



Научная статья

УДК 577.344.3.57.033

Фотодинамическое воздействие с использованием светодиодного красного (660 нм) и лазерного инфракрасного (808 нм) излучения для лечения моделированных абсцессов брюшной полости у лабораторных животных



А. Г. Мусаелян^{1,2}, В. В. Алипов², Е. С. Ефимова¹, У. О. Грицай²,
Т. В. Шарабарина¹, В. В. Тучин¹, Е. С. Тучина¹✉

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского Минздрава РФ, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112

Мусаелян Ара Гагикович, ¹младший научный сотрудник кафедры биохимии и биофизики; ²ассистент кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии, musaelyan.gagik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9849-7304>

Алипов Владимир Владимирович, доктор медицинских наук, академик РАЕ, профессор кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии, vladimiralipov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1859-0825>

Ефимова Екатерина Сергеевна, студент биологического факультета, kkkatyefimova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2422-3678>

Грицай Ульяна Олеговна, студент Клинического института детского здоровья, ulanagricaj3@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-9932-7602>

Шарабарина Татьяна Валерьевна, инженер кафедры биохимии и биофизики, tanuha290902@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2422-3678>

Тучин Валерий Викторович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, профессор кафедры оптики и биофотоники, tuchinvv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7479-2694>

Тучина Елена Святославна, кандидат биологических наук, доцент кафедры биохимии и биофизики, kliany@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4498-2846>

Аннотация. Проведено исследование эффективности антимикробной фотодинамической терапии (АФДТ) при лечении моделированных гнойных абсцессов брюшной полости у лабораторных животных. В ходе эксперимента тестировали две схемы «излучение + фотосенсибилизатор»: первая – с использованием светодиодного красного (660 нм) излучения и метиленового синего, вторая – с использованием лазерного инфракрасного (808 нм) излучения и индоцианинового зеленого. Проведенные на первом этапе исследования *in vitro* позволили определить оптимальное время проведения АФДТ (не менее 15 мин), тип растворителя для каждого из фотосенсибилизаторов (0,24% раствор интралипида для метиленового синего и 0,44% раствор альбумина для индоцианинового зеленого). Установлено, что 15-минутные сеансы АФДТ на протяжении 15 дней приводят к уничтожению микроорганизмов в полости абсцесса, облитерации полости, нормализации физиологических и биохимических показателей крови. Для сравнения двух схем АФДТ были использованы коэффициенты эффективности, анализ значений которых показал, что лазерное инфракрасное (808 нм) излучение в сочетании с индоцианином зеленым, растворенным в 0,44% альбумине, оказывает более выраженный (в среднем на 5–6%) терапевтический эффект. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования клинической практики лечения внутрибрюшинных абсцессов бактериальной этиологии.

Ключевые слова: антибактериальная фотодинамическая терапия, красное светодиодное излучение, 660 нм, лазерное инфракрасное излучение, 808 нм, метиленовый синий, индоцианиновый зеленый, гнойный абсцесс

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам ветеринарного госпиталя Вавиловского университета и лично директору, доктору ветеринарных наук А. С. Рыхлову, сотрудникам вивария СГМУ им. В. И. Разумовского и лично заведующей виварием Н. А. Шушуновой, сотрудникам кафедры оптики и биофотоники, а также сотрудникам кафедры биохимии и биофизики СГУ им. Н. Г. Чернышевского за содействие при проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-24-00370 от 28.12.2024 г.).



Для цитирования: Мусаелян А. Г., Алипов В. В., Ефимова Е. С., Грицай У. О., Шарабарина Т. В., Тучин В. В., Тучина Е. С. Фотодинамическое воздействие с использованием светодиодного красного (660 нм) и лазерного инфракрасного (808 нм) излучения для лечения моделированных абсцессов брюшной полости у лабораторных животных // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 63–75. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-63-75>, EDN: MVUWJI

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Photodynamic treatment using led red (660 nm) and laser infrared (808 nm) radiation for the treatment of simulated abdominal abscesses in laboratory animals

A. G. Musaelyan^{1,2}, V. V. Alipov², E. S. Efimova¹, U. O. Gritsai², T. V. Sharabarina¹, V. V. Tuchin¹, E. S. Tuchina¹✉

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, 112 Bolshaya Kazachiya St., Saratov 410012, Russia

Ara G. Musaelyan, musaelyan.gagik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9849-7304>

Vladimir V. Alipov, vladimiralipov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1859-0825>

Ekaterina S. Efimova, kkkatyefimova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2422-3678>

Ulyana O. Gritsai, ulanagricaj3@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-9932-7602>

Tatiana V. Sharabarina, tanuha290902@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2422-3678>

Valery V. Tuchin, tuchinv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7479-2694>

Elena S. Tuchina, kliany@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4498-2846>

Abstract. This study examined the effectiveness of antimicrobial photodynamic therapy (APDT) in the treatment of simulated purulent abdominal abscesses in laboratory animals. Two "radiation + photosensitizer" regimens were tested: 1) using red LED (660 nm) radiation and methylene blue, 2) using laser infrared (808 nm) radiation and indocyanine green. *In vitro* studies conducted in the first phase determined the optimal APDT duration (at least 15 minutes) and the solvent type for each photosensitizer (0.24% Intralipid solution for methylene blue and 0.44% albumin solution for indocyanine green). It was found that 15-minute APDT sessions over 15 days resulted in the destruction of microorganisms in the abscess cavity, obliteration of the cavity, and normalization of physiological and biochemical blood parameters. To compare the two regimens, efficacy coefficients were used. Analysis of these values revealed that laser infrared (808 nm) radiation combined with indocyanine green dissolved in 0.44% albumin produced a more pronounced therapeutic effect (on average, 5–6%). These results can be used to improve clinical practice in the treatment of bacterial intraperitoneal abscesses.

Keywords: antibacterial photodynamic therapy, red LED radiation, 660 nm, laser infrared radiation, 808 nm, methylene blue, indocyanine green, purulent abscess

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the staff of the Vavilov University Veterinary Hospital, including its director Doctor of Veterinary Sciences Andrey S. Rykhlov; the staff of the vivarium at the Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, including its head Natalya A. Shushunova; the staff of the Department of Optics and Biophotonics, and the staff of the Department of Biochemistry and Biophysics at Saratov State University for their assistance with the experiments.

The research has been carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 25-24-00370, 28.12.2024).

For citation: Musaelyan A. G., Alipov V. V., Efimova E. S., Gritsai U. O., Sharabarina T. V., Tuchin V. V., Tuchina E. S. Photodynamic treatment using led red (660 nm) and laser infrared (808 nm) radiation for the treatment of simulated abdominal abscesses in laboratory animals. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 63–75 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-63-75>, EDN: MVUWJI

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

В хирургической практике, как в медицине, так и в ветеринарии, актуальной проблемой по-прежнему является оперативное лечение гнойных абсцессов мягких тканей, в частности – абсцессов брюшной полости [1–3]. При традиционном лечении с применением чрескожного дренирования и антибиотикотерапии эффективность зависит от локализации, размера и структуры абсцесса, степени чувствительности

микроорганизма-возбудителя к антибиотическим препаратам. При этом любое оперативное вмешательство несет риск развития вторичных инфекций, дополнительной травматизации тканей, образования грубых рубцов [3–5].

Антимикробная фотодинамическая терапия (АФДТ) является одним из перспективных малоинвазивных методов для лечения внутрибрюшинных абсцессов бактериальной этиологии [5–8]. АФДТ основывается на действии трех компонентов – оптического излучения



с определенной длиной волны, фотосенсибилизатора (ФС) и молекулярного кислорода в микрокапиллярах и тканях. Образование активных форм кислорода в ходе воздействия вызывает необратимое повреждение жизненно важных структур бактериальной клетки – мембран, ферментов, нуклеиновых кислот, чем провоцирует ее гибель [6–8]. Благодаря этому клетки микроорганизмов не способны приобрести резистентности к АФДТ даже в течение 5–10 сеансов терапии.

Применение оптического излучения красного (630–660 нм) и инфракрасного (780–810 нм) диапазонов наиболее оправдано при АФДТ абсцессов брюшной полости, поскольку именно эти длины волн обладают достаточной проникающей способностью, позволяющей активировать молекулы ФС в глубине биологических тканей. Кроме того, излучение данных длин волн обладает физиотерапевтическим и иммуностимулирующим действием, что способствует более быстрой и безболезненной регенерации поврежденных тканей [9, 10]. Хорошо зарекомендовавшими себя фотосенсибилизаторами для данных длин волн являются метиленовый синий и индоцианиновый зеленый, которые широко применяют как в противоопухолевой, так и в антимикробной фототерапии [5, 7, 10].

Таким образом, целью настоящего исследования стал комплексный анализ изменений, происходящих в организме лабораторных животных с моделированным гнойным абсцессом, при проведении АФДТ с использованием светодиодного красного (660 нм) и лазерного инфракрасного (808 нм) излучения в сочетании с фотосенсибилизаторами.

Материалы и методы

Бактериальная культура

Объектом исследования служил стандартный штамм *Staphylococcus aureus* 209 P (ГИСК им. Л. А. Тарасевича, Москва, Россия). Микроорганизмы выращивали при температуре 37°C на универсальных питательных средах. Для проведения экспериментов по чувствительности к излучению использовали суспензии *S. aureus* 209 P после 8 ч (экспоненциальная фаза) и 14 ч (стационарная фаза) культивирования.

Источник и параметры оптического излучения

В качестве источников излучения использовали: 1) светодиод с максимумом испускания на

длине волны 660 нм и интегральной плотностью мощности 30 мВт/см², 2) лазер с максимумом испускания на длине волны 808 нм и интегральной плотностью мощности 100 мВт/см².

Во всех экспериментах режим излучения был непрерывным. Время облучения в экспериментах *in vitro* составляло 5, 10, 15 мин, в экспериментах *in vivo* – 15 мин.

Фотосенсибилизаторы и растворители

В качестве фотосенсибилизаторов использовали: 1) метиленовый синий (МВ) с максимумом поглощения 660 нм в концентрациях 0,0001, 0,001, 0,01 и 0,1%; 2) индоцианиновый зеленый (IG) с максимумом поглощения 787 нм в концентрациях 0,01, 0,05, 0,1, 0,5%.

Тестировали эффективность работы ФС в таких растворителях, как: физраствор (SS), смесь глицерина, этанола и воды (в соотношении 25:25:50, GEt), суспензия 0,24% интралипида в физрастворе (IL), 0,44% альбумин в физрастворе (BSA).

Постановка экспериментов *in vitro*

Бактериальную взвесь готовили в стерильном физиологическом растворе методом последовательных десятикратных разведений. Контрольные образцы взвеси инкубировали в течение 15 мин без доступа света. Для создания асептических условий в ходе эксперимента использовали стерильный полистирольный планшет. Бактериальную взвесь из конечного разведения вносили в ячейки планшета в объеме 0,1 мл.

Источник излучения располагали над ячейками планшета. По истечении времени воздействия источник излучения отключали, взвеси бактерий из данных ячеек переносили в соответствующие ячейки плоскодонного планшета с 0,5% пептоном.

При тестировании фотосенсибилизаторов и растворителей для них бактериальные культуры помещали в растворы ФС, инкубировали в течение 30 мин. Затем отмывали бактериальные клетки центрифугированием, ресуспендировали в чистом физиологическом растворе, взвеси бактерий переносили в соответствующие ячейки плоскодонного планшета с 0,5% пептоном.

Учет результатов осуществляли путем измерения оптической плотности бактериальных суспензий на планшетном фотометре iMark (Bio Rad, США) на длине волны 660 нм через 24 ч после инкубации при 37°C. Для контроля чистоты культуры и динамики изменения численности проводили параллельный высеив из



лунок планшета на чашки Петри с ГРМ-агаром и последующим подсчетом числа КОЕ. Численность микроорганизмов выражали либо в виде десятичного логарифма (lgКОЕ/мл), либо в виде отношения к контролю в % (КОЕ, %).

Постановка экспериментов *in vivo*

Исследования проводились на 32 крысах-самках породы «стандарт» массой 200 ± 50 г с моделированными абсцессами. Лабораторные животные содержались в регламентированных условиях вивария при соблюдении всех правил содержания лабораторных животных. На проведение экспериментов получено разрешение локального этического комитета (ЛЭК) Саратовского государственного медицинского университета им. В. И. Разумовского (протокол ЛЭК № 2 от 16.09.2022). Уход за животными и проведение экспериментов осуществлялись согласно основным морально-этическим принципам проведения биомедицинских экспериментов на животных, сформулированных в следующих документах: «Правила лабораторной практики в РФ» (Good Laboratory Practice), утвержденные приказом Министерства здравоохранения и социального развития от 23.08.2010 №708н, и «Международные рекомендации по проведению биомедицинских исследований с использованием животных», принятые Международным советом медицинских научных обществ (CIOMS) в 1985 г.

Моделирование гнойного абсцесса (ГА) проводили в соответствии с методикой, разработанной ранее [11]. Транскутанно вводили модифицированный катетер Фоллея, укороченный до 3 см, с баллоном из силиконовой резины на дистальном конце. После заполнения баллона 2 мл физиологического раствора (NaCl 0,9%), производили перевязку катетера проксимальнее баллона и фиксацию дистальной части его при помощи кожной дупликации.

Для гарантированного формирования острого ГА наносили культуру возбудителя патологического процесса *S. aureus* 209 P непосредственно на поверхность дистального отдела катетера. На 5-е сутки опорожняли баллон, удаляли катетер. Кровь для общего и биохимического анализа брали из хвостовой вены.

Проводили две независимые серии экспериментов. В первой серии опытов использовали светодиодное красное излучение и метиленовый синий (МС) в растворе интралипида, во второй серии опытов – лазерное инфракрасное излучение и индоцианинового зеленого (ИЗ) в 0,44% растворе альбумина.

Как в первой серии, так и во второй животных делили на 4 группы (по 4 крысы в каждой), из которых первая группа была контрольной, остальные опытными.

В контрольной (1-я группа) группе лечения не производилось; во второй (2-я группа) группе полость ГА обрабатывали раствором фотосенсибилизатора 1 раз в 3 дня на протяжении 10 дней; в третьей (3-я группа) группе осуществляли воздействие с помощью излучения в течение 15 мин на протяжении 10 дней; в четвертой (4-я группа) группе проводили обработку полости ГА раствором фотосенсибилизатора и излучением в течение 15 мин на протяжении 10 дней.

Общий и биохимический анализы крови проводили за день до формирования ГА (1-й день), в день начала фотодинамического воздействия (5-й день), на 10-й и 15-й день. УЗИ-контроль объема полости ГА осуществляли в те же дни эксперимента. В те же дни проводили высеивание 0,1 мл содержимого полости гнойного абсцесса на питательную среду (ГРМ-агар) для определения концентрации бактериальных клеток в экссудате.

Схема эксперимента (рис. 1) включала основные этапы работы: 1) получение контрольных данных общего и биохимического анали-

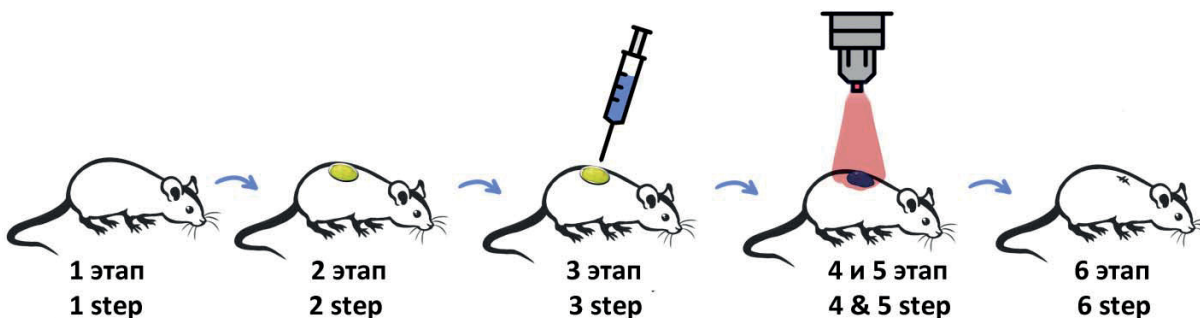


Рис. 1. Схема проведения эксперимента
Fig. 1. Experimental scheme



зов крови, формирование ГА хирургическим методом; 2) на 5-й день при сформированном ГА – получение данных общего и биохимического анализов крови, уровня микробной обсемененности, данных УЗИ полости ГА; 3) на 5-й день – введение фотосенсибилизатора; 4) на 5-й день – облучение места над полостью ГА светодиодным излучением; 5) повторные сеансы проведения ФДТ; 6) на 15-й день завершение ФДТ и оценка результатов.

При работе со светодиодным излучением руководствовались ГОСТом 31581-2012 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий» и Санитарными нормами и правилами устройства и эксплуатации лазеров № 5804-91.

Расчет коэффициентов эффективности АФДТ

Для сравнения эффективности двух комбинаций для АФДТ использовали оригинальный способ [12]. Для этого определяли ряд параметров крови: общее число лейкоцитов и тромбоцитов, концентрации креатинина и гемоглобина, среднее значение нормы общего числа лейкоцитов, тромбоцитов, содержание креатинина и гемоглобина. Коэффициенты K_1 и K_2 определяют из следующих соотношений параметров, полученных в эксперименте:

$$K_1 = \frac{L_{ex}/L_n}{T_{ex}/T_n}, \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{C_{ex}/C_n}{H_{ex}/H_n}, \quad (2)$$

где L_{ex} – значение общего числа лейкоцитов; L_n – среднее значение нормы общего числа лейкоцитов; T_{ex} – значение общего числа тромбоцитов; T_n – среднее значение нормы общего числа тромбоцитов; C_{ex} – значение содержания креатинина в крови; C_n – среднее значение нормы содержания креатинина; H_{ex} – значение содержания гемоглобина в крови; H_n – среднее значение нормы содержания гемоглобина.

На основании этих данных при значении коэффициентов K_1 и K_2 более единицы делали вывод об отсутствии эффективности АФДТ, при значении коэффициентов K_1 и K_2 менее или равно единице – о наличии эффективности АФДТ.

Дополнительно рассчитывали значение скорости редукции абсцесса (3) из соотношения:

$$v_r = V_a / \text{сут}, \quad (3)$$

где V_a – объем полости гнойного абсцесса, см³; v_r – скорость редукции полости гнойного абсцесса, см³/сут; сут – время наблюдения.

Статистическая обработка данных

Измерения для каждого экспериментального образца проводились в пятикратной повторности, данные обрабатывали с помощью пакета программ Statistica base (StatSoft, США). Достоверность отличий определяли с использованием критерия Стьюдента. Выборки считались достоверно отличными при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Определение оптимальных параметров фотодинамического воздействия in vitro

Воздействие красного светодиодного излучения с длиной волны 660 нм на бактериальные клетки, находящиеся в фазе экспоненциального роста, в течение 5 мин приводило к снижению их численности на 19%, в течение 15 мин – на 23%, в течение 30 мин – на 36% (рис. 2, а). Наличие достоверных различий по отношению к контролю (0 мин) – при уровне значимости $p < 0,05$. При воздействии на культуру, находящуюся в стационарной фазе, отмечено общее повышение устойчивости клеток к излучению на 10–15%.

Обработка бактериальных клеток в фазе экспоненциального роста инфракрасным лазерным излучением с длиной волны 808 нм вызывала снижение численности на 25% после 5 мин воздействия, на 27% – после 15 мин и на 37% – после 30 мин (см. рис. 2, б). В данном случае сохранялась тенденция большей (на 7–12%) устойчивости клеток, перешедших в стационарную фазу роста, к оказываемому воздействию.

Показано, что концентрация метиленового синего 0,0001% не вызывает снижения численности исследуемых микроорганизмов. Заметное сокращение выживаемости (на 16%) отмечено при использовании концентрации МС 0,01%. Выраженное сокращение численности регистрировалось при использовании концентраций 0,05 и 0,25% – на 35–40%. Для дальнейшей работы была выбрана концентрация 0,0001%, не вызывавшая гибели бактериальных клеток, чтобы исключить токсическое действие ФС на клетки нормальной микрофлоры и клетки тканей макроорганизма в эксперименте *in vivo*.

Анализ чувствительности клеток к инкубации в растворе индоцианинового зеленого показал, что *S. aureus* 209 Р устойчивы к действию данного красителя как в концентрации

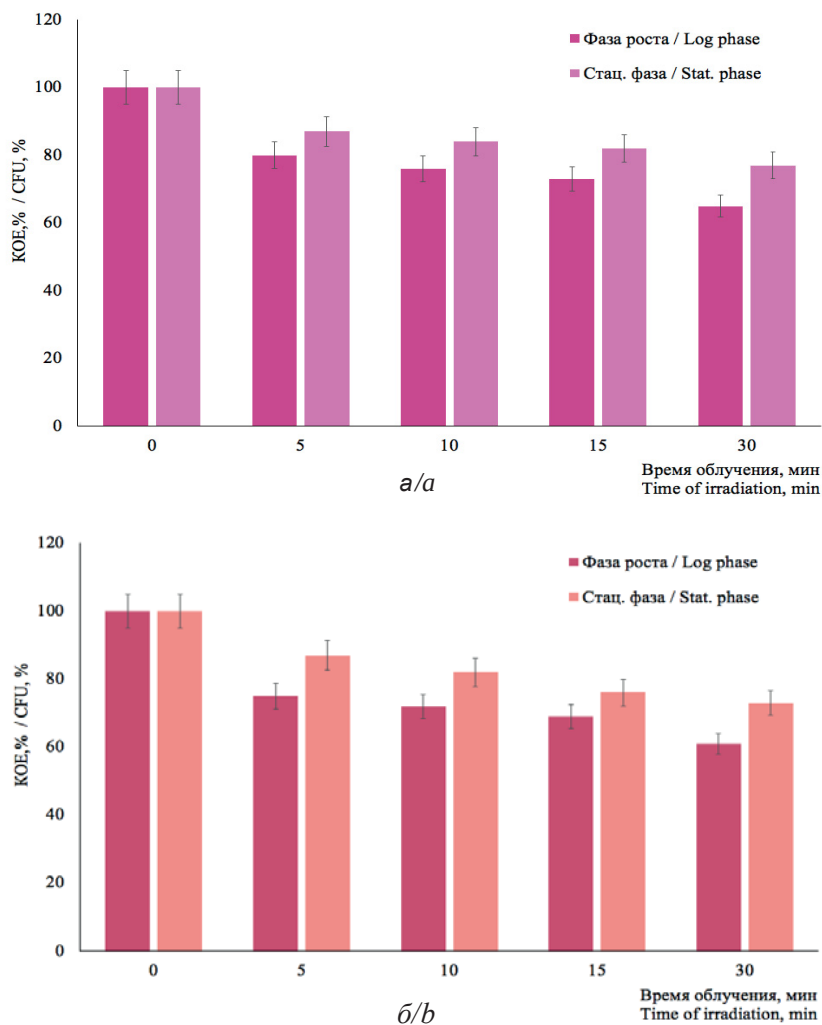


Рис. 2. Изменение численности *S. aureus* 209 P при воздействии излучения: *a* – светодиодного красного (660 нм), *б* – лазерного инфракрасного (808 нм)
Fig. 2. Change in the number of *S. aureus* 209 P during exposure of radiation: *a* – LED red (660 nm), *b* – laser infrared (808 nm)

0,05%, так и к превышающей ее в 10 раз: снижение числа КОЕ отмечено на 10–15%. Таким образом, для дальнейших исследований была выбрана концентрация ИЗ равная 0,1%.

Представляло интерес оценить изменение численности бактерий при использовании различных растворителей для ФС в сочетании с действием излучения.

Снижение численности *S. aureus* 209 P при использовании комбинации МС+ФР, а также комбинации МС и альбумин составило 55–65% после 5 мин действия светодиодного красного (660 нм) излучения и не изменялось до 15 мин, данная комбинация обеспечивала уменьшение числа КОЕ на 68–75% после 30 мин воздействия. Глицерин-спиртовая смесь, как показано в эксперименте, обеспе-

чивала выраженное усиление фотодинамического действия МС после 15 мин облучения, отмечено снижение численности на 63%, к 30-минутной экспозиции снижение численности составило 83%. Использование интралипида вызывало видимое усиление фотодинамического эффекта МС после 15 мин облучения (сокращение КОЕ на 75%) и к 30 мин облучения обеспечивало гибель 88% бактериальной популяции (рис. 3, *a*). Наличие достоверных различий по отношению к контролю (0 мин) при уровне значимости $p < 0,05$.

Подавляющее действие лазерного инфракрасного (808 нм) излучения на клетки *S. aureus* 209 P при использовании в качестве ФС индоцианинового зеленого существенно возрастало. ИЗ, растворенный в физиологи-

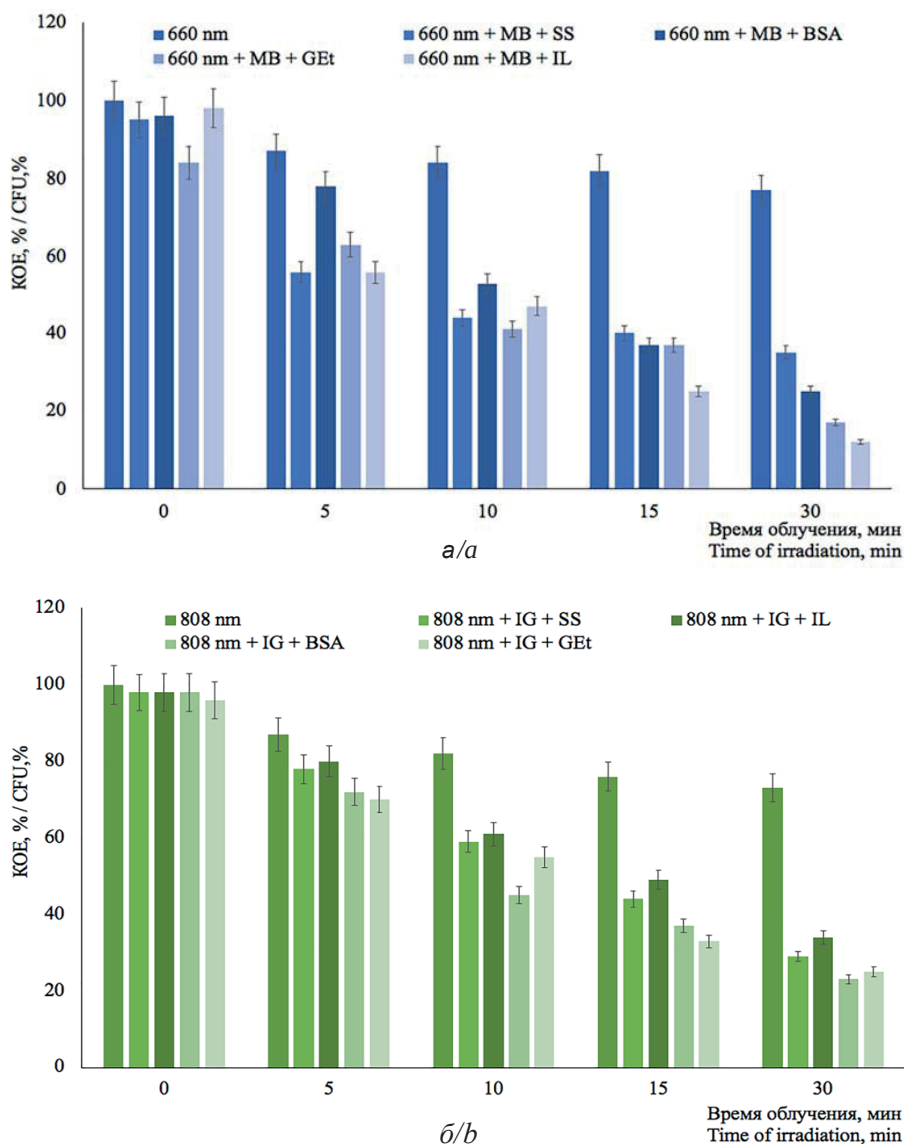


Рис. 3. Изменение численности (КОЕ, %) *S. aureus* 209 P в ходе фотодинамического воздействия при использовании различных растворителей для фотосенсибилизаторов: а – при длине волны 660 нм в присутствии метиленового синего; б – при длине волны 808 нм в присутствии индоцианинового зеленого

Fig. 3. Change in the number (CFU, %) of *S. aureus* 209 P during photodynamic exposure using different solvents for photosensitizers: а – at a wavelength of 660 nm in the presence of methylene blue; б – at a wavelength of 808 nm in the presence of indocyanine green

ческом растворе, приводил к снижению численности на 54% после 15 мин облучения и на 71% – после 30 мин воздействия. Использование в качестве растворителей глицерин-спиртовой смеси или альбумина усиливало фотодинамический эффект излучения, сокращение числа КОЕ после 15 мин воздействия наблюдалось на 63–67%, после 30 мин – на 75–77%. Использование интралипида не вызывало усиления фотодинамического эффекта по сравнению с физиологическим раствором (см. рис. 3, б).

При анализе результатов в качестве растворителя для метиленового синего – суспензия 0,24% интралипида в физрастворе, для индоцианинового зеленого – 0,44% альбумин в физрастворе.

Использование светодиодного красного (660 нм) излучения и метиленового синего для лечения гнойных абсцессов in vivo

Установлено, что использование красного светодиодного излучения для чрескожной обработки области абсцесса снижает обсеменен-



ность инфильтрата на 1 IgKOE/мл после первого сеанса облучения, на 1,5 IgKOE/мл – после 5-го сеанса, на 2,8 IgKOE/мл – после 10-го сеанса и на 4,7 IgKOE/мл – после 15-го сеанса (табл. 1). Использование излучения в сочетании с метиленовым синим ускоряет снижение бактериальной нагрузки уже после 5-го сеанса воздействия (на 3,7 IgKOE/мл). Лучшие по-

казатели – скорость снижения бактериальной нагрузки, редукция абсцесса, восстановление нормальных значений показателей крови – отмечены к 10-му дню эксперимента для 4-й группы животных. У групп 1 и 4 все показатели достигали нормы к 15-му дню, в то время как для группы 2 восстановление произошло на 17-е сутки, а для группы 3 – на 20-е.

Таблица 1 / Table 1

Изменение численности *S. aureus* 209 P в области гнойного абсцесса под действием светодиодного красного (660 нм) излучения и метиленового синего
Change in the number of *S. aureus* 209 P in the area of a purulent abscess under the action of LED red (660 nm) radiation and methylene blue

Сутки / Day	IgKOE/мл / IgCFU/ml			
	1-я группа / 1 group	2-я группа / 2 group	3-я группа / 3 group	4-я группа / 4 group
1-й день (формирование абсцесса) / Day 1 (abscess formation)	7,0±0,35	7,0±0,35	7,0±0,35	7,0±0,35
5-й день (начало лечения) / Day 5 (beginning of treatment)	6,5±0,32	6,3±0,31	6,0±0,30*	5,6±0,28*
10-й день (5-й день лечения) / Day 10 (5th day of treatment)	5,7±0,29*	6,1±0,31*	5,5±0,27*	3,3±0,16*
15-й день (10-й день лечения) / Day 15 (10th day of treatment)	3,4±0,17*	5,0±0,25*	4,2±0,21*	1,1±0,05*
20-й день (завершение лечения) / Day 20 (completion of treatment)	2,8±0,14*	3,2±0,16*	2,3±0,11*	0,9±0,03*

Примечание. *Наличие достоверных различий по отношению к контролю (1-й день) при уровне значимости $p < 0,05$.

Note. *Presence of significant differences in relation to the control (1 day) at a significance level of $p < 0,05$.

При анализе таких параметров, как лейкоцитарная формула, СОЭ и содержание в крови С-реактивного белка было показано, что используемый метод обеспечивал снижение уровня воспалительного процесса. Показано, что на 5-й день эксперимента изменяется процентное соотношение клеток крови по сравнению с физиологической нормой. Существенно увеличивается число лейкоцитов, число тромбоцитов, напротив, снижается (табл. 2).

Ежедневное облучение способствовало восстановлению средней концентрации гемоглобина в эритроците, а также восстановлению нарушения функциональной активности тромбоцитов. Кроме того, было подтверждено, что применение АФДТ с использованием красного (660 нм) малой мощности эффективно корректирует длительные нарушения в процессе гемостаза, предупреждая нарушения в системе свертывания крови и фибринолизе.

УЗИ на 5-й день после формирования гнойного абсцесса у всех животных лоцировалось анэхогенное образование в брюшной полости, отмечено значительное повышение эхогенности окружающих тканей. На 15-й день эксперимента, после десятидневного проведения антимикробного фотодинамического воздействия с использованием красного (660 нм) излучения и 0,0001% метиленового синего в 0,24% растворе интралипида имеет место следующая картина: в области абсцесса лоцируются гипозоногенные ткани, умеренно однородные, полостей и образований не обнаружено, подкожно-жировая клетчатка повышенной эхогенности.

Использование лазерного инфракрасного (808 нм) излучения и индоцинина для лечения гнойных абсцессов in vivo

При высевах содержимого гнойного абсцесса на питательную среду установлено, что в ходе АФДТ с использованием инфракрасного



Таблица 2 / Table 2

Динамика некоторых показателей крови лабораторных крыс в ходе АФДТ с использованием светодиодного красного (660 нм) излучения и метиленового синего
Dynamics of some blood parameters in laboratory rats during APDT using red LED (660 nm) radiation and methylene blue

День исследования / Day of experiment	1-й день / Day 1				5-й день / Day 5				15-й день / Day 15				Норма / Normal
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Группа животных / Group of animals													
Лейкоциты $\times 10^9$ кл/л / Leukocytes $\times 10^9$ cells/l	8,6	9,1	8,7	9	26,8	28,5	28,2	26	15,6	9,7	9,5	8,4	12,5
Эритроциты $\times 10^{12}$ кл/л / RBC, $\times 10^{12}$ cells/l	9,1	8,8	8,5	8,2	7	7,2	7,4	7,4	7,2	7,6	8,6	7,1	8,4
Гематокрит, % / Hematocrit, %	45,5	42,9	46,1	43,9	38,1	36,8	37,2	38,1	38,2	37,8	39,6	37,6	43
Тромбоциты, $\times 10^8$ кл/л / Plates, $\times 10^8$ cells/l	869	884	902	875	761	731	683	598	819	919	900	923	1000
Гемоглобин, г/л / Hemoglobin, g/l	171	173	157	160	138	131	147	149	145	181	179	188	155
Креатинин, мкмоль/л Creatinine, $\mu\text{mol/l}$	69	72	78	82	117	110	122	111	106	72	75	74	86
С-реактивный белок, нг/мл / C-react. prot. ng/ml	409	429	419	429	481	488	471	481	412	410	432	410	427
СОЭ, мм/ч / ESR, mm/h	2	3	2	3	5	5	4	6	2	2	2	3	3

излучения и индоцианинового зеленого происходит сокращение численности бактерий. В группах 1 и 2 концентрация микробных клеток на 20-й день эксперимента составляла 2,7–2,8 lgКОЕ/мл. Сокращение численности стафилококков в образцах, полученных от контрольной группы, вероятнее всего, связано с действием иммунной системы и общим физиологическим процессом заживления. При этом очевидны различия в обсемененности области ГА у крыс, подвергавшихся АФДТ. Так, с 15-го по 20-й день происходит полное уничтожение бактерий в группе 4, что говорит об успешном проведении лечения (табл. 3).

При анализе таких параметров, как лейкоцитарная формула, СОЭ и содержание в крови С-реактивного белка было показано, что используемый метод обеспечивал снижение уровня воспалительного процесса.

Показано, что на 5-й день эксперимента изменяется процентное соотношение клеток крови по сравнению с физиологической нормой. Существенно увеличивается число лейкоцитов, число тромбоцитов и эритроцитов, напротив,

снижается. Ежедневное облучение способствовало восстановлению средней концентрации креатинина, а также восстановлению нарушения функциональной активности тромбоцитов (табл. 4).

При формировании гнойного абсцесса на 5-й день лоцируется кистоподобная анаэробная округлая структура с тонкими стенками, ровными, четкими контурами, однородным жидкостным содержимым. В момент завершения эксперимента лоцируется кистоподобная анаэробная каплевидная структура с тонкими стенками, ровными, четкими контурами, однородным жидкостным содержимым, имеются признаки облитерирующейся анаэробной полости.

Сравнительная оценка эффективности двух комбинаций «излучение + фотосенсибилизатор» для фотодинамической терапии гнойных абсцессов

Показатель K_1 находится в пределах 1 у здоровых и выздоравливающих животных. При сформированном гнойном абсцессе значения K_1 возрастали в 2–3 раза (табл. 5). В ходе



Таблица 3 / Table 3

Изменение численности *S. aureus* 209 P в области гнойного абсцесса под действием лазерного инфракрасного (808 нм) излучения и индоцианина зеленого
Changes in the number of *S. aureus* 209 P in the area of a purulent abscess under the action of laser infrared (808 nm) radiation and indocyanine green

Сутки / Day	lgКОЕ/мл / lgCFU/ml			
	1-я группа / 1 group	2-я группа / 2 group	3-я группа / 3 group	4-я группа / 4 group
1-й день (формирование абсцесса) / Day 1(abscess formation)	7,0±0,35	7,0±0,35	7,0±0,35	7,0±0,35
5-й день (начало лечения) / Day 5 (beginning of treatment)	6,4±0,32	5,6±0,25*	5,6±0,26*	4,9±0,19*
10-й день (5-й день лечения) / Day 10 (5th day of treatment)	5,6±0,28*	5,4±0,24*	5,1±0,24*	2,9±0,11*
15-й день (10-й день лечения) / Day 15 (10th day of treatment)	3,3±0,17*	4,5±0,20*	3,9±0,18*	1,0±0,04*
20-й день (завершение лечения) / Day 20 (completion of treatment)	2,7±0,14*	2,8±0,13*	2,1±0,10*	0,3±0,02*

Примечание. *Наличие достоверных различий по отношению к контролю (1-й день) при уровне значимости $p < 0,05$.

Note. *Presence of significant differences in relation to the control (1 day) at a significance level of $p < 0,05$.

Таблица 4 / Table 4

Динамика некоторых показателей крови лабораторных крыс в ходе АФДТ с использованием лазерного инфракрасного (808 нм) излучения и индоцианинового зеленого
Dynamics of some blood parameters in laboratory rats during APDT using laser infrared (808 nm) radiation and indocyanine green

День исследования / Day of experiment	1-й день / Day 1				5-й день / Day 5				15-й день / Day 15				Норма / Normal
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Группа животных / Group of animals	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Лейкоциты $\times 10^9$ кл/л / Leukocytes $\times 10^9$ cells/l	10,1	10,5	10,3	9,9	26,1	28,8	29,3	25,6	21,5	13,6	9,3	8,5	12,5
Эритроциты $\times 10^{12}$ кл/л / RBC, $\times 10^{12}$ cells/l	8,9	8,6	8,2	8,4	7,1	7,3	6,9	7,2	7,8	8,2	8,1	8,5	8,4
Гематокрит, % / Hematocrit, %	8,9	42,3	45,5	43,3	37,6	36,3	36,7	37,6	37,7	38,5	39,6	42,3	43
Тромбоциты, $\times 10^8$ кл/л / Plates, $\times 10^8$ cells/l	999	984	1010	1001	932	905	874	789	949	920	1001	995	1000
Гемоглобин, г/л / Hemoglobin, g/l	157	152	155	161	123	112	117	128	139	150	168	173	155
Креатинин, мкмоль/л / Creatinine, μ mol/l	83	80	76	81	109	97	113	118	95	97	89	86	86
С-реактивный белок, нг/мл / C-react. prot. ng/ml	366	384	375	384	461	459	482	475	369	376	387	343	427
СОЭ, мм/ч / ESR, mm/h	3	3	3	3	6	5	5	5	4	3	2	3	3

Изменение коэффициентов эффективности АФДТ в зависимости от длительности эксперимента
Change in the efficiency coefficients of APDT depending on the duration of the experiment

День опыта / Day of action		1-й день / Day 1				5-й день / Day 5				15-й день / Day 15			
Группа животных / Group of animals		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
660 nm	K_1	0,79	0,82	0,77	0,82	2,82	3,12	3,32	3,49	1,52	0,84	0,86	0,72
	K_2	0,90	0,82	0,84	0,78	1,50	1,79	1,26	1,63	1,29	0,72	0,70	0,69
808 nm	K_1	0,80	0,84	0,81	0,79	2,25	2,57	2,68	2,60	1,83	1,18	0,72	0,68
	K_2	0,95	0,95	0,88	0,91	1,60	1,56	1,74	1,66	1,23	1,17	0,95	0,90

лечения происходило изменение концентрации основных биохимических показателей крови. Отмечено увеличение СОЭ в 2 раза, что свидетельствовало об активном протекании воспалительного процесса у больных животных. Показатель K_2 у здоровых и выздоравливающих животных не превышал 1, при сформированном гнойном абсцессе его значение возрастало в 1,5 раза (см. табл. 5).

У животных в контрольных группах снижение коэффициентов происходило крайне медленно: к 15-му дню эксперимента значения превышали 1, нормализация биохимических показателей крови и значений коэффициентов отмечены лишь к 20-му дню.

Скорость сокращения объема v_r полости гнойного абсцесса для контрольных групп животных составляла 0,06–0,09 см³/сут, для групп 3 – не более 0,04 см³/сут, для групп 4, получавших АФДТ, 0,1–0,12 см³/сут.

Исходя из значений коэффициентов K_1 и K_2 и скорости редукции объемов полости гнойного абсцесса можно судить о том, что необходимый терапевтический эффект достигается к 10-м суткам (15-й день опыта) проведения АФДТ. Из табл. 3 видно, что динамика изменения значений коэффициентов схожа для двух используемых схем фотодинамического воздействия. В обоих случаях к 10-му дню обработки происходило снижение K_1 до 0,68–0,86 и K_2 до 0,69–0,90 для 4-й экспериментальной группы.

Однако, судя по значениям коэффициентов, метод антимикробной фотодинамической терапии с использованием лазерного инфракрасного (808 нм) излучения показывает лучший терапевтический эффект, регистрируемый как по убыли численности микроорганизмов в

области абсцесса, так и по УЗИ-исследованиям и по данным биохимического анализа крови экспериментальных животных.

Заключение

Существенным ограничением для эффективного использования АФДТ при лечении гнойно-воспалительных заболеваний мягких тканей является проникающая способность излучения [13–15]. Использование света красного и инфракрасного диапазонов открывает возможности для более качественной доставки световой энергии к целевым структурам, расположенным на значительной глубине, что особенно актуально при лечении глубоких абсцессов и гнойных образований.

Проведенные исследования с двумя комбинациями «излучение + фотосенсибилизатор» показали высокую эффективность обеих сочетаний. Применение маломощного светодиодного красного (660 нм) излучения в сочетании с метиленовым синим в ультранизкой концентрации (0,0001%) обеспечивало после 10 сеансов снижение микробной обсемененности полости моделированного абсцесса, способствовало редукции объема абсцесса на 60%, нормализации биохимических показателей крови.

У комбинации «инфракрасное излучение + индоцианиновый зеленый» при доказанной аналогичной эффективности есть пара существенных преимуществ. Инфракрасное излучение обладает большей проникающей способностью в биологические ткани, поскольку минимально поглощается водой и гемоглобином крови, а также известно иммуномодулирующими свойствами [12]. Индоцианиновый зеленый является хорошо зарекомендовавшим себя фотосенси-



билизатором при противоопухолевой фотодинамической терапии и часто используется в модификациях с наночастицами различной формы и состава [2, 5, 7, 13–15].

В ходе данного исследования определены оптимальные параметры проведения АФДТ: продолжительность сеанса не менее 15 мин, число сеансов – не менее 10. Рекомендовано использовать для растворения фотосенсибилизаторов не чистый физиологический раствор, а добавлять биологически активные вещества, повышающие фотодинамический эффект (интралипид – в случае метиленового синего и альбумин – в случае индоцианинового зеленого).

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует высокую терапевтическую эффективность фотодинамической терапии в лечении экспериментальных абсцессов и открывает новые перспективы в разработке малотравматичных методов лечения гнойных осложнений.

Список литературы

1. Мусаелян А. Г., Алипов В. В., Тучина Е. С., Гаспарян Б. Т. Фотодинамическая терапия при хирургическом лечении моделированного местного ограниченного перитонита // Оренбургский медицинский вестник. 2025. Т. 13, № S2 (50). С. 232–233.
2. Мусаелян А. Г., Алипов В. В., Тучина Е. С., Рыжков А. С., Алипов А. И., Грицай У. О., Гаджиева Э. Э., Гаспарян Б. Т., Мельников А. М. Способ фотодинамического воздействия при хирургическом лечении местного ограниченного перитонита в эксперименте // Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал). 2025. Т. 9, № 2-2. С. 77–86. <https://doi.org/10.17116/operhirurg2025902277>
3. Файзулина Р. Р., Соболев Ю. А., Нузова О. Б. Абсцессы брюшной полости: современное лечение // Здоровье и образование в XXI веке. 2019. № 7. С. 20–25. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2019-21-7-2Q-25>
4. Haidaris C. G., Foster T. H., Waldman D. L., Mathes E. J., McNamara J., Curran T. Effective photodynamic therapy against microbial populations in human deep tissue abscess aspirates // *Lasers Surg.* 2013. Vol. 45, № 8. P. 509–516. <https://doi.org/10.1002/lsm.22171>
5. Baran T. M., Sharma A. K. Photodynamic therapy of an abdominal abscess at the time of percutaneous drainage // *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2023. Vol. 46. P. 1292–1294. <https://doi.org/10.1007/s00270-023-03504-z>
6. Baran T. M., Hannan N., Christensen L., Longbine E., Foster T. H., Sharma A. K. Methylene blue photodynamic therapy of deep tissue abscesses: Phase 1 clinical trial and optical spectroscopy results // *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy.* 2024. Vol. 46. EN 104150. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2024.104150>
7. Alam S. Antimicrobial photodynamic therapy (APDT), an approach to fightback against antibiotic resistance: A short review // *Stamford Journal of Microbiology.* 2023. Vol. 13. P. 30–37. <https://doi.org/10.3329/sjm.v13i1.70412>
8. Sun Y., Ogawa R., Xiao B. H., Feng Y. X., Wu Y., Chen L. H., Gao X. H., Chen H. D. Antimicrobial photodynamic therapy in skin wound healing: A systematic review of animal studies // *Int. Wound J.* 2017. Vol. 17. P. 285–99. <https://doi.org/10.1111/iwj.13269>
9. Salehpour F., Cassano P., Rouhi N., Hamblin M. R., De Taboada L., Farajdokht F., Mahmoudi J. Penetration profiles of visible and near-infrared lasers and light-emitting diode light through the head tissues in animal and human species: A review of literature // *Photobiomodul. Photomed. Laser Surg.* 2019. Vol. 37. P. 581–595. <https://doi.org/10.1089/photob.2019.4676>
10. Ko Y.-S., Gi E.-J., Lee S., Cho H.-H. Dual red and near-infrared light-emitting diode irradiation ameliorates LPS-induced otitis media in a rat model // *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2023. Vol. 11. EN 1099574. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1099574>
11. Пат. 2601378 C1 RU. Способ моделирования абсцесса мягких тканей / В. В. Алипов, А. И. Урусова, Д. А. Андреев, Н. Х. Кулиев. Заявл. 10.11.2016, № 2015120118/14 от 27.05.2015.
12. Пат. 2819366 C1 RU. Способ оценки эффективности фотодинамической терапии гнойных абсцессов / Е. С. Тучина, М. В. Каневский, В. В. Алипов, А. Г. Мусаелян, М. А. Полиданов, Е. С. Ефимова, У. О. Грицай, Э. К. Гаджиева, М. В. Корченова. Заявл. 08.06.2023, № 2023115100 от 17.05.2024.
13. Chan H., Pavelka M. S. Jr., Baran T. M. Methylene blue photodynamic therapy of bacterial species found in human abscesses: Planktonic, biofilm, and 3D silicone models // *Proc. SPIE.* 2023. Vol. 12358. P. 1235805–25. <https://doi.org/10.1117/12.2648350>
14. Kassab G., Cheburkanov V., Willis J., Moule M.G., Karachi C., Yakovlev V., Cirillo J. D., Bagnato S. V. Safety and delivery efficiency of a photodynamic treatment of the lungs using indocyanine green and extracorporeal near infrared illumination // *J. Biophotonics.* 2020. Vol. 13, № 10. EN 202000176. <https://doi.org/10.1002/jbio.202000176>
15. Tuchin V. V., Genina E. A., Tuchina E. S., Svetlakov A. V., Svenskaya Y. I. Optical clearing of tissues: Issues of antimicrobial phototherapy and drug delivery // *Advanced Drug Delivery Reviews.* 2022. Vol. 180. EN 114037. P. 1–122. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.114037>

References

1. Musaelyan A. G., Alipov V. V., Tuchina E. S., Gasparyan B. T. Photodynamic therapy in surgical treat-



- ment of simulated local limited peritonitis. *Orenburg Medical Bulletin*, 2025, vol. 13, no. S2 (50), pp. 232–233 (in Russian).
2. MUSAELYAN A. G., ALIPOV V. V., TUCHINA E. S., RYKHOV A. S., ALIPOV A. I., GRITSAY U. O., GADZHIIEVA E. E., GASPARYAN B. T., MYLNIKOV A. M. Method of photodynamic action in surgical treatment of local limited peritonitis in experiment. *Russian Journal of Operative Surgery and Clinical Anatomy*, 2025, vol. 9, no. 2-2, pp. 77–86 (in Russian). <https://doi.org/10.17116/oper-hirurg2025902277>
 3. Fayzulina R. R., Sobolev Yu. A., Nuzova O. B. Abscesses of abdominal cavity: Contemporary treatment. *Health and Education in XXI century*, 2019, no. 7, pp. 20–25 (in Russian). <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2019-21-7-2Q-25>
 4. Haidaris C. G., Foster T. H., Waldman D. L., Mathes E. J., McNamara J., Curran T. Effective photodynamic therapy against microbial populations in human deep tissue abscess aspirates. *Lasers Surg.*, 2013, vol. 45, no. 8, pp. 509–516. <https://doi.org/10.1002/lsm.22171>.
 5. Baran T. M., Sharma A. K. Photodynamic therapy of an abdominal abscess at the time of percutaneous drainage. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.*, 2023, vol. 46, pp. 1292–1294. <https://doi.org/10.1007/s00270-023-03504-z>
 6. Baran T. M., Hannan N., Christensen L., Longbine E., Foster T. H., Sharma A. K. Methylene blue photodynamic therapy of deep tissue abscesses: Phase 1 clinical trial and optical spectroscopy results. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2024, vol. 46, EN 104150. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2024.104150>
 7. Alam S. Antimicrobial photodynamic therapy (APDT), an approach to fightback against antibiotic resistance: A short review. *Stamford Journal of Microbiology*, 2023, vol. 13, pp. 30–37. <https://doi.org/10.3329/sjm.v13i1.70412>
 8. Sun Y., Ogawa R., Xiao B. H., Feng Y. X., Wu Y., Chen L. H., Gao X. H., Chen H. D. Antimicrobial photodynamic therapy in skin wound healing: A systematic review of animal studies. *Int. Wound J.*, 2020, vol. 17, pp. 285–299. <https://doi.org/10.1111/iwj.13269>
 9. Salehpour F., Cassano P., Rouhi N., Hamblin M.R., De Taboada L., Farajdokht F., Mahmoudi J. Penetration profiles of visible and near-infrared lasers and light-emitting diode light through the head tissues in animal and human species: A Review of literature. *Photobiomodul. Photomed. Laser Surg.*, 2019, vol. 37, pp. 581–595. <https://doi.org/10.1089/photob.2019.4676>
 10. Ko Y.-S., Gi E.-J., Lee S., Cho H.-H. Dual red and near-infrared light-emitting diode irradiation ameliorates LPS-induced otitis media in a rat model. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2023, vol. 11, EN 1099574. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1099574>
 11. Pat. 2601378 C1 RU. *Sposob modelirovaniya abstsessa myagkikh tkaney* [Method for modeling a soft tissue abscess]. V. V. Alipov, A. I. Urusova, D. A. Andreev, N. Kh. Kuliev. Filed May 27, 2015, No. 2015120118/14 (in Russian).
 12. Pat. 2819366 C1 RU. *Sposob otsenki effektivnosti fotodinamicheskoy terapii gnoynnykh abstsessov* [Method for assessing the effectiveness of photodynamic therapy for purulent abscesses]. E. S. Tuchina, M. V. Kanevskiy, V. V. Alipov, A. G. MUSAELYAN, M. A. Polidanov, E. S. Efimova, U. O. Gritsay, E. K. Gadzhieva, M. V. Korchenova. Filed June 8, 2023, No. 2023115100 (in Russian).
 13. Chan H., Pavelka M. S. Jr., Baran T. M. Methylene blue photodynamic therapy of bacterial species found in human abscesses: Planktonic, biofilm, and 3D silicone models. *Proc. SPIE*, 2023, vol. 12358, pp. 1235805–25. <https://doi.org/10.1117/12.2648350>
 14. Kassab G., Cheburkanov V., Willis J., Moule M.G., Kurachi C., Yakovlev V., Cirillo J. D., Bagnato S. V. Safety and delivery efficiency of a photodynamic treatment of the lungs using indocyanine green and extracorporeal near infrared illumination. *J. Biophotonics*, 2020, vol. 13, no. 10, EN 202000176. <https://doi.org/10.1002/jbio.202000176>
 15. Tuchin V. V., Genina E. A., Tuchina E. S., Svetlakova A. V., Svenskaya Y. I. Optical clearing of tissues: Issues of antimicrobial phototherapy and drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2022, vol. 180, EN 114037, pp. 1–122. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.114037>

Поступила в редакцию 18.11.2025; одобрена после рецензирования 20.11.2025; принята к публикации 25.11.2025
 The article was submitted 18.11.2025; approved after reviewing 20.11.2025; accepted for publication 25.11.2025