



# Количественная оценка транспортной функции пищевода методом компьютерного анализа рентгеноскопических изображений

**Баширов Р.А.<sup>1,2,3</sup>, Рыжкин С.А.<sup>1,2,4</sup>, Бурков В.О.<sup>1</sup>, Нагорных Б.П.<sup>3</sup>, Зиганшина Л.Ф.<sup>2,3</sup>, Самойленко Л.Е.<sup>1</sup>, Идиятов Р.А.<sup>3</sup>, Баширов Д.Р.<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, 2-й Боткинский пр-д, 7, Москва, 125284, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, ул. Бутлерова, 49, Казань, 420012, Российская Федерация

<sup>3</sup> ГАУЗ «Республиканская клиническая больница Министерства здравоохранения Республики Татарстан», Оренбургский тракт, 138, Казань, 420064, Российская Федерация

<sup>4</sup> ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», ул. Кремлевская, 18, корп. 1, Казань, 420008, Российская Федерация

<sup>5</sup> ГАУЗ «Городская клиническая больница № 7 им. М.Н. Садыкова», ул. Маршала Чуйкова, 54, Казань, 420103, Российская Федерация

**Баширов Рустем Алевкович**, ассистент кафедры радиологии, радиотерапии, радиационной гигиены и радиационной безопасности им. академиков А.С. Павлова и Ф.Г. Кроткова ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, ассистент кафедры онкологии, лучевой диагностики и лучевой терапии ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, врач-радиолог радиологического отделения ГАУЗ «Республиканская клиническая больница Министерства здравоохранения Республики Татарстан»; <http://orcid.org/0000-0003-4793-8197>

**Рыжкин Сергей Александрович**, д. м. н., доцент, чл.-корр. Академии наук Республики Татарстан, заведующий кафедрой радиологии, радиотерапии радиационной гигиены и радиационной безопасности им. академиков А.С. Павлова и Ф.Г. Кроткова ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, профессор кафедры общей гигиены ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, профессор кафедры медицинской физики Института физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»; <http://orcid.org/0000-0003-2595-353X>

**Бурков Владимир Олегович**, ординатор кафедры радиологии, радиотерапии, радиационной гигиены и радиационной безопасности им. академиков А.С. Павлова и Ф.Г. Кроткова ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России; <https://orcid.org/0009-0001-7917-2205>

**Нагорных Борис Петрович**, к. м. н., заведующий рентгенодиагностическим отделением ГАУЗ «Республиканская клиническая больница Министерства здравоохранения Республики Татарстан»

**Зиганшина Лилия Фаридовна**, к. м. н., ассистент кафедры онкологии, лучевой диагностики и лучевой терапии ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, заведующая отделением радиологии ГАУЗ «Республиканская клиническая больница Министерства здравоохранения Республики Татарстан»; <http://orcid.org/0000-0002-6994-7396>

**Самойленко Людмила Евгеньевна**, д. м. н., профессор кафедры радиологии, радиотерапии, радиационной гигиены и радиационной безопасности им. академиков А.С. Павлова и Ф.Г. Кроткова ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России

**Идиятов Рустам Альбертович**, врач-рентгенолог ГАУЗ «Республиканская клиническая больница Министерства здравоохранения Республики Татарстан»

**Баширов Дамир Рустемович**, врач-рентгенолог ГАУЗ «Городская клиническая больница № 7 им. М.Н. Садыкова»

## Резюме

**Актуальность.** Доступ к объективной количественной оценке транспортной функции пищевода (ТПФП) существенно ограничен в клинической практике вследствие двух факторов: недостаточная оснащенность медицинских учреждений специализированным оборудованием и отсутствие адекватных методов анализа. Разработка подходов, использующих традиционную рентгеноскопию с контрастированием жидкой взвесью сульфата бария в сочетании с автоматизированной обработкой, способна существенно повысить доступность и объективность метрического обследования пациентов с заболеваниями, сопровождающимися нарушениями глотания и моторики пищевода.

**Цель:** разработать и валидировать авторский алгоритм компьютерного количественного анализа рентгеноскопических изображений, полученных при традиционной рентгеноскопии пищевода, для оценки ТПФП у пациентов с заболеваниями, сопровождающимися нарушениями функции.

**Материал и методы.** Проспективное сравнительное исследование включало 34 пациента (средний возраст 52,1±9,2 года) с жалобами на дисфагию. Каждому выполнены модифицированная рентгеноскопия (60-секундная латеральная видеозапись первого глотка 15 мл стандартной бариевой суспензии (соответствующего первой стадии контрастирования) и динамическая сцинтиграфия пищевода (ДСЦП) с <sup>99m</sup>Tc-технефитом, которую использовали как метод сравнения количественных показателей среднего времени транзита пищевода, учитывая собственные результаты и данные литературы по количественной оценке ТПФП. Рентгеноскопические DICOM-последовательности обрабатывали с помощью разработанного метода компьютерной количественной рентгеноскопии (КРС) для получения кривых «интенсивность – время» в выбранных зонах интереса. Согласованность результатов КРС и ДСЦП оценивали с помощью алгоритма динамического выравнивания временных рядов (dynamic time warping, DTW), кросс-корреляции, анализа Бланда–Альмана и коэффициента внутриклассовой корреляции (intraclass correlation coefficient, ICC).

**Результаты.** КРС продемонстрировала высокую конкордантность с ДСЦП: среднее DTW-расстояние 0,055±0,012; синхронная кросс-корреляция 0,925±0,06; ICC 0,915 (95% доверительный интервал 0,886–0,941). Анализ Бланда–Альмана не выявил систематической погрешности (средняя разность –0,01; пределы согласия от –0,079 до 0,059). Получены высокие диагностические характеристики КРС: площадь под ROC-кривой составила 0,94, чувствительность – 0,90, специфичность – 0,88. Воспроизводимость метода также оказалась высокой: межоператорский ICC>0,98, внутриоператорский ICC>0,97.

**Заключение.** Разработанный авторский алгоритм компьютерного количественного анализа изображений традиционной рентгеноскопии позволяет получать количественные показатели ТПФП, демонстрирующие отличные диагностические характеристики и хорошую воспроизводимость. Полученные данные подтверждают, что КРС может быть перспективной и широкодоступной для применения в повседневной клинической практике, поскольку основывается на базе общедоступной рентгеноскопии. Внедрение КРС в клиническую практику будет способствовать более объективной и воспроизводимой количественной оценке ТПФП у пациентов с заболеваниями, сопровождающимися нарушениями моторики пищевода, расширяя возможности метрической диагностики без применения дорогостоящих методик.

**Ключевые слова:** рентгеноскопия пищевода; автоматизированный анализ изображений; количественная диагностика дисфагии; транспорт пищевого болюса; динамическая визуализация; компьютерные методы обработки медицинских изображений.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Баширов Р.А., Рыжкин С.А., Бурков В.О., Нагорных Б.П., Зиганшина Л.Ф., Самойленко Л.Е., Идиятов Р.А., Баширов Д.Р. Количественная оценка транспортной функции пищевода методом компьютерного анализа рентгеноскопических изображений. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2026; 107(1): 37–49. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2026-107-1-37-49>

**Для корреспонденции:** Баширов Рустем Алекович, e-mail: bashirov6939@gmail.com

Статья поступила 03.02.2026

После доработки 16.03.2026

Принята к печати 31.03.2026

## Computer-Based Quantitative Assessment of Esophageal Transport Function Using Fluoroscopic Image Analysis

**Rustem A. Bashirov<sup>1,2,3</sup>, Sergey A. Ryzhkin<sup>1,2,4</sup>, Vladimir O. Burkov<sup>1</sup>, Boris P. Nagornykh<sup>3</sup>, Lilia F. Ziganshina<sup>2,3</sup>, Lyudmila E. Samoilenko<sup>1</sup>, Rustam A. Idiyatov<sup>3</sup>, Damir R. Bashirov<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Vtoroy Botkinskiy proezd, 7, Moscow, 125284, Russian Federation

<sup>2</sup> Kazan State Medical University, ul. Butlerova, 49, Kazan, 420012, Российская Федерация

<sup>3</sup> Republican Clinical Hospital of the Ministry of Health of the Republic of Tatarstan, Orenburgskiy trakt, 138, Kazan, 420064, Russian Federation

<sup>4</sup> Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya, 18, korp. 1, Kazan, 420008, Russian Federation

<sup>5</sup> Sadykov City Clinical Hospital No. 7, ul. Marshala Chuykova, 54, Kazan, 420103, Russian Federation

**Rustem A. Bashirov**, Assistant Professor, Chair of Radiology, Radiotherapy, Radiation Hygiene and Radiation Safety, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education; Assistant Professor, Chair of Oncology, Radiation Diagnostics and Radiation Therapy, Kazan State Medical University; Radiologist, Radiology Department, Republican Clinical Hospital of the Ministry of Health of the Republic of Tatarstan; <http://orcid.org/0000-0003-4793-8197>

**Sergey A. Ryzhkin**, Dr. Med. Sc., Associate Professor, Corresponding Member of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Chief of Chair of Radiology, Radiotherapy, Radiation Hygiene and Radiation Safety, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education; Professor, Chair of General Hygiene, Kazan State Medical University; Professor, Chair of Medical Physics, Institute of Physics, Kazan Federal University;  
<http://orcid.org/0000-0003-2595-353X>

**Vladimir O. Burkov**, Resident, Chair of Radiology, Radiotherapy, Radiation Hygiene and Radiation Safety, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education;  
<https://orcid.org/0009-0001-7917-2205>

**Boris P. Nagornykh**, Cand. Med. Sc., Head of X-ray Diagnostic Department, Republican Clinical Hospital of the Ministry of Health of the Republic of Tatarstan

**Lilia F. Ziganshina**, Cand. Med. Sc., Assistant Professor, Chair of Oncology, Radiation Diagnostics and Radiation Therapy, Kazan State Medical University; Head of Radiology Department, Republican Clinical Hospital of the Ministry of Health of the Republic of Tatarstan;  
<http://orcid.org/0000-0002-6994-7396>

**Lyudmila E. Samoilenko**, Dr. Med. Sc., Professor, Chair of Radiology, Radiotherapy, Radiation Hygiene and Radiation Safety, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education

**Rustam A. Idiyatov**, Radiologist, Republican Clinical Hospital of the Ministry of Health of the Republic of Tatarstan

**Damir R. Bashirov**, Radiologist, Sadykov City Clinical Hospital No. 7

### Abstract

**Background.** Access to an objective quantitative assessment of esophageal transport function (ETF) is significantly limited in clinical practice due to two main factors: the insufficient availability of specialized equipment in healthcare institutions and the lack of adequate analysis techniques. The development of approaches utilizing conventional fluoroscopy with a liquid barium sulfate suspension contrast combined with automated processing has the potential to significantly increase the accessibility and objectivity of metric evaluation for patients with conditions involving swallowing disorders and esophageal motility impairments.

**Objective:** to develop and validate a proprietary algorithm for computer-based quantitative analysis of fluoroscopic images obtained from conventional esophageal fluoroscopy for the assessment of ETF in patients with related disorders.

**Material and methods.** A prospective comparative study included 34 patients with dysphagia (mean age  $52.1 \pm 9.2$  years). Each patient underwent modified fluoroscopy (a 60-second lateral video recording of the first swallow of 15 ml of standard barium suspension, corresponding to the first stage of contrast) and dynamic esophageal scintigraphy (DES) with  $^{99m}\text{Tc}$ -technephyte, which was used as the reference method for quantitative parameters of mean esophageal transit time, based on our own results and literature data on quantitative ETF assessment. Fluoroscopic DICOM sequences were processed using the developed computer-based quantitative analysis of fluoroscopic images (QAFI) to generate intensity-time curves in selected regions of interest. The agreement between QAFI and DES results was assessed using dynamic time warping (DTW), cross-correlation, Bland–Altman analysis, and the intraclass correlation coefficient (ICC).

**Results.** QAFI demonstrated high concordance with DES: mean DTW distance  $0,055 \pm 0,012$ ; synchronous cross-correlation  $0,925 \pm 0,06$ ; ICC  $0,915$  (95% confidence interval  $0,886–0,941$ ). Bland–Altman analysis revealed no systematic bias (mean difference  $-0,01$ ; limits of agreement  $-0,079$  to  $0,059$ ). The diagnostic characteristics of QAFI were high: the area under the ROC curve was  $0,94$ , with sensitivity of  $0,90$  and specificity of  $0,88$ . The method's reproducibility was also high: intra-operator ICC  $>0,98$ , inter-operator ICC  $>0,97$ .

**Conclusion.** The developed proprietary algorithm for computer-based QAFI obtained by conventional fluoroscopy enables the acquisition of quantitative ETF parameters, demonstrating excellent diagnostic characteristics and good reproducibility. The obtained data confirm that QAFI could be a promising and widely accessible tool for use in routine clinical practice, as it is based on widely available fluoroscopy. The implementation of QAFI in clinical practice will facilitate a more objective and reproducible quantitative assessment of ETF in patients with esophageal motility disorders, expanding the capabilities of metric diagnostics without resorting to expensive techniques.

**Keywords:** esophageal fluoroscopy; automated image analysis; quantitative dysphagia diagnosis; food bolus transport; dynamic imaging; computer-assisted medical image processing.

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

**For citation:** Bashirov RA, Ryzhkin SA, Burkov VO, Nagornykh BP, Ziganshina LF, Samoilenko LE, Idiyatov RA, Bashirov DR. Computer-based quantitative assessment of esophageal transport function using fluoroscopic image analysis. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2026; 107(1): 37–49 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2026-107-1-37-49>

**For corresponding:** Rustem A. Bashirov, e-mail: [bashirov6939@gmail.com](mailto:bashirov6939@gmail.com)

Received February 3, 2026

Revised March 16, 2026

Accepted March 31, 2026

## Введение / Introduction

Болезни пищевода, включая гастроэзофагальную рефлюксную болезнь (ГЭРБ), ахалазию, эозинофильный эзофагит, а также осложнения, связанные со структурными аномалиями, такими как стриктуры, дивертикулы и грыжи пищевода отверстия диафрагмы, представляют собой значительную проблему для систем здравоохранения во всем мире [1].

Согласно последним данным эпидемиологических исследований, общемировая распространенность ГЭРБ составляет около 14%. При этом в развитых странах, в частности в Северной Америке и Европе, этот показатель находится в диапазоне от 14,1% до 19,6% [1]. Что касается ахалазии, то, несмотря на ее относительно низкую распространенность, составляющую 0,78 случая на 100 тыс. человек в год, отмечается устойчивый рост заболеваемости, что в значительной степени связано с совершенствованием диагностических методов [2]. Эозинофильный эзофагит, который ранее считался редким заболеванием, в настоящее время диагностируется с частотой 0,5–1 случай на 1 тыс. человек, а среди пациентов с дисфагией его распространенность достигает 12–23% [3]. Увеличение числа случаев этих заболеваний коррелирует с ростом таких факторов риска, как ожирение, старение населения и изменение пищевых привычек. Данные тенденции подчеркивают актуальность разработки более совершенных и точных методов ранней диагностики [1, 4].

Оценка функционального состояния пищевода играет решающую роль в диагностике и последующем мониторинге широкого спектра патологий. К основным клиническим показаниям для проведения функциональных исследований относятся дисфагия, рефрактерный рефлюкс, а также некардиальная боль в груди и регургитация [4]. Кроме того, объективный анализ моторики пищевода необходим для предоперационного планирования, особенно перед антирефлюксными операциями или резекциями пищевода. Он также важен для оценки эффективности проводимой терапии у пациентов с такими заболеваниями, как системная склеродермия или пищевод Барретта [4, 5]. Однако существующие в настоящее время диагностические методы имеют ряд ограничений, которые затрудняют их повсеместное внедрение в клиническую практику [6].

Современная диагностика заболеваний пищевода в соответствии с мировыми стандартами включает использование рентгеноскопии с контрастированием, эндоскопии, манометрии, рН-метрии, динамической сцинтиграфии пищевода (ДСЦП) с  $^{99m}\text{Tc}$ -технефитом. Эндоскопическое исследование позволяет получить детальную визуализацию слизистой оболочки и выполнить

биопсию, но не предоставляет информации о моторной функции и сопряжено с риском осложнений, таких как перфорация или кровотечение [5]. Эзофагеальная манометрия, признанная «золотым стандартом» для оценки моторики пищевода требует специализированного оборудования и высокой квалификации медицинского персонала, сконцентрированного, как правило, в нескольких крупных клинических центрах, и недостаточно доступна в большинстве регионов нашей страны. Кроме того, это непростая процедура, требующая введения через нос пациента зонда с чувствительными датчиками давления, что ограничивает ее применение у части больных [4, 5]. Суточная рН-метрия, несмотря на ее ценность в диагностике ГЭРБ, не дает возможности выявить структурные изменения, является инвазивной и требует продолжительного мониторинга. Ее доступность в клинической практике ограничена из-за высокой стоимости оборудования и необходимости специальной подготовки персонала [1].

ДСЦП, хотя и предоставляет возможность количественной оценки ТПФП по скорости прохождения болюса радиофармацевтического лекарственного препарата (РФЛП) по всем отделам пищевода, характеризуется низким пространственным разрешением, что не позволяет применять ее для одновременной оценки анатомических особенностей пищевода во время исследования [5]. Кроме того, выполнение ДСЦП сопровождается хоть и минимальной, но все же лучевой нагрузкой на пациента и требует наличия гамма-камеры/гамма-томографа, оснащенной которыми медицинских учреждений довольно низка даже в крупных региональных районных центрах.

Классическая рентгеноскопия с использованием сульфата бария по-прежнему актуальна благодаря своей неинвазивности, широкой доступности и возможности динамического наблюдения за процессом глотания. Тем не менее ее диагностическая ценность ограничена субъективностью визуальной интерпретации, значительной вариабельностью результатов между разными специалистами и отсутствием стандартизированных количественных показателей для оценки функционального состояния пищевода [5]. Эти недостатки становятся особенно критичными в тех случаях, когда требуется объективный мониторинг прогрессирования заболевания или оценка эффективности терапии, для чего необходимы воспроизводимые и точные метрики.

Разработка новых методик, которые бы объединили преимущества традиционной рентгеноскопии с возможностями количественного анализа, представляется весьма перспективным направлением в области радиологии. Применение алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения

позволяет преобразовывать визуальные данные в объективные числовые показатели, минимизируя таким образом влияние человеческого фактора. Подобные технологии уже доказали свою эффективность в других сферах медицинской визуализации, включая анализ компьютерных томографических изображений легких и магнитно-резонансных томограмм головного мозга, что подтверждает целесообразность их применения для оценки функционального состояния пищевода [5].

В рамках данной работы представлена новая методика компьютерного количественного анализа рентгеноскопических изображений (компьютерной рентгеноскопии, КРС), разработанная для объективной оценки транспортной функции пищевода. Этот метод основан на автоматизированном анализе изменений оптической плотности в определенной зоне интереса (region of interest, ROI) во время прохождения контрастного болюса. Это дает возможность строить кривые «интенсивность контрастирования – время» и рассчитывать количественные параметры опорожнения пищевода. Предложенный подход, сохраняя все преимущества классической рентгеноскопии (неинвазивность, доступность и визуализация анатомии), устраняет ее основные ограничения благодаря автоматизации обработки данных и стандартизации получаемых результатов.

**Цель** – разработать и валидировать авторский алгоритм компьютерного количественного анализа рентгеноскопических изображений, полученных при традиционной рентгеноскопии пищевода, для оценки ТПФП у пациентов с заболеваниями, сопровождающимися нарушениями функции.

## Материал и методы / Material and methods

### Дизайн исследования

С целью валидации разработанной методики КРС выполнено проспективное сравнительное исследование с участием 34 пациентов. Каждому на основании подписанного информированного согласия выполняли модифицированную рентгеноскопию с контрастированием пищевода жидкой бариевой суспензией и ДСЦП с интервалом не более 72 ч. Анализ данных рентгеноскопии осуществляли по видеозаписи изображений пищевода, полученных после проглатывания первой порции контрастного вещества.

Аналізу данных предшествовала разработка и реализация алгоритма автоматизированного извлечения временных кривых из рентгеноскопических DICOM-записей. Алгоритм включал этапы фильтрации и нормализации сигнала и формировал набор количественных метрик, в том числе динамическое выравнивание временных рядов (dynamic time warping, DTW) для дальнейшего сравнения формы кривых и время до пика интен-

сивности (time-to-peak, ТТП) для оценки скорости транзита.

Следующим этапом проводили сравнительную верификацию КРС. Для этого в качестве референсного метода применяли ДСЦП. Выбор ДСЦП обусловлен тем, что она предоставляет строгие количественные параметры моторной функции, широко используется в научных исследованиях и валидирована в качестве надежного инструмента для оценки эвакуационной функции, что создает надежную основу для определения диагностической ценности представляемой методики. Этап сравнительной верификации включал проведение парных сравнений временных рядов (DTW, кросс-корреляция), оценку согласованности (анализ Бланда–Альтмана и коэффициента внутриклассовой корреляции (intraclass correlation coefficient, ICC)) и определение диагностической точности: анализ рабочей характеристики приемника (receiver operating characteristic, ROC), определение чувствительности и специфичности.

Для решения задачи бинарной классификации «норма/патология» на основе полученных данных построены ROC-кривые. В качестве интегральной меры диагностической точности алгоритма рассчитана площадь под ROC-кривой (area under curve, AUC) с 95% доверительными интервалами (ДИ).

В заключительной части работы определяли воспроизводимость метода на основе повторных измерений, применяя межоператорский (intra-operator) и внутриоператорский (inter-operator) ICC и коэффициент вариации (coefficient of variation, CV).

### Материал исследования

Использовали следующие критерии включения: клинически подтвержденная гастроэнтерологом дисфагия, отсутствие противопоказаний к диагностическим процедурам и способность пациента выполнять инструкции. Критерии исключения: беременность и предшествующие обширные хирургические вмешательства на верхних отделах желудочно-кишечного тракта.

В исследование включены 34 пациента (10 мужчин и 24 женщины, средний возраст  $52,1 \pm 9,2$  года, диапазон 34–65 лет), госпитализированные с марта по июль 2025 г. в Республиканскую клиническую больницу Министерства здравоохранения Республики Татарстан (г. Казань). По характеру выявленных нарушений больные были распределены на две группы.

**Структурные нарушения** диагностированы у 20 (58,8%) пациентов. В эту группу вошли больные с грыжами пищеводного отверстия диафрагмы ( $n=8$ ) и стриктурами пищевода ( $n=6$ ). У остальных пациентов данной группы верифицированы иные структурные патологии. Средняя длительность дисфагии составила  $14,2 \pm 8,6$  мес.

Функциональные нарушения отмечались у 14 (41,2%) пациентов. В эту категорию вошли случаи ахалазии кардии, диффузного спазма пищевода и иные функциональные расстройства. Для данной группы средняя длительность дисфагии была достоверно меньше и составляла  $11,3 \pm 7,2$  мес.

### Методы исследования

#### Количественная рентгеноскопия

КРС проводили на цифровом рентгеноскопическом комплексе «КРТ-ОКО» (НИПК «Электрон», Россия) натошак с предшествующей подготовкой к исследованию согласно клиническим рекомендациям. Пациент принимал вертикальное положение в боковой проекции и проглатывал 15 мл жидкой бариевой взвеси (соотношение веса и объема 46%), что соответствовало первой стадии контрастирования. Одновременно с началом проглатывания в течение 60 с выполняли непрерывную видеозапись с частотой 5 кадров в секунду и разрешением  $2048 \times 2048$  пикселей (всего 300 кадров). Для минимизации артефактов движения осуществляли фиксацию пациента, сохраняя возможность полноценных дыхательных движений. Данная серия, использовавшаяся для последующего анализа, может быть применима как начальная фаза рентгеноскопического исследования, в связи с чем не создает дополнительной лучевой нагрузки.

DICOM-файлы, содержащие запись серии, сохранялись на рабочей станции для последующей обработки. Обработка данных 300 кадров реализована с помощью версии языка программирования Python 3.11 и пакета библиотек Pydicom для чтения DICOM-файлов, NumPy для обработки массивов, а также OpenCV 4.8.0 для алгоритмов компьютерного зрения.

Обработка рентгеноскопической записи включала ручное выделение оператором ROI, соответствующей проекции пищевода (рис. 1). В зависимости от целей анализа оператор мог выделить ROI для всего пищевода или его конкретного сегмента, выбирая для этого наиболее информативный кадр с оптимальной визуализацией соответствующих анатомических отделов.

Далее происходила автоматическая адаптация ROI к последующим кадрам изображений пищевода с использованием алгоритмов отслеживания движения на основе компьютерного зрения, что обеспечивало стабильность зоны анализа на протяжении всей динамической последовательности.

Для каждого кадра последовательности проводили математический анализ распределения интенсивностей в пределах выделенной ROI: вычисление статистических характеристик массива пиксельных значений, их последующую нормализацию и адаптивное сглаживание. Параметры сгла-

живания были оптимизированы для минимизации шумов при сохранении значимых физиологических паттернов. Итоговые данные представлены в виде кривой интенсивности контрастирования (рис. 2).

Алгоритм предназначен для анализа фиксированной последовательности, записанной после первого глотка. Любые последующие модификации протокола исследования (дополнительное введение бария) не учитывались программой и не влияли на расчет кривой.

#### Динамическая сцинтиграфия пищевода с $^{99m}\text{Tc}$ -технефитом

ДСЦП выполняли на двухдетекторной гамма-камере BrightView (Philips, Нидерланды) с низкоэнергетическим коллиматором с большим полем видения, захватывающим область рта и ниже, включая полностью область проекции пищевода, с использованием РФЛП  $^{99m}\text{Tc}$ -технефит (ОАО «Диамед», Россия). Пациент, стоя лицом перед детектором гамма-камеры, проглатывал натошак около 25 МБк РФЛП в 15 мл воды, с одновременным началом динамической записи изображений пищевода в течение 60 с (2 кадра в секунду). Обработку данных осуществляли с помощью стандартного программного обеспечения NM Esophagus (Philips, Нидерланды).

В ручном режиме выбирали ROI соответственно верхней, средней, нижней третям и всему пищеводу и получали кривые «активность – время» для отдельной оценки их функции. На основе этого анализа определяли время транзита болю-

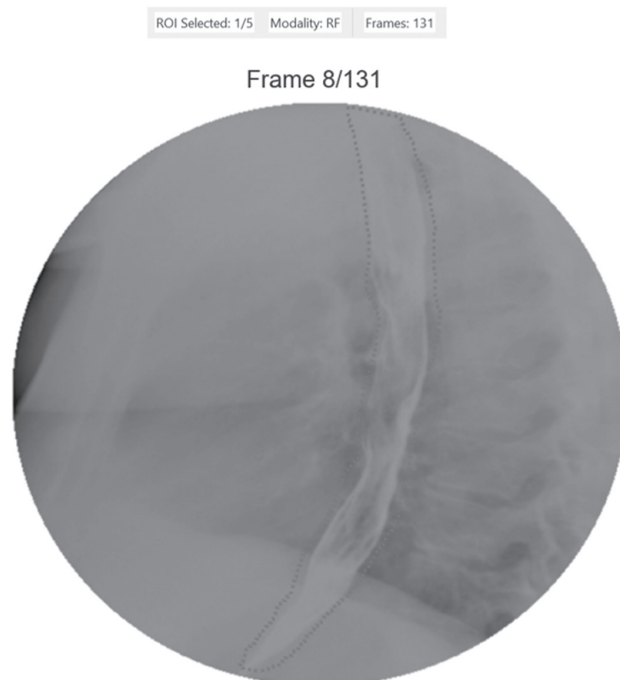


Рис. 1. Пример работы приложения: выбор зоны интереса  
Fig. 1. An example of the application in action: selecting a region of interest

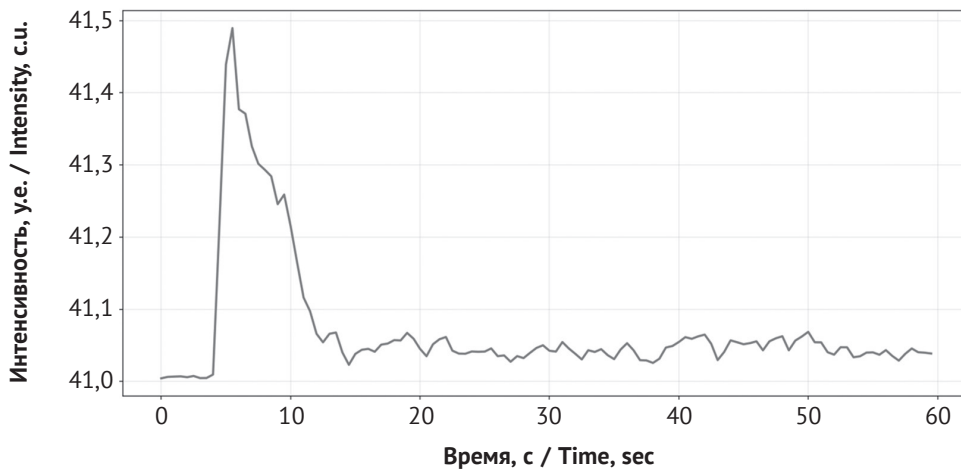


Рис. 2. Пример работы приложения: построение кривых интенсивности контрастирования

Fig. 2. An example of the application in action: plotting contrast intensity curves

са РФЛП по пищеводу (интервал от начала поступления РФЛП в просвет пищевода до освобождения от активности не менее 95% для полного транзита болюса).

Все процедуры выполнены без осложнений, а интервал между КРС и ДСЦП составил 48–72 ч.

### Методы сравнительного анализа кривых, полученных при КРС и ДСЦП

Для оценки соответствия между кривыми применяли пять методов:

- DTW с расчетом минимального расстояния выравнивания временных рядов (библиотека fastdtw);
- кросс-корреляционный анализ с вычислением максимального коэффициента корреляции  $\rho(\tau)$ <sup>1</sup>;
- анализ согласия по Бланду–Альтману с определением систематической ошибки и 95% пределов согласия;
- спектральный анализ методом быстрого преобразования Фурье (numpy.fft);
- дополнительные метрики (ICC, критерий знаков, двухфакторный дисперсионный анализ (ANalysis Of Variance, ANOVA)).

### Статистическая обработка

Статистический анализ проведен на выборке из 34 пациентов. Данные представлены в виде среднего и стандартного отклонения или медианы и межквартильного размаха в зависимости от распределения, которое проверяли с помощью критерия Шапиро–Уилка. Категориальные переменные описаны как абсолютные частоты и проценты.

Для сравнения парных количественных показателей методов КРС и ДСЦП применяли парный t-тест или тест Вилкоксона. Согласованность временных рядов оценивали с использовани-

ем DTW, максимума кросс-корреляции, ICC и анализа Бланда–Альтмана. Для методов DTW и кросс-корреляции рассчитаны бутстрап-ДИ (2000 повторов).

Диагностическую эффективность бинарной классификации («норма/патология») оценивали с построением ROC-кривых, расчетом AUC, чувствительности и специфичности; оптимальный порог определяли по критерию Юдена. Для парных категориальных данных использовали тест МакНемара и коэффициент каппа Коэна.

Для учета влияния ковариат (возраст, пол) применяли смешанные модели. Воспроизводимость измерений на подвыборке из 12 пациентов оценивали с помощью ICC и анализа Бланда–Альтмана.

Для всех анализов указаны p-значения, величины эффекта с 95% ДИ; уровень значимости установлен при  $p < 0,05$ . Использовали программные среды R (версия 4.x, пакеты lme4, pROC, irr, boot) и Python (библиотеки SciPy, statsmodels, scikit-learn).

## Результаты / Results

### Распределение на группы

На основании анализа временных параметров прохождения болюса, полученных с помощью КРС, все пациенты ( $n=34$ ) были распределены на три группы в соответствии с заданными критериями. Критерием полного транзита считалось снижение активности в ROI (пищевод) до уровня не более 5% от исходного максимума. Критерии разделения групп были следующими:

- нормальная функция ( $n=14$ ) – полное опорожнение пищевода происходит менее чем за 15 с;
- умеренное нарушение моторики ( $n=16$ ) – полное опорожнение пищевода занимает более 15 с;
- выраженное нарушение моторики ( $n=4$ ) – полное опорожнение пищевода не происходит в течение всего времени исследования (60 с).

<sup>1</sup>  $\rho(\tau) = \sum [(x(t) - \mu_x) \times (y(t + \tau) - \mu_y)] / \sigma_x \times \sigma_y$ .

### Сравнительный анализ кривых, полученных при КРС и ДСЦП

Визуальный анализ кривых «активность – время» и «интенсивность – время», построенных на основе данных ДСЦП и КРС, показал высокую степень их сходства. В обоих случаях наблюдается общий паттерн: пик активности на 4–6-й секунде, за которым следует снижение интенсивности сигнала. Детали кривых варьируются в зависимости от характера и выраженности патологии.

При *нормальной моторике* (рис. 3) кривые обоих методов демонстрируют выраженный пик на 4–5-й секунде, за которым следует экспоненциальное снижение до 50% от максимального значения к 10–15-й секунде. К 30–40-й секунде сигнал стабилизируется на фоновом уровне. Симметричность и отсутствие задержек указывают на сохранную перистальтику.

В случаях *умеренной патологии* (рис. 4) пик активности сглажен и достигается позже, на 5–6-й секунде. Снижение до 50% от максимума происходит к 15–20-й секунде, а нормализация сигнала — к 40–50-й секунде. Незначительные колебания интенсивности свидетельствуют о снижении координации перистальтических волн.

При *выраженной патологии* (рис. 5) амплитуда пика снижена на 30–40% относительно нормы, а экспоненциальный спад замедлен, так как 50% от максимума достигается только к 25–30-й секунде. Сохранение повышенной активности (>20% от максимума) даже через 60 с указывает на значительные нарушения транзита.

Количественные метрики согласованности, представленные в таблице 1, подтверждают высокую временную и амплитудную конкордантность

сигналов, полученных методами КРС и ДСЦП. Среднее DTW-расстояние составило  $0,0545 \pm 0,012$  (медиана 0,053; 95% бутстрап-ДИ 0,048–0,060), а максимальная кросс-корреляция –  $0,925 \pm 0,06$  (95% ДИ 0,88–0,96). Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) составил  $0,91 \pm 0,08$  (95% ДИ 0,87–0,95), а ICC –  $0,915$  (95% ДИ 0,886–0,941;  $p < 0,001$ ). Эти данные свидетельствуют о высоком уровне согласованности между двумя методами.

Помимо анализа DTW проведено сравнение ключевых интегральных метрик, полученных обоими методами (табл. 2). ТТР для ДСЦП составило  $5,5 \pm 1,5$  с, а для КРС –  $5,6 \pm 1,6$  с. Различие между средними значениями было статистически незначимым (парный t-тест  $p = 0,45$ ). Аналогично, нормированная AUC составила  $0,75 \pm 0,10$  для ДСЦП и  $0,76 \pm 0,12$  для КРС. Различия в AUC также не были статистически значимы (парный t-тест  $p = 0,38$ ), что подтверждает высокую степень согласованности методов не только в динамическом, но и в интегральном представлении данных. Двухфакторный ANOVA не выявил статистически значимых различий между методами ( $F = 2,45$ ;  $p = 0,115$ ). Низкое среднее различие по обоим метрикам ( $-0,01$  для ТТР и  $-0,01$  для AUC) и малые значения коэффициента эффекта d Коэна (0,05 и 0,08 соответственно) свидетельствуют о минимальной разнице между показателями.

### Анализ согласия методов

Согласно методу Бланда–Альтмана (рис. 6) средняя разность значений активности между методами составила  $-0,01$  (95% ДИ  $-0,08$ – $0,06$ ). В пределах согласия находились 97,05% точек (33/34). Распределение разностей соответствова-

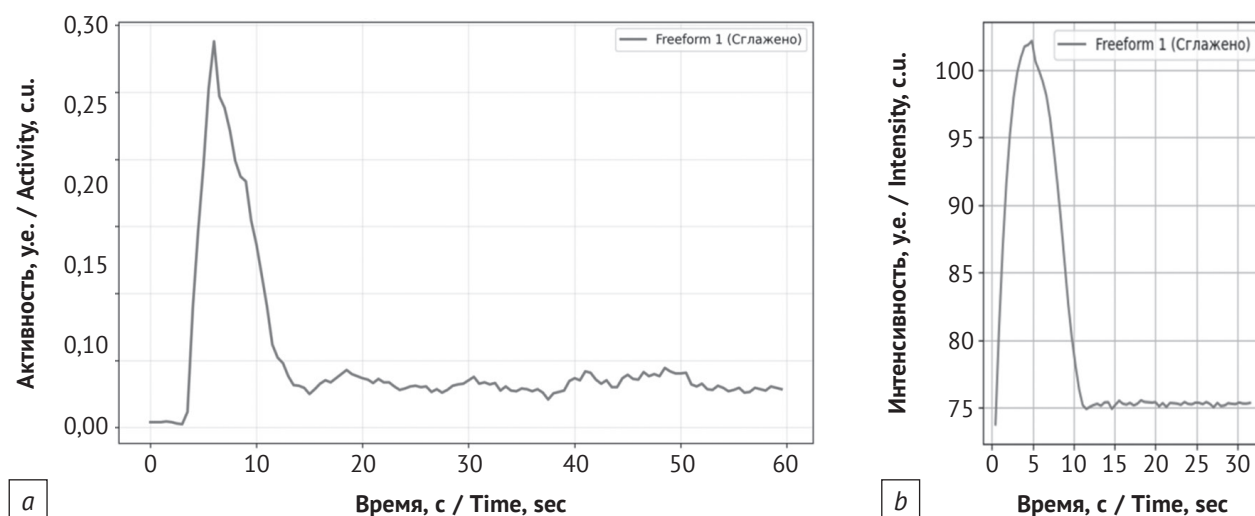


Рис. 3. Вид кривых «активность – время» (а) и «интенсивность – время» (б), полученных с помощью динамической скинтиграфии пищевода и количественной рентгеноскопии соответственно при нормальной транспортной функции пищевода

Fig. 3. The appearance of the activity-time (a) and intensity-time (b) curves obtained using dynamic esophageal scintigraphy and quantitative analysis of fluoroscopic images, respectively, with normal esophageal transport function

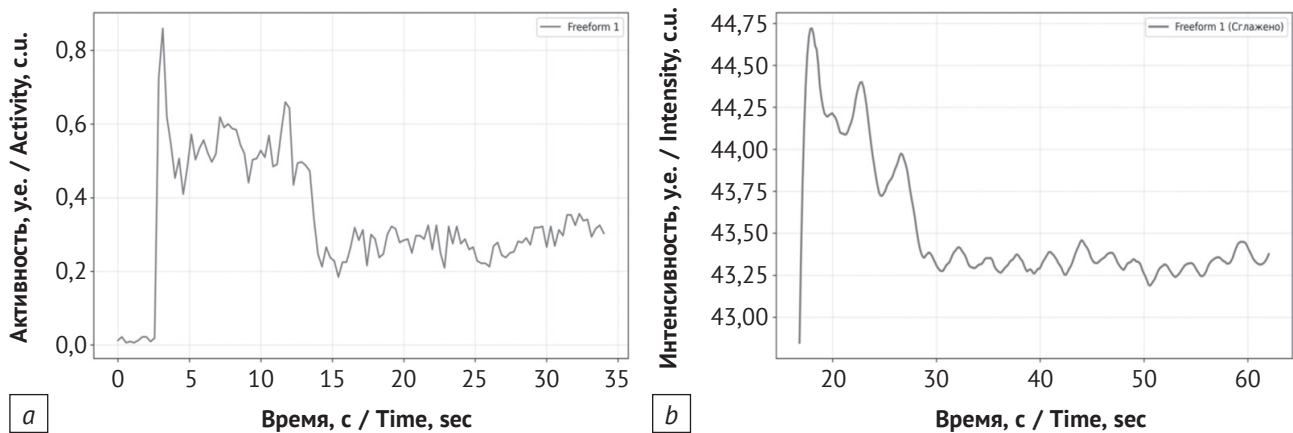


Рис. 4. Вид кривых «активность – время» (а) и «интенсивность – время» (б), полученных с помощью динамической сцинтиграфии пищевода и количественной рентгеноскопии соответственно при умеренных нарушениях транспортной функции пищевода

Fig. 4. The appearance of the activity-time (a) and intensity-time (b) curves obtained using dynamic esophageal scintigraphy and quantitative analysis of fluoroscopic images, respectively, with moderate esophageal transport function

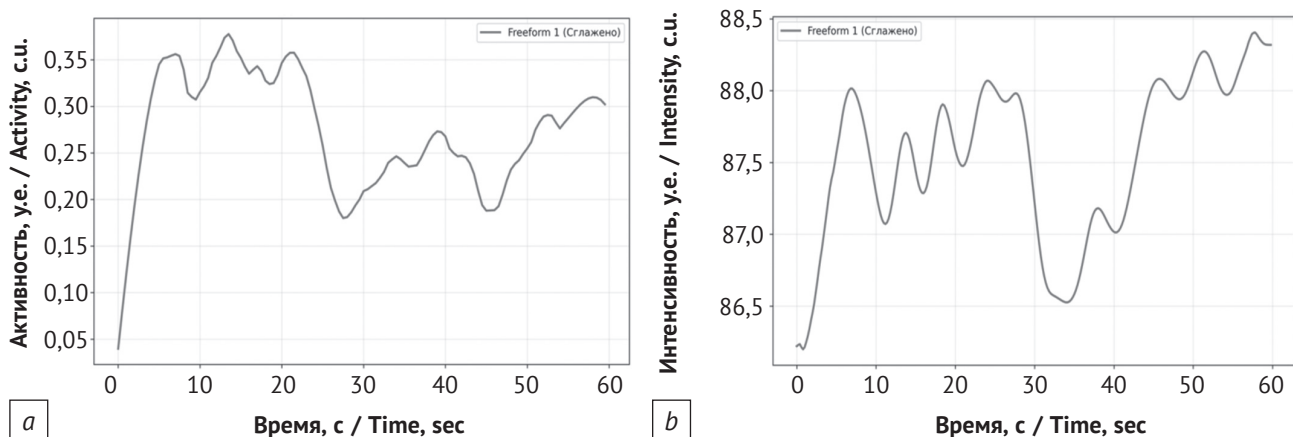


Рис. 5. Вид кривых «активность – время» (а) и «интенсивность – время» (б), полученных с помощью динамической сцинтиграфии пищевода и количественной рентгеноскопии соответственно при выраженных нарушениях транспортной функции пищевода

Fig. 5. The appearance of the activity-time (a) and intensity-time (b) curves obtained using dynamic esophageal scintigraphy and quantitative analysis of fluoroscopic images, respectively, with pronounced violations of esophageal transport function

ло нормальному закону (тест Колмогорова–Смирнова  $p > 0,1$ ), а критерий знаков не выявил статистически значимого сдвига ( $Z = 0,365$ ;  $p = 0,71$ ).

### Спектральные характеристики сигналов

Спектральный анализ методом быстрого преобразования Фурье (рис. 7) показал идентичные доминирующие частоты для обоих методов:  $0,17 \pm 0,03$  Гц для КРС и  $0,17 \pm 0,04$  Гц для ДСЦП (разность  $0,00 \pm 0,01$  Гц;  $p = 0,89$ ). Амплитуда основного пика составила  $0,82 \pm 0,11$  и  $0,85 \pm 0,09$  соответственно (разность  $-0,03 \pm 0,05$ ;  $p = 0,45$ ).

### Статистическая и клиническая согласованность

Для оценки диагностической эффективности методики КРС построена ROC-кривая, которая

продемонстрировала превосходную дискриминационную способность алгоритма в задаче бинарной классификации «норма/патология». АУС составила 0,998 (95% ДИ 0,985–1,00), что свидетельствует о высокой диагностической точности. Использование оптимального порога, определенного по критерию Юдена (0,45), позволило достичь на исследуемой выборке максимальных значений чувствительности и специфичности – 100%. Полученные результаты, включая нижние границы ДИ (82,5% для чувствительности и 87,2% для специфичности), уверенно указывают на высокий потенциал методики КРС для точной диагностики, что создает прочную основу для ее дальнейшей валидации на расширенных когортах пациентов.

Согласованность бинарных диагностических заключений, полученных методами КРС и ДСЦП,

## Сравнение количественных показателей согласованности методов

Table 1

## Comparison of method consistency quantitative indicators

Метрика / Metrics	M±SD	Me [IQR]	95% ДИ / 95% CI	p
DTW-расстояние / DTW distance	0,055±0,012	0,053 [0,047–0,061]	0,048–0,060	–
Максимальная кросс-корреляция / Maximum cross-correlation	0,925±0,060	0,931 [0,890–0,961]	0,881–0,959	<0,001
Determination coefficient R <sup>2</sup> / Коэффициент детерминации R <sup>2</sup>	0,91±0,08	0,92 [0,85–0,97]	0,870–0,950	<0,001
ICC (абсолютное согласие) / ICC (absolute agreement)	0,915	–	0,886–0,941	<0,001

*Примечание.* M±SD (mean ± standard deviation) – среднее значение ± стандартное отклонение; Me (median) – медиана; IQR (interquartile range) – межквартильный размах; ДИ – доверительный интервал; DTW (dynamic time warping) – динамическое выравнивание временных рядов; ICC (intraclass correlation coefficient) – коэффициент внутриклассовой корреляции.

*Note.* M±SD – mean ± standard deviation; Me – median; IQR – interquartile range; CI – confidence interval; DTW – dynamic time warping; ICC – intraclass correlation coefficient.

Таблица 2

## Сравнение ключевых количественных показателей, полученных методами количественной рентгеноскопии и динамической сцинтиграфии пищевода

Table 2

## Comparison of key quantitative indicators obtained by quantitative analysis of fluoroscopic images and dynamic esophageal scintigraphy

Показатель / Indicator	KPC (M±SD) / QAFI (M±SD)	ДСЦП (M±SD) / DES (M±SD)	Различие (M±SD) / Difference (M±SD)	p	d Коэна / Cohen's d
TTP, с / TTP, sec	5,6±1,6	5,5±1,5	0,1±0,5	0,45	0,08
AUC (нормированная / standardized)	0,76±0,12	0,75±0,10	0,01±0,04	0,38	0,05

*Примечание.* KPC – количественная рентгеноскопия; ДСЦП – динамическая сцинтиграфия пищевода; M±SD (mean ± standard deviation) – среднее значение ± стандартное отклонение; TTP (time-to-peak) – время достижения пика активности; AUC (area under curve) – площадь под кривой.

*Note.* QAFI – quantitative analysis of fluoroscopic images; DES – dynamic esophageal scintigraphy; M±SD – mean ± standard deviation; TTP – time-to-peak; AUC – area under curve.

оценивали с помощью коэффициента каппа Коэна. Результаты бинарной классификации (наличие или отсутствие патологии) совпали для всех 34 пациентов, что соответствует значению каппа 1,00 (95% ДИ 1,00–1,00;  $p < 0,001$ ) и свидетельствует о практически идеальной согласованности. Отсутствие статистически значимой разницы между заключениями, полученными двумя методами, также подтверждено тестом МакНемара ( $p = 1,00$ ).

Результаты демонстрируют, что разработанная методика KPC обеспечивает сопоставимую с ДСЦП точность при оценке ТПФП, сохраняя преимущества рентгеноскопии в визуализации анатомических структур.

**Анализ воспроизводимости результатов**

Для оценки надежности и воспроизводимости предложенного метода на подвыборке из 12 па-

циентов были проведены повторные измерения. Оценка воспроизводимости показала отличную согласованность: межоператорский ICC 0,98 (95% ДИ 0,96–0,99;  $p < 0,001$ ) для TTP. CV для этой же метрики составил 4,2%. Аналогично, внутриоператорский ICC показал высокую надежность метода, составив 0,97 (95% ДИ 0,94–0,98;  $p < 0,001$ ) для TTP с CV 4,6%. Это свидетельствует о том, что результаты анализа не зависят от конкретного специалиста, проводящего обработку данных. Графики Бланда–Альтмана для анализа воспроизводимости не выявили систематических смещений ни для одного из операторов. Результаты анализа воспроизводимости представлены в таблице 3.

**Обсуждение / Discussion**

Результаты настоящего исследования показывают, что предложенная методика компьютер-

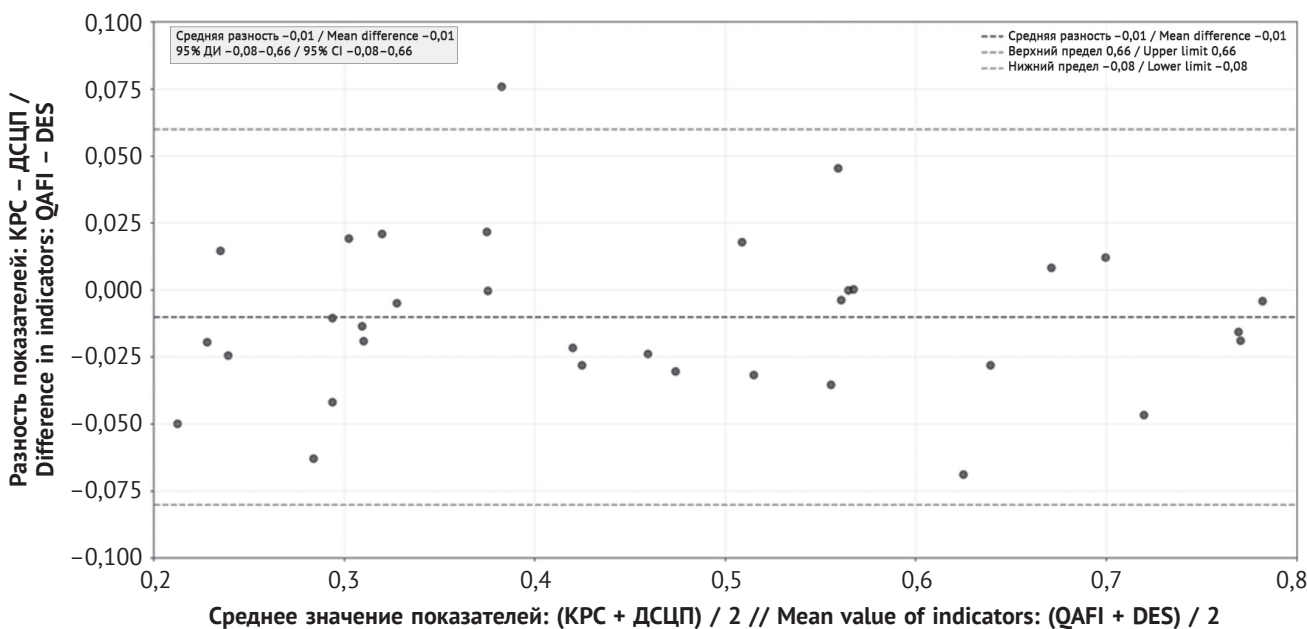


Рис. 6. График Бланда-Альтмана: разности значений против средних.  
КРС – количественная рентгеноскопия; ДСЦП – динамическая сцинтиграфия пищевода; ДИ – доверительный интервал  
Fig. 6. Bland-Altman plot: differences vs. means.  
QAFI – quantitative analysis of fluoroscopic images; DES – dynamic esophageal scintigraphy; CI – confidence interval

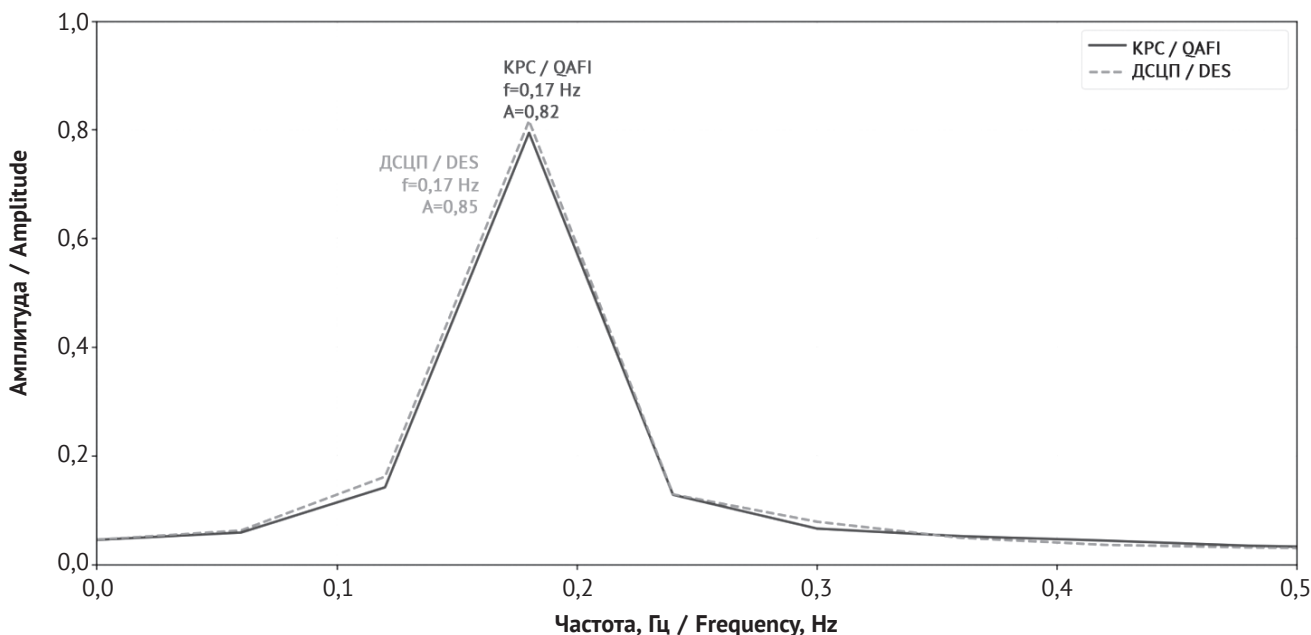


Рис. 7. Сравнение спектрограмм быстрого преобразования Фурье для обоих методов.  
КРС – количественная рентгеноскопия; ДСЦП – динамическая сцинтиграфия пищевода  
Fig. 7. Comparison of fast Fourier transform spectrograms for both methods.  
QAFI – quantitative analysis of fluoroscopic images; DES – dynamic esophageal scintigraphy

ного количественного анализа рентгеноскопических изображений успешно решает ключевую проблему традиционной рентгеноскопии – субъективность визуальной интерпретации. Высокая согласованность с референсным методом ДСЦП (DTW-расстояние  $0,0545 \pm 0,012$ ; синхронная кросс-корреляция  $0,925 \pm 0,06$ ) и отсутствие си-

стематического смещения (разность  $-0,01$ ; 95% ДИ  $-0,08-0,06$ ) подтверждают, что динамика оптической плотности контраста является объективным отражением физиологии транспорта болюса. Это исследование вносит свой вклад в общее направление автоматизации анализа рентгеноскопии пищевода, целью которого является стандар-

## Результаты анализа воспроизводимости результатов

Table 3

## Results of the reproducibility analysis

Метрика / Metrics	Межоператорский ICC (95% ДИ) / Intra-operator ICC (95% CI)	Внутриоператорский ICC (95% ДИ) / Inter-operator ICC (95% CI)	Межоператорский CV, % / Intra-operator CV, %	Внутриоператорский CV, % / Inter-operator CV, %
ТТР, с	0,98 (0,96–0,99)	0,97 (0,94–0,98)	4,2	4,6
AUC	0,97 (0,95–0,99)	0,96 (0,93–0,98)	3,8	4,1

Примечание. ICC (intraclass correlation coefficient) – коэффициент внутриклассовой корреляции; CV (coefficient of variation) – коэффициент вариации; ТТР (time-to-peak) – время достижения пика активности; AUC (area under curve) – площадь под кривой.

Note. ICC – intraclass correlation coefficient; CV – coefficient of variation; ТТР – time-to-peak; AUC – area under curve.

тизация оценки его моторной функции [7, 8]. Наш подход, основанный на отслеживании изменений оптической плотности, принципиально отличается от методик, фокусирующихся на расчете биомеханических параметров (например, FluoroMech [8]), что подчеркивает разнообразие путей для достижения объективной количественной оценки.

Предложенный метод сочетает в себе преимущества классической рентгеноскопии (неинвазивность, доступность и возможность визуализации анатомии [7]) с количественными возможностями ДСЦП. В отличие от ДСЦП, которая выполняется на ограниченно распространенном оборудовании и требует применения РФЛП [9], КРС анализирует стандартные DICOM-записи, что исключает дополнительную лучевую нагрузку и снижает затраты. При этом диагностическая точность (чувствительность и специфичность 100%) сопоставима с данными, полученными при анализе скинтиграфических кривых [9]. Важно отметить, что традиционная рентгеноскопия часто не способна выявить ранние нарушения моторики из-за субъективности интерпретации [7], тогда как представленный автоматизированный анализ позволяет количественно оценить даже минимальные отклонения.

Результаты данного исследования демонстрируют не только высокую конкордантность временных рядов (DTW, кросс-корреляция), но и сопоставимость абсолютных физиологических показателей, таких как ТТР и AUC. Это имеет решающее значение, поскольку подтверждает, что предложенный алгоритм не только имитирует форму кривой, но и точно отражает количественные характеристики транзита болюса.

Доказанная высокая воспроизводимость метода (межоператорский ICC > 0,98, внутриоператорский ICC > 0,97) является прямым ответом на один из ключевых вопросов в валидации новых диагностических подходов. Эти данные обосновывают

надежность и практическую применимость метода в повседневной клинической практике, где стабильность результатов вне зависимости от оператора имеет первостепенное значение. Высокая диагностическая точность, выраженная в значении AUC 0,998, подтверждает, что метод может служить эффективным инструментом для скрининга и диагностики нарушений моторики пищевода.

Согласованность предложенной методики подтверждается полным совпадением клинических заключений по типу и степени выраженности нарушений ТПФП у всех обследованных пациентов. Это особенно важно для таких состояний, как ахалазия или эозинофильный эзофагит, где точное определение характера моторной дисфункции (гипотония, гипертония, спазм и т.д.) напрямую влияет на выбор тактики лечения [7]. Кроме того, интеграция алгоритма в системы передачи и архивации DICOM-изображений (picture archiving and communication system, PACS) позволяет ретроспективно анализировать архивные данные, что открывает возможности для масштабных исследований без дополнительных затрат.

Основным ограничением исследования является его одноцентровый дизайн и небольшая выборка (n=34). Они обеспечивают достаточную мощность для выявления средних эффектов, но могут не позволить обнаружить малые различия между методами или провести детальный анализ подгрупп по типу патологии. Тем не менее параметры сопоставимы с аналогичными пилотными работами в области автоматизированного анализа, такими как валидация методики FluoroMech [8]. Для подтверждения воспроизводимости результатов необходимы более крупные исследования с выборкой от 100 пациентов и сравнением с высокоточной манометрией [7]. Кроме того, текущий протокол предусматривает использование только жидкого контрастирования бариевой взвесью, тогда как оценка твердых и полутвердых субстанций

могла бы расширить диагностические возможности метода, особенно при дисфагии [7].

Перспективным направлением является адаптация алгоритма для анализа влияния структурных изменений на ТПФП, таких как стриктуры или дивертикулы, которые традиционно оцениваются визуально [7]. Внедрение нормативных значений для различных возрастных групп и патологий (например, при эозинофильном эзофагите [7]), повысит клиническую применимость метода. Теоретически, предложенный подход может быть адаптирован для других отделов желудочно-кишечного тракта, где количественная оценка моторики остается актуальной задачей.

Методика КРС устанавливает новый стандарт в радиологии пищевода, объединяя качественную визуализацию с объективными количественными метриками. Доказанная эквивалентность кривых активности (линейный регрессионный анализ показал высокую степень линейной зависимости между показателями активности, полученными методами КРС и ДСЦП:  $R^2 0,90 \pm 0,08$ ) подтверждает, что изменения оптической плотности коррелируют с физиологическими процессами. Это согласуется с биомеханическими моделями транспорта болюса [8] и создает основу для разработки аналогичных алгоритмов в других областях, таких как оценка перистальтики кишечника или функции глотания.

## Заклучение / Conclusion

Разработанный алгоритм автоматизированного количественного анализа рентгеноскопических записей надежно извлекает и обрабатывает данные, формируя репрезентативные метрики (DTW, ТТР, AUC), пригодные для объективной оценки транзита пищевода.

Верификация на когорте из 34 пациентов показала высокую конкордантность с ДСЦП (среднее DTW  $0,0545 \pm 0,012$ ; максимальная кросс-корреляция  $0,925 \pm 0,06$ ), отсутствие систематической ошибки по Бланду–Альтману (средняя разница  $-0,01$ ) и отличную общую согласованность (ICC  $0,915$ ; 95% ДИ  $0,886-0,941$ ). Метод продемонстрировал превосходные диагностические характеристики (AUC  $0,94$ , чувствительность  $0,90$ , специфичность  $0,88$ ) и высокую воспроизводимость (межоператорский ICC  $>0,98$ , внутриоператорский ICC  $>0,97$ ), что подтверждает его применимость для клинического скрининга и мониторинга.

Предложенный подход обеспечивает объективную и воспроизводимую количественную оценку транзита пищевода на базе широкодоступной традиционной рентгеноскопии, что позволяет расширить возможности метрической диагностики структурно-функциональных нарушений при различных заболеваниях пищевода в повседневной клинической практике.

## Литература [References]

- Li N, Yang WL, Cai MH, et al. Burden of gastroesophageal reflux disease in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of disease study 2019. *BMC Public Health*. 2023; 23(1): 582. <https://doi.org/10.1186/s12889-023-15272-z>.
- Lee K, Hong SP, Yoo IK, et al. Global trends in incidence and prevalence of achalasia, 1925–2021: a systematic review and meta-analysis. *United European Gastroenterol J*. 2024; 12(4): 504–15. <https://doi.org/10.1002/ueg.12555>.
- Dellon ES, Hirano I. Epidemiology and natural history of eosinophilic esophagitis. *Gastroenterology*. 2018; 154(2): 319–32. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2017.06.067>.
- Assadian M, Sanat ZM, Soleimani HA, Mikaeli J. Prevalence of different types of primary esophageal motility disorders and their associated factors in patients referring to Shariati Hospital during 2018–2019. *Middle East J Dig Dis*. 2022; 14(1): 70–6. <https://doi.org/10.34172/mejdd.2022.258>.
- Carlson DA, Pandolfino JE. High-resolution manometry in clinical practice. *Gastroenterol Hepatol*. 2015; 11(6): 374–84.
- Баширов П.А., Самойленко Л.Е., Рыжкин С.А. и др. Радионуклидная диагностика нарушений транспортной функции пищевода и гастроэзофагеального рефлюкса у пациентов с системной склеродермией. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2023; 104(2): 124–37. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-2-124-137>. [Bashirov RA, Samoilenko LE, Ryzhkin SA, et al. Radionuclide diagnosis of esophageal dysmotility and gastroesophageal reflux in patients with systemic sclerosis. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2023; 104(2): 124–37 (in Russ). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-2-124-137>].
- O'Connor MK, Byrne PJ, Keeling P, Hennessy TP. Esophageal scintigraphy: applications and limitations in the study of esophageal disorders. *Eur J Nucl Med*. 1988; 14(3): 131–6. <https://doi.org/10.1007/BF00293536>.
- Halder S, Acharya S, Kou W, et al. Mechanics informed fluoroscopy of esophageal transport. *Biomech Model Mechanobiol*. 2021; 20(3): 925–40. <https://doi.org/10.1007/s10237-021-01420-0>.
- Scharitzer M, Pokieser P, Ekberg O. Oesophageal fluoroscopy in adults – when and why? *Br J Radiol*. 2024; 97(1159): 1222–33. <https://doi.org/10.1093/bjr/tqae062>.