

Article

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ ИНТРАОПЕРАЦИОННОЙ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ И ICG-ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ У ПАЦИЕНТОВ С КОЛОРЕКТАЛЬНЫМ РАКОМ

Давлетшина В.В.^{1,2}.

1 - Санкт-Петербургский государственный университет, Клиника высоких медицинских технологий им. Н. И. Пирогова

2 - Северо-Западный окружной научно-клинический центр им. Л.Г.Соколова

Аннотация. Продемонстрированы возможности визуализирующей фотоплетизмографии и ICG-флуоресцентной ангиографии как интраоперационных методов оценки тканевой перфузии. Что является самой частой причиной развития такого грозного послеоперационного осложнения, как несостоятельность анастомоза. Описаны основные понятия для понимания процесса визуализирующей фотоплетизмографии. Выявленные данные показывают, что разработка неинвазивных интраоперационных методов визуализации кровоснабжения анастомозируемых участков кишечника динамично развивается и требует дальнейшего изучения.

Ключевые слова: Фотоплетизмография, визуализирующая фотоплетизмография, несостоятельность анастомоза, ICG-флуоресценция, тканевая перфузия, индоцианин зеленый, колоректальный рак, профилактика несостоятельности анастомоза.

Введение. Колоректальный рак занимает 3-е место среди всех онкологических заболеваний и 2-е место по смертности [1]. Среди грозных осложнений после резекционных оперативных вмешательств с формированием анастомоза огромное внимание уделяется развитию несостоятельности анастомозов. Развитие несостоятельности анастомоза влечет за собой не только рост количества послеоперационных осложнений, но и достоверно увеличивает частоту местных рецидивов [2, 3].

Оценка параметров кровообращения и тканевой перфузии чрезвычайно важна для оценки адекватного кровоснабжения анастомозируемых участков кишки.

В настоящее время не существует единого стандартного и исчерпывающего интраоперационного метода оценки кровоснабжения участков кишки при колоректальных резекциях. Описаны различные методы оценки перфузии такие как гиперспектральная визуализация, оптическая когерентная томография, лазерная спекл-контрастная визуализация, инфракрасная термометрия, темнопольная микроскопия, визуализация с введением индоцианина зеленого и фотоплетизмография. Более того, опыт хирурга играет немаловажную роль в качестве визуальной оценки как единственного метода для решения адекватности кровоснабжения участков кишки.

Несостоятельность анастомоза

Несостоятельностью анастомоза можно назвать наличие сообщения между внутри- и внекишечным пространством в результате дефекта целостности кишечной стенки на уровне анастомоза, а также по линии ручного или аппаратного шва в области неоректального резервуара [11]. Наиболее распространенной причиной несостоятельности является нарушение перфузии тканей кишки в зоне межкишечного анастомоза. Учитывая, что несостоятельность анастомоза является грозным послеоперационным осложнением в колоректальной хирургии, огромную значимость имеет профилактика, выявление факторов риска, методы ранней диагностики, а также разработка эффективных мер раннего выявления и лечения.

На сайте поисковой системы по биомедицинским исследованиям PUBMED за период с 1958 по март 2023 года несостоятельности анастомоза посвящено 8877 публикаций. Из которых за последние 10 лет количество ежегодных публикаций увели-

чилося почти в 3,5 раза (281 против 902). Из указанных публикаций 79% приходится на последние 10 лет (7013 из 8877).

К основным факторам развития несостоятельности колоректального анастомоза относят возраст, пол пациента, курение, локализация опухоли в прямой кишке, высокий индекс массы тела, гипоальбуминемия, анемию, неoadъювантную химиолучевую терапию, опыт и интуицию хирурга [2, 11, 12, 13]. При развитии анастомоза немаловажную роль играют мобилизация проксимальных отделов ободочной кишки, способы и техника укрепления анастомоза, интраоперационная кровопотеря, наличие и методика дренирования брюшной полости и пресакрального пространства, продолжительность операции, уровень наложения анастомоза, наличие или отсутствие превентивных стом, питание в раннем послеоперационном периоде, активизация пациента.

По данным ряда авторов частота несостоятельности колоректальных анастомозов достигает от 1.5% до 16% [3, 9]. В многоцентровом исследовании, в котором было проанализировано почти 100 тысяч операций в период с 2008 по 2010 гг., описывали частоту несостоятельности анастомоза при операциях на правой половине ободочной кишки - 6,09%, а при операциях на левой половине ободочной кишки - 5,82% [10]. В 2016 году в исследовании было проанализировано 427 пациентов с раком прямой кишки и 458 пациентов с раком ободочной кишки, и выявлено, что несостоятельность аппаратного колоректального анастомоза развилась в 8,7% случаях с отметкой более лучших результатов при наложении "конец-в-конец"[16]. В колоректальной хирургии с внедрением аппаратных циркулярных анастомозов посвящается немало работ, посвященных безопасности использования и методу выбора аппаратов во время операции, так например, в одноцентровом ретроспективном исследовании у 815 пациентов за период с 2013 по 2016г. были проанализированы осложнения, связанных с анастомозом (несостоятельность, кровотечение, стриктура) и выявлено, что использование 25мм циркулярного степлера безопасно не увеличивает риск стриктур и других осложнений по сравнению с более крупными степлерами [17]. Однако необходимо учитывать, что с каждым годом чаще используется миниинвазивные методики, использование аппаратных анастомозов, улучшается методика проведения и филигранность манипуляций во время оперативного вмешательства. И стоит отметить, что за последние десятилетия повышена не только качество, но и безопасность колоректальной хирургии за счет улучшения преабилитации, проведения антибиотикопрофилактики и повышения качества послеоперационного ведения пациентов. Не смотря на прогресс в медицине тема несостоятельности анастомозов остается актуальной и остро востребованной к решению проблемы послеоперационных осложнений при колоректальных операциях.

Различные методы оценки тканевой перфузии

Тканевой перфузией (perfusio - обливание, вливание) обозначают процесс прохождения/пропускания крови, кровезамещающих растворов и биологически активных веществ через сосудистую систему органов и ткани организма. Описаны различные методы оценки перфузии такие как гиперспектральная визуализация, оптическая когерентная томография, лазерная спекл-контрастная визуализация, инфракрасная термометрия, темнопольная микроскопия, визуализация с введением индоцианина зеленого и фотоплетизмография.

Лазерная доплеровская флоуметрия это метод, который используют для измерения объемной скорости кровотока и оценки состояния микроциркуляторного русла. Широко применяют для оценки кожного периферического кровотока и микроциркуляции верхних и нижних конечностях. В частности, у пациентов с сахарным диабетом оценивалась микроциркуляция нижних конечностей методами лазерной доплеровской флоуметрии и флуоресцентная спектроскопия, и оценили высокую диагностическую значимость комплексного применения [18].

Лазерная спекл-контрастная визуализация предоставляет изображение с более темными и светлыми участками, где хорошая перфузия наблюдается в темных областях [34].

Основные определения и характеристики в физике, общие базовые знания для понимания процесса фотоплетизмографии

Фотоплетизмография (от греч. “photo” - свет, “plethysmos” - наполнение, “grapho” - писать, изображать) это метод непрерывной графической регистрации изменений объема, отражающих динамику кровенаполнения органов на основании измерения оптической плотности. Основой методики фотоплетизмографии является просвечивание светом с определенной длиной волны через участок ткани.

Для того, чтобы всецело понять методику, необходимо разобраться в физических определениях и процессах. Как мы знаем, в оптической физике, занимающейся изучением света, свет рассматривается как электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом. Электромагнитное излучение это изменение состояния электромагнитного поля. Электромагнитное поле это совокупность неразрывно связанных между собой переменных электрического и магнитного полей. Таким образом, светом являются электромагнитные поля видимого спектра, включающегося в себя инфракрасную и ультрафиолетовую области спектра. У света как волны есть характеристики: частота, длина, поляризация и интенсивность. Длиной волны называют расстояние между двумя ближайшими друг к другу точками в пространстве, в которых колебания происходят в одинаково фазе. Человеческим глазом посредством рецепторов колбочкам на сетчатке глаза воспринимается длина волны от 380 до 760 нм, что соответствует интервалу частот от $7,5 \times 10^{14}$ до 4×10^{14} Гц. Излучения с длинами волн: от 380 до 470 нм имеют фиолетовый и синий цвет, от 470 до 500 нм - сине-зеленый, от 500 до 560 нм - зеленый, от 560 до 590 нм - желто-оранжевый, от 590 до 760 нм - красный), в каждом интервале из которых при градации определяется оттенки указанных цветов.

Свет, который мы не видим, представлен ультрафиолетовым излучением и инфракрасным излучением.

Ультрафиолетовое излучение (лат. ultra - за + “фиолетовый”) это электромагнитное излучение с длиной волны с 10 до 400 нм. Источниками являются Солнце и другие звезды, электрические дуги, некоторые лазер и специальные устройства. Действует поверхностно, и при длительном воздействии может вызывать ожоги.

Инфракрасное излучение (лат. infra - ниже + “красный”) это оптическое излучение с длиной волны, превышающей 760 нм. Источниками могут любые тела, имеющие температуру выше абсолютного нуля. Хорошо проходит через все слои.

Принцип фотоплетизмографии основан на поступлении отраженного и прошедшего через участок ткани рассеянного света после воздействия светом. Фотоплетизмография признана простым и надежным методом скрининговой оценки сосудов, оценивающим наполнение мелких сосудов кровью в зависимости от фазы кардиоцикла.

Фотоплетизмография не является новым открытием [19, 20, 21]. Впервые процесс фотоплетизмографии был описан еще в 1937 году [22].

Пульсовая волна - это распространяющаяся по артериям волна повышенного давления, вызванная выбросом крови из левого желудочка сердца в период систолы. В графике пульсовой волны выделяют восходящий участок — анакроту, инцизуру, дикротический подъем и катакроту (нисходящий участок кривой пульсовой волны) [26]. Анакрота отображает временный интервал от начала периода изгнания крови из желудочка до достижения максимального давления в сосуде. Инцизура формируется с конца изгнания крови до закрытия полулунных клапанов. Затем дикротический подъем - с закрытия полулунных клапанов с формированием повторной волны повышения давления. И наконец, катакроте в виде спада пульсовой волны соответствуют время от момента снижения давления в артерии до минимального и восстановление исход-

ного диаметра артерии [26, 27].

Время прохождения импульса (Pulse Transit Time) - это время, за которое пульсовая волна проходит между двумя артериальными участками.

Индекс перфузии (Perfusion Index, индекс импульсной модуляции) - это характеристика кровотока, которая зависит от интенсивности кровотока, от заполнения сосудов кровью, от количества работающих капилляров. Нормальная величина PI находится в пределах 4-5%. В случаях более 5% имеет место избыточная - гиперперфузия, что означает бо́льший объемный периферический кровоток [24]. Измерение отношения пульсирующего и неппульсирующего кровотока в периферических тканях человека, таких как к примеру кончики пальцев, основано на двух компонентах поглощения красного и инфракрасного света [25].

Визуализирующая фотоплетизмография

Визуализирующая фотоплетизмография (Imaging photoplethysmography, iPPG) является бесконтактным методом оценки тканевой перфузии.

В экспериментальном исследовании интраоперационной визуализирующей фотоплетизмографии авторы отметили, что метод iPPG продемонстрировал потенциал качественной оценки тканевой перфузии кишечного анастомоза с последующим решением пересмотра зоны резекции [30]. В недавних исследованиях Kaschenko et al. (2022) и Kamshilin et al. (2022) были описаны результаты визуализирующей фотоплетизмографии при формировании анастомоза по Ру, правосторонней и левосторонней гемиколэктомиях, резекциях прямой кишки, которое отразило хорошую визуализацию тканевой перфузии анастомозируемых участков различных отделов желудочно-кишечного тракта.

Преимуществами метода визуализирующей фотоплетизмографии являются: отсутствие необходимости введения какого-либо вещества, возможность непрерывного мониторинга перфузии, простота и низкая стоимость оборудования, сканирует сразу нескольких сигналов: SpO₂, частота сердечных сокращений и частота дыхательных движений. Недостатками метода являются задержка в несколько минут при визуализации перфузии тканей, также на качество сигнала ФПГ могут влиять различные факторы, вызывающие вазомоторный тонус, низкий сердечный выброс.

Визуализирующая фотоплетизмография набирает интерес со стороны ученых, хирургов. Так, авторы продемонстрировали.

Продемонстрирована лапароскопическая визуализирующая фотоплетизмография (laparoscopic iPPG) (рис.1), при котором через дополнительный троакар хирург вводил оптическую систему с последующей записью видеоизображений исследуемой ткани в течение 12 сердечных циклов [5]. В результате работы алгоритма на экран монитора выводилось пространственное распределение амплитуды пульсирующего компонента (APC), который представляет собой индекс перфузии, связанный с тоном близлежащих артериальных сосудов [5, 23].

Публикуется с разрешения авторов.

Источник: Зайцев В.В., Камшилин А.А., Кащенко В.А., Мачихин А.С. Лапароскопическая фотоплетизмографическая система для оценки перфузии тканей при малоинвазивном операционном вмешательстве. - Медицинская фотоника и агрофотоника. ВКВО-2019. DOI: 10.24412/2308-6920-2023-6-234-235

В исследовании оценки пространственно-временных изменений тонуса внутричерепных сосудов на 15 крысах при попытке сравнения двух методов оценки перфузии: визуализирующей фотоплетизмографии и ICG-флуоресценции было выявлено, что ФПГ соответствует распределениям, полученным при ICG [28].

ICG-флуоресцентная ангиография

Метод флуоресцентной ангиографии с индоцианином зеленым является достаточно хорошо зарекомендовавшим себя методом оценки перфузии в реальном времени, хотя еще не является стандартом. Принцип заключается в визуализации

течения флуоресцентного агента (индоцианина зеленого) в тканях и анатомических структурах. Данный метод широко применяют в онкологии, в частности в определении сигнальных лимфатических узлов и путей оттока лимфы. Применение ICG облегчает определение оптимальной линии резекции (рис.2) и позволяет отчетливо визуализировать области ишемии или плохой перфузии до момента выполнения анастомоза после разделения брыжейки, что значительно облегчает оценку васкуляризации после завершения реконструкции [32].

Рисунок 1.
Лапароскопическая визуализирующая фотоплетизмография [5]

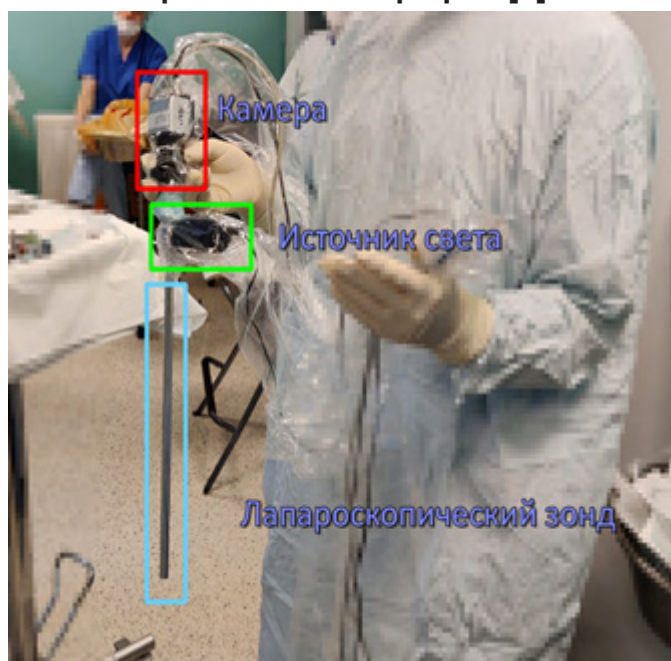


Рисунок 2.
Отчетливо видны распределение перфузии толстой кишки при использовании ICG – флуоресцентной визуализации, а также четкая демаркация. Зеленым цветом светится хорошо перфузируемая часть кишки, красным – плохо перфузируемая [33].



Оценка и анализ перфузии тканей, осуществляемый посредством ICG-флуоресцентной ангиографии, дает возможность помимо традиционных методов оценки достаточности кровоснабжения тканей, которые основаны на субъективном восприятии хирурга (оценка цвета серозной оболочки, пальпируемой пульсации и признаков активного кровотечения из маргинальных артерий), также получить более точное измерение уровня перфузии тканей. Это способствует снижению риска несостоятельности анастомоза, благодаря возможности интраоперационного изменения и моделирования оперативного вмешательства, связанного с адекватной и более детальной оценкой кровоснабжения тканей в области межкишечного анастомоза, что особенно значимо для коморбидных пациентов и при наличии сложностей формирования анастомоза [6].

Ряд авторов описывают, что использование ICG-флуоресценции в колоректальной хирургии позволяет экономить средства в связи со снижением развития несостоятельности анастомоза [14].

В недавнем исследовании (2022г.) при формировании пищеводно-желудочного анастомоза при торакоскопической эзофагэктомии было отмечено эффективное снижение несостоятельности анастомоза при использовании ICG-флуоресценции [15].

Однако ввиду дороговизны не каждый медицинский центр имеет возможность приобретения и использования данной методики. Изображения ICG-флуоресценции обычно оцениваются визуально, что приводит к субъективной интерпретации [31]. Также следует отметить необходимость внутривенного или паратуморального введения пациентам контрастного вещества, что может ограничить круг допустимых лиц и привести к развитию аллергических или побочных явлений. Интенсивность изобра-

жений обуславливают как доза контрастного вещества, так и место введения, расстояние между тканью и камерой и промежуток времени между введением и оценкой перфузии.

Заключение. Дополнительные методы оценки тканевой перфузии являются мощными профилактическими мерами в профилактике послеоперационных осложнений, в улучшении качества хирургической помощи пациентам. Визуализирующая фотоплетизмография является перспективным инновационным и конкурентноспособным методом оценки перфузии. Мы считаем, что использование дополнительных методов оценки тканевой перфузии при колоректальных резекциях позволяет снизить количество ранних послеоперационных осложнений. Метод визуализирующей фотоплетизмографии, являющийся отечественной разработкой, требует дальнейшего изучения и набора данных.

Список использованной литературы:

1. Данные ВОЗ, опубликованные 2021г. <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cancer>
2. Соловьев И.А., Литвинов О.А., Навматуля А.Ю., Житихин Е.В. Факторы риска развития несостоятельности колоректального анастомоза и способы профилактики. - Вестник национального медико-хирургического центра им.Н.И.Пирогова 2019, т.14, №1. DOI: 10.25881/BPNMSC.2019.63.22.023
3. Черданцев Д.В., Поздняков А.А., Шпак В.В., Рябков Ю.В., Попов А.Е. Несостоятельность колоректального анастомоза. Современное состояние проблемы (обзор литературы). Колопроктология. 2015;4(54):57–64. [Cherdantsev D.V., Pozdnyakov A.A., Shpak V.V., Ryabkov Yu.V., Popov A.E. Colorectal anastomosis failure. The current state of the problem (literature review). Coloproctology. 2015;4(54):57–64 (In Rus.)].
4. Ермаков Д.Ф. Факторы риска несостоятельности аппаратного анастомоза после передней резекции прямой кишки: дис. ... канд. мед. наук. М., 2012. [Ermakov D.F. Risk factors for hardware anastomosis failure after the anterior rectal resection: Dis. Cand. Sci. (Med.). Moscow, 2012 (In Rus.)]
5. Зайцев В.В., Камшилин А.А., Кащенко В.А., Мачихин А.С. Лапароскопическая фотоплетизмографическая система для оценки перфузии тканей при малоинвазивном операционном вмешательстве. - Медицинская фотоника и агрофотоника. ВКВО-2019. DOI: 10.24412/2308-6920-2023-6-234-235
6. Кащенко В.А., Лодыгин А.В., Волкова Е.С., Напалков А.Н., Коробицына А.М. ICG-флуоресцентная навигация в колоректальной хирургии. Клиническая больница № 2. 2019; 2(28): 12-17. [Kashchenko V.A., Lodygin A.V., Volkova E.S., Napalkov A.N., Korobicyna A.M. ICG-fluorescent navigation in colorectal surgery. The hospital № 2. 2019; 2(28): 12-17. (in Russian)]
7. KamshilinAA, ZaytsevVV, LodyginAV, KashchenkoVA. Imaging photoplethysmography as an easy-to-use tool for monitoring changes in tissue blood perfusion during abdominal surgery. Sci Rep. 2022 Jan 21;12(1):1143. doi: 10.1038/s41598-022-05080-7. PMID: 35064190; PMCID: PMC8782890.
8. Tsujinaka S., Kawamura Y.J., Konishi F. et al. Pelvic drainage for anterior resection revisited: use of drains in anastomotic leaks. ANZ J. Surg. – 2008. 78 (6):461-5
9. Hammond J., Lim S., Wan Y. The Burden of Gastrointestinal Anastomotic Leaks: an Evaluation Clinical and Economic Outcomes. J. Gastrointest. Surg. – 2014. – Jun; 18 (6):1176-85
10. Rahbari NN, Weitz J, Hohenberger W. et al. Definition and grading of anastomotic leakage following anterior resection of the rectum: a proposal by the International Study Group of Rectal Cancer. Surgery. 2010;147:339–51
11. Половинкин, В.В., Проханов, В.А., Завражнов, А.А., Волков, А.В., Халафян, А.А. Факторы риска развития несостоятельности колоректального анастомоза после

операций по поводу рака прямой кишки // Кубанский научный медицинский вестник. – 2013. – No 7. – С. 106–112. [Polovinkin, V.V., Prohanov, V.A., Zavrazhnov, A.A., Volkov, A.V., Halafyan, A.A. Faktory riska razvitiya nesostoyatel'nosti kolorektal'nogo anastomoza posle operacij po povodu raka pryamoj kishki // Kubanskij nauchnyj medicinskij vestnik. – 2013. – No 7. – S. 106–112].

12. Попов, Д.Е. Факторы риска несостоятельности колоректальных анастомозов у больных раком прямой кишки // Колопроктология. – 2014. – No 2 (48). – С. 48–56. [Popov, D.E. Faktory riska nesostoyatel'nosti kolorektal'nyh anastomozov u bol'nyh rakom pryamoj kishki // Koloproktologiya. – 2014. – No 2 (48). – S. 48–56].

13. Kim, M.K., Won, D.Y., Lee, J.K., Kang, W.K., Kim, J.G., Oh, S.T. Comparative study between transanal tube and loop ileostomy in low anterior resection for mid rectal cancer: a retrospective single center trial. // Ann Surg Treat Res. – 2015. – Vol. 88 (50). – P. 260–268.

14. Liu RQ, Elnahas A, Tang E, Alkhamesi NA, Hawel J, Alnumay A, Schlachta CM. Cost analysis of indocyanine green fluorescence angiography for prevention of anastomotic leakage in colorectal surgery. Surg Endosc. 2022 Dec;36(12):9281-9287. doi: 10.1007/s00464-022-09166-1. Epub 2022 Mar 15. PMID: 35290507.

15. Shishido Y, Matsunaga T, Makinoya M, Miyauchi W, Shimizu S, Miyatani K, Uejima C, Morimoto M, Murakami Y, Hanaki T, Kihara K, Yamamoto M, Tokuyasu N, Takano S, Sakamoto T, Saito H, Hasegawa T, Fujiwara Y. Circular stapling anastomosis with indocyanine green fluorescence imaging for cervical esophagogastric anastomosis after thoracoscopic esophagectomy: a propensity score-matched analysis. BMC Surg. 2022 Apr 29;22(1):152. doi: 10.1186/s12893-022-01602-2. PMID: 35488244; PMCID: PMC9052471.

16. Кит О.И., Геворкян Ю.А., Солдаткина Н.В., Колесников Е.Н., Харагезов Д.А., Колесников В.Е., Кожушко М.А. Аппаратный межкишечный анастомоз при колоректальном раке: непосредственные результаты. Колопроктология. 2016г. №1. с48-53.

17. Nagaoka T, Yamaguchi T, Nagasaki T, Akiyoshi T, Nagayama S, Fukunaga Y, Chino A, Ishizuka N, Konishi T. Safety of Small Circular Staplers in Double Stapling Technique Anastomosis for Sigmoid Colon and Rectal Cancer. Dis Colon Rectum. 2021 Aug 1;64(8):937-945. doi: 10.1097/DCR.0000000000001889. PMID: 33951685.

18. Шинкин М.В., Звенигородская А.М., Мкртумян А.М. Лазерная доплеровская флоуметрия и флуоресцентная спектроскопия как методы оценки доклинических проявлений синдрома диабетической стопы. Эффективная фармакотерапия. Эндокринология, 2018г. №2.

19. Alian AA, Shelley KH. Photoplethysmography. Best Pract Res Clin Anaesthesiol. 2014 Dec;28(4):395-406. doi: 10.1016/j.bpa.2014.08.006. Epub 2014 Sep 9. PMID: 25480769.

20. Severinghaus JW, Astrup PB. History of blood gas analysis. VI. Oximetry. J Clin Monit 1986;2(4):270e88

21. Wukitsch MW. Pulse oximetry: historical review and Ohmeda functional analysis. Int J Clin Monit Comput 1987;4(3): 161-6

22. Hertzman AB, Spielman C. Observations on the finger volume pulse recorded photoelectrically. Am J Physiol 1937;119: 334-5.

23. Lyubashina O.A., Mamontov O.V., Volynsky M.A., Zaytsev V.V., Kamshilin A.A. Contactless assessment of cerebral autoregulation by photoplethysmographic imaging at green illumination. Front Neurosci. 13:1235 (2019)

24. Курсов С.В. Перфузионный индекс в практике анестезиологии и интенсивной терапии (обзор литературы). Журнал “Медицина неотложных состояний” 7 (70), 2015г.

25. Surekha C, Eadara VS, Satish Kumar MN. Evaluation of perfusion index as an objective tool to assess analgesia during laparoscopic surgeries under general anaesthesia. Indian J Anaesth. 2022 Apr;66(4):260-265. doi: 10.4103/ija.ija_658_21. Epub 2022 Apr 20. PMID: 35663221; PMCID: PMC9159402.

26. Сагирова Ж.Н., Кузнецова Н.О., Ларионов В.Б., Чомахидзе П.Ш., Копылов

Ф.Ю., Сыркин А.Л. Параметры пульсовой волны в оценке систолической функции левого желудочка. Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2020;13(3):253-257. <https://doi.org/10.17116/kardio202013031253>

27. Агаджанян Н.А., Торшин В.И., Власова В.М. Основы физиологии человека. М.: РУДН; 2001.

28. Mamontov OV, Sokolov AY, Volynsky MA, Osipchuk AV, Zaytsev VV, Romashko RV, Kamshilin AA. Animal model of assessing cerebrovascular functional reserve by imaging photoplethysmography. *Sci Rep.* 2020 Nov 4;10(1):19008. doi: 10.1038/s41598-020-75824-w. Erratum in: *Sci Rep.* 2021 Apr 26;11(1):9350. PMID: 33149189; PMCID: PMC7642404.

29. Kashchenko VA, Zaytsev VV, Ratnikov VA, Kamshilin AA. Intraoperative visualization and quantitative assessment of tissue perfusion by imaging photoplethysmography: comparison with ICG fluorescence angiography. *Biomed Opt Express.* 2022 Jun 16;13(7):3954-3966. doi: 10.1364/BOE.462694. PMID: 35991934; PMCID: PMC9352280.

30. M. Lai, S. D. van der Stel, H. C. Groen, M. van Gastel, K. F. D. Kuhlmann, T. J. M. Ruers, and B. H. W. Hendriks. "Imaging PPG for In Vivo Human Tissue Perfusion Assessment during Surgery," *J. Imaging* 8(4), 94 (2022)

31. Chalopin C, Pfahl A, Köhler H, Knospe L, Maktabi M, Unger M, Jansen-Winkel B, Thieme R, Moulla Y, Mehdorn M, Sucher R, Neumuth T, Gockel I, Melzer A. Alternative intraoperative optical imaging modalities for fluorescence angiography in gastrointestinal surgery: spectral imaging and imaging photoplethysmography. *Minim Invasive Ther Allied Technol.* 2023 Jan 9:1-11. doi: 10.1080/13645706.2022.2164469. Epub ahead of print. PMID: 36622288.

32. Boni L., Macina S., David G., Cassinotti E., Fingerhut A. ICG-Enhanced Fluorescence-Guided Laparoscopic Surgery. 2nd ed. Endo-Press GmbH; 2019. 20 p.

33. А.Л. Акопов, Д.П. Асадчая, М.А. Бикетов, А.А. Богатиков, А.А. Божок, Д.А. Ведянская, М.А. Волынский, М.И. Глузман, В.В. Давлетшина, С.Ю. Дворецкий, В.В. Зайцев, А.А. Ильин, А.А. Камшили, Я.Ю. Капшук, А.М. Карачун, В.А. Кащенко, И.В. Комаров, Н.Р. Коптеев, А.М. Коробицина, Е.С. Краморов, А.В. Лодыгин, О.В. Мамонтов, А.А. Назаренко, Р.В. Павлов, Г.В. Папаян, Ю.В. Пелипась, С.М. Портной, В.А. Ратников, И.О. Руткин, В.В. Стрижелецкий, А.В. Струй, Р.Э. Топузов, А.В. Щербинин. ICG-флуоресцентная навигация в абдоминальной хирургии. Учебно-методическое пособие. – Лепран Принт, 2022 г. – 84 с.

34. Heeman W, Steenberg W, van Dam G, Voerma EC. Clinical applications of laser speckle contrast imaging: a review. // *J Biomed Opt.* 2019 Aug;24(8):1-11. V 10.1117/1.JBO.24.8.080901.