

УДК 616.137.83/93-089.844

<https://doi.org/10.23888/HMJ2024122183-196>

Определение этапности гибридной реконструкции на артериях нижних конечностей с помощью метода лазериндуцированной ультрафиолетовой фотолюминесцентной спектроскопии

А. Г. Ваганов^{1✉}, М. С. Ночной³, Д. А. Лисицкий¹, А. В. Гавриленко^{2,3}

¹ Городская клиническая больница № 29 имени Н. Э. Баумана Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Российская Федерация

² Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского, Москва, Российская Федерация

³ Институт клинической медицины имени Н. В. Склифосовского — Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва, Российская Федерация

Автор, ответственный за переписку: Ваганов Алексей Геннадьевич, aleksejvaganov4@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Основной проблемой, влияющей на эффективность гибридных операций, является этапность выполнения манипуляций в рамках единой реконструкции. Одним из методов, определяющих как проходимость магистральных артерий, так и эффективность реваскуляризации конечности на основании глубины и обратимости ишемических изменений на клеточно-тканевом уровне, является метод УФ-люминесцентной спектроскопии.

Цель. Определить последовательность этапов гибридной реконструкции на артериях нижних конечностей в зависимости от функционального состояния дистального артериального русла, зарегистрированного при помощи метода лазериндуцированной ультрафиолетовой фотолюминесцентной спектроскопии.

Материалы и методы. В исследовании принял участие 51 человек, страдающий критической ишемией нижних конечностей, оперированный в объеме гибридного (одномоментного) вмешательства: стентирования наружной подвздошной артерии и бедренно-подколенного шунтирования в отделении сосудистой хирургии ГКБ № 29 им. Н. Э. Баумана. Все пациенты были разделены на 3 группы. Первую группу (n = 24) составили пациенты, которым первым этапом было выполнено бедренно-подколенное шунтирование, вторым — стентирование наружной подвздошной артерии. Вторую группу (n = 17) составили пациенты, у которых первым этапом было выполнено стентирование наружной подвздошной артерии, вторым этапом в течение первых суток — открытая реконструкция. Третью группу контроля (n = 10) составили пациенты, которым было выполнено только стентирование наружной подвздошной артерии с хорошими послеоперационными результатами. Регистрация хемилюминесценции проводилась с помощью прибора, предложенного И. В. Москаленко. Показатели снимались перед операцией по внутренней поверхности нижней трети бедра, средней трети голени, тыльной поверхности стопы. На 2–5 сутки вышеописанное исследование повторялось. Для статистической обработки данных при сравнении групп исследования было использовано программное обеспечение SPSS Statistics 17.0.

Результаты. При изучении спектра люминесценции в предоперационном периоде отмечен характерный максимум сигнала на длине волны 410 ± 20 нм (пик НАДН и

НАДНФ), сменяющийся его минимумом на длине волны 450 ± 15 нм (пик гемоглобина). Успех артериальной реконструкции наблюдался у 24 человек из первой группы и у 14 человек из второй. У данной категории больных в диапазоне 380–430 нм интенсивность свечения была сопоставима, а на длинах волн 440–460 нм, последняя была достоверно ниже во 2 группе исследования ($p < 0,05$), что говорит о лучшей открытости и компенсации «путей оттока» у представителей данной группы. В послеоперационном периоде у пациентов с успешной реваскуляризацией отмечается снижение интенсивности люминесценции на всех диапазонах измерения, что подтверждает улучшение кровоснабжения конечности. Отмечена сильная положительная корреляционная связь между изменениями лодыжечно-плечевого индекса и амплитудой люминесценции в предоперационном ($r = 0,78$ при $p < 0,0001$) и послеоперационном периоде ($r = 0,75$ при $p < 0,0001$). При росте показателей функционального состояния конечности и артериальной проходимости амплитуда хемилюминесценции снижается. В раннем послеоперационном периоде у 3 пациентов отмечено развитие тромботических осложнений, что сопровождалось повышением амплитуды люминесценции выше $2,5 \times 10^5$ фотон. У пациентов с амплитудой хемилюминесценции перед операцией свыше $0,7 \times 10^5$ фотон (на частоте 410 нм) и свыше $0,5 \times 10^5$ фотон (на частоте 450 нм) требуется первостепенное выполнение открытого этапа с целью коррекции «путей оттока» из-за высокого риска тромботических осложнений. Проводилось сравнение неосложненных случаев из 2 группы с 3 группой исследования, созданной эмпирически. Выведена амплитуда люминесценции перед операцией, при которой отмечена такая тождественность групп на частоте 410 нм, составила $0,35 \pm 0,05 \times 10^5$ фотон, на частоте 450 нм — $0,22 \pm 0,03 \times 10^5$ фотон.

Вывод. Методика лазериндуцированной УФ-люминесцентной спектроскопии позволяет определить состояние «путей оттока» на нижней конечности, что может использоваться в определении этапности гибридной реконструкции на артериях нижних конечностей.

Ключевые слова: критическая ишемия нижних конечностей; гибридные операции; ультрафиолетовая фотолюминесцентная спектроскопия

Для цитирования:

Ваганов А. Г., Ночной М. С., Лисицкий Д. А., Гавриленко А. В. Определение этапности гибридной реконструкции на артериях нижних конечностей с помощью метода лазериндуцированной ультрафиолетовой фотолюминесцентной спектроскопии // Наука молодых (Eruditio Juvenium). 2024. Т. 12, № 2. С. 183–196. <https://doi.org/10.23888/HMJ2024122183-196>.

<https://doi.org/10.23888/HMJ2024122183-196>

Determination of Stages of Hybrid Reconstruction of Lower Limb Arteries Using Laser-Induced Ultraviolet Photoluminescence Spectroscopy

Aleksey G. Vaganov^{1✉}, Maksim S. Nochnoy³, Dmitriy A. Lisitskiy¹, Aleksandr V. Gavrilenko^{2, 3}

¹ City Clinical Hospital No. 29 named after N. E. Bauman, Moscow, Russian Federation

² Petrovsky National Research Center of Surgery, Moscow, Russian Federation

³ N. V. Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine — I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenovskiy University), Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Aleksey G. Vaganov, aleksejvaganov4@gmail.com

ABSTRACT

INTRODUCTION: The main problem that influences the effectiveness of hybrid operations is a stage approach to manipulations within a single reconstruction. One of methods that determines both the patency of the major arteries and effectiveness of revascularization of a limb based on the depth and reversibility of ischemic alterations at the cell-tissue level is the method of UV luminescence spectroscopy.

AIM: To determine the sequence of the stages in hybrid reconstruction of the lower limb arteries depending on the functional state of the distal arterial bed registered by the method of laser-induced ultraviolet photoluminescence spectroscopy.

MATERIALS AND METHODS: The study included 51 patients with critical ischemia of the lower limbs who underwent a hybrid (simultaneous) intervention: stenting of the external iliac artery and femoropopliteal bypass surgery in the department of vascular surgery of Bauman City Clinical Hospital No. 29. The patients were divided into two groups. The first group (n = 24) included patients who underwent femoropopliteal bypass surgery as the first stage, and stenting of the external iliac artery as the second stage. In the second group (n = 17), the first stage was stenting of the external iliac artery, and the second stage was open reconstruction within the first day. The third, control group (n = 10), consisted of patients who underwent only stenting of the external iliac artery with good postoperative results. Chemiluminescence was registered using the device proposed by I. V. Moskalenko. The parameters were taken up before the surgery on the inner surface of the lower third of thigh, middle third of shin, rear surface of the foot. On days 2–5, this examination was repeated. Statistical processing of the data when comparing study groups was performed using SPSS Statistics 17.0 software.

RESULTS: When studying the luminescence spectrum in the preoperative period, a characteristic maximum of the signal was noted at 410 ± 20 nm wavelength (peak of NADH and NADPH) that changed to its minimum at 450 ± 15 nm wavelength (peak of hemoglobin). Successful arterial reconstruction was observed in 24 patients from the first group and 14 from the second group. In this category of patients, the intensity of luminescence in 380 nm–430 nm range was comparable, but at 440 nm–460 nm wavelengths, it was reliably lower in the second group ($p < 0.05$), which indicates better openness and compensation of ‘outflow pathways’ in this group. In the postoperative period, in patients with successful revascularization, the reduction of luminescence intensity was noted in all measurement ranges, which confirms improvement of blood supply to the limb. There was a strong positive correlation between changes in the ankle-brachial index and luminescence amplitude in the preoperative ($r = 0.78$ at $p < 0.0001$) and postoperative ($r = 0.75$ at $p < 0.0001$) period. With an increase in the parameters of the functional state of the limb and arterial patency, the amplitude of chemiluminescence decreases.

In the early postoperative period, 3 patients developed thrombotic complications accompanied by an increase in luminescence amplitude above 2.5×10^5 photons. In patients with chemiluminescence amplitudes before the operation greater than 0.7×10^5 photons (at 410 nm frequency) and greater than 0.5×10^5 photons (at 450 nm frequency), of priority is the open stage to correct the 'outflow pathways' because of a high risk of thrombotic complications. Uncomplicated cases of group 2 were compared with group 3, created empirically. Luminescence amplitude before the operation, at which such identity of the groups was noted, was $0.35 \pm 0.05 \times 10^5$ photons at 410 nm, and $0.22 \pm 0.03 \times 10^5$ photons at 450 nm.

CONCLUSION: The method of laser-induced UV luminescence spectroscopy permits to determine the state of 'outflow pathways' on the lower limb, which can be used in determining the stages of hybrid reconstruction of the lower limb arteries.

Keywords: *critical ischemia of lower limbs; hybrid operations; ultraviolet photoluminescence spectroscopy*

For citation:

Vaganov A. G., Nochnoy M. S., Lisitskiy D. A., Gavrilenko A. V. 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. <https://doi.org/10.23888/HMJ2024122183-196>.

Введение

Гибридная хирургия является одной из инновационных технологий в лечении критической ишемии нижних конечностей (КИНК) [1]. Привлекательность данной методики заключается в одномоментном сочетании открытых и эндоваскулярных вмешательств на артериях, выполняемых зачастую из единого доступа в условиях одной — гибридной операционной [2]. Основной проблемой, влияющей на эффективность гибридных операций, является этапность выполнения манипуляций в рамках единой реконструкции [3]. В настоящее время отсутствуют четкие объективные критерии выбора последовательности действий в процессе одной гибридной операции [4]. На практике данный вопрос острее всего стоит при выполнении гибридной реконструкции в случае сочетания окклюзионно-стенотического поражения артерий подвздошного и бедренно-подколенного сегментов и заключается в выборе первостепенного этапа в виде стентирования подвздошной артерии, либо бедренно-подколенного шунтирования. Кроме того, существует вопрос в необходимости гибридной операции в целом и ее достаточности для реваскуляризации конечности. Другими словами: где та «золотая середина» между эндоваскулярными и открытыми вариантами реконструкции, где гибридная хирургия будет иметь максимальную эффективность? По мнению ряда авторов, чьих взглядов мы придерживаемся, успех артериальной реваскуляризации определяется степенью проходимости магистральных и развитием коллатеральных «путей оттока» [5]. Основными инструментальными методами диагностики поражения магистральных артерий нижних конечностей являются ультразвуковая доплерография, рентгеноконтрастная ангиография, компьютерная томография и магнитно-резонансная ангиография. Однако, данные виды диагностики способны лишь определить степень окклюзионно-стенотического поражения и скорость кровотока в магистральных артериях конечности [6]. Од-

ним из методов, определяющих как проходимость артерий, так и эффективность реваскуляризации конечности на основании глубины и обратимости ишемических изменений на клеточно-тканевом уровне, является метод люминесцентной спектроскопии [7]. Его сущность заключается в регистрации явления хемилюминесценции, то есть свечения веществ (люминофоров), образующихся в результате биохимических реакций, запускаемых клеточной деструкцией. Универсальными флуорофорами являются молекулы никотинамидадениндинуклеотида (НАДН) и никотинамидадениндинуклеотидфосфата (НАДНФ), коллаген и эластин, флавины, каротин [8, 9]. Данные соединения участвуют в основных метаболических процессах, происходящих в клетке — цикл Кребса, пентозный цикл, дыхательная цепь митохондрий, перекисное окисление липидов и так далее. В нашем исследовании был использован метод лазериндуцированной ультрафиолетовой фотолюминесцентной спектроскопии, с использованием прибора, предложенного И. В. Москаленко [10]. Данное устройство состоит из источника лазерного излучения (эксимерный лазер XeCl), прибора, воспринимающего люминесцентный сигнал, и средства регистрации этого сигнала. Особенностью данного метода является высокая точность измерения с единицы площади, не превышающей 1–5 мм². Сила люминесцентного свечения увеличивается при разрушении клеточных структур, связанных с ишемией [11, 12]. В зависимости от длины волны, на которой происходит снятие сигнала, спектральные характеристики хемилюминесценции могут меняться. Это связано с появлением веществ-гасителей люминесценции. В частности, к ним относятся гемоглобин и его различные соединения (оксигемоглобин, дезоксигемоглобин), миоглобин [13, 14]. Обычно, это обстоятельство учитывают для корректировки фотолюминесцентного сигнала, с целью определения четких границ ишемии и некроза [15]. В нашем исследовании по степени снижения люми-

несцентного сигнала на определенных частотах его снятия в зависимости от локализации мы смогли определить степень кровоснабжения конечности и функциональную готовность путей «оттока» для шунтирующей операции в рамках решения вопроса о выборе первостепенного этапа гибридной реконструкции [16, 17].

Цель. Определить последовательность этапов гибридной реконструкции на артериях нижних конечностей в зависимости от функционального состояния дистального артериального русла, оцененного при помощи метода лазериндуцированной УФ-люминесцентной спектроскопии.

Материалы и методы

В исследовании принял участие 51 человек, страдающий КИНК, оперированный в объеме гибридной реконструкции артерий нижних конечности. Пациентам в рамках одного вмешательства в гибридной операционной выполнено стентирование наружной подвздошной артерии и бедренно-подколенного шунтирования в отделении сосудистой хирургии ГКБ № 29 им. Н. Э. Баумана. Все пациенты были разделены на три группы. Первую группу (n = 24) составили пациенты, которым первым этапом было выполнено бедренно-подколенное шунтирование (БПШ), вторым — стентирование наружной подвздошной артерии (НПА). Вторую группу (n = 17) составили пациенты, у которых

первым этапом было выполнено стентирование НПА, вторым этапом в течение первых суток - открытая реконструкция. Третью группу контроля (n = 10) составили пациенты, которым было выполнено только стентирование НПА с хорошими послеоперационными результатами.

Хирургическая тактика в отношении проксимальной гибридной реконструкции определялась по анатомическому характеру многоуровневого поражения артерий нижних конечностей, определенному по КТ-ангиографии. В случае сочетания поражения НПА и окклюзионно-стенотического поражения области бифуркации общей бедренной артерии (ОБА), протяженных бедренно-подколенных окклюзиях, в сочетании со стенозом устья глубокой артерии бедра (ГАБ), гибридное вмешательство строилось на первостепенной коррекции «путей оттока», как имеющих наиболее гемодинамически значимое поражение. В этой ситуации первым этапом гибридного вмешательства выполнялось БПШ. В случае, если наиболее гемодинамически значимым, по результатам КТ-ангиографии, признавалось окклюзивное поражение НПА — первым этапом выполнялось эндоваскулярное стентирование данной зоны, обычно доступом через плечевую артерию.

Группы были сопоставимы по возрасту и половому составу, спектру сопутствующей патологии, частоте курения (табл. 1, 2).

Таблица 1. Распределение больных в группах исследования по полу

Группы	Мужчины	Женщины
1	19 (79,1%)	5 (20,8%)
2	13 (76,7%)	4 (23,5%)
3	8 (80%)	2 (20%)

Таблица 2. Спектр сопутствующей патологии у пациентов, включенных в группы исследования

Диагноз	Количество пациентов (%)
Гипертоническая болезнь	47 (92%)
Ишемическая болезнь сердца	42 (82%)
Сахарный диабет	24(47%)
Хроническая обструктивная болезнь легких	11 (21,6%)
Цереброваскулярная болезнь	13 (25,4%)
Язвенная болезнь желудка	8 (15,7%)

Критериями включения в группу исследования являлись:

1) пациенты с болями покоя, дистанцией перемежающейся хромоты не более 25 м; характеризующиеся отсутствием некрозов на нижней конечности; лодыжечно-плечевой индекс (ЛПИ) от 0,4 до 0,5 (хроническая артериальная недостаточность III стадии по Фонтейну–Покровскому);

2) наличие сочетания окклюзионно-стенотического поражения НПА и артерий бедренно-подколенного сегмента;

3) отсутствие гемодинамически значимых поражений глубокой артерии бедра;

4) невозможность многоуровневой открытой реконструкции по общемедицинским показаниям;

5) отсутствие гемодинамически значимых стенозов и окклюзий дистального русла на оперированной конечности.

Регистрация хемилюминесценции проводилась с помощью прибора, предложенного И. В. Москаленко после подписания пациентами письменного добровольного информированного согласия на диагностическое исследование в соответствии с Хельсинской декларацией Всемирной медицинской ассоциации (2004). Работа одобрена локальным этическим комитетом Сеченовского Университета № 22-21 от 09.12.2021.

Доставка излучения и снятие показаний индуцированной люминесценции проводилась *in situ* с использованием двух кварцевых волокон, смонтированных в одном зонде, длиной 1 м, диаметром сердцевины 450 мкм. Головка зонда устанавливалась на расстоянии 1–2 см от поверхности кожи исследуемой конечности. Измерение проводилось на длине волны импульсного излучения эксимерного лазера ХеС1 308 нм в течение 3 минут. Данная экспозиционная доза лазерного излучения соответствует гигиеническим требованиям [18]. Спектр люминесценции фиксировался в диапазоне от 350 нм до 780 нм, с шагом 10 нм, в течение 10 секунд. Показатели снимались перед опера-

цией по внутренней поверхности нижней трети бедра, средней трети голени, тыльной поверхности стопы. На 2–5 сутки послеоперационного периода лазер-индуцированная фотолюминесцентная спектроскопия повторялась на прежних уровнях оперированной конечности по ранее описанной схеме. У пациентов оценивались различные показатели течения раннего послеоперационного периода до выписки из стационара: количество тромботических осложнений, количество койко-дней в отделении реанимации и интенсивной терапии, степень прироста лодыжечно-плечевого индекса, дистанция безболевого ходьбы после операции.

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 определение коэффициента корреляции Спирмена. Статистическую гетерогенность групп оценивали с помощью χ^2 теста. При $p < 0,1$ и $I^2 > 50\%$ гетерогенность считали статистически значимой.

Результаты

Успех артериальной реконструкции наблюдался у 24 человек из первой группы и у 14 человек из второй. Результаты проведенных операций показаны в таблице 3. При изучении спектра люминесценции, полученного при измерении на различных уровнях оперированной конечности в предоперационном периоде, отмечен характерный максимум сигнала на длине волны 410 ± 20 нм, сменяющийся его ми-

нимумом на длине волны 450 ± 15 нм (рис. 1). Необходимо отметить, что при сравнении пациентов с неосложненным послеоперационным периодом в диапазоне измерения 380–430 нм перед операцией достоверного отличия в амплитуде полученного люминесцентного сигнала группы не имели. Эта тенденция подтверждается на всех изучаемых уровнях конечности, причем при измерениях от бедра к стопе сила свечения возрастает (табл. 4). Например, при измерениях на голени амплитуда люминесценции равнялась соответственно: 1 группа —

$0,58 \pm 0,09 \times 10^5$ фотон, 2 группа — $0,54 \pm 0,04 \times 10^5$ фотон, $p = 0,15$. Однако, на длинах волн 440–460 нм, соотносящихся с пиком поглощения сигнала гемопорфиринами, отмечена достоверная разница в интенсивности сигнала. При аналогичном уровне измерений: 1 группа — $0,42 \pm 0,01 \times 10^5$ фотон, 2 группа — $0,30 \pm 0,04 \times 10^5$ фотон, $p < 0,05$. При измерениях в послеоперационном периоде у пациентов с успешной реваскуляризацией отмечается снижение интенсивности люминесценции на всех диапазонах измерения (табл. 5).

Таблица 3. Показатели, характеризующие эффективность операций у пациентов групп исследований в раннем послеоперационном периоде

Группы	Лодыжечно-плечевой индекс		Дистанция безболевого ходьбы		Интра-операционная кровопотеря	Количество часов в отделении реанимации и интенсивной терапии
	до операции	после операции	до операции	после операции		
1	$0,42 \pm 0,4$	$0,84 \pm 0,16$	$26 \pm 1,4$	$161 \pm 3,7$	$231,5 \pm 15,4$	$22,5 \pm 2,2$
2	$0,41 \pm 0,6$	$0,85 \pm 0,13$	$27 \pm 1,6$	$159 \pm 4,6$	$243,2 \pm 12,8$	$24,1 \pm 1,8$

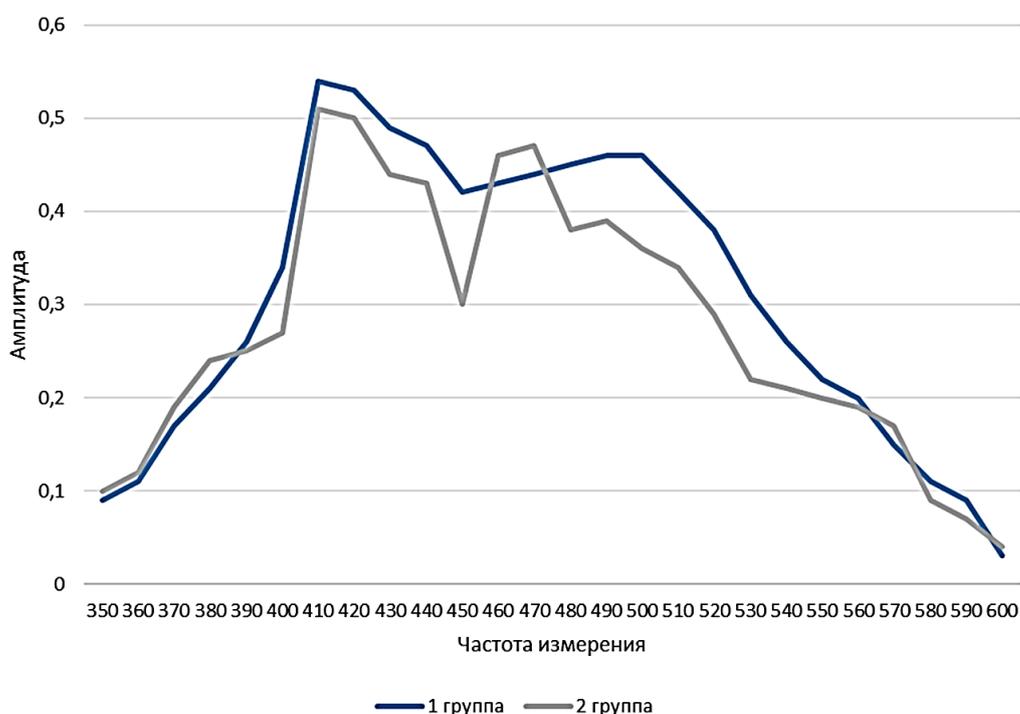


Рис. 1. Зависимость амплитуды хемилюминесценции в группах от частоты измерения.

Таблица 4. Амплитуда люминесценции на оперированной конечности в зависимости от частоты и уровня измерения в группах исследования перед операцией

Группы	Частота измерения, нм	S (бедро)* 10^5 фотон	S (голень)* 10^5 фотон	S (стопа)* 10^5 фотон
1 группа	410	$0,52 \pm 0,05$	$0,58 \pm 0,09$	$0,64 \pm 0,09$
	450	$0,39 \pm 0,03^*$	$0,42 \pm 0,01^*$	$0,48 \pm 0,01^*$
2 группа	410	$0,45 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,04$	$0,53 \pm 0,04$
	450	$0,20 \pm 0,06^*$	$0,30 \pm 0,04^*$	$0,32 \pm 0,02^*$

Примечание: * — различия показателей достоверны $p < 0,05$

Таблица 5. Снижение амплитуды люминесценции после операции у пациентов с неосложненным течением раннего послеоперационного периода в зависимости от частоты измерения

Группы	Диапазон измерения, нм	Среднее снижение амплитуды
1 группа	410	$0,34 \pm 0,03$
	450	$0,21 \pm 0,07$
2 группа	410	$0,35 \pm 0,04$
	450	$0,23 \pm 0,04$

При оценке результатов первичной артериальной проходимости отмечена сильная положительная корреляционная связь между изменениями ЛПИ и амплитудой люминесценции при УФ-индуцированной спектроскопии в предоперационном ($r = 0,78$ при $p < 0,0001$) и послеоперационном периоде ($r = 0,75$ при $p < 0,0001$). Аналогичная взаимосвязь прослеживается также между увеличением дистанции безболевой ходьбы и интенсивностью свечения ($r = 0,71$ при $p < 0,0001$). Причем при росте показателей функционального состояния конечности и артериальной проходимости амплитуда хемилюминесценции снижается.

В раннем послеоперационном периоде у 3 пациентов отмечено развитие тромботических осложнений (3 человека во 2 группе). Появление клинических признаков тромбоза отмечено на 2–3 сутки после операции и сопровождалось повышением амплитуды люминесценции выше $2,5 \times 10^5$ фотон, что достоверно различается с интенсивностью свечения у пациентов с неосложненным течением раннего послеоперационного периода, которое составило в среднем $0,55 \pm 0,14 \times 10^5$ фотон

(показатели измерены на частоте максимума НАДН — 410 нм).

При сравнении показателей люминесценции в предоперационном периоде 3 случаев тромбоза в группе, пациентам которой первым этапом выполнялась стентирование НПА (2 группа исследования), амплитуда свечения составила $0,75 \pm 0,15 \times 10^5$ фотон на частоте 410 нм, $0,58 \pm 0,09 \times 10^5$ фотон на частоте 450 нм. Пациенты с аналогичными спектральными характеристиками хемилюминесценции встречаются в 1 группе, где открытый этап являлся первостепенным. Ранний послеоперационный период у них протекал без осложнений.

С целью определения достаточности и необходимости гибридной операции по спектральным характеристикам люминесцентного свечения была создана 3 группа контроля, которую составили 10 человек, подобранных эмпирически тождественными по ряду параметров с пациентами 2 группы. В первом случае больным с сочетанным атеросклеротическим поражением артерий нижних конечностей выполнялась гибридная операция, заключающаяся в стентировании НПА в сочетании с БПШ.

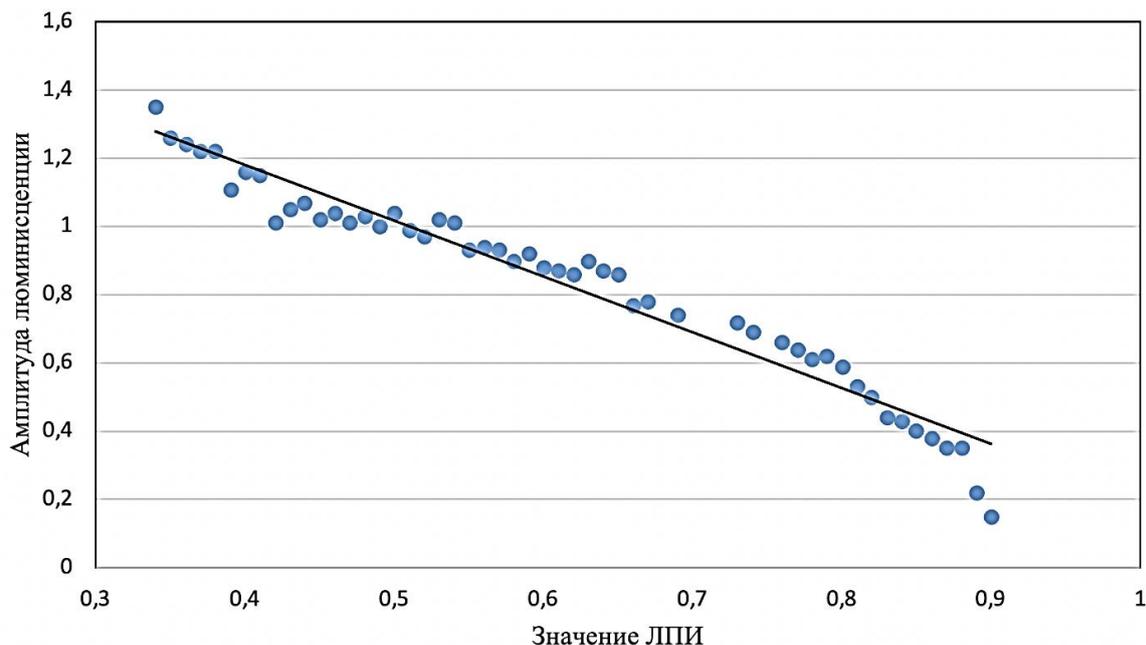


Рис. 2. Зависимость амплитуды люминесценции от значения лодыжечно-плечевого индекса в предоперационном периоде.

Примечание: ЛПИ — лодыжечно-плечевой индекс.

Во втором случае с данной патологией выполнялось только стентирование НПА. В группу 3 подобраны пациенты, сопоставимые со 2 группой исследования возрастом, полом, сопутствующей патологией, а также интенсивностью люминесцентного сигнала в послеоперационном периоде. Осложнений в раннем послеоперационном периоде при наблюдении в течение 10 дней в группах также не отмечено. Амплитуда люминесценции перед операцией, при которой отмечена такая тождественность групп на частоте 410 нм составила $0,35 \pm 0,05 \times 10^5$ фотон, на частоте 450 нм — $0,22 \pm 0,03 \times 10^5$ фотон.

Обсуждение

Проблема выбора этапности хирургических вмешательств в рамках гибридной реконструкции является актуальной проблемой, решение которой позволит повысить эффективность проводимой реваскуляризации. Зачастую в данной ситуации отсутствует универсальный объективный подход, а построение плана гибридной реконструкции определяется

взглядом конкретного хирурга на индивидуальные особенности клинической картины КИНК. Метод ультрафиолетовой лазериндуцированной спектроскопии призван внести долю объективизма в выбор хирургической тактики у пациентов с сочетанным поражением подвздошного сегмента и бедренно-подколенного сегментов. Данный метод использован нами, с одной стороны, для оценки степени ишемии конечности на клеточно-тканевом уровне, а с другой — с целью определения состояния и степени компенсации «путей оттока». При этом группы тождественны по анатомической структуре поражения артерий подвздошного и бедренно-подколенного сегментов, отсутствию гемодинамически значимого поражения артерий голени и стопы. При спектральном анализе амплитуды люминесцентного свечения при импульсном излучении ткани эксимерным лазером необходимо отметить характерный положительный пик сигнала на частоте 410 нм. Этот максимум характеризует, по данным литературы, возрастающую концентрацию НАДН и

НАДНФ, определяющую степень выраженности структурной клеточной дегенерации в условиях ишемии [7]. Характерно, что при движении измерений в дистальном направлении от бедра к стопе сила люминесцентного сигнала возрастает, что подтверждает общий тренд в углублении ишемических изменений в этом направлении, связанный с уменьшением магистрального кровоснабжения. Далее, во всех измерениях отмечен минимум интенсивности люминесценции, наступающей на длине волны 450 ± 15 нм. Данный феномен обусловлен поглощением сигнала фотолюминесценции различными гемопорфиринами, в том числе гемоглобином. По своей сути, в нашем исследовании данный показатель определяет степень количественной компенсации «путей оттока» в ответ на хроническую гипоксию вследствие КИНК. Таким образом, состояние магистрального кровообращения на бедре в условиях отсутствия гемодинамически значимого поражения дистального артериального русла определяется с одной стороны выраженностью ишемии, маркером которой является концентрация НАДН и НАДНФ, а с другой — «открытостью» путей оттока. Именно сочетание данных факторов, которые нам объективно удалось оценить при помощи УФ-люминесцентной спектроскопии в нашем исследовании, является ключевым в рациональном построении плана гибридной реконструкции.

Предоперационная интенсивность свечения на длине волны 410 нм в группах 1 и 2 достоверно не отличалась, что характеризует однородность их участников по степени КИНК. Однако, на частоте 450 нм, мы видим, что амплитуда люминесценции в группе 2 достоверно ниже, что характеризует лучшую проходимость и большую степень коллатерализации «путей оттока». Удовлетворительное состояние воспринимающего русла в итоге явилось причиной успеха реваскуляризации, первым этапом которой явилось стентирование НПА (группа 2). Именно эта причина, но с отрицательным смыс-

лом, явилась основной в возникновении 3 случаев послеоперационного тромбоза у пациентов изучаемой группы. Тождественность показателей спектроскопии этих больных с аналогичными характеристиками хемилюминесценции, имеющимися в предоперационном периоде у ряда пациентов 1 группы, где послеоперационный период был неосложненным, доказывает, что в данных случаях требовалась первостепенная коррекция «путей оттока», а тромботические осложнения вызваны неправильной этапностью гибридного вмешательства.

Третья группа — группа контроля, созданная эмпирическим путем, доказывает, что при спектральных характеристиках люминесценции при КИНК, обусловленной сочетанным поражением артерий подвздошного сегмента и бедренно-подколенного сегмента, при измерении в предоперационном периоде, составляющих на частоте 410 нм — не более $0,35 \pm 0,05 \times 10^5$ фотон, на частоте 450 нм — не более $0,22 \pm 0,03 \times 10^5$ фотон, успех гибридной реконструкции сопоставим с эндоваскулярным стентированием НПА. Данный феномен объясняется хорошей степенью открытости и компенсации «путей оттока», в связи с чем дополнение эндоваскулярного вмешательства открытой реконструкцией было избыточным.

Выводы

1. Методика лазериндуцированной ультрафиолетовой фотолюминесцентной спектроскопии позволяет определить состояние «путей оттока» на нижней конечности, что может использоваться в определении этапности гибридной реконструкции на артериях нижних конечностей.

2. Амплитуда фотолюминесценции, измеренная на нижней конечности в предоперационном периоде у пациентов с хронической артериальной недостаточностью III стадии, сочетанным поражением подвздошного и бедренно-подколенного сегментов и отсутствием гемодинамически значимого поражения артерий голени и стопы, не превышающая на частоте

410 нм — $0,35 \pm 0,05 \times 10^5$ фотон, на частоте 450 нм — $0,22 \pm 0,03 \times 10^5$ фотон дает основания для рассмотрения эндоваскулярной реваскуляризации в качестве альтернативы гибридным способам реконструкции.

3. Пациенты, у которых отмечено повышение амплитуды фотолюминесценции в предоперационном периоде на ча-

стоте 410 нм — свыше $0,7 \times 10^5$ фотон, на частоте 450 нм — свыше $0,5 \times 10^5$ фотон, имеют высокий риск послеоперационных тромботических осложнений, обусловленных выраженными нарушениями «путей оттока», поэтому первым этапом гибридной операции у них рекомендовано выполнение открытой реконструкции.

Список источников

1. Гавриленко А.В., Кочетков В.А., Кравченко А.А. Гибридные операции при хронической ишемии нижних конечностей // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. 2021. Т. 63, № 5. С. 437–442. doi: [10.24022/0236-2791-2021-63-5-437-442](https://doi.org/10.24022/0236-2791-2021-63-5-437-442)
2. Пузряк П.Д., Шломин В.В., Бондаренко П.Б., и др. Сравнение результатов гибридного и открытого хирургического лечения многоуровневого поражения артерий нижних конечностей // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2019. Т. 12, № 3. С. 227–234. doi: [10.17116/kardio201912031227](https://doi.org/10.17116/kardio201912031227)
3. Троицкий А.В., Бехтев А.Г., Хабазов Р.И., и др. Гибридная хирургия при многоэтажных атеросклеротических поражениях артерий аорто-подвздошного и бедренно-подколенного сегментов // Диагностическая и интервенционная радиология. 2012. Т. 6, № 4. С. 67–77. doi: [10.25512/DIR.2012.06.4.08](https://doi.org/10.25512/DIR.2012.06.4.08)
4. Гавриленко А.В., Кравченко А.А., Котов А.Э., и др. Гибридные реконструкции у больных с хронической ишемией нижних конечностей и многоуровневым поражением артерий // Ангиология и сосудистая хирургия. 2018. Т. 24, № 3. С. 183–188.
5. Косенков А.Н., Винокуров И.А., Киселева А.К. Лечение критической ишемии нижних конечностей с язвенно-некротическими поражениями // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2019. Т. 12, № 4. С. 302–307. doi: [10.17116/kardio201912041302](https://doi.org/10.17116/kardio201912041302)
6. Кудряшова Н.Е., Синякова О.Г., Михайлов И.П., и др. Радионуклидная семиотика ишемии при острых окклюзионных заболеваниях магистральных артерий нижних конечностей // Журнал им. Н.В. Склифосовского Неотложная медицинская помощь. 2019. Т. 8, № 3. С. 257–265. doi: [10.23934/2223-9022-2019-8-3-257-265](https://doi.org/10.23934/2223-9022-2019-8-3-257-265)
7. Цыганкова Е.А., Корнева Ю. С. Применение спектроскопических методов в исследованиях новообразований в биологических тканях // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2021. Т. 20, № 2. С. 150–156. doi: [10.37903/vsgma.2021.2.21](https://doi.org/10.37903/vsgma.2021.2.21)
8. Бабкина А.С. Лазер-индуцированная флуоресцентная спектроскопия в диагностике тканевой гипоксии // Общая реаниматология. 2019. Т. 15, № 6. С. 50–61. doi: [10.15360/1813-9779-2019-6-50-61](https://doi.org/10.15360/1813-9779-2019-6-50-61)
9. Vladimirova E.S., Salmin V.V., Salmina A.B., et al. Fluorescence diagnostics of human lens status *in vivo* // J. Appl. Spectrosc. 2012. Vol. 79, No. 1. P. 135–139. doi: [10.1007/s10812-012-9573-7](https://doi.org/10.1007/s10812-012-9573-7)
10. Москаленко И.В., Прилуцкий В.И. Метод определения границ молекулярных клеточных изменений с использованием метода лазерной спектроскопии // Активированная вода. 2000. Т. 8, № 1. С. 37–41.
11. Салмин В.В., Салмина А.Б., Фурсов А.А., и др. Использование флуоресцентной спектроскопии для оценки ишемического повреждения миокарда // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2011. Т. 2, № 4. С. 142–157.
12. Салмина А.Б., Салмин В.В., Фролова О.В., и др. Лазер-индуцированная аутофлуоресценция для оценки метаболизма и гемодинамики головного мозга // Клиническая неврология. 2011. Т. 5, № 3. С. 32–39.
13. Song Z., Wang L., Hou S. A study of the chemiluminescence behavior of myoglobin with luminol and its analytical applications // Anal. Bioanal. Chem. 2004. Vol. 378, No. 2. P. 529–535. doi: [10.1007/s00216-003-2302-6](https://doi.org/10.1007/s00216-003-2302-6)
14. Pur M.R.K., Hosseini M., Faridbod F., et al. Highly sensitive label-free electrochemiluminescence aptasensor for early detection of myoglobin, a biomarker for myocardial infarction // Microchim. Acta. 2017. Vol. 184. P. 3529–3537. doi: [10.1007/s00604-017-2385-y](https://doi.org/10.1007/s00604-017-2385-y)
15. Гунько В.И., Попов С.Н., Александров М.Т., 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. С. 93–97.
16. Гаибов А.Д., Ньязматзода О., Рахмонов Д.К., и др. Эндоваскулярные методы реканализации в лечении хронической ишемии нижних конечностей: современное состояние проблемы // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2023. Т. 31, № 2. С. 305–316. doi: [10.17816/PAVLOVJ107324](https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ107324)

17. Калинин Р.Е., Сучков И.А., Крылов А.А., и др. Комплексный подход к лечению неоперабельных пациентов с критической ишемией нижних конечностей и сахарным диабетом: результаты и перспективы // Наука молодых (Eruditio Juvenium). 2021. Т. 9, № 4. С. 559–572. doi: [10.23888/HMJ202194559-572](https://doi.org/10.23888/HMJ202194559-572)
18. Петрова М.Д., Малькова Н.Ю. Гигиеническая оценка лазерного излучения на рабочих местах медицинского персонала // Здоровье — основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. 2018. Т. 13, № 2. С. 949–958.

References

- Gavrilenko AV, Kochetkov VA, Kravchenko AA. Hybrid operations in chronic lower limb ischemia. *Russian Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2021;63(5):437–42. (In Russ). doi: [10.24022/0236-2791-2021-63-5-437-442](https://doi.org/10.24022/0236-2791-2021-63-5-437-442)
- Puzdriak PD, Shlomin VV, Bondarenko PB, et al. Comparison of the results of hybrid and open surgical treatment of multilevel arterial disease of lower extremities (in Russian only). *Russian Journal of Cardiology and Cardiovascular Surgery*. 2019;12(3):227–34. (In Russ). doi: [10.17116/kardio201912031227](https://doi.org/10.17116/kardio201912031227)
- Troitskiy AV, Bekhtev AG, Khabazov RI, et al. Hybrid surgery of multilevel atherosclerotic lesions of aorto-iliac and femoral-popliteal segments. *Diagnostic & Interventional Radiology*. 2012;6(4):67–77. (In Russ). doi: [10.25512/DIR.2012.06.4.08](https://doi.org/10.25512/DIR.2012.06.4.08)
- Gavrilenko AV, Kravchenko AA, Kotov AE, et al. Hybrid reconstructions in patients with lower limb chronic ischaemia and multilevel arterial lesions. *Angiology and Vascular Surgery*. 2018;24(3):183–8. (In Russ).
- Kosenkov AN, Vinokurov IA, Kiseleva AK. Treatment of critical lower limb ischemia followed by ulcerative-necrotic lesions (in Russian only). *Russian Journal of Cardiology and Cardiovascular Surgery*. 2019;12(4):302–7. (In Russ). doi: [10.17116/kardio201912041302](https://doi.org/10.17116/kardio201912041302)
- Kudryashova NY, Sinyakova OG, Mikhaylov IP, et al. Radionuclide Patterns of Ischemia in Acute Occlusive Diseases of Main Arteries of Lower Extremities. *Russian Sklifosovsky Journal "Emergency Medical Care"*. 2019;8(3):257–65. (In Russ). doi: [10.23934/2223-9022-2019-8-3-257-265](https://doi.org/10.23934/2223-9022-2019-8-3-257-265)
- Tsygankova EA, Korneva YuS. Application of spectroscopic methods in research of new formations in biological tissues. *Vestnik Smolenskoy Gosudarstvennoy Medicinskoj Akademii*. 2021;20 (2):150–6. (In Russ). doi: [10.37903/vsgma.2021.2.21](https://doi.org/10.37903/vsgma.2021.2.21)
- Babkina AS. Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy in the Diagnosis of Tissue Hypoxia (Review). *General Reanimatology*. 2019;15(6): 50–61. (In Russ). doi: [10.15360/1813-9779-2019-6-50-61](https://doi.org/10.15360/1813-9779-2019-6-50-61)
- Vladimirova ES, Salmin VV, Salmina AB, et al. Fluorescence diagnostics of human lens status *in vivo*. *J Appl Spectrosc*. 2012;79(1):135–9. doi: [10.1007/s10812-012-9573-7](https://doi.org/10.1007/s10812-012-9573-7)
- Moskalenko IV, Priluckij VI. Metod opredeleniya granic molekulyarnyh kletochnyh izmenenij s ispol'zovaniem metoda lazernoj spektroskopii. *Aktivirovannaya Voda*. 2000;8(1):37–41. (In Russ).
- Salmin VV, Salmina AB, Fursov AA, et al. Application of Fluorescence Spectroscopy for Assessment of Myocardial Ischemic Injury. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2011;2(4): 142–57. (In Russ).
- Salmina AB, Salmin VV, Frolova OV, et al. Laser-induced autofluorescence for assessment of methabolism and hemodynamic. *Clinical Nevrology*. 2011;5(3):32–8. (In Russ).
- Song Z, Wang L, Hou S. A study of the chemiluminescence behavior of myoglobin with luminol and its analytical applications. *Anal Bioanal Chem*. 2004;378(2):529–35. doi: [10.1007/s00216-003-2302-6](https://doi.org/10.1007/s00216-003-2302-6)
- Pur MRK, Hosseini M, Faridbod F, et al. Highly sensitive label-free electrochemiluminescence aptasensor for early detection of myoglobin, a biomarker for myocardial infarction. *Microchim Acta*. 2017;184:3529–37. doi: [10.1007/s00604-017-2385-y](https://doi.org/10.1007/s00604-017-2385-y)
- Gun'ko VI, Popov SN, Alexandrov MT, 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):93–7. (In Russ).
- Gaibov AD, Nematzoda O, Rakhmonov DK, et al. Endovascular Recanalization Methods in Treatment of Chronic Lower Limb Ischemia: Modern State of Problem. *I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*. 2023;31(2):305–16. (In Russ). doi: [10.17816/PAVLOVJ107324](https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ107324)
- Kalinin RE, Suchkov IA, Krylov AA, et al. Integrated approach to treatment of inoperable patients with critical lower limb ischemia and diabetes mellitus: results and prospects. *Nauka Molodykh (Eruditio Juvenium)*. 2021;9(4):559–72. (In Russ). doi: [10.23888/HMJ202194559-572](https://doi.org/10.23888/HMJ202194559-572)
- Petrova MD, Mal'kova NYu. Hygienic assessment of laser radiation at workplaces of medical personnel. *Zdorov'ye — Osnova Chelovecheskogo Potentsiala: Problemy i Puti ikh Resheniya*. 2018;13(2):949–58. (In Russ).

Дополнительная информация

Финансирование. Авторы заявляют об отсутствии финансирования при проведении исследования.

Этика. Использованы данные пациента в соответствии с письменным информированным согласием.

Информация об авторах:

✉ *Ваганов Алексей Геннадьевич* — канд. мед. наук, врач-хирург хирургического отделения № 1, SPIN: 2202-0746, <https://orcid.org/0000-0001-8191-2551>, e-mail: aleksejvaganov4@gmail.com

Ночной Максим Сергеевич — врач-ординатор кафедры госпитальной хирургии, SPIN: 6013-8148, <https://orcid.org/0000-0003-0057-9561>, e-mail: maxnochnoy@yandex.ru

Лисицкий Дмитрий Алексеевич — д-р мед. наук, врач-сердечно-сосудистый хирург хирургического отделения № 1, SPIN: 9855-9286, <https://orcid.org/0000-0003-0423-8879>, e-mail: dalis@rambler.ru

Гавриленко Александр Васильевич — д-р мед. наук, профессор, академик РАН, профессор кафедры госпитальной хирургии № 2; руководитель отделения сосудистой хирургии, SPIN: 9607-8346, <https://orcid.org/0000-0001-7267-7369>, e-mail: a.v.gavrilenko@mail.ru

Вклад авторов:

Ваганов А. Г. — обработка материала, написание текста.
Ночной М. С. — анализ и обработка материала, редактирование текста.
Лисицкий Д. А. — дизайн исследования, статистическая обработка данных.
Гавриленко А. В. — концепция исследования, экспертная оценка. Утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи — все соавторы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Funding. The authors declare no funding for the study.

Ethics. The data is used in accordance with the informed consent of patient.

Information about the authors:

✉ *Aleksey G. Vaganov* — MD, Cand. Sci. (Med.), Surgeon of the Surgical Department No. 1, SPIN: 2202-0746, <https://orcid.org/0000-0001-8191-2551>, e-mail: aleksejvaganov4@gmail.com

Maksim S. Nochnoy — MD, Resident of the Department of Hospital Surgery, SPIN: 6013-8148, <https://orcid.org/0000-0003-0057-9561>, e-mail: maxnochnoy@yandex.ru

Dmitriy A. Lisitskiy — MD, Dr. Sci. (Med.), Cardiovascular Surgeon of the Surgical Department No. 1, SPIN: 9855-9286, <https://orcid.org/0000-0003-0423-8879>, e-mail: dalis@rambler.ru

Aleksandr V. Gavrilenko — MD, Dr. Sci. (Med.), Professor, Professor of the Department of Hospital Surgery No. 2; Head of the Department of Vascular Surgery, SPIN: 9607-8346, <https://orcid.org/0000-0001-7267-7369>, e-mail: a.v.gavrilenko@mail.ru

Contribution of the authors:

Vaganov A. G. — processing of material, writing the text.
Nochnoy M. S. — analysis and processing of material, editing.
Lisitskiy D. A. — design of the study, statistical data processing.
Gavrilenko A. V. — concept of the study, expert evaluation of information.
Approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article all authors.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.