

А.М. Ковальчук^{1,2}, А.А. Махонько^{1,3}, О.С. Орлова¹

СОЧЕТАНИЕ ФОТОАКУСТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИМЕЕТ ЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ КЛИНИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ: ОБЗОР

¹ФГАО ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия²Федеральный центр мозга и нейротехнологий ФМБА России, Москва, Россия³Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

Контактное лицо: Ковальчук Анна Максимовна: kleshchevvva.anna@mail.ru

Резюме

Фотоакустическая визуализация (ФАВ), позволяет неинвазивно получать высококонтрастные изображения глубоких тканей на основе оптического поглощения эндогенных хромофоров или экзогенных агентов и последующей генерации УЗ излучения. Метод имеет значительный клинический потенциал, особенно в сочетании с ультразвуковыми методами. Этот обзор рассматривает преимущества комбинированных систем ФАВ/УЗИ для точной диагностики и мониторинга терапии: в онкологии, неврологии и при раневом заживлении. Интеграция ФАВ и УЗИ обеспечивает получение клинически значимой мультимодальной информации.

Ключевые слова: фотоакустическая визуализация, ультразвуковая диагностика

Для цитирования: Ковальчук А.М., Махонько А.А., Орлова О.С. Сочетание фотоакустической визуализации и ультразвуковых технологий имеет значительный клинический потенциал: обзор // Клинический вестник ФМБЦ им. А.И. Бурназяна 2025. №4. С. 75–78. DOI: 10.33266/2782-6430-2025-4-75-78

А.М. Kovalchuk^{1,2}, А.А. Makhonko^{1,3}, О.С. Orlova¹

Combining Photoacoustic Imaging and Ultrasound Technologies Has Significant Clinical Potential: a Review

¹ Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia²Federal Center for Brain and Neurotechnology FMBA of Russia, Moscow, Russia³Frumkin Institute of physical chemistry and electrochemistry, Moscow, Russia

Contact person: Kovalchuk Anna Mikhaylovna: kleshchevvva.anna@mail.ru

Abstract

Photoacoustic imaging (PAI) enables the non-invasive acquisition of high-contrast images of deep tissues by detecting optical absorption from endogenous chromophores or exogenous agents and their subsequent ultrasound wave generation. This method holds significant clinical promise, particularly when combined with ultrasonic techniques. This review examines the advantages of combined PAI/ultrasound (PAI/UST) systems for precise diagnostics and therapy monitoring in fields such as oncology, neurology, and wound healing. The integration of PAI and UST provides clinically relevant, multi-parametric information that enhances diagnostic capabilities.

Keywords: photoacoustic imaging, ultrasound diagnostics

For citation: Kovalchuk AM, Makhonko AA, Orlova OS. Combining Photoacoustic Imaging and Ultrasound Technologies Has Significant Clinical Potential: a Review. A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center Clinical Bulletin. 2025.4:75-78. (In Russian) DOI: 10.33266/2782-6430-2025-4-75-78

Введение

Ультразвуковые исследования (УЗИ) незаменимы в функциональной диагностике благодаря своей безопасности, неинвазивности и оперативности. Главное преимущество использования ультразвука – визуализация органов и структур в режиме реального времени, что позволяет оценить не только их анатомию, но и динамическую функцию [1].

Изображения живых тканей являются основополагающими для биологических и биохимических исследований, а также для медицинской диагностики и терапии. Фотоакустическая визуализация (ФАВ) является одной из самых быстро развивающихся биомедицинских визуализационных технологий, отвечающей на необходимость развития высокоразрешающей 3D-визуализации [2].

ФАВ эффективна в областях дерматологии, офтальмологии, маммографии, неврологии, эндоскопии, ангиографии, и диабетологии [3, 4]. Также ФАВ может быть объединена с традиционной ультразвуковой визуализацией с целью получения уточненных структурных данных об исследуемых тканях. Одновременное получение фотоакустических (ФА) и ультразвуковых (УЗ) данных позволяет более эффективно интерпретировать информацию [4].

Визуализация методом фотоакустики работает по следующему физическому принципу: эндогенные (оксигемоглобин, дезоксигемоглобин) и экзогенные (наночастицы, красители) хромофоры ткани поглощают энергию фотонов в определенной области спектра, характерной для каждого хромофора. При этом биофизический механизм получения изображений заключается в том, что при стимуляции короткими световыми импульсами хромофоры приобретают тепловую энергию, расширяются и генерируют акустические сигналы, которые могут быть зафиксированы ультразвуковыми преобразователями [5].

ФАВ можно классифицировать на две категории по разрешению:

– Оптическое разрешение (ОР): включает ОР-микроскопию и ОР-ФА эндоскопию. Эти методы обеспечивают высококачественные изображения поверхностных тканей с разрешением на уровне микрометров на глубине в миллиметры.

– Акустическое разрешение (АР): включает АР-ФА микроскопию, АР-ФА томографию и АР-ФА эндоскопию. Методы этой категории позволяют глубже визуализировать ткани (от миллиметров до сантиметров), сохраняя баланс между разрешением изображения и глубиной [6].

Доклинические исследования с использованием систем ФАВ/УЗИ позволяют проводить детальную *in vivo* молекулярную картографию, обнаруживать патологические биомаркеры, а также планировать терапевтические стратегии и оценивать их. Также в настоящий момент доклинические приложения включают в себя диагностику и стадирование опухолей, исследования церебрального кровотока, степени оксигенации тканей [6, 7].

Примеры применения

Одним из примеров сочетанного применения ФАВ/УЗИ является комбинирование ФАВ и ультразвуковой доплерографии (УБД) для диагностики рака щитовидной железы [8]. ФАВ и УБД - передовые методы визуализации, комбинация которых повышает точность диагностики рака щитовидной железы, а также позволяет снизить долю ложноположительных диагнозов. Их интеграция обеспечивает морфо-функциональную оценку тиреоидных

узлов за счет объединения структурной и функциональной информации.

ФАВ позволяет получить детальную информацию о молекулярном составе тканей посредством визуализации оптических характеристик поглощения, с фокусом на содержании гемоглобина внутри узловых образований. Количественный анализ параметров, таких как средний уровень насыщения гемоглобина кислородом и спектральные градиенты фотоакустического сигнала важны для дифференциальной диагностики злокачественных и доброкачественных тиреоидных узлов [9].

УБД регистрирует динамические параметры кровотока и особенности васкуляризации в перинодулярной области и внутри самого узла, что имеет первостепенное значение для оценки функционального состояния ткани. УБД основана на ультрабыстрых технологиях сканирования плоской УЗ волной. Однако, в отличие от ФАВ, УБД предоставляет ограниченные возможности для прямой количественной оценки молекулярных параметров тканей (10).

Продолжающиеся технологические разработки в области комбинированной ФАВ/УБД визуализации открывают перспективы для оптимизации ведения пациентов с патологией щитовидной железы. Ожидается, что данный подход позволит минимизировать гипердиагностику (*overdiagnosis*), связанную с неопределенными результатами традиционных методов, и в конечном итоге улучшить долгосрочные клинические исходы для пациентов.

Комбинация ФАВ и УБД реализует принцип синергетического использования преимуществ обоих методов визуализации. Интеграция данных о молекулярном составе и гемодинамических характеристиках тиреоидных узлов обеспечивает получение целостной картины, что существенно повышает точность диагностики рака щитовидной железы и обоснованность принимаемых клинических решений [8].

ФАВ также возможно применять при таких угрожающих жизни цереброваскулярных и сердечно-сосудистых заболеваниях, как ишемический инсульт, инфаркт миокарда и легочная эмболия [11].

Принцип метода в таком случае основан на генерации ультразвуковых волн вследствие термоупругого расширения тканей, подвергнутых воздействию лазерных импульсов; детекция этих волн позволяет получать изображения, отражающие оптические свойства поглощения биологических структур. Ключевым диагностическим преимуществом ФАВ является ее уникальная способность к дифференциации оксигемоглобина и дезоксигемоглобина [12], что обеспечивает точное количественное определение уровня насыщения крови кислородом. Эта возможность критически важна

для оценки жизнеспособности церебральной ткани в условиях ишемии и позволяет осуществлять быструю и точную диагностику острого ишемического инсульта за счет оперативной оценки состояния цереброваскулярной системы.

Помимо диагностики, ФАВ играет важную роль в контроле терапии, предоставляя возможность мониторинга реперфузии сосудов в режиме реального времени после проведения тромболитических вмешательств, тем самым повышая их целенаправленность и эффективность. Экспериментальные исследования *in vivo* подтверждают способность метода визуализировать динамику кровотока и оксигенации в реальном времени, что необходимо для понимания патогенеза ишемии и оценки результатов лечения. Значительный синергетический эффект достигается при интеграции ФАВ с терапевтическими стратегиями, такими как сонотромболизис или фармакологический тромболизис; такая комбинация позволяет улучшить таргетинг на тромб, контролировать процесс его деструкции и, как следствие, повышать общую эффективность лечения [13].

Таким образом, ФАВ утвердилась как мощный инструмент, обеспечивающий оперативную оценку ключевых параметров (оксигенации крови, состояния сосудов) и предоставляющий визуальный контроль за терапевтическими вмешательствами при ишемическом инсульте.

Еще одним важным направлением применения ФАВ является оценка состояния ран и терапия периферических нервов.

Ключевое преимущество ФАВ заключается в способности обеспечивать высококонтрастное изображение с глубоким проникновением в ткани, что позволяет детально визуализировать структуру раневого ложа, включая сложные и глубокие повреждения, что критически важно для точной оценки их состояния [14].

Эффективность ФАВ в ведении ран определяется ее способностью неинвазивно и в режиме реального времени мониторировать жизненно важные физиологические параметры. К ним относятся перфузия тканей (кровоток), уровень оксигенации (сатурация кислорода – sO_2) и динамика регенеративных процессов. Особое значение имеет возможность ФАВ точно отслеживать pH раневой среды.

Учитывая, что хронические раны характеризуются щелочным pH, а острые – кислым, мониторинг этого параметра с помощью ФАВ предоставляет клиницистам объективные критерии для оценки прогрессирования раны в хроническую форму и обоснования выбора стратегии лечения, такой как назначение антимикробной терапии или хирургическая обработка. Разработки в области интеллектуальных перевязочных материалов, например, pH-чувствительных гидрогелей, интегрированных с ФАВ, существенно ускоряют и упрощают оценку pH [15].

Метод позволяет оценивать биомаркеры (индикаторы воспаления) и процессы, такие как активность протеаз, неангиогенез и наличие/распространенность бактериальной инфекции. Эта комплексная многопараметрическая оценка дает возможность клиницистам объективно судить о статусе раны и своевременно корректировать терапевтические схемы.

Накопленные данные подтверждают клинический потенциал ФАВ для оперативного мониторинга и ранней диагностики широкого спектра ран, включая диабетические язвы стопы и ожоговые поражения [16]. Продолжающиеся технологические усовершенствования направлены на преодоление барьеров для внедрения ФАВ в рутинную клиническую практику.

Вывод

Фотоакустическая визуализация в сочетании с ультразвуковым методом исследования представляет собой мощный биомедицинский метод, основанный на оптических свойствах эндогенных молекул и экзогенных агентов, с широким спектром приложения и потенциалом. По отдельности ФАВ и УЗИ менее информативны: так, в фотоакустическом методе не хватает детализированной визуализации УЗИ, а ультразвуковые исследования ограничены невозможностью измерения биохимических показателей. Сочетание ФАВ/УЗИ, обеспечивает высокодетализированную визуализацию, мониторинг критически важных физиологических и биохимических параметров и позволяет проводить неинвазивную оценку, что представляет собой перспективную технологию для современной клинической практики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ/REFERENCES

1. Ferrara L. Ultrasounds Importance in the Clinic and Medical Diagnostics. Arch Gastroenterol Res. 2020 Jun;1;1:17–21.
2. Moran C.M., Thomson A.J.W. Preclinical Ultrasound Imaging – a Review of Techniques and Imaging Applications. Front Phys. 2020 May 5;8. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2020.00124/full>
3. Lee H., Han S., Kye H., Kim T.K., Choi W., Kim J. A Review on the Roles of Photoacoustic Imaging for Conventional and Novel Clinical Diagnostic Applications. Photonics. 2023 Aug;10;8:904.
4. Perleberg B., Lee S., Malik P., Kim D., Ahn J., Kim J.Y., et al. Simultaneous Photoacoustic and Laser Induced Ultrasound Imaging of Animals and Humans via a Semi Transparent Ultrasound Transducer. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lpor.202500387>

5. Gao R., Liu Y., Qi S., Song L., Meng J., Liu C. Influence Mechanism of the Temporal Duration of Laser Irradiation on Photoacoustic Technique: a Review. *JBO*. 2024 Apr;29;S1:S11530.
6. Pérez-Liva M., Alonso de Leciñana M., Gutiérrez-Fernández M., Camacho Sosa Dias J.F., Cruza J., Rodríguez-Pardo J., et al. Dual Photoacoustic/Ultrasound Technologies for Preclinical Research: Current Status and Future Trends. *Phys Med Biol*. 2025 Mar;70;7:07TR01.
7. Wang S., Zhao Y., Xu Y. Recent Advances in Applications of Multimodal Ultrasound-Guided Photoacoustic Imaging Technology. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*. 2020 Oct 21;3;1:24.
8. Tsedendamba N., Vial J.C., Taylor R.A., Kim J., Choi W. In vivo Photoacoustic and Ultrafast Ultrasound Doppler Assessment of Vascularity for Potential Thyroid Cancer Diagnosis: a Comprehensive Review. *J Phys Photonics*. 2025 Apr;7;2:022002.
9. Han S., Lee H., Kim C., Kim J. Review on Multispectral Photoacoustic Analysis of Cancer: Thyroid and Breast. *Metabolites*. 2022 May;12;5:382.
10. Osmanski B.F., Pernot M., Montaldo G., Bel A., Messas E., Tanter M. Ultrafast Doppler Imaging of Blood Flow Dynamics in the Myocardium. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2012 Aug;31;8:1661–8.
11. Han M., Xue Z., Yu M., You N., Ren Y., Xu Z., et al. Rapid Synergistic Thrombolysis of Ischemic Stroke Guided by High-Resolution and High-Speed Photoacoustic Cerebrovascular Imaging. *Photoacoustics*. 2025 Jun 1;43:100722.
12. Sciortino V.M., Tran A., Sun N., Cao R., Sun T., Sun Y.Y., et al. Longitudinal Cortex-Wide Monitoring of Cerebral Hemodynamics and Oxygen Metabolism in Awake Mice Using Multi-Parametric Photoacoustic Microscopy. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*. 2021 Jul 26. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0271678X211034096>
13. Wang L.V., Hu S. Photoacoustic Tomography: in Vivo Imaging from Organelles to Organs. *Science*. 2012 Mar 23;335;6075:1458–62.
14. Hu H., Zeng R., Du L., Hu W., Lin C., Liao J., et al. The Potential of Photoacoustic Imaging in Detecting and Managing Complex Wounds. *Biomaterials Research*. 2025 May 21. URL: <https://spj.science.org/doi/10.34133/bmr.0206>
15. Guo L., Zhang X., Zhao D.M., Chen S., Zhang W.X., Yu Y.L., et al. Portable Photoacoustic Analytical System Combined with Wearable Hydrogel Patch for pH Monitoring in Chronic Wounds. *Anal Chem*. 2024 Jul 16;96;28:11595–602.
16. Hariri A., Chen F., Moore C., Jokerst J.V. Noninvasive Staging of Pressure Ulcers Using Photoacoustic Imaging. *Wound Repair Regen*. 2019 Sep;27;5:488–96.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 25.10.2025. **Принята к публикации:** 20.11.2025.

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

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 25.10.2025. **Accepted for publication:** 20.11.2025