

V. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Научная статья

УДК 616.31, 615.47, 616-073.584

**ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ПРОСТРАНСТВЕННО-
ЧАСТОТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ РАКА
СЛИЗИСТОЙ ОБОЛОЧКИ ПОЛОСТИ РТА**

**Александр Владимирович Колпаков¹✉, Диана Юрьевна Соколова²,
Анастасия Станиславовна Семенова³, Наталья Павловна Муравская⁴**

^{1, 2, 3, 4} ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

¹ alexanderkolpakov@bmstu.ru✉, SPIN-код: 4078-3360, ORCID: 0000-0002-8858-2214, Scopus ID: 51763833800

² sokolovadyu@bmstu.ru, SPIN-код: 8866-4186, ORCID: 0000-0002-4884-0573, Scopus ID: 58248041000, WoS Researcher ID: CAI-5819-2022

³ prof.s.cfm@gmail.com, ORCID: 0009-0009-0056-4539

⁴ ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия
nptm@vniiftri.ru, SPIN-код: 7879-8413, Scopus ID: 51763833800

Аннотация. Целью работы является предварительная оценка метода пространственно-частотной визуализации (ПЧВ) для раннего обнаружения злокачественных изменений слизистой оболочки полости рта. Эксперименты проведены на тест-объектах, имитирующих оптические свойства тканей, с использованием лабораторного стенда ПЧВ, оснащённого лазерными диодами с длинами волн 660 и 808 нм и модулем пространственной модуляции. Метод обеспечивает получение двумерных карт коэффициентов оптического поглощения и рассеяния, позволяющих выявлять и количественно оценивать различия между областями тест-объекта, моделирующими здоровую и опухолевую ткань, на глубине до 6 мм. Данные, полученные методом ПЧВ, были валидированы с использованием аналогичных измерений методом спектроскопии диффузного отражения и продемонстрировали высокую степень согласованности: коэффициенты корреляции составили 0,998 при длине волны 660 нм и 0,994 при 808 нм, при отсутствии систематического смещения между методами. Предварительные результаты подтверждают перспективность ПЧВ для ранней диагностики рака слизистой оболочки полости рта и подчеркивают необходимость дальнейшей разработки технологии, включая создание системы для *in vivo* исследований слизистой оболочки полости рта.

Ключевые слова: пространственно-частотная визуализация, рак слизистой оболочки полости рта, ранняя диагностика, оптические свойства тканей, спектроскопия диффузного отражения, неинвазивная диагностика

Для цитирования: Колпаков А.В., Соколова Д.Ю., Семенова А.С., Муравская Н.П. Оценка потенциала пространственно-частотной визуализации для ранней диагностики рака слизистой оболочки полости рта // Альманах современной метрологии. 2026. № 2 (46). С. 111–116.

© Колпаков А.В., Соколова Д.Ю., Семенова А.С., Муравская Н.П., 2026

V. Methods and instruments for monitoring and diagnostics of materials, products, substances and the natural environment

Original article

ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OF SPATIAL-FREQUENCY DOMAIN IMAGING FOR EARLY DIAGNOSIS OF ORAL MUCOSAL CANCER

**Alexandr V. Kolpakov¹✉, Diana Yu. Sokolova²,
Anastasiya S. Semenova³, Natalia P. Muravskaya⁴**

^{1, 2, 3, 4}*FSAEI of HE “National Research University ‘Bauman Moscow State Technical University’” (BMSTU), Moscow, Russia*

¹*alexanderkolpakov@bmstu.ru✉, SPIN-code: 4078-3360,
ORCID: 0000-0002-8858-2214, Scopus ID: 51763833800*

²*sokolovadyu@bmstu.ru, SPIN-code: 8866-4186, ORCID: 0000-0002-4884-0573,
Scopus ID: 58248041000, WoS Researcher ID: CAI-5819-2022*

³*prof.s.cfm@gmail.com, ORCID: 0009-0009-0056-4539*

⁴*FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia
npm@vniiftri.ru, SPIN-code: 7879-8413, Scopus ID: 51763833800*

Abstract. The study aims to preliminarily assess the spatial-frequency domain imaging (SFDI) method for early detection of malignant changes in the oral mucosa. Experiments were conducted on tissue-mimicking phantoms using an SFDI setup equipped with lasers (660 and 808 nm) and a spatial modulation module. The method provides two-dimensional maps of optical absorption and scattering coefficients, enabling detection and quantitative assessment of differences between phantom regions simulating healthy and cancerous tissue at depths up to 6 mm. The data obtained using the spatial-frequency domain imaging method were validated by corresponding measurements performed with diffuse reflectance spectroscopy and demonstrated a high level of agreement, with correlation coefficients of 0.998 at 660 nm and 0.994 at 808 nm, and no systematic bias between the methods. Preliminary results confirm the potential of SFDI for early diagnosis of oral mucosal cancer and emphasize the need for further development, including the creation of an in vivo imaging system for oral mucosa studies.

Keywords: spatial-frequency domain imaging, oral mucosal cancer, early diagnosis, optical properties of tissues, diffuse reflectance spectroscopy, noninvasive diagnostics

For citation: Kolpakov A.V., Sokolova D.Yu., Semenova A.S., Muravskaya N.P. Assessment of the potential of spatial-frequency domain imaging for early diagnosis of oral mucosal cancer. *Almanac of Modern Metrology*. 2026; 46 (2): 111–116.

Рак полости рта является широко распространённым онкологическим заболеванием, поражающим слизистую оболочку языка, дёсен, щёк, дна рта и красной каймы губ. Глобальная эпидемиологическая ситуация остаётся серьёзной: ежегодно регистрируется около 600 тысяч новых случаев и 300 тысяч летальных исходов [1]. По прогнозам, к 2040 году заболеваемость может вырасти на 50 % относительно уровня 2018 года [2]. Ключевым фактором выживаемости является стадия диагностики: при раннем выявлении пятилетняя

выживаемость составляет 80–90 %, а на поздних стадиях падает до 30 % [3]. Это обуславливает острую необходимость во внедрении эффективных методов ранней диагностики в практику стоматологических осмотров и скрининговых программ.

Среди неинвазивных диагностических технологий выделяется спектроскопия диффузного отражения, основанная на анализе спектрального состава отражённого от ткани света в отдельных точках [4]–[6]. Эволюционным развитием этого подхода является метод пространственно-частотной визуализации, который генерирует не точечные данные, а цельные двумерные карты оптических свойств тканей. Несмотря на успешное использование данной методики в смежных областях (контроль заживления ран, интраоперационная оценка опухолей), её применимость для задач скрининга и ранней диагностики рака слизистой оболочки рта системно не изучена.

Целью настоящей работы являлась предварительная оценка возможности применения визуализации в пространственно-частотной области как метода раннего обнаружения злокачественных изменений слизистой оболочки рта на основе результатов обработки измерений параметров тест-объектов, имитирующих оптические свойства тканей. В исследовании был использован стенд для пространственно-частотной визуализации, содержащий модуль освещения, включая лазерные диоды с длинами волн 660 и 808 нм, модуль пространственной модуляции и модуль регистрации изображений.

Поскольку большинство патологических изменений при злокачественных заболеваниях происходит в базальном и парабазальном слоях эпителия, при этом существенная часть клеток поверхностного слоя может не являться злокачественной [7], важной является возможность метода визуализации в пространственно-частотной области обнаруживать патологические изменения в глубине ткани. Для оценки возможной глубины визуализации был проведён эксперимент с использованием тест-объекта из прозрачного силикона, имитирующего здоровую ткань, с включениями графитовых стержней, расположенных на различной глубине и моделирующих злокачественные новообразования (рис. 1).

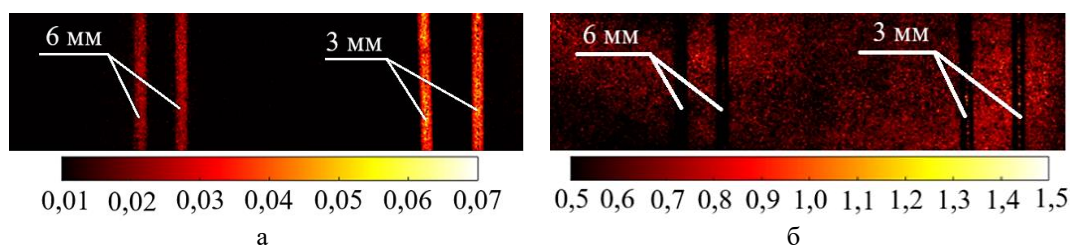


Рис. 1. Карты оптических параметров тест-объекта с графитовыми включениями:
а — коэффициент поглощения; б — транспортный коэффициент рассеяния

Fig. 1. Test object with graphite inclusions optical parameters maps:
а — absorption coefficient; б — reduced scattering coefficient

Результаты демонстрируют способность метода детектировать и количественно оценивать разницу оптических параметров между областью тест-объекта, имитирующей здоровую ткань, и областью, имитирующей злокачественное новообразование, на глубине до 6 мм.

В ходе исследования была оценена согласованность результатов измерений коэффициента отражения R методами спектроскопии диффузного отражения (с использованием спектрометра Thorlabs CCS-200M) и визуализации в пространственно-частотной области. Коэффициент корреляции Пирсона составил 0,998 для 660 нм и 0,994 для 808 нм, что указывает на сильную линейную зависимость. Методом наименьших квадратов были получены две линейные калибровочные кривые вида $R_{SFDI} = \alpha \cdot R_{DRS} + \beta$, где R_{SFDI} — средние значения коэффициента отражения, полученного методом визуализации в пространственно-частотной области; R_{DRS} — средние значения коэффициента отражения, полученного методом спектроскопии диффузного отражения; коэффициент α отражает пропорциональные различия между результатами измерений, а коэффициент β — систематические смещения (рис. 2). Пренебрежимо малые значения $|\beta|$ демонстрируют отсутствие систематических смещений, то есть смещений темнового сигнала.

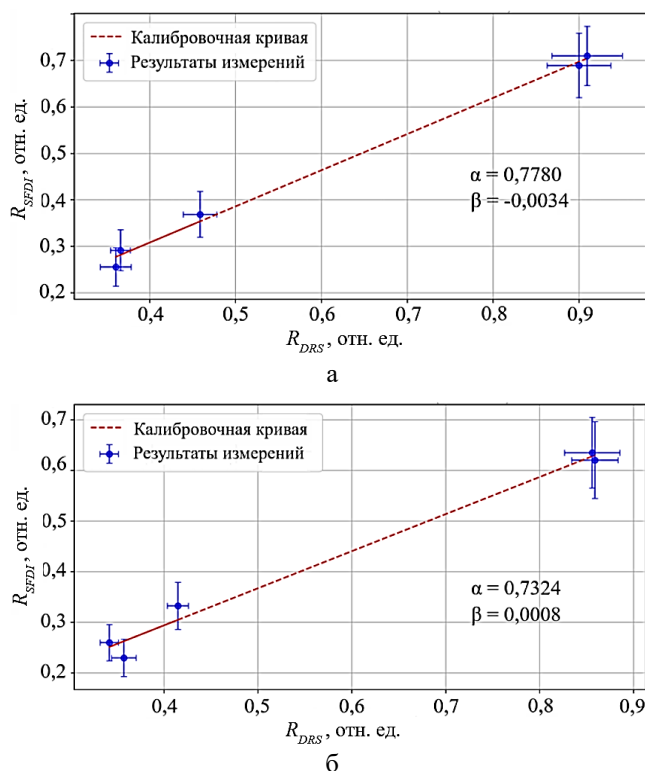


Рис. 2. Результаты линейного регрессионного анализа: а — 660 нм; б — 808 нм

Fig. 2. Linear regression analysis results: a — 660 nm; б — 808 nm

Предварительная оценка показала перспективность применения метода визуализации в пространственно-частотной области для раннего обнаружения злокачественных изменений слизистой оболочки рта и целесообразность дальнейшего развития технологии, в частности разработки системы визуализации в пространственно-частотной области для *in vivo* исследований слизистой оболочки полости рта.

Финансирование. Авторы заявляют об отсутствии сторонней финансовой поддержки при проведении исследования.

Вклад авторов. А.В. Колпак: руководство исследованием и организация его проведения. Д.Ю. Соколова и А.С. Семенова: обработка и анализ результатов эксперимента. Н.П. Муравская: консультационная и организационная поддержка.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет потенциального конфликта интересов в связи с исследованием, представленным в данной статье.

Благодарности. Авторы благодарят Н.Г. Оганян за помощь при подготовке работы.

Funding. The authors declare that they received no external financial support for this study.

Contribution of the authors. A.V. Kolpakov: research management and organization. D.Yu. Sokolova and A.S. Semenova: processing and analysis of experimental results. N.P. Muravskaya: consulting and organizational support.

Conflict of interests. The authors declare that they have no potential conflict of interest related to the research presented in this article.

Acknowledgements. The authors would like to thank N.G. Oganyan for her help in preparing the work.

Список источников

1. Pierfelice T.V., D'Amico E., Cinquini Ch., Iezzi G., D'Arcangelo C., D'Ercole S., Petrini M. The diagnostic potential of non-invasive tools for oral cancer and precancer: a systematic review // *Diagnostics (Basel)*. 2024. V. 14. № 18. 2033. <http://doi.com/10.3390/diagnostics14182033>.
2. World Cancer Report: Cancer Research for Cancer Prevention / Ch.P. Wild, E. Weiderpass, B.W. Stewart (eds.). Lyon, France: International Agency for Research on Cancer, 2020. 596 p.
3. Tiziani S., Lopes V., Günther U.L. Early-stage diagnosis of oral cancer using ¹H-NMR-based metabolomics // *Neoplasia*. 2009. V. 11. № 3. P. 269–276. <http://doi.com/10.1593/neo.81396>.
4. Fuller C., Camilon R., Nguyen Sh., Jennings J., Day T., Gillespie M.B. Adjunctive diagnostic techniques for oral lesions of unknown malignant potential: systematic review with meta-analysis // *Head & Neck*. 2015. V. 37. № 5. P. 755–762.
5. Limin Zhang, Qing Chang, Qi Zhang, Siyi Zou, Dongyuan Liu, Feng Gao, Chenlu Liu. Sub-diffuse reflectance spectroscopy combined with machine learning method for oral mucosal disease identification // *Lasers in Surgery and Medicine*. 2025. V. 57. № 4. P. 339–351.

6. Kolpakov A.V., Moshkova A.A., Melikhova E.V., Sokolova D.Yu., Muravskaya N.P., Samorodov A.V., Kopaneva N.O., Lukina G.I., Abramova M.Ya., Mamatsashvili V.G., Parshkov V.V. Diffuse reflectance spectroscopy of the oral mucosa: *in vivo* experimental validation of the precancerous lesions early detection possibility // *Diagnostics (Basel)*. 2023. V. 13. № 9. 1633.
7. Cawson R.A., Binnie W.H., Barrett A.W., Wright J.M. Chronic white lesions and premalignant lesions // *Oral Disease: Clinical and Pathological Correlations*. 3rd ed. London: Mosby International, 2001. P. 14.1–14.24.

References

1. Pierfelice T.V., D'Amico E., Cinquini Ch., Iezzi G., D'Arcangelo C., D'Ercole S., Petrini M. The diagnostic potential of non-invasive tools for oral cancer and precancer: a systematic review. *Diagnostics (Basel)*. 2024; 14 (18): 2033. <http://doi.com/10.3390/diagnostics14182033>.
2. World Cancer Report: Cancer Research for Cancer Prevention / Ch.P. Wild, E. Weiderpass, B.W. Stewart (eds.). Lyon, France: International Agency for Research on Cancer; 2020. 596 p.
3. Tiziani S., Lopes V., Günther U.L. Early-stage diagnosis of oral cancer using 1H-NMR-based metabolomics. *Neoplasia*. 2009; 11 (3): 269–276. <http://doi.com/10.1593/neo.81396>.
4. Fuller C., Camilon R., Nguyen Sh., Jennings J., Day T., Gillespie M.B. Adjunctive diagnostic techniques for oral lesions of unknown malignant potential: systematic review with meta-analysis. *Head & Neck*. 2015; 37 (5): 755–762.
5. Limin Zhang, Qing Chang, Qi Zhang, Siyi Zou, Dongyuan Liu, Feng Gao, Chenlu Liu. Sub-diffuse reflectance spectroscopy combined with machine learning method for oral mucosal disease identification. *Lasers in Surgery and Medicine*. 2025; 57 (4): 339–351.
6. Kolpakov A.V., Moshkova A.A., Melikhova E.V., Sokolova D.Yu., Muravskaya N.P., Samorodov A.V., Kopaneva N.O., Lukina G.I., Abramova M.Ya., Mamatsashvili V.G., Parshkov V.V. Diffuse reflectance spectroscopy of the oral mucosa: *in vivo* experimental validation of the precancerous lesions early detection possibility. *Diagnostics (Basel)*. 2023; 13 (9): 1633.
7. Cawson R.A., Binnie W.H., Barrett A.W., Wright J.M. Chronic white lesions and premalignant lesions. In: *Oral Disease: Clinical and Pathological Correlations*. 3rd ed. London: Mosby International; 2001. P. 14.1–14.24.

Статья поступила в редакцию 16.03.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 14.04.2026.

The article was submitted 16.03.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 14.04.2026.