

Оригинальная статья / Original article

Инвазивная люминесцентная спектроскопия в определении хирургической тактики при ампутации нижней конечности

А.Г. Ваганов^{1✉}, <https://orcid.org/0000-0001-8191-2551>, aleksejvaganov4@gmail.comМ.Р. Кузнецов², <https://orcid.org/0000-0001-6926-6809>, mrkuznetsov@mail.comА.Н. Косенков³, <https://orcid.org/0000-0002-6975-5802>, alenkos@rambler.ruД.А. Лисицкий¹, <https://orcid.org/0000-0003-0423-8879>, dalis@rambler.ru¹ Городская клиническая больница №29 имени Н.Э. Баумана; 111020, Россия, Москва, Госпитальная площадь, д. 2² Институт кластерной онкологии имени профессора Л.Л. Левшина Первого Московского государственного медицинского университета имени И.М. Сеченова; 119435, Россия, Москва, Пироговский пер., д. 6, стр. 1³ Институт клинической медицины имени Н.В. Склифосовского Первого Московского государственного медицинского университета имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет); 119992, Россия, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2

Резюме

Введение. В настоящее время в связи с ростом ампутаций актуальным становится снижение их уровня для лучшей реабилитации больных.

Цель. Оценить результаты применения метода инвазивной фотолюминесцентной спектроскопии для определения уровня ампутации конечности.

Материалы и методы. В проспективном, открытом, нерандомизированном исследовании приняли участие 24 человека с клинической картиной критической ишемии нижних конечностей после эндоваскулярной реконструкции. По поводу гангрены стопы на 6–7-е сут. пациентам была выполнена ампутация на уровне верхней трети голени. Наблюдение за пациентами осуществлялось в течение 1 мес. Все пациенты были разделены на 2 группы. 1-ю группу ($n = 10$) составили пациенты, у которых осложнений после ампутации не отмечалось, 2-ю группу ($n = 14$) – пациенты, у которых зафиксированы осложнения со стороны культи. У всех пациентов проводилось измерение фотолюминесценции пораженной конечности по предложенной нами методике на уровне будущей ампутации. Результаты исследования были представлены в виде среднего значения, стандартного отклонения или медианы и 25-го, 75-го перцентилей.

Результаты. Интенсивность свечения была выше во 2-й группе исследования, где позже развились различные осложнения. При сопоставлении интенсивности фотолюминесценции с площадью некротически измененных мышечных волокон, выявленных при микроскопии, отмечается прямая зависимость между этими двумя показателями. Выявлено увеличение в 11 раз количества некротически измененных волокон при интенсивности люминесценции выше $10\,000 \times 10^5$ фотонов.

Обсуждение. При увеличении степени кровоснабжения, снижении степени ишемизации тканей наблюдались падение интенсивности люминесценции на пиках никотинамиддинуклеотида и более интенсивная редукция сигнала на частоте гематопорфиринов. Эти обстоятельства объясняют уменьшение амплитуды свечения при движении измерительной иглы от поверхности кожи вглубь и приближении ее к магистральным артериям.

Выводы. Люминесцентная спектроскопия является методом выбора для определения уровня ампутации нижней конечности.

Ключевые слова: ампутация, фотолюминесцентная спектроскопия, сосудистая реконструкция, критическая ишемия нижних конечностей, некроз тканей, морфометрия некротизированных тканей, уровень ампутации

Для цитирования: Ваганов АГ, Кузнецов МР, Косенков АН, Лисицкий ДА. Инвазивная люминесцентная спектроскопия в определении хирургической тактики при ампутации нижней конечности. *Амбулаторная хирургия*. 2025;22(1):198–205. <https://doi.org/10.21518/akh2025-004>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Invasive luminescent spectroscopy in determining surgical tactics in lower limb amputation

Aleksey G. Vaganov^{1✉}, <https://orcid.org/0000-0001-8191-2551>, aleksejvaganov4@gmail.comMaxim R. Kuznetsov², <https://orcid.org/0000-0001-6926-6809>, mrkuznetsov@mail.comAlexandr N. Kosenkov³, <https://orcid.org/0000-0002-6975-5802>, alenkos@rambler.ruDmitriy A. Lisitskiy¹, <https://orcid.org/0000-0003-0423-8879>, dalis@rambler.ru

¹ Bauman City Clinical Hospital No. 29; 2, Gospitalnaya Square, Moscow, 111020, Russia

² Levshin Institute of Cluster Oncology of the Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University); 6, Bldg. 1, Pirogovsky Lane, Moscow, 119435, Russia

³ Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine of the Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University); 8, Bldg. 2, Trubetskaya street, Moscow, 119992, Russia

Abstract

Introduction. Currently, due to the increase in amputations, it is becoming relevant to reduce its level for better rehabilitation of patients.

Aim. To evaluate the results of the use of invasive photoluminescence spectroscopy to determine the level of limb amputation.

Materials and methods. A prospective, open-ended, non-randomized study involved 24 people with a clinical picture of KINK after endovascular reconstruction. For gangrene of the foot, amputation was performed at the level of the upper third of the lower leg on day 6–7. The patients were monitored during 1 turnout. All patients were divided into 2 groups. Group 1 (n = 10) consisted of patients who had no complications after amputation, group 2 (n = 14) – who had complications from the stump. In all patients, photoluminescence measurements of the affected limb were performed according to our proposed method at the level of future amputation. The results of the study were presented in the form of an average value, standard deviation or median and the 25th, 75th percentiles.

Results. The intensity of the glow was higher in the second group of the study, where various complications later developed. When comparing the intensity of photoluminescence with the area of necrotically altered muscle fibers detected by microscopy, a direct relationship between these two indicators is noted. An 11-fold increase in the number of necrotically altered fibers was revealed at luminescence intensity above $10,000 \times 10^5$ photons.

Discussion. With an increase in the degree of blood supply, a decrease in the degree of tissue ischemia, a decrease in the luminescence intensity at the nicotinamide dinucleotide peaks and a more intense signal reduction at the hematoporphyrin frequency were observed. These circumstances explain the decrease in the amplitude of the glow as the measuring needle moves from the surface of the skin deeper into the skin and approaches the main arteries.

Conclusions. Luminescent spectroscopy is the method of choice for determining the level of amputation of the lower limb.

Keywords: amputation, photoluminescent spectroscopy, vascular reconstruction, critical ischemia of the lower extremities, tissue necrosis, morphometry of necrotic tissues, amputation level

For citation: Vaganov AG, Kuznetsov MR, Kosenkov AN, Lisitskiy DA. Invasive luminescent spectroscopy in determining surgical tactics in lower limb amputation. *Ambulatornaya Khirurgiya*. 2025;22(1):198–205. (In Russ.) <https://doi.org/10.21518/akh2025-004>.

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время как в России, так и во всем мире наметилась тенденция к росту количества ампутаций нижних конечностей [1–3]. Основной причиной ампутаций является облитерирующий атеросклероз артерий нижних конечностей (90%, по данным TASK-II, 2007 г.) [4–6]. Крайней степенью развития данного заболевания является критическая ишемия нижних конечностей (КИНК), по поводу которой, при естественном развитии процесса, в течение первого года выполняется четверть всех высоких ампутаций [7–10]. Данный тренд не может изменить даже быстрое и высокотехнологичное развитие ангиохирургии. Высокие ампутации приводят к инвалидизации пациентов, у 25% из которых наступает летальный исход в течение первого года после операции [1, 4, 5, 8]. Протезирование конечности в данном случае используют лишь 9–30% больных [5]. Снижение летальности пациентов и улучшение качества протезирования достигаются снижением уровня ампутации, что является ключевой задачей ангиохирургии облитерирующего атеросклероза артерий нижних конечностей [6–7]. Немаловажным в сохранении конечности является определение уровня некроза ткани.

Известно, что щадящие ампутации на уровне голени с сохранением коленного сустава в половине случаев ведут к гнойно-некротическим осложнениям культи, а в 16% – к реампутации конечности [11–15]. В этой связи хирурги зачастую выбирают более надежные варианты ампутации на уровне бедра, дающие низкий процент осложнений. В настоящее время отсутствуют четкие методики диагностики границы некротизированных и условно здоровых тканей [13]. Исследования сосудистого кровотока, такие как ультразвуковая доплерография, рентгеноконтрастная ангиография, магнитно-резонансная ангиография, с высокой долей вероятности позволяют оценить кровоток в том или ином сосудистом бассейне, однако не позволяют понять степень структурной дегенерации ткани в условиях КИНК [16–20]. Одним из способов определения микроциркуляции является чрескожное определение парциального давления кислорода в тканях при нагревании до 44–45°. Однако полученные результаты являются довольно относительными и не оценивают всей глубины биохимических сдвигов при критической ишемии [21–22]. Также используются методики радиотермометрии конечности и определения импеданса тканей с целью выявления

границ ишемии и некроза [23–24]. Наиболее информативной методикой определения уровня ампутации в настоящий момент является сцинтиграфия с изотопом ^{99}Tc , позволяющая определить некроз тканей по уровню накопления ими этого изотопа [25]. Но данное исследование является продолжительным по времени, труднодоступным и дорогостоящим. В этой связи разработка новых методов определения границы некротизированной и здоровой ткани в рамках выбора уровня предполагаемой ампутации является актуальной задачей современной медицины.

Цель исследования – оценка результатов применения метода инвазивной ультрафиолетовой фотOLUMИнесцентной спектроскопии для определения уровня ампутации конечности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В проспективном, открытом, нерандомизированном исследовании приняли участие 24 человека с клиническим диагнозом «облитерирующий атеросклероз артерий нижних конечностей; окклюзия поверхностной бедренной артерии (ПБА), подколенной артерии (ПКА), артерий голени; критическая ишемия левой нижней конечности; сухая гангрена стопы». Средний возраст пациентов составил 66 (62,2; 74,8) лет. По сопутствующей патологии все пациенты были компенсированы и сопоставимы. Всем пациентам в течение текущей госпитализации выполнялась балонная ангиопластика (БАП) артерий голени. Все операции прошли технически успешно. Тромбозов зон реконструкции не отмечалось. В послеоперационном периоде все получали двойную антиагрегантную терапию (ацетилсалициловую кислоту 100 мг/сут + клопидогрел 75 мг/сут). По поводу гангрены стопы на 6–7-е сут. пациентам была выполнена ампутация на уровне верхней трети голени ниже коленного сустава. В дальнейшем наблюдение за пациентами осуществлялось в течение 1 мес. с еженедельными явками на прием с целью перевязок и осмотра ампутационной культи. В результате все пациенты были разделены на 2 группы: 1-ю группу ($n = 10$) составили пациенты, у которых осложнений после ампутации не отмечалось, 2-ю группу ($n = 14$) – пациенты, у которых отмечались осложнения со стороны культи.

Необходимо отметить, что от момента поступления до хирургического вмешательства пациенты были всесторонне обследованы, включая полный лабораторный скрининг, электрокардиографию, ультразвуковое ангиосканирование артерий нижних конечностей, эхокардиографию, осмотр кардиолога и терапевта. Средний койко-день у пациентов составил 14 (12; 16) дней.

У всех пациентов интраоперационно во время сосудистого этапа операции и перед выполнением ампутации проводилось измерение фотOLUMИнесценции пораженной конечности по предложенной нами методике на уровне верхней трети голени по задней поверхности в проекции икроножной мышцы. В проведенном исследовании был применен метод лазерно-индуцированной ультрафиолетовой фотOLUMИнесцентной спектроскопии с использованием прибора, состоявшего из источника лазерного излучения (диодный лазер) и миниспектрометра, который является средством регистрации этого сигнала. Доставка излучения и снятие показаний индуцированной люминесценции проводились с использованием двух кварцевых волокон, смонтированных в одном зонде, с диаметром сердцевины 450 мкм [26]. Головка зонда соединялась с металлической иглой, которая предварительно была простерилизована. Игла вводилась в икроножную мышцу на глубину 3 см с шагом 0,5 см, на котором производилось снятие показаний. Накачка лазером проводилась на длине волны импульсного излучения диодного лазера 308 нм в течение 20 сек. Спектр люминесценции фиксировался в диапазоне от 350 до 780 нм, с шагом 10 нм, в течение 20 сек. Необходимо отметить, что каждый элемент или химическое соединение имеет уникальный спектр свечения при накачке лазером на определенной длине волны. Особенностью данного метода является высокая чувствительность измерения, которая зависит от концентрации в цитоплазме клеток веществ-люминофоров. Последними, при преобладании процессов катаболизма в клетках, в случае их деструкции являются в большей степени никотинамиддинуклеотид (НАДН) и никотинамиддинуклеотидфосфат (НАДНФ) (пики при измерении на частоте 380 нм и 450 нм), в меньшей степени – каротин и флавины. Необходимо отметить, что веществами-гасителями люминесценции являются гемоглобин и его производные (оксигемоглобин, хемогемоглобин). При измерениях отмечаются отрицательные пики резорбции сигнала на частоте 420 нм. Данные вещества приводят к снижению интенсивности люминесценции [27–30]. Измерения на конечности проходили от зоны критической ишемии на стопе с шагом 1 см в проксимальном направлении по передней, задней и боковым поверхностям. В результате суммарно было получено около 3 000 измерений люминесцентного сигнала в каждой группе исследования. Уровень ампутации был выбран в связи с успешной реваскуляризацией артерий голени во время эндоваскулярного этапа. Далее ампутированные конечности были отправлены на гистологию. Из зоны интраоперационной пункции с целью измерения люминесценции бралась гистология

мышечных волокон. Биоптаты волокон фиксировались в нейтральном растворе 10%-ного формалина не менее 2 ч. В дальнейшем изготавливались парафиновые срезы, препараты окрашивались гематоксилином и эозином. Выраженность некротических изменений количественно определялась по площади детрита (мм^2) относительно элементов здоровой соединительной ткани в одном поле зрения.

Статистический анализ

Для статистической обработки данных при сравнении групп исследования было использовано программное обеспечение SPSS 17.0. Результаты также были представлены в виде среднего значения, стандартного отклонения или медианы и 25-го, 75-го процентилей. Для количественных показателей предварительно проводился анализ соответствия распределения нормальному закону по критерию Шапиро – Уилка. Различия количественных показателей между группами оценивали с помощью непараметрического критерия Краскела – Уоллиса. Различия считали значимыми при достигнутом уровне $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При интраоперационном измерении интенсивности фотолюминесценции перед сосудистым этапом различия в группах исследования отсутствовали. Необходимо отметить, что во всех группах исследования присутствовала одинаковая тенденция, заключающаяся в уменьшении интенсивности фотолюминесценции при измерениях от поверхности в глубину мягких

тканей. При интраоперационных измерениях фотолюминесценции непосредственно перед ампутацией ее амплитуда в группах исследования достоверно различалась ($p < 0,05$) (табл. 1). Интенсивность свечения была выше во 2-й группе исследования, где позже развились различные гнойно-некротические осложнения. При сопоставлении интенсивности фотолюминесценции с площадью некротически измененных мышечных волокон, выявленных при микроскопии, отмечается прямая зависимость между этими двумя показателями. Чем выше интенсивность люминесценции, тем больше площадь деструкции мышечных волокон при морфометрии. Необходимо отметить резкий рост количества некротически измененных клеточно-тканевых комплексов при микроскопии, при интенсивности люминесценции выше $10\,000 \times 10^5$ фотонов. При превышении этого показателя площадь деструктивно измененных тканей возрастает в 11 раз.

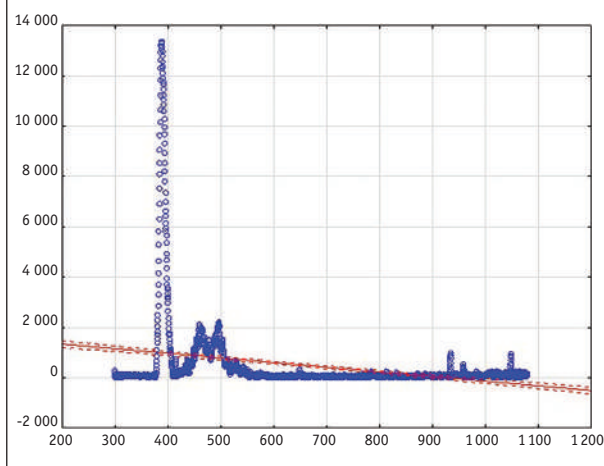
В гистологических препаратах, выполненных из ампутированных конечностей, в 1-й группе исследования также отмечается наличие некротических волокон в зоне, где проходило измерение люминесценции. Но их значение не превышало $0,04 \text{ мм}^2$. Среди спектра осложнений после ампутации во 2-й группе исследования 80% занимают гнойные осложнения культи, которые требовали некрэктомии и длительных перевязок. Только 20% пациентов в течение первого месяца были повторно госпитализированы, им была выполнена реампутация. При сравнении интенсивности люминесценции, при измерениях, выполненных во время первой госпитализации, у пациентов с различными осложнениями

Таблица 1. Результаты измерения фотолюминесценции и результаты гистологии в группах исследования

Table 1. Photoluminescence measurement results and histology results in study groups

Глубина измерения, см	Статистические показатели							
	№ группы	Среднее значение	Медиана	Минимум	Максимум	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Средняя площадь деструкции волокон, мм^2
0,5	1-я группа	8 714,18	7 366,70	5,8500	21 229,08	3 197,570	14 275,14	0,04 (0,03; 0,04)
1,0		8 349,06	7 279,49	3,4700	19 539,36	3 134,070	13 655,86	0,03 (0,025; 0,035)
1,5		7 337,21	6 374,69	0,3100	17 205,79	2 644,650	11 832,03	0,02 (0,02; 0,03)
2,0		6 216,66	5 010,62	8,9900	16 002,79	1 570,493	10 728,56	0,01 (0,01; 0,02)
2,5		4 384,56	3 627,72	0,4800	13 941,05	955,765	7 165,16	0,015 (0,01; 0,03)
3,0		1 332,86	474,30	0,1400	13 341,51	146,835	1 307,48	0,00
0,5	2-я группа	20 146,31	18 363,91	217,1100	43 739,86	8 625,420	31 363,19	0,8 (0,76; 0,83)
1,0		15 380,97	15 146,63	141,8800	35 518,66	6 658,295	24 843,79	0,68 (0,62; 0,71)
1,5		13 240,58	11 671,12	40,1900	29 905,58	5 528,445	21 152,06	0,58 (0,55; 0,64)
2,0		10 961,99	10 042,27	176,3400	24 981,13	5 487,250	10 167,79	0,44 (0,43; 0,45)
2,5		8 794,16	7 835,83	7,6800	18 442,48	4 049,285	13 715,56	0,04 (0,02; 0,05)
3,0		4 352,81	3 351,66	0,0000	14 965,46	2 278,290	5 607,58	0,01 (0,01; 0,18)

Рисунок 1. Спектр фотолюминесценции при измерении в области гангренозно измененных тканей
Figure 1. Photoluminescence spectrum when measured in the area of gangrenously altered tissues



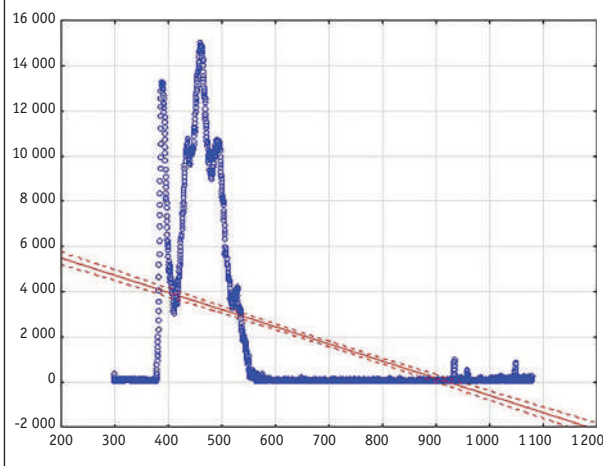
после ампутации достоверных различий не выявляется. Спектр фотолюминесценции у пациентов с максимальной площадью деструктивных волокон по результатам микроскопии имеет принципиальное отличие (рис. 1).

При измерении в зоне некроза отмечается минимальная интенсивность свечения в диапазоне от 400 до 600 нм. При этом основной пик НАДФ на частоте 380 нм резко выражен ввиду большой концентрации продуктов клеточного распада. В зоне некробиоза или критической ишемии мышечных тканей мы видим ярко выраженный отрицательный пик гематопорфиринов за счет резорбции люминесцентного сигнала на фоне двухпикового максимума НАДФ (380 нм и 450 нм), что характеризует хорошее состояние микроциркуляторного русла в зоне измерения (рис. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенного нами исследования метод фотолюминесцентной спектроскопии показал свою действенность при определении границы между некротическими и ишемизированными тканями. При увеличении степени кровоснабжения, снижении степени ишемизации тканей наблюдались падение интенсивности люминесценции на пиках НАДФ и более интенсивная редукция сигнала на частоте гематопорфиринов. Эти обстоятельства объясняют уменьшение амплитуды свечения при движении измерительной иглы от поверхности кожи вглубь и приближении ее к магистральным артериям. Также было установлено, что интенсивность люминесцентного сигнала прямо коррелирует с количеством некротически измененных клеточно-тканевых комплексов в зоне измерения,

Рисунок 2. Спектр фотолюминесценции при измерении в области критической ишемии тканей
Figure 2. Photoluminescence spectrum measured in the area of critical tissue ischemia



что было определено гистологически. Было установлено, что при превышении интенсивности свечения в $10\,000 \times 10^5$ фотонов количество деструктивных изменений в тканях резко возрастает. При сравнении интенсивности фотолюминесценции в группах исследования в зоне предполагаемой ампутации непосредственно перед началом операции был выявлен достоверно более высокий уровень свечения ($p < 0,05$) в группе, где позже отмечались гнойно-некротические изменения культи и требовалась реампутация. Более того, порог в $10\,000 \times 10^5$ фотонов был преодолен в этой группе уже на глубине 0,5 см. Таким образом, площадь распада тканей и концентрация его продуктов, прежде всего НАДН и его фосфата, а также снижение концентрации гемоглобина, резорбирующего сигнал, позволили с точностью до 0,5 см определиться с зоной измененных тканей, где микроциркуляторное русло полностью закрыто, и масштаб деструктивных изменений уже необратим. Важное значение имеют спектральные характеристики полученного люминесцентного сигнала при измерении в зоне некроза. Амплитуда люминесценции падает здесь практически до нуля, отсутствуют второй пик НАДН и отрицательный пик гемоглобина, что характеризуется абсолютной гибелью клеток. Таким образом, метод фотолюминесцентной спектроскопии дает понимание структурного состояния клеточно-тканевых ансамблей в зоне предполагаемой ампутации, чего не дают такие методы, как ультразвуковая доплерография, резонансная ангиография либо измерение парциального давления кислорода. Именно концентрация ключевых люминофоров, которые связаны непосредственно с клеточной

деструкцией, дает точное понимание морфофункционального состояния тканей, а люминесцентный сигнал очень чувствителен к их концентрации, что позволяет проводить измерения с точностью до 1–2 мм.

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод, что люминесцентная спектроскопия является методом выбора для определения уровня ампутации нижней конечности. При достижении интенсивности люминесценции (при измерении диодным лазером) выше $10\,000 \times 10^5$ фотонов

деструктивные процессы в клетках и тканях становятся необратимыми, а ампутация, проведенная на уровне конечности с такой интенсивностью свечения, вероятно, приведет к послеоперационным осложнениям. Данные выводы, безусловно, верны лишь в первом приближении, для уточнения точности и специфичности данного метода необходимы исследования на большой выборке пациентов.

Поступила / Received 28.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 13.01.2025

Принята в печать / Accepted 21.01.2025

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kwah LK, Webb MT, Goh L, Harvey LA. Rigid dressings versus soft dressings for transtibial amputations. *Cochrane Database Syst Rev*. 2019;6(6):CD012427. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD012427.pub2>.
2. Fard B, Persoon S, Jutte PC, Daemen JHC, Lamprou DA, Hoop WT et al. Amputation and prosthetics of the lower extremity: The 2020 Dutch evidence-based multidisciplinary guideline. *Prosthet Orthot Int*. 2023;47(1):69–80. <https://doi.org/10.1097/PXR.000000000000170>.
3. Ülger Ö, Yıldırım Şahan T, Çelik SE. A systematic literature review of physiotherapy and rehabilitation approaches to lower-limb amputation. *Physiother Theory Pract*. 2018;34(11):821–834. <https://doi.org/10.1080/09593985.2018.1425938>.
4. Davie-Smith F, Coulter E, Kennon B, Wyke S, Paul L. Factors influencing quality of life following lower limb amputation for peripheral arterial occlusive disease: A systematic review of the literature. *Prosthet Orthot Int*. 2017;41(6):537–547. <https://doi.org/10.1177/0309364617690394>.
5. Dupuis F, Ginis KAM, MacKay C, Best KL, Blanchette V, Cherif A et al. Do Exercise Programs Improve Fitness, Mobility, and Functional Capacity in Adults With Lower Limb Amputation? A Systematic Review on the Type and Minimal Dose Needed. *Arch Phys Med Rehabil*. 2024;105(6):1194–1211. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2023.10.011>.
6. Вачёв АН, Михайлов МС, Сухоруков ВВ, Суркова ЕА, Гуреев АД, Кругомов АВ, Черновалов ДА. Хирургическое лечение больных с сочетанием критической ишемии нижних конечностей при поражении аорто-подвздошного сегмента и ишемической болезни сердца. *Патология кровообращения и кардиохирургия*. 2013;17(1):73–78. <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2013-1-73-78>.
7. Vachev AN, Mikhailov MS, Sukhorukov VV, Surkova EA, Gureyev AD, Kugomov AV, Chernovalov DA. Surgical treatment of patients with critical ischemia of lower limbs originating from aortoiliac lesions and concomitant coronary artery disease. *Patologiya Kровоobrashcheniya i Kardiokhirurgiya*. 2013;17(1):73–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2013-1-73-78>.
8. Jaff MR, White CJ, Hiatt WR, Fowkes GR, Dormandy J, Razavi M et al. An Update on Methods for Revascularization and Expansion of the TASC Lesion Classification to Include Below-the-Knee Arteries: A Supplement to the Inter-Society Consensus for the Management of Peripheral Arterial Disease (TASC II). *Vasc Med*. 2015;20(5):465–478. <https://doi.org/10.1177/1358863X15597877>.
9. Davie-Smith F, Paul L, Nicholls N, Stuart WP, Kennon B. The impact of gender, level of amputation and diabetes on prosthetic fit rates following major lower extremity amputation. *Prosthet Orthot Int*. 2017;41(1):19–25. <https://doi.org/10.1177/0309364616628341>.
10. Ahn J, Raspoic KM, Liu GT, Lavery LA, La Fontaine J, Nakonezny PA, Wukich DK. Lower Extremity Necrotizing Fasciitis in Diabetic and Nondiabetic Patients: Mortality and Amputation. *Int J Low Extrem Wounds*. 2019;18(2):114–121. <https://doi.org/10.1177/1534734619836464>.
11. Penn-Barwell JG. Outcomes in lower limb amputation following trauma: a systematic review and meta-analysis. *Injury*. 2011;42(12):1474–1479. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2011.07.005>.
12. Zambetti BR, Stiles ZE, Gupta PK, Stickley SM, Brahmabhatt R, Rohrer MJ, Kempe K. Analysis of Early Lower Extremity Re-amputation. *Ann Vasc Surg*. 2022;81:351–357. <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2021.10.030>.
13. Berli MC. Mid- and Hindfoot Amputations in Diabetic Patients. *Foot Ankle Clin*. 2022;27(3):687–700. <https://doi.org/10.1016/j.fcl.2022.05.004>.
14. Косенков АН, Винокуров ИА, Киселева АК. Лечение критической ишемии нижних конечностей с язвенно-некротическими поражениями. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2019;12(4):302–307. <https://doi.org/10.17116/kardio201912041302>.
15. Kosenkov AN, Vinokurov IA, Kiseleva AK. Treatment of critical lower limb ischemia followed by ulcerative-necrotic lesions. *Kardiologiya i Serdechno-Sosudistaya Khirurgiya*. 2019;12(4):302–307. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/kardio201912041302>.
16. Cheun TJ, Jayakumar L, Sideman MJ, Ferrer L, Mitromaras C, Miserlis D, Davies MG. Short-term contemporary outcomes for staged versus primary lower limb amputation in diabetic foot disease. *J Vasc Surg*. 2020;72(2):658–666.e2. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2019.10.083>.
17. Папоян СА, Щеголев АА, Громов ДГ, Асатурян КС. Ангиопластика баллонными катетерами с лекарственным покрытием при заболеваниях артерий нижних конечностей. *РМЖ. Медицинское обозрение*. 2022;6(4):177–181. <https://doi.org/10.32364/2587-6821-2022-6-4-177-181>.
18. Papoyan SA, Shchegolev AA, Gromov DG, Asaturyan KS. Drug-coated balloon angioplasty in peripheral arterial disease. *RMJ. Medical Review*. 2022;6(4):177–181. (In Russ.) <https://doi.org/10.32364/2587-6821-2022-6-4-177-181>.
19. Norvell DC, Henderson AW, Halsne EG, Morgenroth DC. Predicting Functional Outcomes Following Dysvascular Lower Limb Amputation: An Evidence Review of Personalizing Patient Outcomes. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2024;35(4):833–850. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2024.06.005>.
20. Gwilym BL, Pallmann P, Waldron CA, Thomas-Jones E, Milosevic S, Brookes-Howell L et al. Long-term risk prediction after major lower limb amputation: 1-year results of the PERCEIVE study. *BJS Open*. 2024;8(1):zrad135. <https://doi.org/10.1093/bjsopen/zrad135>.
21. Iida O, Nakamura M. Reply: 3-year outcome of the OLIVE Registry, a prospective multicenter study of patients with critical limb ischemia. *JACC Cardiovasc Interv*. 2015;8(11):1493–1502. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2015.07.005>.
22. Белов ЮВ, Винокуров ИА. Концепция подхода к хирургическому лечению критической ишемии нижних конечностей. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2015;8(5):9–13. <https://doi.org/10.17116/kardio2015859-13>.
23. Belov YuV, Vinokurov IA. The concept of surgical treatment of critical limb ischemia. *Kardiologiya i Serdechno-Sosudistaya Khirurgiya*. 2015;8(5):9–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/kardio2015859-13>.

20. Musial DC, Irigaray MEL, Gerber LC, Lenz GB, Echterhoff CFM, Plinta LAK et al. Risk Factors for Early Lower Limb Re-Amputation in Vascular Diseases. *Ann Vasc Surg.* 2024;107:208–213. <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2024.02.001>.
21. Al-Saadi N, Al-Hashimi K, Popplewell M, Fabre I, Gwilym BL, Hitchman L et al. The incidence of surgical site infection following major lower limb amputation: A systematic review. *Int Wound J.* 2024;21(7):e14946. <https://doi.org/10.1111/iwj.14946>.
22. Малахов ЮС, Батрашов ВА, Ференец МВ, Гончаров ЕА, Костина ЕВ, Фархутдинов ФФ. Прогностическая значимость показателей чрескожного наружного давления кислорода после реваскуляризации у больных с язвенно-некротическими поражениями нижних конечностей. *Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова.* 2015;10(3):32–35. Режим доступа: https://www.pirogov-vestnik.ru/upload/uf/e7d/magazine_2015_3.pdf.
Malahov YuS, Batrashov VA, Ferenec MV, Goncharov EA, Kostina EV, Farhutdinov FF. Prognostic value of transcutaneous oxygen pressure outdoor after revascularization in patients with ulcer-necrotic lesions lower limb. *Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center.* 2015;10(3):32–35. (In Russ.) Available at: https://www.pirogov-vestnik.ru/upload/uf/e7d/magazine_2015_3.pdf.
23. Маликов ВН, Шмыкова ПА, Фадеев ДА, Войнаш СА, Соколова ВА. Изучение дисперсии импеданса биологических тканей. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2023;(8):245–249. Режим доступа: <https://elibrary.ru/okhcux>.
Malikov VN, Shmykova PA, Fadeev DA, Voinash SA, Sokolova VA. Studying the dispersion of impedance biological tissue. *Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences.* 2023;(8):245–249. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/okhcux>.
24. Волошин ВН, Клецкин АЗ, Корзина ЛН. Возможности радиотермометрии при выборе уровня ампутации нижней конечности и способа ее выполнения у больных с облитерирующими сосудистыми заболеваниями. *Амурский медицинский журнал.* 2018;(3):86–87. Режим доступа: https://amurgma.ru/upload/iblock/95a/256dtimaf7t3pm3aw865aawn09extdql/AMZh_3_2018_27.pdf.
Voloshin VN, Kletskin AE, Korzina LN. The opportunities of radiothermometry at the selection of the level of amputation of the lower limb and the method of its performing in patients with obliterating vascular diseases. *Amur Medical Journal.* 2018;(3):86–87. (In Russ.) Available at: https://amurgma.ru/upload/iblock/95a/256dtimaf7t3pm3aw865aawn09extdql/AMZh_3_2018_27.pdf.
25. Гавриленко АВ, Сандриков ВА, Свищевский ЕБ, Омаржанов ОА. Выбор метода хирургического лечения пациентов с критической ишемией нижних конечностей с использованием методики радиоизотопной сцинтиграфии. *Ангиология и сосудистая хирургия.* 2009;15(3):43–48. Режим доступа: <https://www.angiologysurgery.org/magazine/2009/3/7.htm>.
Gavrilenko AV, Sandrikov VA, Svishchevsky EB, Omarzhanov OA. Surgical decision-making in management of patients with lower limb critical ischaemia using radioisotope scintigraphy. *Angiology and Vascular Surgery.* 2009;15(3):43–48. (In Russ.) Available at: <https://www.angiologysurgery.org/magazine/2009/3/7.htm>.
26. Бункин НФ, Горелик ВС, Козлов ВА, Шкирин АВ, Суязов НВ. Исследование фазовых состояний воды вблизи поверхности полимерной мембраны. Эксперименты по фазовой микроскопии и люминесцентной спектроскопии. *Журнал экспериментальной и теоретической физики.* 2014;146(5):1051–1061. Режим доступа: <https://elibrary.ru/thheyn>.
Bunkin NF, Gorelik VS, Kozlov VA, Shkirin AV, Suyazov NV. Phase states of water near the surface of a polymer membrane. Phase microscopy and luminescence spectroscopy experiments. *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* 2014;146(5):1051–1061. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/thheyn>.
27. Бабкина АС. Лазер-индуцированная флуоресцентная спектроскопия в диагностике тканевой гипоксии. *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>.
28. Vladimirova ES, Salmin VV, Salmina AB, Oskirko SA, Lazarenko VI, Provorov AS. Fluorescence diagnostics of human lens status *in vivo*. *J Appl Spectrosc.* 2012;79(1):135–139. <https://doi.org/10.1007/s10812-012-9573-7>.
29. Ваганов АГ, Ночной МС, Лисицкий ДА, Гавриленко АВ. Определение этапности гибридной реконструкции на артериях нижних конечностей с помощью метода лазериндуцированной ультрафиолетовой фотолуминесцентной спектроскопии. *Наука молодых (Eruditio Juvenium).* 2024;12(2):183–196. Режим доступа: https://naukamolod.rzgm.ru/uploads/art/art724_702ea2.pdf.
Vaganov AG, Nochnoy MS, Lisitskiy DA, Gavrilenko AV. Determination of Stages of Hybrid Reconstruction of Lower Limb Arteries Using Laser-Induced Ultraviolet Photoluminescence Spectroscopy. *Science of the Young (Eruditio Juvenium).* 2024;12(2):183–196. (In Russ.) Available at: https://naukamolod.rzgm.ru/uploads/art/art724_702ea2.pdf.
30. Гунько ВИ, Попов СН, Александров МТ, Пашков ЕП, Быков АС, Иванченко ОН и др. Повышение эффективности диагностики и лечения больных с гнойно-воспалительными заболеваниями на основе применения лазерно-флуоресцентной диагностики. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина.* 2012;(1):93–97. Режим доступа: <https://elibrary.ru/opplbd>.
Gun'ko VI, Popov SN, Alexandrov MT, Pashkov EP, Bikov AS, Ivanchenko ON et al. Improvement of efficiency in diagnostics and management/treatment in patients with purulent diseases on the basis of application of laser fluorescent diagnostics. *RUDN Journal of Medicine.* 2012;(1):93–97. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/opplbd>.

Вклад авторов:

Концепция статьи – А.Г. Ваганов
 Концепция и дизайн исследования – А.Г. Ваганов, М.Р. Кузнецов, А.Н. Косенков
 Написание текста – А.Г. Ваганов, А.Н. Косенков
 Сбор и обработка материала – Д.А. Лисицкий
 Обзор литературы – А.Г. Ваганов, А.Н. Косенков
 Анализ материала – М.Р. Кузнецов, А.Г. Ваганов, А.Н. Косенков
 Статистическая обработка – Д.А. Лисицкий
 Редактирование – М.Р. Кузнецов, А.Н. Косенков
 Утверждение окончательного варианта статьи – М.Р. Кузнецов, А.Г. Ваганов

Contribution of authors:

Concept of the article – Aleksey G. Vaganov
 Study concept and design – Aleksey G. Vaganov, Maxim R. Kuznetsov, Alexandr N. Kosenkov
 Text development – Aleksey G. Vaganov, Alexandr N. Kosenkov

Collection and processing of material – Dmitriy A. Lisitskiy

Literature review – Aleksey G. Vaganov, Alexandr N. Kosenkov

Material analysis – Maxim R. Kuznetsov, Aleksey G. Vaganov, Alexandr N. Kosenkov

Statistical processing – Dmitriy A. Lisitskiy

Editing – Maxim R. Kuznetsov, Alexandr N. Kosenkov

Approval of the final version of the article – Maxim R. Kuznetsov, Aleksey G. Vaganov

Информация об авторах:

Ваганов Алексей Геннадьевич, к.м.н., врач-хирург, хирургическое отделение №1, Городская клиническая больница №29 имени Н.Э. Баумана; 111020, Россия, Москва, Госпитальная площадь, д. 2; aleksejvaganov4@gmail.com

Кузнецов Максим Робертович, д.м.н., профессор, заместитель директора, Институт кластерной онкологии имени профессора Л.Л. Левшина Первого Московского государственного медицинского университета имени И.М. Сеченова; 119435, Россия, Москва, Пироговский пер., д. 6, стр. 1; mrkuznetsov@mail.com

Косенков Александр Николаевич, д.м.н., профессор кафедры госпитальной хирургии Института клинической медицины имени Н.В. Склифосовского Первого Московского государственного медицинского университета имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет); 119992, Россия, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2; alenkos@rambler.ru

Лисицкий Дмитрий Алексеевич, д.м.н., врач – сердечно-сосудистый хирург, хирургическое отделение №1, Городская клиническая больница №29 имени Н.Э. Баумана; 111020, Россия, Москва, Госпитальная площадь, д. 2; dalis@rambler.ru

Information about the authors:

Aleksey G. Vaganov, Cand. Sci. (Med.), Surgeon, Surgical Department No. 1, Bauman City Clinical Hospital No. 29; 2, Gospitalnaya Square, Moscow, 111020, Russia; aleksejvaganov4@gmail.com

Maxim R. Kuznetsov, Dr. Sci. (Med.), Professor, Deputy Director, Levshin Institute of Cluster Oncology of the Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University); 6, Bldg. 1, Pirogovsky Lane, Moscow, 119435, Russia; mrkuznetsov@mail.com

Alexandr N. Kosenkov, Dr. Sci. (Med.), Professor of the Department of Hospital Surgery, Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine of the Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University); 8, Bldg. 2, Trubetskaya street, Moscow, 119992, Russia

Dmitriy A. Lisitskiy, Dr. Sci. (Med.), Cardiovascular Surgeon, Surgical Department No. 1, Bauman City Clinical Hospital No. 29; 2, Gospitalnaya Square, Moscow, 111020, Russia; dalis@rambler.ru