

Оригинальная статья / Original article

Экспериментальное исследование эффективности выкраивания кожно-жирового лоскута под контролем люминесцентной спектроскопии

А.Г. Ваганов^{1✉}, <https://orcid.org/0000-0001-8191-2551>, aleksejvaganov4@gmail.comА.А. Шоно², <https://orcid.org/0000-0002-3679-520X>, shonoarsby@yahoo.comА.Д. Асланов¹, <https://orcid.org/0000-0002-7051-0917>, dr-aslanov1967@mail.ru¹ Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова; 360004, Россия, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, ул. Чернышевского, д. 173² Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова; 364093, Россия, Чеченская Республика, Грозный, ул. Шарипова, д. 32

Резюме

Введение. В настоящее время в различных областях хирургии является актуальным совершенствование техник выкраивания кожных лоскутов.

Цель. Оценить эффективность выкраивания кожно-жирового лоскута под контролем люминесцентной спектроскопии в эксперименте.

Материалы и методы. Проспективное нерандомизированное прямое исследование проводилось на 17 беспородных кроликах на базе экспериментального вивария Кабардино-Балкарского университета с марта по апрель 2025 г. На первом этапе выполнялась отсепаровка кожи на животе длиной 12 см. После ее экспозиции выполнялась тотальная биопсия, изготавливались гистологические препараты с дальнейшей морфометрией. Полученные показатели сопоставлялись с интенсивностью люминесценции. На втором этапе были прооперированы 14 беспородных кроликов, разделенных на равные группы. 1-й группе после отсепаровки лоскута проводилась его фиксация на прежнее место без укорочения, 2-й группе выполнялось укорочение выкроенного лоскута под люминесцентным контролем. Продолжительность эксперимента составила 21 день. Оценивались клинично-лабораторная динамика, количество и площадь гнойных осложнений. Для статистической обработки данных использовали программное обеспечение SPSS 17.0.

Результаты. При амплитуде сигнала в $0,95 \pm 0,15 \times 10^5$ фотонов в микропрепаратах отмечалась минимальная площадь некрозов. В контрольной группе отмечено нагноение раны у 5 животных (площадь – $4,35 \pm 0,11 \text{ см}^2$), в опытной группе – у 2 (площадь – $1,34 \pm 0,14 \text{ см}^2$, $p = 0,005$). Некроза кожно-жирового лоскута в опытной группе не отмечалось. При биопсии раны с морфометрией гистологических препаратов на 21-е сут. выявлено более интенсивное развитие соединительной ткани в опытной группе и большая выраженность местного воспаления в группе контроля. На секции животных после выведения из эксперимента в группе контроля выявлены признаки острого сепсиса.

Выводы. Использование метода ультрафиолетовой люминесцентной спектроскопии является эффективным при определении границ выкраивания кожно-жирового лоскута у кроликов.

Ключевые слова: люминесцентная спектроскопия, кожно-жировой лоскут, гнойная рана, абдоминопластика, некроз кожи, точная хирургия, флюорофоры

Для цитирования: Ваганов АГ, Шоно АА, Асланов АД. Экспериментальное исследование эффективности выкраивания кожно-жирового лоскута под контролем люминесцентной спектроскопии. *Амбулаторная хирургия*. 2025;22(2). <https://doi.org/10.21518/akh2025-038>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Experimental study of the effectiveness of cutting out a skin-fat flap under the control of luminescent spectroscopy

Aleksey G. Vaganov^{1✉}, <https://orcid.org/0000-0001-8191-2551>, aleksejvaganov4@gmail.comArsby A. Shono², <https://orcid.org/0000-0002-3679-520X>, shonoarsby@yahoo.comAkhmed D. Aslanov¹, <https://orcid.org/0000-0002-7051-0917>, dr-aslanov1967@mail.ru¹ Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; 173, Chernyshevsky St., Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russia² Kadyrov Chechen State University; 32, Sharipov St., Grozny, Chechen Republic, 364093, Russia

Abstract

Introduction. Currently, improvement of skin flap cutting techniques is relevant in various fields of surgery.

Aim. To evaluate the effectiveness of cutting out a skin flap under the control of luminescent spectroscopy in an experiment.

Materials and methods. A prospective, non-randomized, direct study was conducted on 17 mongrel rabbits at the experimental vivarium of Kabardino-Balkarian University from March to April 2025. The first step was to separate the skin on the abdomen with a length of 12 cm. After its exposure, a total biopsy was performed, histological preparations with further morphometry were made. The obtained values were compared with the luminescence intensity. In the second stage, 14 mongrel rabbits were operated on, divided into equal groups. In the 1st group after peeling off the flap it was fixed to its original place without shortening, in the 2nd group the cut flap was shortened under luminescent control. The duration of the experiment was 21 days. The clinical and laboratory dynamics, the number and area of purulent complications were evaluated. The SPSS 17.0 software was used for statistical data processing.

Results. With a signal amplitude of $0.95 \pm 0.15 \times 10^5$ photons, the micro-preparations showed a minimal area of necrosis. In the control group wound suppuration was noted in 5 animals (area – 4.35 ± 0.11 cm²), in 2 animals from the experimental group (area – 1.34 ± 0.14 cm², $p = 0.005$). Necrosis of the skin flap was not observed in the experimental group. A biopsy of the wound with morphometry of histological preparations on day 21 revealed a more intensive development of connective tissue in the experimental group and a greater severity of local inflammation in the control group. After withdrawal from the experiment, signs of acute sepsis were detected in the control group in the section of animals.

Conclusions. The use of ultraviolet luminescent spectroscopy is effective in determining the boundaries of the cutout of the skin-fat flap in rabbits.

Keywords: luminescent spectroscopy, skin-fat flap purulent wound, abdominoplasty, skin necrosis, precision surgery, fluorophores

For citation: Vaganov AG, Shono AA, Aslanov AD. Experimental study of the effectiveness of cutting out a skin-fat flap under the control of luminescent spectroscopy. *Ambulatornaya Khirurgiya*. 2025;22(2). (In Russ.) <https://doi.org/10.21518/akh2025-038>.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных областях хирургии является актуальным совершенствование техник выкраивания кожных и кожно-жировых лоскутов [1]. Данная проблематика важна при выполнении закрытия различных анатомических зон перемещенными кожными лоскутами после иссечения гнойно-некротических тканей [2–4]. Также при ампутации нижней конечности важно верное выкраивание кожно-жирового лоскута для закрытия ампутационной культи с соблюдением анатомических ориентиров [5]. Наконец, данная процедура имеет ключевое значение при выполнении абдоминопластики, целью которой является восстановление контуров передней брюшной стенки [6–8].

Основная сложность при выполнении данной операции – обеспечение достаточного кровотока в лоскуте [9–11]. Недостаточная квалификация хирурга, ошибки при проведении выкраивания с повреждением питающих сосудов или обширной мобилизацией приводят к ишемии и некрозу лоскута. При избыточной толщине подкожно-жировой клетчатки, наличии кожных рубцовых изменений также могут возникать трудности с приживлением [12, 13].

В процессе выкраивания лоскута чрезвычайно важен постоянный контроль за состоянием его жизнеспособности, что делает актуальной разработку различных средств визуализации [14, 15]. Одним из них является ультразвуковая доплерография, однако степень разрешения данного метода при небольшой площади ткани крайне низкая [16, 17]. Альтернативным способом

оценки жизнеспособности кожно-жирового лоскута может выступать люминесцентная спектроскопия.

Представленный метод диагностики основан на принципах аутолюминесценции – свечения, возникающего в результате биохимических реакций, сопровождающих процессы клеточной деструкции [18–20]. Суть метода заключается в обнаружении и анализе излучения, испускаемого специальными веществами – люминофорами, которые образуются в процессе клеточного повреждения [21, 22]. Среди таких универсальных флюорофоров, способных генерировать свечение, можно выделить молекулы никотинамиддинуклеотида и их фосфата (НАДН, НАДФ), коллаген, эластин, флавины и каротин [23–25]. Эти соединения играют важнейшую роль в ключевых метаболических процессах организма, участвуя в цикле Кребса, пентозофосфатном пути, работе митохондриальной дыхательной цепи и процессах перекисного окисления липидов.

Изменение концентрации и электронного состояния молекул этих веществ напрямую отражает состояние клеток и тканей [26, 27]. В данном исследовании для регистрации и анализа люминесценции использовалась лазерно-индуцированная ультрафиолетовая фотолюминесцентная спектроскопия.

Интенсивность регистрируемого свечения, или люминесценции, непосредственно коррелирует со степенью ишемического повреждения клеток. Чем сильнее повреждение, тем интенсивнее свечение [18, 23–25]. Однако спектральные характеристики регистрируемого сигнала могут существенно варьироваться

в зависимости от длины волны излучения. Это объясняется влиянием различных веществ, способных «тушить» люминесценцию, подавляя ее интенсивность.

К таким веществам относятся в первую очередь гемоглобин и его производные: оксигемоглобин, дезоксигемоглобин и миоглобин [28]. Их присутствие в ткани необходимо учитывать при анализе полученных данных. Поэтому интерпретация результатов должна проводиться с учетом влияния гасителей люминесценции, что позволяет более точно оценить состояние микроциркуляции в зоне ишемии [29].

В итоге представленный метод позволяет получить объективную информацию о степени повреждения тканей на клеточном уровне, обеспечивая высокую точность и пространственное разрешение, что делает его незаменимым инструментом в определении жизнеспособности тканей. Точность метода обусловлена не только высокой чувствительностью аппаратуры, но и глубоким пониманием биохимических процессов, лежащих в основе регистрируемого сигнала. Таким образом, комбинация передовых технологий и тщательного анализа биохимических механизмов обеспечивает высокую достоверность получаемых результатов.

Цель исследования – оценить эффективность выкраивания кожно-жирового лоскута под контролем люминесцентной спектроскопии в эксперименте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проспективное нерандомизированное прямое исследование проводилось на 17 беспородных кроликах в возрасте 4 мес. и весом 4–5 кг на базе экспериментального vivария ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский университет им. Х.М. Бербекова» с марта по апрель 2025 г.

На первом этапе экспериментального исследования трем животным моделировали абдоминопластику, заключающуюся в выполнении разреза кожи и подкожной клетчатки длиной 6 см, параллельно – лобковой кости с последующей отсепаровкой лоскута сверху. Все животные оперировались под общим обезболиванием (рометар 5,0–6,0 мг/кг и золетил 50 в дозе 8–10 мг/кг). Длина отсепаровки составила 12 см. Диссекция проводилась равномерно по 1 см в течение 5 мин.

Процедура измерения аутолюминесценции проводилась непосредственно во время операции следующим образом. Специальный зонд – сдвоенное кварцевое волокно длиной 1 м с активным диаметром рабочей части 450 мкм, помещенное в стерильный рукав – позволял регистрировать свечение в изучаемой зоне. Зонд располагался на расстоянии 1–2 см от поверхности кожного покрова. Для индукции аутолюминесценции

применялось импульсное излучение эксимерного лазера XeCl с длиной волны 308 нм в течение 3 мин.

Регистрация спектра люминесценции осуществлялась в диапазоне 350–780 нм с шагом 10 нм в течение 10 сек. Это позволило получить детальную информацию о спектральном составе излучения, что явилось ключевым для диагностики [29].

Люминесцентная спектроскопия выполнялась в конце отсепаровки с шагом 1 см из дистального конца лоскута к проксимальному. С таким же шагом выполнялось измерение люминесценции по ширине разреза. Общий срок вмешательства составил 60 мин, по окончании было произведено 12 измерений люминесценции в продольном направлении, 60 измерений – в поперечном. Общее количество измерений люминесцентного сигнала составило 72. После завершения отсепаровки кожного лоскута выполнялась его экспозиция в течение 20 мин, а далее выполнялась его последовательная биопсия в точках измерения люминесценции с целью гистологической оценки. Площадь забранных фрагментов биопсийного материала составила 1 см². В результате первой части исследования с каждого кролика было получено 72 гистологических препарата, со всех животных – 216 стекол соответственно. Далее животные выводились из эксперимента путем передозировки наркозного препарата.

Полученные участки кожи фиксировались 10%-ным раствором нейтрального формалина, затем из каждого образца изготавливались парафиновые блоки и стекла. Препараты окрашивались гематоксилином и эозином или альциановым синим. В дальнейшем с помощью программы ImageJ 1.45s выполнялась морфометрия полученных препаратов. Оценивалась площадь некрозов и относительная площадь микроциркуляторного русла. Данные количественные показатели сопоставлялись с интенсивностью люминесцентного свечения с целью обнаружения различных закономерностей.

Получив гистологическое обоснование эффективности использования метода люминесцентной спектроскопии в определении региональной микроциркуляции и площади некроза клеточно-конечного микроокружения, мы приступили ко второму этапу эксперимента, в ходе которого были прооперированы 14 беспородных кроликов.

Перед началом операции оценивалось общее состояние животных. В группу включались здоровые особи с целостным шерстяным покровом при отсутствии у них температуры, лейкоцитоза и существенных биохимических сдвигов в общем анализе крови.

Все животные были разделены по методу выполнения операции на две группы. Смысл экспериментальной

операции заключался в создании кожного лоскута размером 12 × 6 см с последующей абдоминопластикой.

1-ю группу ($n = 7$) составили животные, которым после отсепаровки лоскута выполняли его фиксацию на прежнее место без укорочения отдельными узловыми швами с использованием атравматической полипропиленовой нити.

2-ю группу ($n = 7$) составили животные, которым укорочение выкроенного лоскута производилось на основании данных люминесцентной спектроскопии, полученных в первой части эксперимента. Далее края кожного лоскута фиксировались на прежнее место отдельными кожными узловыми швами с использованием атравматической полипропиленовой нити.

Продолжительность эксперимента составила 21 день. В ходе наблюдения ежедневно оценивались клиническое состояние особи, ее вес, температура тела. Динамика клинического и биохимического анализа крови оценивалась 1 раз в 7 сут. Фиксировались также наличие и характер осложнений.

Площадь нагноения кожной раны определялась с использованием планиметрического метода [30]. Для измерения площади раны на ее поверхность накладывалась стерильная полиэтиленовая пленка, через нее обводился контур раны. Затем полученное изображение раны накладывали на лист миллиметровой бумаги, после чего подсчитывали количество квадратных сантиметров и миллиметров, заключенных внутри границ контура.

В конце эксперимента кролики выводились из исследования путем передозировки наркозных препаратов. Бралась последовательная биопсия из краев послеоперационной раны со стороны выкроенного ранее лоскута, с одного края до другого, с шагом 1 см. Площадь биоптатов также составила 1 см². В результате было получено 98 гистологических стекол (по 49 стекол в каждой группе). Фрагменты тканей фиксировались в 10%-ном растворе формалина с целью выполнения морфометрии по принципам, использованным ранее. Кроме ранее изученных параметров, определяли также относительную площадь новообразованной соединительной ткани, количество фибробластов и клеток-нерезидентов (нейтрофилов, эозинофилов, базофилов) с целью комплексной оценки местных воспалительных изменений, а также процессов регенерации.

Дизайн исследования соответствовал этическим принципам и нормам проведения биомедицинских исследований с участием животных, установленным приказом Министерства здравоохранения РФ от 1 апреля 2016 г. №199н «Об утверждении правил надлежащей лабораторной практики» и Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации (2000). Кроме

того, исследование было одобрено протоколом локального этического комитета при ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский университет им. Х.М. Бербекова» Минздрава России (протокол №3 от 03.02.2025).

Для статистической обработки данных при сравнении групп исследования было использовано программное обеспечение SPSS Statistics 17.0. Результаты исследования были разнесены по шкале среднеарифметических значений (mean) $\pm$ стандартное отклонение (SD). Различия средних значений (p) в основных показателях послеоперационного периода оценивали с применением парного t -критерия Стьюдента, который считали достоверным при $p < 0,05$. Для оценки различий между двумя малыми независимыми выборками использовали U -критерий Манна – Уитни. Для определения корреляционной зависимости между показателями использовали коэффициент корреляции Спирмена. Статистическую гетерогенность групп оценивали с помощью χ^2 теста. При $p < 0,1$ и $I^2 > 50\%$ гетерогенность считали статистически значимой.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При изучении интенсивности люминесцентного свечения в кожных лоскутах наибольшая его величина была выявлена в дистальных участках выкроенного кожно-жирового слоя. Кроме того, с течением времени амплитуда свечения увеличивалась. Было выявлено два выраженных пика сигнала люминесценции: положительный – на частоте 380–400 нм и отрицательный – на частоте 410–440 нм (рис. 1).

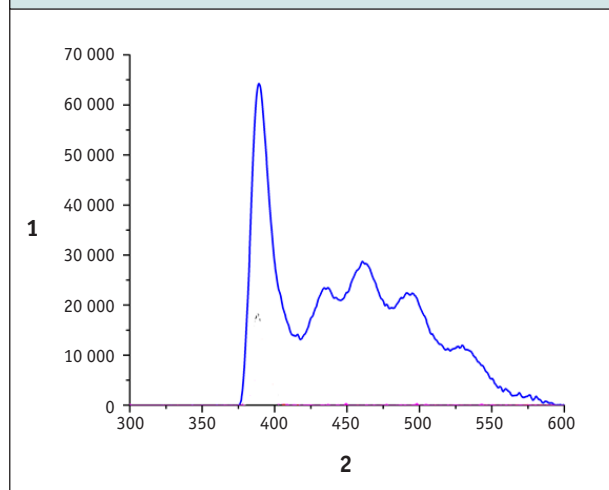
При изучении микропрепаратов выявлена прямая сильная корреляционная связь между площадью некрозов и интенсивностью люминесценции на частоте 380–400 нм ($r = 0,77$; $p < 0,005$). При этом амплитуда сигнала, при котором в микропрепаратах отмечалась минимальная площадь некрозов клеточно-тканевого микроокружения, составляла $0,95 \pm 0,15 \times 10^5$ фотонов. На рис. 2А ($S = 1,0 \times 10^5$ фотонов (410 нм)) в микропрепарате видны многочисленные очаги некрозов темно-фиолетового цвета, на рис. 2В ($S = 0,3 \times 10^5$ фотонов) – здоровая соединительная ткань без признаков некроза и ишемии.

Также необходимо отметить наличие обратной сильной корреляционной связи между амплитудой люминесцентного свечения на частоте 450 нм и относительной площадью микроциркуляторного русла. Чем лучше была развита микроциркуляция, тем ниже была амплитуда люминесценции ($r = 0,87$; $p < 0,001$).

При изучении эпидермиса необходимо отметить, что толщина его в различных микропрепаратах была сопоставима, однако площадь клеточной деструкции также

Рисунок 1. Спектральная характеристика сигнала, полученного при ультрафиолетовой люминесцентной спектроскопии (1 – интенсивность люминесценции, 2 – частота, на которой получен сигнал)

Figure 1. Spectral characteristics of the signal obtained using ultraviolet luminescence spectroscopy (1 - luminescence intensity, 2 - frequency at which the signal was obtained)



напрямую коррелировала с интенсивностью люминесценции ($r = 0,87$; при $p < 0,001$). Сила корреляционной связи в данном случае была сильной (табл. 1).

Важно отметить, что относительная площадь соединительной ткани в изученных препаратах была сопоставимой. Данный факт показывает отсутствие фиброза и нарушений микроциркуляции в исходном состоянии перед началом операции.

Во второй части экспериментального исследования все животные были разделены по методу выполнения операции на две группы. Смысл экспериментальной операции заключался в создании кожного лоскута размером 12×6 см с последующей абдоминопластикой. При этом линия пересечения кожи находилась на участке с интенсивностью люминесценции менее $0,95 \pm 0,15 \times 10^5$ на частоте 410 нм. Далее края кожного лоскута фиксировались на прежнее место отдельными кожными узловыми швами с использованием атравматической полипропиленовой нити.

1–7-е сут. исследования

Животные контрольной и опытной групп были активны, корм и воду усваивали в полном объеме. Отмечается потеря массы тела в 1-й группе на $0,32 \pm 0,11$ кг, во 2-й группе исследования – на $0,39 \pm 0,14$ кг ($p = 0,244$). Гипертермии не отмечалось. Послеоперационные раны были без признаков нагноения. В общем анализе крови обеих групп отмечался умеренный лейкоцитоз

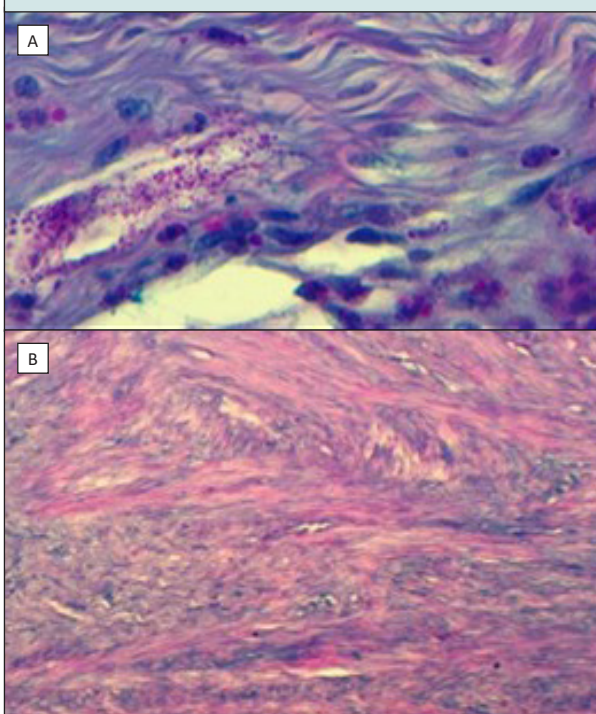
Таблица 1. Связь интенсивности люминесценции с площадью некротизированных тканей и относительной плотностью микроциркуляторного русла

Table 1. Correlation between luminescence intensity, necrotic tissue area and relative microcirculatory density

Интенсивность люминесценции (410 нм) $\times 10^5$ фотонов	Относительная площадь микроциркуляторного русла, мкм ²	Площадь некротических волокон, мкм ²
$3,65 \pm 0,28$	$44,31 \pm 0,15$	$66,33 \pm 0,35$
$2,33 \pm 0,45$	$54,62 \pm 0,36$	$45,62 \pm 0,23$
$1,66 \pm 0,38$	$76,43 \pm 0,29$	$29,81 \pm 0,25$
$0,95 \pm 0,15$	$80,54 \pm 0,42$	$18,82 \pm 0,13$
$0,62 \pm 0,08$	$81,95 \pm 0,55$	$10,37 \pm 0,42$
$0,45 \pm 0,04$	$88,72 \pm 0,62$	$9,17 \pm 0,45$

Рисунок 2. Связь интенсивности люминесценции (S) с морфологическими изменениями биоптатов

Figure 2. Correlation between luminescence intensity (S) and morphological changes in biopsy specimens



с нейтрофильным сдвигом. Статистически достоверных отклонений в уровне лейкоцитов, С-реактивного белка в группах исследований не отмечено (табл. 2).

7–14-е сут. исследования

У 5 животных контрольной группы отмечено повышение температуры тела до 38° на 7-е сут. исследования. Данные особи были вялы и адинамичны, отмечалось

Таблица 2. Основные лабораторные показатели, претерпевшие изменения в процессе эксперимента

Table 2. Major laboratory parameters that underwent changes during the experiment

Показатель	Сутки	Опытная группа	Контрольная группа	p
Лейкоциты крови, г/л	7	13,2 ± 0,1	12,4 ± 0,8	0,488
	14	15,4 ± 0,5	19,7 ± 0,4	0,034
	21	12,1 ± 1,4	22,2 ± 2,9	0,003
СРБ, ЕД/л	7	60,6 ± 0,16	62,5 ± 0,14	0,267
	14	170,9 ± 0,5	297,2 ± 0,9	0,025
	21	125,4 ± 1,8	300,4 ± 3,4	0,003
Креатинин крови, ммоль/л	7	102,6 ± 0,5	105,5 ± 0,3	0,234
	14	113,5 ± 0,7	246,1 ± 0,7	0,004
	21	124,3 ± 1,5	350,4 ± 2,2	0,002

Примечание. СРБ – С-реактивный белок.

снижение потребления корма при нормальных объемах приема воды. Анализ потери массы тела выявил статистически достоверное различие между группами. Интенсивнее данный процесс протекал в группе контроля (опытная группа – 0,54 ± 0,13 кг, контрольная группа – 0,82 ± 0,17 кг; $p = 0,006$).

При оценке местного статуса у особей контрольной группы выявлен некроз и нагноение кожного лоскута, средняя площадь которого составила $4,35 \pm 0,11 \text{ см}^2$. Нагноение кожной раны отмечено также у 2 животных из опытной группы. Однако площадь гнойного дефекта в данной группе составила $1,34 \pm 0,14 \text{ см}^2$ ($p = 0,005$). При этом визуального некроза кожного лоскута не отмечалось.

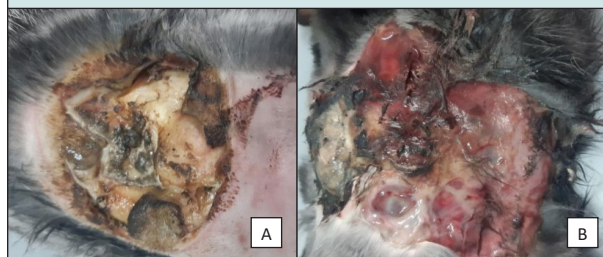
Пяти животным контрольной группы после нагноения раны на 7-е сут. выполнена некрэктомия. В раннем послеоперационном периоде у них отмечается стойкий субфебрилитет на протяжении всего времени наблюдения – до $37,2\text{--}37,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 3).

У животных в опытной группе ($n = 2$) после нагноения на 7-е сут. сняты швы с послеоперационной раны, выполнена перевязка с использованием раствора йодопирона. Максимальная температура тела у данных особей составляла $37,0 \text{ }^\circ\text{C}$ на 7–10-е сут. эксперимента, после чего отмечена нормотермия.

Статистически значимо отличается уровень лейкоцитов в группах исследования к 14-м сут. В общем анализе крови в контрольной группе отмечается снижение гемоглобина до $83,2 \pm 1,8 \text{ г/л}$, в то время как в опытной группе анемии не отмечается.

С 14-х сут. у животных контрольной группы, где отмечено наличие гнойных осложнений, начинают развиваться признаки полиорганной недостаточности.

Рисунок 3. Внешний вид гнойной раны к 10-м сут. исследования в группе контроля
Figure 3. Appearance of a purulent wound on Day 10 of the study in the control group



А – до некрэктомии; В – после некрэктомии.

Печеночная недостаточность характеризуется повышением активности трансаминаз и общего билирубина. Реактивный панкреатит проявляется амилаземией. Отмечаются явления хронической почечной недостаточности, что проявляется увеличением уровня мочевины и креатинина крови.

14–21-е сут. исследования

В данный период эксперимента отмечается прогрессирование основных тенденций, которые были отмечены ранее. В контрольной группе это прогрессирование полиорганной дисфункции. У двух животных к 18–21-м сут. отмечается полное отсутствие усвоения пищи и воды, стойкий лейкоцитоз до 25 г/л при отсутствии гипертермии, появление токсической зернистости эритроцитов в общем анализе крови. Данные особи скончались на следующий день. Летальности в опытной группе не отмечено.

Местные изменения к концу эксперимента у особей опытной группы с раневыми осложнениями полностью регрессировали, раны зажили вторичным натяжением. Заживления ран у выживших животных с гнойными осложнениями в группе контроля отмечено не было. Более того, площадь кожного дефекта за счет вторичного некроза кожного лоскута увеличилась до $8,22 \pm 0,17 \text{ см}^2$. Биохимические сдвиги в анализе крови у контрольной группы прогрессивно нарастали и характеризовались повышением активности трансаминаз, амилазы крови, билирубина, уровня почечных шлаков.

Результаты предоперационного анализа показали, что средний уровень люминесценции на отрицательном пике (на частоте 450 нм) у животных опытной группы, у которых послеоперационный период протекал без осложнений, в среднем составил $0,38 \pm 0,03 \times 10^5$ фотонов. Данный показатель статистически отличался от уровня люминесценции в группах с осложненным течением послеоперационного периода, где он составлял $0,54 \pm 0,07 \times 10^5$ ($p = 0,002$).

На 21-е сут. в условиях общей анестезии животным была выполнена множественная биопсия из зоны абдоминопластики и проведена морфометрия, данные которой представлены в *табл. 3*.

Полученные результаты свидетельствуют о более интенсивном развитии соединительной ткани в опытной группе. В группе контроля выявляются более интенсивные процессы воспаления, большая площадь воспалительных инфильтратов и преобладающее число клеток-нерезидентов в микропрепаратах. Кроме того, в группе контроля ход волокон новообразованной соединительной ткани носил хаотичный характер на фоне отека межклеточного матрикса. Сосуды микроциркуляторного русла в группе контроля характеризовали явления застойной недостаточности со сладжированием эритроцитов. При этом относительная площадь сосудов дермы в группах исследования была сопоставима.

На 21-е сут. эксперимента все животные были выведены из исследования путем передозировки наркозного препарата и подвергнуты патологоанатомическому вскрытию в день смерти.

При вскрытии у всех животных контрольной группы наблюдались схожие изменения, поэтому описание патологоанатомической картины будет представлено в обобщенном виде. Патоморфологические признаки органов и систем соответствовали сепсису. При вскрытии обнаружены венозный застой, тотальный отек легких с компенсаторной эмфиземой, общая гипертрофия сердца,

клапанный эндокардит, венозный застой всех паренхиматозных органов с резко выраженной инъекцией сосудов и множественными кровоизлияниями на серозных покровах. Кроме того, имелись признаки токсического гепатита, нефрита с множественными кровоизлияниями, септического спленита с множественными инфарктами.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выкраивание кожного лоскута под контролем люминесцентной спектроскопии представляет собой современный метод, повышающий точность хирургических вмешательств. Этот подход основан на использовании флуоресцентных свойств тканей для оценки их жизнеспособности и перфузии. Методики, которые используют данные свойства, делятся на две группы.

К 1-й группе методов относится введение флюорофоров с известными частотно-волновыми свойствами извне в ткани с дальнейшей фиксацией силы люминесцентного свечения в зависимости от изменения их физических данных под воздействием тех или иных факторов тканевого метаболизма. Избирательная способность флуоресцеина накапливаться в хорошо васкуляризированных тканях используется в пластической хирургии с целью детекции тканей с плохой реваскуляризацией [31]. При этом участки с активным кровоснабжением проявляют яркую зеленоватую флуоресценцию, тогда как ишемизированные зоны остаются темными. Современные системы обеспечивают количественную оценку перфузии с построением перфузионных карт [32]. Флуоресцентный анализ особенно эффективен при реконструкциях после ожогов и онкологических резекций [33]. Ограничением в использовании данного метода является возможность ложноположительных результатов при воспалительном изменении тканей и связанной с ним гипervаскуляризации [31, 33].

Использованная в исследовании фотолюминесцентная лазерно-индуцированная спектроскопия относится ко 2-й группе методов, заключающихся в детекции свечения от тканевых флюорофоров, интенсивность которых напрямую зависит от их концентрации.

В проведенном исследовании данный метод позволил выявить абсолютные критерии жизнеспособности выкраиваемого лоскута, основанные на амплитуде люминесценции тканевых люминофоров, зависящей от скорости катаболизма. Гистологически было доказано, что появление некроза клеточно-тканевого окружения возникает в лоскутах с амплитудой люминесценции в $0,95 \pm 0,15 \times 10^5$ фотонов на частоте 410 нм.

Данный показатель оказался критически важным для определения объема мобилизации кожного лоскута, что позволяет снизить риск различных гнойно-некротических

Таблица 3. Морфометрические параметры созревания соединительной ткани и выраженности местного воспаления в группах сравнения у особей с неосложненным течением раннего послеоперационного периода в динамике эксперимента

Table 3. Morphometric parameters of the connective tissue maturation and the local inflammation severity in the comparator groups in subjects with uncomplicated early postoperative effects of surgery during the course of experiment over time

Показатель	Опытная группа	Контрольная группа	p
Фибробласты, %	65,24 ± 0,11	44,33 ± 0,12	0,011
Лимфоциты, нейтрофилы, эозинофилы, %	33,21 ± 0,18	62,68 ± 0,39	0,029
Относительная площадь новообразованной соединительной ткани, мкм ²	670,44 ± 23,55	432,14 ± 30,11	0,002
Площадь воспалительного инфильтрата, мкм ²	88,54 ± 10,45	165,16 ± 14,40	0,005
Относительная площадь сосудов дермы, мкм ²	192,36 ± 14,10	199,36 ± 10,40	0,525

изменений в послеоперационном периоде. В проведенном исследовании такие осложнения наблюдались в контрольной группе на 60% чаще, чем в опытной.

Кроме того, в контрольной группе нагноение раны протекало более злокачественно, вызывая развитие системной воспалительной реакции с последующим присоединением полиорганной недостаточности. Более того, после вывода животных из эксперимента на секции выявлена морфологическая картина острого сепсиса с множественным поражением внутренних органов.

При морфометрии, выполненной по окончании эксперимента, выявляются количественно более интенсивные процессы тканевой регенерации в опытной группе по сравнению с контролем. Эти процессы подтверждают полноценное восстановление микроциркуляции в кожно-жировом лоскуте. Таким образом,

примененный нами метод дает возможность осуществить точную количественную оценку интенсивности люминесцентного свечения для определения границ жизнеспособности кожно-жирового лоскута.

ВЫВОДЫ

Использование метода ультрафиолетовой люминесцентной спектроскопии является эффективным при определении границ выкраивания кожно-жирового лоскута у кроликов. Условная линия, проведенная на границе люминесценции $0,95 \pm 0,15 \times 10^5$ фотонов на частоте 410 нм, является демаркацией между жизнеспособной и некротизированной тканью.

Поступила / Received 05.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 20.06.2025

Принята в печать / Accepted 27.06.2025

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Alves M, Mendes M, Valença-Filipe R, Rebelo M, Peres H, Costa-Ferreira A. Long Drainers After Abdominoplasty: A Risk Analysis. *Aesthetic Plast Surg.* 2025;49(9):2525–2533. <https://doi.org/10.1007/s00266-025-04773-4>.
2. Lovald ST, Topp SG, Ochoa JA, Gaball CW. Biomechanics of the monopedicle skin flap. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2013;149(6):858–864. <https://doi.org/10.1177/0194599813505836>.
3. Gibbons MS, Gruber PJ, Syed S, Sell SA, Carroll CJ, Maher IA. Mechanical Strain of the Trilobed Transposition Flap in Artificial Skin Models: Pivotal Restraint Decreases With Decreasing Rotational Angles. *Dermatol Surg.* 2021;47(1):30–33. <https://doi.org/10.1097/DSS.0000000000002522>.
4. Ha JH, Lee SY, Choi TH, Park SO. Surgical delay increases the survival of expanded random-pattern flap in pediatric patients. *Sci Rep.* 2023;13(1):19204. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45852-3>.
5. Green C, Plyler D, Masadeh S, Bibbo C. Reconstructive Amputations of the Foot. *Clin Podiatr Med Surg.* 2021;38(1):17–29. <https://doi.org/10.1016/j.cpm.2020.08.002>.
6. Cheung LK, Skepastianos V, Kostopoulos E, Skepastianos G. “Nip and Tuck”: Training the Next Generation of Aesthetic Plastic Surgeons. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2025;13(1):e6470. <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000006470>.
7. Cannistrà C, Lori E, Arapís K, Gallo G, Varanese M, Pironi D et al. Abdominoplasty after massive weightloss. Safety preservation fascia technique and clinical outcomes in a large single series-comparative study. *Front Surg.* 2024;11:1337948. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2024.1337948>.
8. Monteiro IA, de Sousa Barros A, Costa-Ferreira A. Postbariatric Abdominoplasty: A Comparative Study on Scarpa Fascia Preservation Versus Classical Technique. *Aesthetic Plast Surg.* 2023;47(6):2511–2524. <https://doi.org/10.1007/s00266-023-03455-3>.
9. Cristofari S, Halimi C, Van Dieren L, Stivala A, Lellouch AG, Janin A. Use of perfusion device for free flap salvage after ischemia in swine. *Ann Chir Plast Esthet.* 2024;69(5):376–383. <https://doi.org/10.1016/j.anplas.2024.07.004>.
10. Arellano JA, Comerçi AJ, Liu HY, Alessandri Bonetti M, Nguyen VT, Parent B et al. Complications in Prolonged Intraoperative Ischemia Time in Free Flap Breast Reconstruction: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Aesthetic Plast Surg.* 2025;49(5):1262–1270. <https://doi.org/10.1007/s00266-024-04382-7>.
11. Golpanian S, Gerth DJ, Tashiro J, Thaller SR. Free Versus Pedicled TRAM Flaps: Cost Utilization and Complications. *Aesthetic Plast Surg.* 2016;40(6):869–876. <https://doi.org/10.1007/s00266-016-0704-z>.
12. Sutcu M, Keskin M, Karacaoglan N. Abdominoplasty with “En block” removal of the skin island: a safe and fast approach. *J Plast Surg Hand Surg.* 2022;56(3):160–166. <https://doi.org/10.1080/2000656X.2021.1953040>.
13. Graf R, de Araujo LR, Rippel R, Neto LG, Pace DT, Cruz GA. Lipoabdominoplasty: liposuction with reduced undermining and traditional abdominal skin flap resection. *Aesthetic Plast Surg.* 2006;30(1):1–8. <https://doi.org/10.1007/s00266-004-0084-7>.
14. Sjöberg T, Numan A, de Weerd L. Liberal versus Modified Intraoperative Fluid Management in Abdominal-flap Breast Reconstructions. A Clinical Study. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2021;9(9):e3830. <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000003830>.
15. Nelson JA, Fischer JP, Grover R, Mirzabeigi MN, Nelson P, Wes AM et al. Intraoperative perfusion management impacts postoperative outcomes: an analysis of 682 autologous breast reconstruction patients. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2015;68(2):175–183. <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2014.10.002>.
16. Бабкина АС. Лазер-индуцированная флуоресцентная спектроскопия в диагностике тканевой гипоксии (обзор). *Общая реаниматология.* 2019;15(6):50–61. <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2019-6-50-61>.
Babkina AS. Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy in the Diagnosis of Tissue Hypoxia (Review). *Obshchaya Reanimatologiya.* 2019;15(6):50–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2019-6-50-61>.
17. Rampazzo E, Prodi L, Petrizza L, Zaccheroni N. Luminescent Silica Nanoparticles Featuring Collective Processes for Optical Imaging. *Top Curr Chem.* 2016;370:1–28. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22942-3_1.
18. Burikov SA, Sarmanova OE, Fedyanina AA, Plastinin IV, Dolenko TA. A step towards versatile temperature-luminescent nanosensor: Combination of luminescent and time-resolved spectroscopy of $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ nanoparticles. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc.* 2025;334:125902. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.125902>.
19. Zhang S, Qin S, Xiao Y, Liu Z, Hu X, Xiao Z et al. Near-infrared luminescent materials: a review of their practical applications and prospective advancements. *Dalton Trans.* 2025;54(17):6717–6740. <https://doi.org/10.1039/d4dt03538k>.
20. Тимурзиева АБ. Использование раман-флуоресцентных технологий в ранней диагностике воспалительных и опухолевых заболеваний как часть стратегического направления формирования общественного здоровья и инструмент для повышения качества оказания медицинской помощи: обзор литературы. *Лазерная медицина.* 2021;25(4):42–50. <https://doi.org/10.37895/2071-8004-2021-25-4-42-50>.

- Timurzieva AB. Raman fluorescence technologies for early detection of inflammatory and oncological disorders as a part of public health strategy and a tool for improving the quality of medical care: a review. *Laser Medicine*. 2021;25(4):42–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.37895/2071-8004-2021-25-4-42-50>.
21. Tow DH, Chan CH, Howe JR, Ear PH. Aluminoscent sensor for investigating serotonin metabolism in neuroendocrine cancer. *Surgery*. 2024;175(3):726–734. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2023.09.018>.
 22. Lam SE, Mat Nawi SN, Abdul Sani SF, Khandaker MU, Bradley DA. Raman and photoluminescence spectroscopy analysis of gamma irradiated human hair. *Sci Rep*. 2021;11(1):7939. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86942-4>.
 23. Pur MRK, Hosseini M, Faridbod F, Ganjali MR. Highly sensitive label-free electrochemiluminescence aptasensor for early detection of myoglobin, a biomarker for myocardial infarction. *Microchim Acta*. 2017;184:3529–3537. <https://doi.org/10.1007/s00604-017-2385-y>.
 24. Inman JL, Wu Y, Chen L, Brydon E, Ghosh D, Wan KH et al. Long-term, non-invasive FTIR detection of low-dose ionizing radiation exposure. *Sci Rep*. 2024;14(1):6119. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56491-7>.
 25. Shang L, Nienhaus GU. In Situ Characterization of Protein Adsorption onto Nanoparticles by Fluorescence Correlation Spectroscopy. *Acc Chem Res*. 2017;50(2):387–395. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00579>.
 26. Wu KJ, Wu C, Chen F, Cheng SS, Ma DL, Leung CH. Time-Resolved Luminescent High-Throughput Screening Platform for Lysosomotropic Compounds in Living Cells. *ACS Sens*. 2021;6(1):166–174. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c02046>.
 27. Еремеев АВ, Пикина АС, Владимировича ТВ, Богомазова АН. Методы оценки жизнеспособности клеток, культивируемых *in vitro* в 2D и 3D-структурах. *Гены и клетки*. 2023;18(1):5–21. <https://doi.org/10.23868/gc312198>.
 28. Еремеев АВ, Пикина АС, Владимировича ТВ, Богомазова АН. Methods for assessing the viability of cells cultured *in vitro* in 2D and 3D structures. *Genes and Cells*. 2023;18(1):5–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.23868/gc312198>.
 28. Афанасьева АН, Сапарова ВБ, Сельменских ТА, Макаренко ИЕ. Выбор оптимального метода детекции жизнеспособности клеточных культур для тестов на пролиферативную активность и цитотоксичность. *Лабораторные животные для научных исследований*. 2021;(2):16–24. <https://doi.org/10.29296/2618723X-2021-02-03>.
 29. Афанасьева АН, Сапарова ВБ, Сельменских ТА, Макаренко ИЕ. Optimal choice method of detection of the viability of cell cultures for tests on proliferation and cytotoxicity. *Laboratory Animals for Scientific Research*. 2021;(2):16–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.29296/2618723X-2021-02-03>.
 29. Ваганов АГ, Кузнецов МР, Артыков АВ, Анисимова АВ, Насритдинходжаев АО. О точном определении уровня ампутации нижних конечностей с помощью фотолуминесцентной спектроскопии. *Казанский медицинский журнал*. 2025;106(1):129–138. <https://doi.org/10.17816/KMJ642025>.
 30. Ваганов АГ, Кузнецов МР, Артыков АВ, Анисимова АВ, Насритдинходжаев АО. Determining the precise level of lower limb amputation using photoluminescence spectroscopy. *Kazan Medical Journal*. 2025;106(1):129–138. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/KMJ642025>.
 30. Илюхин ЕА, Булатов ВЛ, Гальченко МИ. Точность и воспроизводимость измерения площади фантомных поражений кожи неправильной формы с помощью мобильного приложения LesionMeter. *Флебология*. 2020;14(4):266–274. <https://doi.org/10.17116/flebo202014041266>.
 31. Илюхин ЕА, Булатов ВЛ, Гальченко МИ. Reliability and Accuracy of Measuring the Surface Area of Phantom Skin Lesions with Lesionmeter Mobile Application. *Flebologiya*. 2020;14(4):266–274. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/flebo202014041266>.
 31. Heuvelings DJI, Scheepers MHMC, Al-Difaie Z, Okamoto N, Diana M, Stassen LPS et al. Quantitative analysis of intestinal perfusion with indocyanine green (ICG) and methylene blue (MB) using a single clinically approved fluorescence imaging system: a demonstration in a porcine model. *Surg Endosc*. 2024;38(7):3556–3563. <https://doi.org/10.1007/s00464-024-10864-1>.
 32. Quang TT, Wei CF, Walsh SA, Papay FA, Liu Y. Real-time tissue perfusion assessment using fluorescence imaging topography scanning system: A preclinical investigation. *Lasers Surg Med*. 2022;54(7):994–1001. <https://doi.org/10.1002/lsm.23560>.
 33. Yeung TM. Fluorescence imaging in colorectal surgery. *Surg Endosc*. 2021;35(9):4956–4963. <https://doi.org/10.1007/s00464-021-08534-7>.

Вклад авторов:

Концепция статьи – А.Г. Ваганов
 Концепция и дизайн исследования – А.Г. Ваганов, А.Д. Асланов
 Написание текста – А.Г. Ваганов, А.А. Шоно
 Сбор и обработка материала – А.А. Шоно
 Обзор литературы – А.Г. Ваганов, А.А. Шоно
 Анализ материала – А.Д. Асланов
 Статистическая обработка – А.А. Шоно
 Редактирование – А.А. Шоно
 Утверждение окончательного варианта статьи – А.Д. Асланов

Contribution of authors:

Concept of the article – Aleksey G. Vaganov
 Study concept and design – Aleksey G. Vaganov, Akhmed D. Aslanov
 Text development – Aleksey G. Vaganov, Arsby A. Shono
 Collection and processing of material – Arsby A. Shono
 Literature review – Aleksey G. Vaganov, Arsby A. Shono
 Material analysis – Akhmed D. Aslanov
 Statistical processing – Arsby A. Shono
 Editing – Arsby A. Shono
 Approval of the final version of the article – Akhmed D. Aslanov

Информация об авторах:

Ваганов Алексей Геннадьевич, к.м.н., доцент кафедры госпитальной хирургии Медицинской академии, Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова; 360004, Россия, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, ул. Чернышевского, д. 173; aleksejvaganov4@gmail.com

Шоно Арсби Ахмат, заведующий кафедрой международного медицинского образования Медицинского института, Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова; 364093, Россия, Чеченская Республика, Грозный, ул. Шарипова, д. 32; shonoarsby@yahoo.com

Асланов Ахмед Дзенович, д.м.н., профессор, заведующий кафедрой госпитальной хирургии Медицинской академии, Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова; 360004, Россия, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, ул. Чернышевского, д. 173; dr-aslanov1967@mail.ru

Information about the authors:

Aleksey G. Vaganov, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor of the Department of Hospital Surgery, Medical Academy, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; 173, Chernyshevsky St, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russia; aleksejvaganov4@gmail.com

Arsby A. Shono, Head of the Department of International Medical Education, Medical Institute, Kadyrov Chechen State University; 32, Sharipov St, Grozny, Chechen Republic, 364093, Russia; shonoarsby@yahoo.com

Akhmed D. Aslanov, Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Hospital Surgery, Medical Academy, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; 173, Chernyshevsky St, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russia; dr-aslanov1967@mail.ru