

## ЛАПАРОСКОПИЧЕСКАЯ ИНТРАОПЕРАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИКИ КРОВОТОКА МЕТОДОМ ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ

В. В. Зайцев<sup>a,b</sup>, В. А. Кащенко<sup>b,c</sup>, А. В. Лодыгин<sup>b,c</sup>,  
К. Ю. Красносельский<sup>b,d</sup>, А. А. Камшилин<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
690041, Владивосток, ул. Радио, 5

<sup>b</sup> Северо-Западный окружной научно-клинический центр им. Л. Г. Соколова  
ФМБА, 194291, Санкт-Петербург, пр. Культуры, 4

<sup>c</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

<sup>d</sup> Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский  
университет, 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2

Объективная оценка функционального состояния и жизнеспособности биологических тканей при малоинвазивных операциях остается нерешенной задачей. Визуализирующая фотоплетизмография (iPPG) — новый метод количественной оценки распределения перфузии в тканях. Это первое исследование, в котором мы демонстрируем успешное использование iPPG для оценки перфузии органов во время лапароскопической хирургии в операционной. Измерения перфузии проводились перед подготовкой участка кишки или желудка к резекции, после наложения анастомоза или во время физиологических проб. Пространственное распределение перфузии и ее изменения во времени были успешно измерены во всех хирургических случаях.

**Ключевые слова:** интраоперационная оценка перфузии; визуализирующая фотоплетизмография; малоинвазивная хирургия; лапароскопическая хирургия

## LAPAROSCOPIC INTRAOPERATIVE ASSESSMENT OF BLOOD FLOW DYNAMICS BY IMAGING PHOTOPLETHYSMOGRAPHY

V. V. Zaytsev<sup>a,b</sup>, V. A. Kashchenko<sup>b,c</sup>, A. V. Lodygin<sup>b,c</sup>, K. Yu. Krasnoselsky<sup>b,d</sup>,  
A. A. Kamshilin<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Institute of Automation and Control Processes FEB RAS,  
5 Radio str., 690041, Vladivostok

<sup>b</sup> North-Western District Scientific and Clinical Center FMBA,  
4 Kultury av., 194291, St. Petersburg

<sup>c</sup> St. Petersburg State University, 7-9 University emb., 199034, St. Petersburg

<sup>d</sup> St. Petersburg State Pediatric Medical University,  
2, Litovskaya str., 194100, St. Petersburg

An objective assessment of the functional state and identification of biological tissues in minimally invasive operations remains an unsolved problem. Imaging photoplethysmography (iPPG) is a novel technique for quantifying perfusion distribution across tissues. This is the first study in which we have successfully used iPPG to assess organ perfusion during laparoscopic surgery. Measurements were carried out before preparing a section of the intestine or stomach for resection, after anastomosis, or during physiological test. Perfusion distribution and its changes over time were successfully measured in all surgical cases.

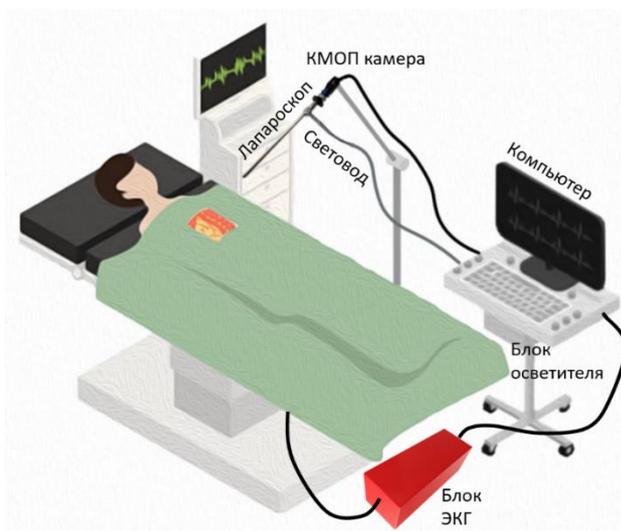
**Keywords:** intraoperative perfusion assessment; imaging photoplethysmography; minimally invasive surgery; laparoscopic surgery

Лапароскопически ассистированная хирургия малотравматична и значительно сокращает время последующего восстановления больного. Интраоперационная оценка перфузии тканей брюшной полости играет первостепенную роль в принятии хирургических решений при выполнении реконструктивных резекций кишечника [1]. Однако, при стандартной лапароскопической операции объективная интраоперационная оценка функционального состояния и жизнеспособности биологических тканей остается нерешенной задачей. В последние годы перспективные результаты при оценке перфузии органов внутри брюшной полости были продемонстрированы с помощью метода флуоресцентной ангиографии с индоцианином зеленым (ICG) [2]. Этот метод обеспечивает полное поле зрения перфузии тканей в режиме реального времени. Поскольку для реализации этого метода требуется только цифровая камера и соответствующее освещение тканей, его можно легко интегрировать в стандартный лапароскоп [3]. Этот метод коммерчески доступен в лапароскопических камерах визуализации и хирургических роботах для малоинвазивной хирургии. Однако этот метод требует внутривенного введения флуорофора, и мониторинг перфузии в течение длительного времени невозможен. Поэтому поиск альтернативных методов интраоперационной оценки перфузии тканей внутри брюшной полости является актуальной задачей [4].

Недавно для интраоперационной визуализации и бесконтактного количественного определения перфузии крови в тканях был предложен метод визуализирующей фотоплетизмографии (iPPG) [5]. Этот метод также использует обычную видеокамеру, но в отличие от ICG ангиографии не требуется введения какого-либо красителя, и при этом исследуемый орган освещается обычным зеленым светом. Отличительной особенностью является корреляционная обработка видеок кадров, синхронно записанных с электрокардиограммой, которая позволяет выявлять мельчайшие световые модуляции, связанные с сердечной деятельностью, на сильно изменчивом фоне, что решает непростую задачу достоверной и чувствительной оценки перфузии в реальных клинических условиях. Совсем недавно в нашей группе

было продемонстрировано успешное применение системы iPPG для визуализации и количественного измерения перфузии тканей желудка и кишечника во время открытой операции в клинических условиях [6, 7].

В этом исследовании мы использовали стандартное лапароскопическое оборудование в сочетании с ранее разработанным в нашей группе программно-аппаратным комплексом iPPG (Рис. 1).



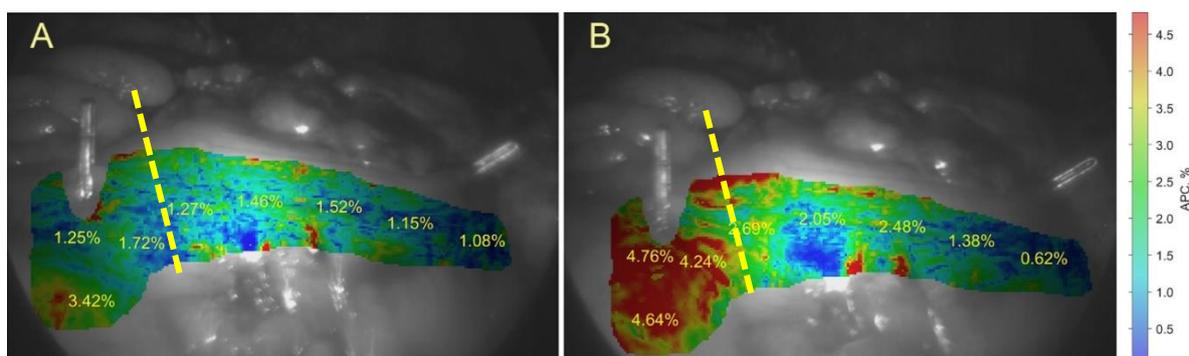
*Рис. 1. Система iPPG лапароскопии, разработанная в этом исследовании*

Интраоперационная оценка перфузии была проведена у девяти пациентов с различными онкологическими диагнозами. Все хирургические процедуры были выполнены сертифицированными лапароскопическими колоректальными хирургами нашего клинического центра. В ходе оперативного лечения оценивали перфузию органов брюшной полости с помощью iPPG лапароскопа на различных этапах операции для оценки границ применимости разработанной системы интраоперационной оценки параметров кровотока. В частности, измерения проводились при подготовке участка кишки или желудка к резекции, после наложения анастомоза или при физиологических пробах.

После записи и сохранения на компьютере видеокadres и ЭКГ обрабатывались в автономном режиме с помощью специального программного обеспечения. В результате расчётов мы получали пространственное распределение амплитуды пульсаций (АРС) питающих артериальных сосудов. Физиологически параметр АРС указывает на изменения объема артериальной крови, обусловленные их пульсирующим характером [8, 9]. Как известно, этот параметр определяется тонусом сосудов кровоснабжения [8] и, следовательно, его карта отображает пространственное распределение показателя индекса перфузии.

В качестве одного из примеров на Рис. 2 показано изменение карты распределения перфузии во время физиологического теста по оценке изменений кровотока в ответ на повышение артериального давления,

вызванного введением норадреналина. Распределение перфузионного индекса до введения норадреналина при артериальном давлении 93/51 мм рт.ст. показано на рис. 2А. Через две минуты после введения давление повысилось до 103/59 мм рт.ст., и распределение перфузии в этот момент показано на рис. 2В. Как видно, повышение АД существенно изменило перфузию: в левой части кишечника она увеличилась, а в правой, наоборот, уменьшилась. Это доказывает, что лапароскоп iPPG позволяет как визуализировать, так и количественно оценивать перфузию органов во время лапароскопических операций. Желтые пунктирные линии на рис. 2 указывают местонахождение самого крутого градиента перфузии.



*Рис. 2. Интра-абдоминальная визуализация перфузии сигмовидной кишки во время фармакологического теста. (А) До введения норадреналина. (В) Через две минуты после введения*

Основным преимуществом разработанной лапароскопической системы является возможность легко и непрерывно получать новые количественные изображения во время операции, отображающие распределение перфузии по органам. Следует особо подчеркнуть, что система позволяет проводить количественную оценку градиента перфузии внутри брюшной полости в сложных условиях, когда различные участки органов смещены как относительно друг друга в произвольных направлениях, так и относительно передней линзы лапароскопа. Визуализирующая фотоплетизмография, улучшенная за счет корреляционной обработки видеоданных, синхронно регистрируемых с ЭКГ, легко совмещается со стандартным лапароскопом, что позволяет проводить интраабдоминальную визуализацию и количественную оценку распределения перфузии. Это новая технология, которая имеет большой потенциал для клинического применения в малоинвазивной хирургии.

Применяя экспериментальную методику визуализирующей фотоплетизмографии, нашей группой впервые получены данные по динамическому изменению кортикального кровотока в ходе проведения нейрохирургических операций, сопряженных с трепанацией черепа человека. В результате измерений получаются изображения с картированием динамики перфузии тканей мозга на различных стадиях операции.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД  
Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки Пермского  
федерального исследовательского центра Уральского отделения  
Российской академии наук

## **ПЕРМСКИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ**

**Сборник материалов IX Всероссийской конференции,  
посвященной памяти профессоров  
Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова**

(г. Пермь, ПГНИУ, 4–6 октября 2023 г.)



Пермь 2023

УДК 532.5

ББК 22.25

П26

П26

**Пермские** гидродинамические научные чтения [Электронный ресурс]: сборник статей по материалам IX Всероссийской конференции, посвященной памяти профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова / отв. ред. Т. П. Любимова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2023. – 20 Мб; 502 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/permskie-gidrodinamicheskie-nauchnyechneniya-2023.pdf>. – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-3158-2

Представлены статьи по материалам VIII Всероссийской конференции, проходившей на базе Пермского государственного национального исследовательского университета 4 – 6 октября 2023 г. Конференция посвящена памяти руководителей Пермской гидродинамической научной школы – ведущей научной школы Российской Федерации – профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова.

Тематика сборника охватывает широкий спектр актуальных исследований в области физической гидродинамики, перспективных материалов и технологий, физики мягких конденсированных сред.

Издание предназначено для научных работников, аспирантов и студентов естественнонаучных специальностей вузов.

УДК 532.5

ББК 22.25

*Издается по решению ученого совета физического факультета  
Пермского государственного национального исследовательского университета*

#### Рецензенты

- Кривилев М.Д.** – д.ф.-м.н., доцент, заведующий лабораторией физики конденсированных сред, Удмуртский государственный университет, г. Ижевск;
- Баяндин Д.В.** – к.ф.-м.н, доцент, доцент кафедры общей физики Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь

ISBN 978-5-7944-3158-2

© ПГНИУ, 2023

Исследование реализовано при поддержке гранта № 21-15-00265 Российского научного фонда.

### Список литературы

1. *Urbanavičius L., Pattyn P., de Putte D. V., Venskutonis D.* How to assess intestinal viability during surgery: A review of techniques // *World Journal of Gastrointestinal Surgery*. 2011. Vol. 3 (5). P. 59–69.
2. *Miyashiro I., Kishi K., Yano M., Tanaka K., Motoori M., Ohue M., Ohigashi H., Takenaka A., Tomita Y., Ishikawa O.* Laparoscopic detection of sentinel node in gastric cancer surgery by indocyanine green fluorescence imaging // *Surgical Endoscopy*. 2011. Vol. 25 (5). P. 1672–1676.
3. *Diana M., Agnus V., Halvax P., Liu Y.-Y., Dallemagne B., Schlagowski A.-I., Geny B., Diemunsch P., Lindner V., Marescaux J.* Intraoperative fluorescence-based enhanced reality laparoscopic real-time imaging to assess bowel perfusion at the anastomotic site in an experimental model // *British Journal of Surgery*. 2015. Vol. 102 (2). P. e169–e176.
4. *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 // *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*. 2022. Vol. 31. P. 1–11.
5. *Mamontov O. V., Shcherbinin A. V., Romashko R. V., Kamshilin A. A.* Intraoperative imaging of cortical blood flow by camera-based photoplethysmography at green light // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10 (18). P. 6192.
6. *Kamshilin A. A., Zaytsev V. V., Lodygin A. A., Kashchenko V. A.* Imaging photoplethysmography as an easy-to-use tool for monitoring changes in tissue blood perfusion during abdominal surgery // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12 (1). P. 1143.
7. *Kashchenko V. A., Zaytsev V. V., Ratnikov V. A., Kamshilin A. A.* Intraoperative visualization and quantitative assessment of tissue perfusion by imaging photoplethysmography: comparison with ICG fluorescence angiography // *Biomedical Optics Express*. 2022. Vol. 13 (7). P. 3954–3966.
8. *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 // *Frontiers in Neuroscience*. 2019. Vol. 13. P. 1235.
9. *Volynsky M. A., Mamontov O. V., Osipchuk A. V., Zaytsev V. V., Sokolov A. Y., Kamshilin A. A.* Study of cerebrovascular reactivity to hypercapnia by imaging photoplethysmography to develop a method for intraoperative assessment of the brain functional reserve // *Biomedical Optics Express*. 2022. Vol. 13 (1). P. 184–196.