Обзор литературы
УДК 616-073.584
http://dx.doi.org/10.35177/1994-5191-2026-2-15

ДИАГНОСТИКА ОПУХОЛЕВЫХ ПОРАЖЕНИЙ ПИЩЕВАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Валерия Фанильевна Камалова[1]✉, Евгений Геннадьевич Солоницын[2], Егор Андреевич Ясенко[3], Челибанов Владимир Петрович[4], Данилов Иван Николаевич[5], Виталий Евгеньевич Назаров[6]

[1,2,5,6]Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия
[1]✉lerakamalova.lk@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-8227-0242
[2]esoloni@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0794-232X
[5]https://orcid.org/0000-0001-9540-7812
[6]VENazarov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4629-4836
[3,4]АО «ОПТЭК», Санкт-Петербург, Россия
[3]geoyasenko@gmail.com
[4]chelibanov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4493-4855

Аннотация. Ранняя диагностика злокачественных опухолей пищеварительной системы остается сложной задачей по ряду причин. В настоящее время ведется активный поиск новых диагностических методов, одним из которых может стать рамановская спектроскопия – это аналитический метод, основанный на неупругом рассеянии света, который позволяет изучать молекулярный состав и структуру веществ. Ее плюсами являются неинвазивность, высокая информативность и возможность интеграции с современными технологиями анализа данных. В литературе имеются данные об успехах рамановской спектроскопии в анализе биологических материалов, в том числе, тканей, клеточных линий, фиксированных препаратов и биологических жидкостей. Основной задачей данного обзора является оценка возможности рамановской спектроскопии в диагностике опухолевых заболеваний пищеварительной системы.

Ключевые слова: рамановская спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света, диагностика в онкологии, опухоли пищеварительной системы

Для цитирования: Диагностика опухолевых поражений пищеварительной системы методом рамановской спектроскопии / В.Ф. Камалова, Е.Г. Солоницын, Е.А. Ясенко и др. // Дальневосточный медицинский журнал. – 2026. – № 2. – С. 104-109. http://dx.doi.org/10.35177/1994-5191-2026-2-15.

DIAGNOSTICS OF THE DIGESTIVE SYSTEM TUMORS BY RAMAN SPECTROSCOPY

Valeriya F. Kamalova[1]✉, Evgeniy G. Solonitsyn[2], Egor A. Yasenko[3], Vladimir P. Chelibanov[4], Ivan N. Danilov[5], Vitaliy E. Nazarov[6]

[1,2,5,6]V.A. Almazov National Medical Research Center, St. Petersburg, Russia
[1]✉lerakamalova.lk@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-8227-0242
[2]esoloni@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0794-232X
[5]https://orcid.org/0000-0001-9540-7812
[6]VENazarov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4629-4836
[3,4]АО «ОРТЕК», Saint Petersburg, Russia
[3]geoyasenko@gmail.com
[4]chelibanov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4493-4855

Abstract. Early diagnostics of malignant tumors of the digestive system remains a challenging task for several reasons. Currently, there is an active search for new diagnostic methods, one of which could be Raman spectroscopy – an analytical technique based on inelastic light scattering that enables the study of molecular composition and structure of substances. Its advantages include non-invasiveness, high information content, and the ability to integrate with modern data analysis technologies. The literature contains data on the successful application of Raman spectroscopy

in the analysis of biological materials, including tissues, cell lines, fixed preparations, and biological fluids. The main objective of this review is to evaluate the potential of Raman spectroscopy in the diagnostics of neoplastic diseases of the digestive system.

Keywords: Raman spectroscopy, Raman spectroscopy, diagnostics in oncology, tumors of the digestive system

For citation: Diagnostics of the digestive system tumors by raman spectroscopy / V.F. Kamalova, E.G. Solonitsyn, E.A. Yasenko, et al. // Far Eastern medical journal. – 2026. – № 2. – P. 104-109. http://dx.doi.org/10.35177/1994-5191-2026-2-15.

Онкологические заболевания являются актуальной проблемой здравоохранения, ввиду неуклонного роста заболеваемости и летальности. Так, по данным GLOBOCAN в 2022 году было зафиксировано около 20 миллионов новых случаев рака и 9,7 миллиона смертей с ним связанных [1]. Опухоли пищеварительной системы, включающие рак пищевода, желудка тонкой кишки и колоректальный рак, по-прежнему остаются основной причиной онкологической смертности во всем мире [2]. Сложность диагностики этих злокачественных новообразований заключается в отсутствии клинических симптомов и достоверных биомаркеркеров на ранних стадиях, инвазивности диагностических процедур, что затрудняет введение популяционного скрининга. Описанные трудности побуждают к поиску новых методов ранней диагностики – менее инвазивных, более точных и более экономичных, которые могли бы войти в стандарты скрининга. Медицина все чаще обращается к физическим методам анализа, применяемым в смежных областях науки, для их трансфера в клиническую практику. К таким методам относится Рамановская спектроскопия (РС), которая применяется в экспериментах с биологическим материалом в опытах in vitro и in vivo.

Цель данного обзора – оценить возможности РС в диагностике опухолевых заболеваний пищеварительной системы.

Эффект неупругого взаимодействия света с веществом был впервые обнаружен Чандрасекарой Венката Раманом в 1928 году. За открытие этого явления профессор получил Нобелевскую премию по физике в 1930 году, а метод спектроскопии теперь носит его фамилию.

Рамановская спектроскопия (РС) представляет собой аналитический метод, основанный на неупругом рассеянии света молекулами. В отличие от рэлеевского рассеяния, при рамановском рассеянии происходит изменение частоты света, что позволяет получать уникальные спектральные «отпечатки пальцев» молекул. Эти спектры отражают химический состав и молекулярную структуру исследуемых веществ. В современных системах используется лазерное излучение и ПЗС-детекторы для регистрации сигналов [3].

Метод обладает рядом ключевых преимуществ: не требует введения контрастных веществ или специальной подготовки образцов, позволяет проводить неразрушающий анализ в реальном времени. Важным достоинством является слабая чувствительность к воде, что делает метод идеальным для исследования биологических тканей. Кроме того, отсутствует фотообесцвечивание, характерное для флуоресцентных методов, что позволяет проводить многократные измерения без повреждения образца [3].

Несмотря на высокий диагностический потенциал, широкое внедрение в клиническую практику РС на настоящий момент ограничено рядом технических проблем. Рамановский сигнал крайне слаб (примерно 1 из 10^6–10^8 фотонов), а флуоресцентный фон биологических тканей маскирует полезный сигнал. Для решения этих проблем используют лазеры ближнего ИК-диапазона, которые снижают флуоресценцию и минимизируют повреждение тканей. Для клиницистов РС может быть полезна в ряде направлений: от онкологических скринингов до прицельной биопсии и «оптической навигации» при эндоскопических вмешательствах. Возможность получать биохимическую информацию в реальном времени, без необходимости окрашивания или разрушения ткани, делает данный метод особенно ценным в зонах анатомической сложности, например ротоглотка, где точность диагностики имеет решающее значение для выбора лечебной тактики [3].

Оборудование для РС отличается простотой, что делает его подходящим для сочетания с другими методами. Такие сочетания позволяют изменять параметры регистрации спектров для конкретных задач исследования. В связи с этим, появилось большое количество модификаций рамановской спектроскопии. Стандартная или спонтанная рамановская спектроскопия – наиболее широко используемая форма, в которой не применяется усиление сигнала. [4]. При добавлении к рамановскому спектрометру оптического микроскопа метод имеет название рамановской микроспектроскопии [5].

Для повышения чувствительности предложен ряд модификаций, направленных на усиление слабого рамановского сигнала: резонансная рамановская спектроскопия, поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия (SERS), а также спектроскопия с усилением на остром зондовом наконечнике (TERS) и лазерная пинцетная рамановская спектроскопия (LTRS) для регистрации сигнала от отдельных клеток [6]. Все эти модификации постепенно приближают РС к практическому применению в клинической диагностике [7].

После получения спектров рамановской спектроскопии требуется их цифровая обработка: удаление флуоресцентного фона и шумов, а также выделение значимых пиков. Для этого используются алгоритмы, которые автоматически устраняют флуоресценцию и нормируют спектры, чтобы их можно было сравнивать между собой [8].

Поскольку спектры биологических тканей сложны и не всегда содержат четкие сигналы конкретных веществ, для анализа применяются статистические методы и алгоритмы машинного обучения. Они помогают находить закономерности в данных и классифицировать образцы, например, отличать злокачественные ткани от доброкачественных. Среди таких методов – анализ главных компонентов (PCA), дискриминантный анализ (LDA, PLS-DA), а также современные алгоритмы, такие как метод ближайших соседей (KNN), случайный лес (RF) и оптимизация колонии муравьев (ACO) [9, 10].

Для получения рамановских спектров достаточен небольшой объем образца. Анализ можно выполнить как на основе биоптатов, так и различных жидкостей с предварительной подготовкой и без нее. Далее приведены исследования ряда ученых, изучавших нативные и/или фиксированные образцы спектральным анализом.

В исследовании Teh и соавт. (2008 г.) были проанализированы рамановские спектры, полученные от 76 образцов нормальной слизистой желудка и аденокарциномы желудка. Наиболее выраженные различия между опухолевой и нормальной тканью выявлены в диапазонах 1 200-1 500 $см^{-1}$ и 1 600-1 800 $см^{-1}$, связанных с белками, нуклеиновыми кислотами и фосфолипидами. Простой диагностический подход, основанный на соотношении интенсивности пиков 875 и 1 450 $см^{-1}$, обеспечил чувствительность 85,7 % и специфичность 80,0 %. Усложненный алгоритм на основе анализа главных компонентов и линейной дискриминации (PCA-LDA) показал еще более высокие результаты – чувствительность 95,2 % и специфичность 90,9 % [11].

В работе Synytsya и соавт. (2021 г.) анализировались нативные образцы нормальной и опухолевой ткани толстой кишки, полученные от 14 пациентов. Для анализа применяли лазеры с тремя длинами волн: 1064 нм, 785 нм и 532 нм. Были получены спорные результаты, со значительными различиями спектров даже в пределах одного образца, что свидетельствует о структурной и биохимической неоднородности тканей [12].

В исследовании Li и соавт. (2014 г.) также анализировались образцы толстой кишки от 44 пациентов. Были определены 5 ключевых участков рамановских спектров (815-830, 935-945, 1131-1141, 1 447-1 457 и 1 665-1 675 $см^{-1}$), на основании полученных различий была предложена диагностическая модель, которая продемонстрировала точность 93,2 % [13].

Для анализа биоптатов методом рамановской спектроскопии подходят не только нативные, но и фиксированные формалином и залитые в парафин ткани. Такой анализ выполнили Liu и соавт. (2016 г.) на материале от 81 пациента. На основе полученных спектральных данных они разработали диагностическую модель, которая имела точность 84,3 % в выявлении рака [14].

Ishigaki и соавт. (2016 г.) исследовали методом РС образцы плоскоклеточного рака пищевода, удаленные при эндоскопической резекции, полученные от 15 пациентов. Предложенный авторами алгоритм показал чувствительность 81,0 % и специфичность 94,0 % в диагностике неоплазии [15].

Zheng и соавт. (2007 г.) для анализа отдельных живых эпителиальных клеток в норме и при аденокарциноме толстой кишки использовали модификацию метода – лазерную пинцетную рамановскую спектроскопию. Чувствительность предложенного ими алгоритма составила 86,3 % [16].

В исследовании Berthold и соавт. (2011 г.) была применена технология волоконно-оптической рамановской эндоскопии для измерений in vivo в реальном времени. Спектры снимались при эндоскопии верхних отделов ЖКТ в норме и при опухолях пищевода и желудка. На основе 1 189 спектров был предложен диагностический алгоритм, который показал точность 89,3 %, чувствительность 92,6 % и специфичность 88,6 % в выявлении рака [17].

Таким образом, рамановская спектроскопия показала широкие возможности применения для анализа тканей. С одной стороны, исследования in vivo в реальном времени и с возможностью регистрации информации от отдельных клеток, могут лечь в основу интраоперационной диагностики. С другой стороны, анализ фиксированных и залитых парафиновых срезов открывает широкие возможности для анализа резецированных фрагментов вне зависимости от давности забора материала, что позволяет ретроспективно пополнять базу данных и на ее основе строить максимально точные диагностические алгоритмы.

Образцы периферической крови являются идеальным материалом для минимально инвазивной диагностики в масштабах популяции, которую можно проводить оперативно и многократно, а непрерывный отбор проб и тестирование подходят для мониторинга субъектов в группах высокого риска [3]. Однако имеющиеся технические сложности – сильные помехи флуоресценции и изначально слабые сигналы рамановского сдвига плазмы – всегда накладывали ограничения на исследования данным методом, но и эти ограничения удалось нивелировать путем пробоподготовки и изменения параметров регистрации спектров [5].

Так, большое количество работ было направлено на поиск возможностей использовать РС в скрининге колоректального рака, с использованием сыворотки крови пациентов [18-22].

В исследовании Li и соавт. (2012 г.) был проведен анализ сыворотки крови 30 здоровых доноров, 46 пациентов с колоректальным раком и 44 пациентов с раком прямой кишки. Построенная при помощи LDA диагностическая модель продемонстрировала точность 88 % в выявлении рака [23].

Feng и соавт. (2015 г.) впервые при SERS включили в группу исследования плазму как от пациентов с колоректальным раком, так и с аденоматозными полипами. Предложенный диагностический алгоритм продемонстрировал чувствительность 86,4 % и специфичность 80 % в диагностике рака [24].

Проводились исследования и пациентов с онкологическими заболеваниями других локализаций. Так Li и соавт. (2014 г.) сравнили образцы сыворотки крови 130 пациентов с опухолями пяти локализаций (печени, толстой кишки, пищевода, носоглотки и желудка) и 113 здоровых доноров при помощи SERS и разработали диагностические модели с точностью 95,8 % [25].

Моча представляет собой биологическую жидкость, которая может быть безопасно получена от пациента неинвазивным способом. В этой связи, возможность ее использования в программах скрининга чрезвычайно актуальна.

В уже упомянутой работе Lin и соавт. (2020 г.) анализировали образцы мочи от 116 пациентов, включая больных раком толстой кишки на разных стадиях и здоровых добровольцев, методом SERS. При помощи алгоритма PCA-DFA была построена диагностическая модель с чувствительностью 80,9 % для ранних стадий (I-II) и 84,3 % для поздних стадий (III-IV) при сравнении с контролем [8].

В аналогичном исследовании Huang и соавт. (2014 г.) использовали SERS для анализа мочи 56 пациентов с раком пищевода и 36 здоровых доноров. При комбинации методов PCA и LDA была построена диагностическая модель с чувствительностью 89,3 % и специфичностью 83,3 % [26].

Phyo и соавт. (2021 г.) представили экспресс-системы для анализа мочи при помощи SERS с добавлением серебряных нанопроволок на специальном фильтре. В исследование были включены три группы: здоровые доноры (n=30), пациенты с раком поджелудочной железы (n=22) и раком простаты (n=22). Представленный диагностический алгоритм обладал точностью 98 % для рака поджелудочной железы и 100 % для рака простаты [27].

Yu и соавт. (2024 г.) также сравнивали образцы мочи от трех групп методом SERS: пациентов с раком поджелудочной железы (n=40), раком простаты (n=56) и здоровых доноров (n=39). В спектрах онкологических групп были идентифицированы характерные пики при 647, 710, 1 260, 1 372, 1 420, 1 459, 1 492 и 1 581 $см^{-1}$, отражающие изменения биохимического состава. Предложенный диагностический алгоритм имел чувствительность 95 % и специфичность 92,9 % для диагностики рака поджелудочной железы [28].

Untereiner и соавт. (2014 г.) сравнили образцы желчи 19 пациентов со злокачественными стриктурами желчных протоков и 38 пациентов с доброкачественными стриктурами желчных протоков. Предложенный диагностический алгоритм в опыте продемонстрировал чувствительность 95 % и специфичность 100 % [29].

Lazzini и соавт. (2025 г.) выполняли анализ свежезамороженных и залитых парафином фрагментов поджелудочной железы при аденокарциноме, хроническом панкреатите и норме, всего в исследование были включены образцы от 15 пациентов. Анализ выполнялся при помощи конфокально-лазерной РС с продвинутым алгоритмом машинного обучения, при помощи которого в эксперименте удалось разработать диагностический алгоритм с точностью 96 % [30].

Представленные в обзоре работы демонстрируют возможность применения РС при работе с различным биологическим материалом: от резецированных фрагментов тканей до биологических жидкостей. Более того, такие свойства РС, как работа с небольшим количеством биологического материала, сохранение структуры тканей и состава жидкостей, получение результата в реальном времени позволяет надеяться на разработку новых, высокоэффективных диагностических методик.

РС обладает значительным диагностическим потенциалом для выявления опухолей пищеварительной системы. Метод демонстрирует высокую точность при анализе тканевых биоптатов (84,3–95,2 %), сыворотки крови и мочи. Он эффективен для работы с нативными и архивными гистологическими образцами. Кроме того, РС позволяет проводить анализ в режиме реального времени во время эндоскопии с высокой точностью и регистрировать сигналы от отдельных клеток.

Основные преимущества РС включают неинвазивность, возможность использования различных биоматериалов и проведение анализа in vivo. Эти характеристики открывают перспективы для внедрения метода в клиническую практику для скрининга, прицельной биопсии и интраоперационной навигации. Однако для широкого применения метода необходимо провести стандартизацию протоколов и валидацию алгоритмов на больших многоцентровых выборках, учитывая отсутствие масштабных мультицентровых исследований и метаанализов.

Список источников

1. Bray F., Ferlay J., Laversanne M., et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries // CA: A Cancer Journal for Clinicians. – 2024. – Vol. 74, № 3. – P. 229-263.

2. Ai H., Xie J., Wang Z., et al. Cancer/testis antigens: promising immunotherapy targets for digestive tract cancers // Frontiers in Immunology. – 2023. – Vol. 14. – Art. 1190883.
3. Wan Q.-S., Wang T., Zhang K.-H. Biomedical optical spectroscopy for the early diagnosis of gastrointestinal neoplasms // Tumour Biology: The Journal of the International Society for Oncodevelopmental Biology and Medicine. – 2017. – Vol. 39, № 7. – Art. 1010428317717984.
4. Shipp D.W., Sinjab F., Notingher I. Raman spectroscopy: techniques and applications in the life sciences // Advances in Optics and Photonics. – 2017. – Vol. 9, № 2. – P. 315-428.
5. Atkins C.G., Buckley K., Blades M.W., et al. Raman Spectroscopy of blood and blood components // Applied Spectroscopy. – 2017. – Vol. 71, № 5. – P. 767-793.
6. Efremov E.V., Ariese F., Gooijer C. Achievements in resonance Raman spectroscopy: review of a technique with a distinct analytical chemistry potential // Analytica Chimica Acta. – 2008. – Vol. 606, № 2. – P. 119-134.
7. Xie C., Dinno M.A., Li Y.-Q. Near-infrared Raman spectroscopy of single optically trapped biological cells // Optics Letters. – 2002. – Vol. 27, № 4. – P. 249-251.
8. Lin J., Lin R., Lin S., et al. Rapid and label-free urine test based on surface-enhanced Raman spectroscopy for the non-invasive detection of colorectal cancer at different stages // Biomedical Optics Express. – 2020. – Vol. 11, № 12. – P. 7109-7119.
9. Duraipandian S., Zheng W., Ng J., et al. In vivo diagnosis of cervical precancer using Raman spectroscopy and genetic algorithm techniques // The Analyst. – 2011. – Vol. 136, № 20. – P. 4328-4336.
10. Ressom H.W., Varghese R.S., Drake S., et al. Peak selection from MALDI-TOF mass spectra using ant colony optimization // Bioinformatics (Oxford, England). – 2007. – Vol. 23, № 5. – P. 619-626.
11. Teh S.K., Zheng W., Ho K.Y., et al. Diagnostic potential of near-infrared Raman spectroscopy in the stomach: differentiating dysplasia from normal tissue // British Journal of Cancer. – 2008. – Vol. 98, № 2. – P. 457-465.
12. Synytsya A., Synytsya K., Blafkova P., et al. Ex vivo vibration spectroscopic analysis of colorectal polyps for the early diagnosis of colorectal carcinoma // Diagnostics. – 2021. – Vol. 11, № 11. – Art. 2048.
13. Li S., Li Y., Yi R., et al. Identification and characterization of colorectal cancer using Raman spectroscopy and feature selection techniques // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, № 21. – P. 25895-25908.
14. Liu W., Sun L., Zhong M., et al. Raman spectroscopy in colorectal cancer diagnostics: comparison of PCA-LDA and PLS-DA models // Journal of Spectroscopy. – 2016. – Vol. 2016. – Art. 1603609.
15. Ishigaki M., Maeda Y., Taketani A., et al. Diagnosis of early-stage esophageal cancer by Raman spectroscopy and chemometric techniques // The Analyst. – 2016. – Vol. 141, № 3. – P. 1027-1033.
16. Zheng F., Qin Y., Chen K. Sensitivity map of laser tweezers Raman spectroscopy for single-cell analysis of colorectal cancer // Journal of Biomedical Optics. – 2007. – Vol. 12, № 3. – Art. 034002.
17. Bergholt M.S., Zheng W., Ho K.Y., et al. Characterizing variability in in vivo Raman spectra of different anatomical locations in the upper gastrointestinal tract toward cancer detection // Journal of Biomedical Optics. – 2011. – Vol. 16, № 3. – Art. 037003.
18. Lualdi M., Colombo A., Leo E., et al. Natural fluorescence spectroscopy of human blood plasma in the diagnosis of colorectal cancer: feasibility study and preliminary results // Tumori. – 2007. – Vol. 93, № 6. – P. 567-571.
19. Sun T., Wang Y., Sun X., et al. Low-abundance proteins-based label-free SERS approach for high precision detection of liver cancer with different stages // Analytica Chimica Acta. – 2024. – Vol. 1304. – Art. 342518.
20. Li X., Yang T., Li S., et al. Raman spectroscopy combined with principal component analysis and k nearest neighbour analysis for non-invasive detection of colon cancer // Laser Physics. – 2016. – Vol. 26, № 3. – Art. 035702.
21. Lin D., Pan J., Huang H. et al. Colorectal cancer detection by gold nanoparticle based surface-enhanced Raman spectroscopy of blood serum and statistical analysis // Optics Express. – 2011. – Vol. 19, № 14. – P. 13565-13577.
22. Feng S., Chen R., Lin J., et al. Gastric cancer detection based on blood plasma surface-enhanced Raman spectroscopy excited by polarized laser light // Biosensors and Bioelectronics. – 2011. – Vol. 26, № 7. – P. 3167-3174.
23. Li X., Yang T., Li S. Discrimination of serum Raman spectroscopy between normal and colorectal cancer using selected parameters and regression-discriminant analysis // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51, № 21. – P. 5038-5043.
24. Feng S., Chen R., Lin J., et al. Label-free surface-enhanced Raman spectroscopy for detection of colorectal cancer and precursor lesions using blood plasma // Biomedical Optics Express. – 2025. – Vol. 6, № 9. – P. 3494-3502.
25. Li S.X., Zeng Q.Y., Li L.F., et al. Potential of cancer screening with serum surface-enhanced Raman spectroscopy and a support vector machine // Laser Physics Letters. – 2014. – Vol. 11, № 6. – Art. 065603.
26. Huang S., Chen R., Lin J., et al. Potential of non-invasive esophagus cancer detection based on urine surface-enhanced Raman spectroscopy // Laser Physics Letters. – 2014. – Vol. 11, № 11. – Art. 115604.

27. Phyo J.B., Kown H., Kim J., et al. Label-free SERS analysis of urine using a 3D-stacked AgNW-glass fiber filter sensor for the diagnosis of pancreatic cancer and prostate cancer // Analytical Chemistry. – 2021. – Vol. 93, № 8. – P. 3778-3785.
28. Yu H.-J., Lim J.W., Kim H., et al. Cancer screening through surface-enhanced Raman spectroscopy fingerprinting analysis of urinary metabolites using surface-carbonized silver nanowires on a filter membrane // Analytica Chimica Acta. – 2024. – Vol. 1292. – Art. 342233.
29. Untereiner V., Dhombres F., Simon D., et al. Bile analysis using high-throughput FTIR spectroscopy for the diagnosis of malignant biliary strictures: a pilot study in 57 patients // Journal of Biophotonics. – 2014. – Vol. 7, № 3-4. – P. 241-253.
30. Lazzini G., Ronci M., De Luca A.C., et al. Raman spectroscopy based diagnosis of pancreatic ductal adenocarcinoma // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, № 1. – Art. 13240.

Вклад авторов:
Камалова В.Ф. – сбор материала, обработка материала, написание статьи;
Солоницын Е.Г. – идея статьи;
Ясенко Е.А. – научное редактирование текста статьи;
Челибанов В.П. – научное редактирование текста статьи;
Данилов И.Н. – идея статьи;
Назаров В.Е. – идея статьи, научное редактирование текста статьи.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors:
Kamalova V.F. – collecting material, processing material, writing an article;
Solonitsyn E.G. – the idea of the article;
Yasenko E.A. – scientific editing of the text of the article;
Chelibanov V.P. – scientific editing of the text of the article;
Danilov I.N. – the idea of the article;
Nazarov V.E. – the idea of the article, scientific editing of the text of the article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья принята к публикации 12.04.2026.
The article was accepted for publication 12.04.2026.