

ПЭТ/КТ ДИАГНОСТИКА НАРУШЕНИЙ БАРЬЕРНОЙ ФУНКЦИИ СТЕНКИ МОЧЕВОГО ПУЗЫРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИСТОСКОПИЧЕСКИХ И УЛЬТРАСТРУКТУРНЫХ 3D-РЕКОНСТРУКЦИЙ (ПИЛОТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

Г.В. Зубик¹, Б.А. Бердичевский¹, А.Р. Гоняев², И.В. Павлова¹, Д.А. Учаев³, М.А. Корабельников⁴

¹ФГБОУ ВО «Тюменский государственный медицинский университет» Минздрава России (Тюмень, Российская Федерация)

²Клинический госпиталь «Мать и дитя» (Тюмень, Российская Федерация)

³ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (Челябинск, Российская Федерация)

⁴ГАУЗ ТО МКМЦ «Медицинский город» (Тюмень, Российская Федерация)

Для цитирования: Зубик Г.В., Бердичевский Б.А., Гоняев А.Р., Павлова И.В., Учаев Д.А., Корабельников М.А. ПЭТ/КТ диагностика нарушений барьерной функции стенки мочевого пузыря с использованием цистоскопических и ультраструктурных 3D-реконструкций (пилотное исследование). *Аспирантский вестник Поволжья*. 2025;25(4):46-52.

DOI: <https://doi.org/10.35693/AVP692611>

■ Сведения об авторах

*Зубик Григорий Васильевич – стажер-исследователь института клинической медицины. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1333-2922>
E-mail: grisha.zubik@mail.ru

Бердичевский Б.А. – д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры детской хирургии с курсом урологии и андрологии.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9414-8510> E-mail: doktor_bba@mail.ru

Гоняев А.Р. – канд. мед. наук, заведующий отделением оперативной урологии. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1619-4714>

E-mail: a.gonyaev25@yandex.ru

Павлова И.В. – канд. мед. наук, врач-уролог, докторант кафедры детской хирургии с курсом урологии и андрологии.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5079-430X> E-mail: iraena@mail.ru

Учаев Д.А. – научный сотрудник отдела электронной микроскопии научно-образовательного центра «Нанотехнологии».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8623-4769> E-mail: uchaevda@susu.ru

Корабельников М.А. – врач-радиолог радиологического центра. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6020-2489> E-mail: kma_doc@mail.ru

*Автор для переписки

■ Список сокращений

ПЭТ/КТ – позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией; СЭМ – сканирующая электронная микроскопия.

Получено: 09.09.2025

Одобрено: 09.10.2025

Опубликовано: 21.11.2025

■ Аннотация

Цель – оценить нарушения барьерной функции стенки мочевого пузыря по результатам позитронно-эмиссионной/компьютерной томографии с 11С-холином с использованием 3D-реконструктивных методик по данным смотровой цистоскопии и сканирующей электронной микроскопии биоптата ткани стенки мочевого пузыря с увеличением в 6000 раз.

Материал и методы. Исследование выполнено на базе четырех клинических наблюдений пациентов с различной степенью выраженности воспалительных изменений мочевого пузыря. У пациентов в процессе реализации воспаления в стенке мочевого пузыря цифровые показатели метаболической активности ПЭТ/КТ сравнивались с наглядными цистоскопическими и ультраструктурными 3D-реконструкциями.

Результаты. Показатели ПЭТ/КТ стандартизированного уровня захвата 11С-холина в стенке мочевого пузыря соотносились с 3D-ультраструктурными проявлениями нарушения барьерной функции всех слоев стенки мочевого пузыря, а также с визуальными 3D-цистоскопическими изменениями слизистой оболочки в процессе реализации воспалительного процесса. ПЭТ/КТ с 11С-холином в сочетании с передовыми методами 3D-реконструкции демонстрируют высокий потенциал для более точной диагностики и мониторинга урологических заболеваний, связанных с нарушением барьерной функции мочевого пузыря.

Заключение. Интеграция данных ПЭТ/КТ с цистоскопическими и ультраструктурными 3D-реконструкциями является перспективным подходом для комплексной оценки состояния барьерной функции мочевого пузыря и позволяет выявить глубокие патологические процессы на разных уровнях. Комплексный подход позволяет повысить точность диагностики воспалительных и деструктивных процессов, а также оптимизировать выбор лечебной тактики. Внедрение подобных высокотехнологичных подходов в урологическую практику может значительно улучшить качество оказания медицинской помощи пациентам с воспалительными патологиями мочевого пузыря.

■ **Ключевые слова:** ПЭТ/КТ, 3D-реконструкция, сканирующая электронная микроскопия, барьерная функция, стенка мочевого пузыря, ультраструктура, цистоскопия.

■ **Конфликт интересов:** не заявлен.

PET/CT DIAGNOSTICS OF THE BLADDER WALL BARRIER FUNCTION DISORDERS USING CYSTOSCOPIC AND ULTRASTRUCTURAL 3D RECONSTRUCTIONS (PILOT STUDY)

Grigorii V. Zubik¹, Boris A. Berdichevsky¹, Artem R. Gonyaev², Irina V. Pavlova¹, Daniil A. Uchaev³, Mikhail A. Korabelnikov⁴

¹Tyumen State Medical University (Tyumen, Russian Federation)

²Mother and Child Clinical Hospital (Tyumen, Russian Federation)

³SUSU National Research University (Chelyabinsk, Russian Federation)

⁴Medical City Clinical Medical Center (Tyumen, Russian Federation)

Citation: Zubik GV, Berdichevsky BA, Gonyaev AR, Pavlova IV, Uchaev DA, Korabelnikov MA. PET/CT diagnostics of the bladder wall barrier function disorders using cystoscopic and ultrastructural 3D reconstructions (pilot study). *Aspirantskiy vestnik Povolzhya*. 2025;25(4):46-52. DOI: <https://doi.org/10.35693/AVP692611>

Information about authors

Grigorii V. Zubik – research intern of the Institute of Clinical Medicine. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1333-2922>

E-mail: grisha.zubik@mail.ru

Boris A. Berdichevsky – MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor, Professor of the Department of Pediatric Surgery with a Course in Urology and Andrology. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9414-8510> E-mail: doktor_bba@mail.ru

Artem R. Gonyaev – MD, Cand. Sci. (Medicine), Head of the Department of Operative Urology. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1619-4714> E-mail: a.gonyaev25@yandex.ru

Irina V. Pavlova – MD, Cand. Sci. (Medicine), Urologist, doctoral student of the Department of Pediatric Surgery with a Course in Urology and Andrology. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5079-430X> E-mail: iraena@mail.ru

Daniil A. Uchaev – Researcher of Electron Microscopy Department of the Nanotechnology Research and Education Center.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8623-4769> E-mail: uchaevda@susu.ru

Mikhail A. Korabelnikov – Radiologist of the Radiology Center. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6020-2489> E-mail: kma_doc@mail.ru

Received: 09.09.2025

Accepted: 09.10.2025

Published: 21.11.2025

Abstract

Aim – to evaluate the bladder wall barrier dysfunction using 11C-choline positron emission tomography/computed tomography using 3D reconstructive techniques based on visual cystoscopy and scanning electron microscopy of bladder wall tissue biopsy specimens at 6000x magnification.

Material and methods. The study was based on four clinical observations of patients with varying degrees of inflammatory changes in the bladder. In patients with bladder wall inflammation, digital PET/CT metabolic activity indices were compared with visual cystoscopic and ultrastructural 3D reconstructions.

Results. PET/CT indices of standardized 11C-choline uptake in the bladder wall correlated with 3D ultrastructural manifestations of the bladder wall barrier dysfunction across all layers, as well as with visual 3D cystoscopic changes in the mucosa during inflammation. 11C-choline PET/CT combined with advanced 3D reconstruction methods demonstrates high potential for a more accurate diagnosis and monitoring of urological diseases associated with bladder barrier dysfunction.

Conclusion. The integration of PET/CT data with cystoscopic and ultrastructural 3D reconstructions is a promising approach for a comprehensive assessment of bladder barrier function and enables the identification of underlying pathological processes at various levels. This integrated approach allows for increased diagnostic accuracy for inflammatory and destructive processes and optimizes treatment options. The introduction of such high-tech approaches into urological practice can significantly improve the quality of care for patients with inflammatory bladder pathologies.

Keywords: PET/CT, 3D-reconstruction, scanning electron microscopy, barrier function, bladder wall, ultrastructure, cystoscopy.

Conflict of interest: *nothing to disclose.*

ВВЕДЕНИЕ

Барьерная функция стенки мочевого пузыря представляет собой сложный многоуровневый процесс, обеспечивающий изоляцию мочи от тканей организма и поддержание гомеостаза уринарной системы [1–3]. Основу барьерной функции составляет интеграция структурных и биохимических компонентов всех слоев стенки мочевого пузыря, которые совместно препятствуют проникновению агрессивных компонентов урины внутрь тканей [4–5]. Слизистая оболочка мочевого пузыря выстлана многослойным переходным эпителием – уротелием, обладающим уникальными барьерными свойствами. Уротелий состоит из базальных, промежуточных и поверхностных клеток. Межклеточные плотные контакты уротелиальных клеток обеспечивают дополнительный механический и химический барьер. Под уротелием располагается слизистая

основа, представленная плотной соединительной тканью, богатой коллагеном и эластическими волокнами [6]. Этот слой выполняет функцию структурной поддержки слизистой оболочки и участвует в регуляции межклеточной коммуникации через экстрацеллюлярный матрикс. В слизистой основе локализуются иммунокомпетентные клетки (макрофаги, дендритные клетки), обеспечивающие иммунологическую защиту и быстрое реагирование на патогенные воздействия, способствуя поддержанию целостности барьера [7]. Мышечный слой состоит из гладкомышечных пучков, которые отвечают за наполнение и опорожнение мочевого пузыря при накоплении и выделении мочи. Барьерная функция мышечной оболочки выражена не напрямую в защите от химических или микробиологических агентов, но она играет важную роль в механическом обеспечении целостности стенки и предотвращении ее

чрезмерного растяжения и повреждения [8]. Адекватное функционирование детрузора поддерживает оптимальное внутрипузырное давление, что минимизирует риск травматизации слизистой оболочки. Внешний слой стенки мочевого пузыря состоит из рыхлой соединительной ткани (адвентиции) и серозной оболочки, покрывающей верхушку мочевого пузыря. Эти слои обеспечивают механическую защиту и питание ткани через сосудистую сеть [9–10].

Нарушение структуры и функции любого из перечисленных слоев приводит к ослаблению барьерной функции и развитию патологических состояний. Повреждение уротелия и нарушение плотных контактов способствуют проникновению раздражающих веществ и микроорганизмов в глубокие ткани, что провоцирует воспаление и деструкцию. Изменения в составе и организации слизистой основы снижают иммунологическую защиту и механическую поддержку, усугубляя повреждение. Дисфункция мышечного слоя нарушает нормальный цикл наполнения и опорожнения, способствуя хроническому воспалению. Нарушения барьерной функции стенки мочевого пузыря представляют собой важную медико-социальную проблему и являются патофизиологическим фундаментом широкого спектра урологических заболеваний, включая хронические воспалительные

процессы, интерстициальный цистит, лучевой цистит и предопухольные состояния. Точная диагностика, количественная и визуальная оценка данных нарушений имеют ключевое значение для своевременного выявления патологических изменений, адекватного выбора терапевтической стратегии и прогнозирования исходов заболеваний [11].

Современные диагностические методы, такие как цистоскопия и традиционная морфологическая оценка, несмотря на высокую информативность, не всегда позволяют выявить микроскопические и ультраструктурные изменения, лежащие в основе нарушения барьерной функции. В этом контексте значительный интерес представляют мультидисциплинарные подходы, сочетающие функциональную и морфологическую визуализацию, обеспечивающие более комплексное и детализированное исследование состояния мочевого пузыря.

Позитронно-эмиссионная томография в сочетании с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ) позволяет осуществлять количественную оценку метаболической активности тканей и выявлять патологические процессы на молекулярном уровне, что имеет важное значение для диагностики воспалительных и онкологических изменений [12–13]. Однако функциональные данные требуют

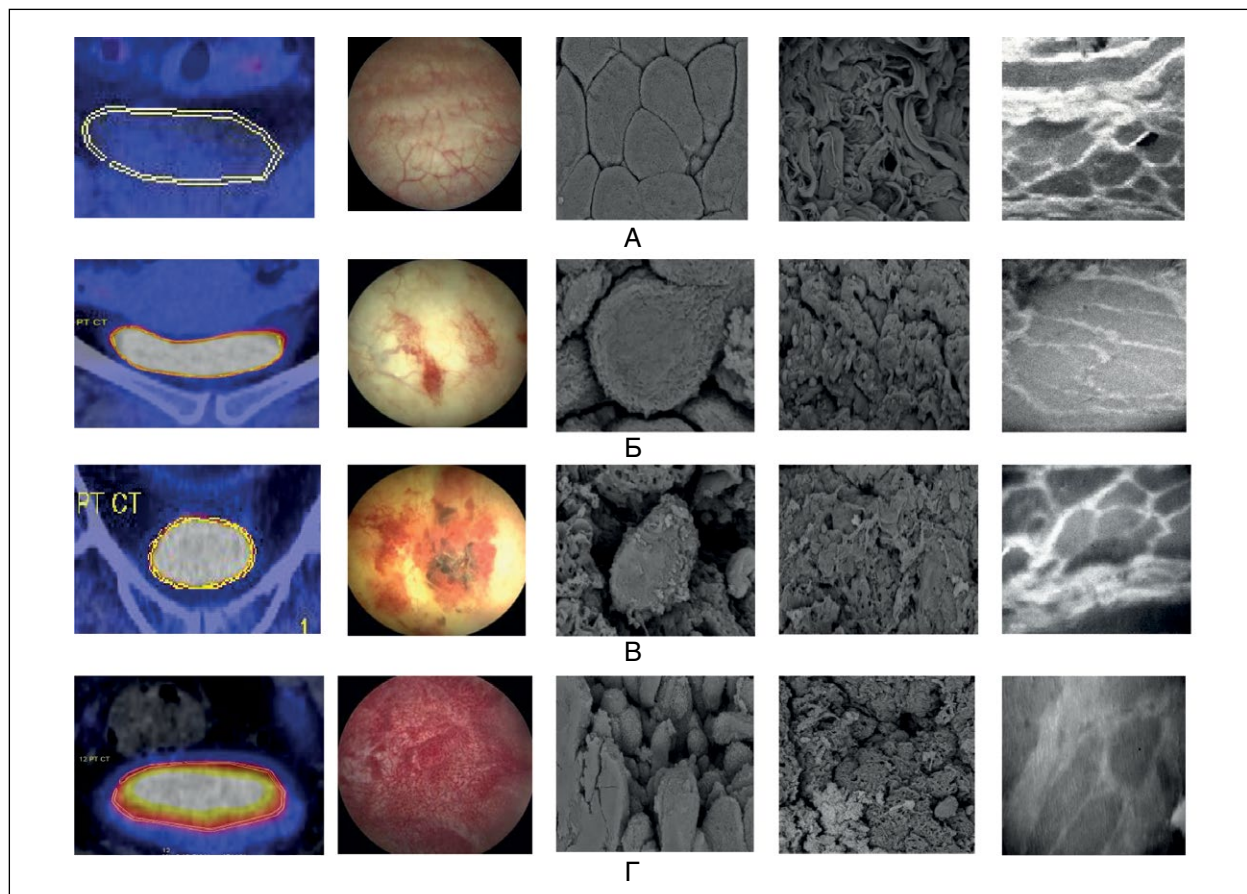


Рисунок 1. Исходные результаты ПЭТ/КТ термограмм с ^{11}C -холином, смотровой цистоскопии и сканирующей электронной микроскопии (слизистого, подслизистого, мышечного слоев) с увеличением в 6000 раз в процессе реализации воспалительного процесса в стенке мочевого пузыря (А – норма, Б – минимальные изменения, В – умеренные изменения, Г – выраженные изменения).

Figure 1. Initial results of PET/CT thermograms with ^{11}C -choline, viewing cystoscopy and scanning electron microscopy (mucous, submucous, muscular layers) with a magnification of 6000 times during the implementation of the inflammatory process in the bladder wall (A - normal, B - minimal changes, C - moderate changes, D - pronounced changes).

корреляции с морфологическими исследованиями для повышения точности диагностики.

Использование цистоскопических 3D-реконструкций обеспечивает объемное представление состояния слизистой оболочки мочевого пузыря, расширяя возможности традиционной эндоскопии. Ультраструктурный анализ биоптатов с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с высоким увеличением (до 6000x) предоставляет уникальную информацию о клеточной и субклеточной организации ткани, что является необходимым для выявления нарушений барьерной функции на ультраструктурном уровне¹.

В рамках настоящего пилотного исследования реализована интеграция данных ПЭТ/КТ, цистоскопии с 3D-реконструкциями и ультраструктурного анализа биоптатов, что позволяет оценить корреляцию между функциональными метаболическими изменениями и морфологическими повреждениями стенки мочевого пузыря. Такой комплексный подход способствует более глубокой диагностике патологий, улучшает клиническое понимание механизма нарушения барьерной функции и открывает перспективы для разработки персонализированных лечебных стратегий.

Совершенствование методов ПЭТ/КТ диагностики нарушений барьерной функции стенки мочевого пузыря с использованием цистоскопических и ультраструктурных 3D-реконструкций является актуальной задачей, способствующей развитию современных диагностических технологий и улучшению качества медицинской помощи пациентам урологического профиля.

ЦЕЛЬ

Оценить нарушения барьерной функции стенки мочевого пузыря по результатам ПЭТ/КТ с 11С-холином с использованием 3D-реконструктивных методик по данным смотровой цистоскопии и сканирующей электронной микроскопии биоптата ткани стенки мочевого пузыря с увеличением в 6000 раз.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В рамках настоящего пилотного исследования было обследовано 4 пациента, госпитализированных в урологическое отделение Областной клинической больницы №2. ПЭТ/КТ и расчет тропности (SUVmax) стенки мочевого пузыря к 11С-холину проведены на аппарате Biograph в радиологическом центре ГАУЗ ТО МЦ «Медицинский город» города Тюмени по стандартной методике. Пациентам проводилась смотровая цистоскопия с биопсией стенки мочевого пузыря, далее биоптаты направлены на сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) с увеличением в 6000 раз. Результаты базовой смотровой цистоскопии и высокоточной СЭМ сопоставлялись с результатами, полученными в процессе ПЭТ/КТ сканирования (рисунок 1).

По визуальной картине состояния слизистой оболочки мочевого пузыря, полученной в процессе выполнения смотровой цистоскопии, создавались цистоскопические 3D-реконструкции стенки мочевого пузыря. По снимкам сканирующей электронной микроскопии с увеличением в 6000 раз создавались ультраструктурные 3D-реконструкции стенки мочевого пузыря. У пациентов в процессе реализации воспаления в стенке мочевого пузыря цифровые показатели SUVmax тропности сравнивались с наглядными цистоскопическими и ультраструктурными 3D-реконструкциями.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В первом клиническом наблюдении у пациента С., 48 лет ПЭТ/КТ тропность стенки мочевого пузыря к 11С-холину составила SUVmax=1,15, при этом по цистоскопической 3D-реконструкции визуальной картины состояния слизистой оболочки мочевого пузыря, полученной в процессе смотровой цистоскопии, наблюдается условный вариант нормы, легкая инъекция сосудов слизистой оболочки без выраженных изменений. По результатам ультраструктурной 3D-реконструкции снимков СЭМ с увеличением в 6000 раз наблюдаются структурированные клетки уротелия, с плотными межклеточными промежутками, препятствующими

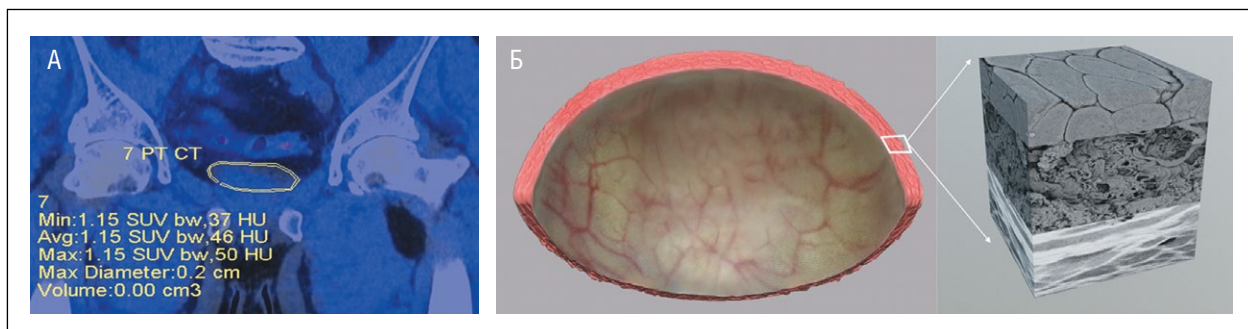


Рисунок 2. А – ПЭТ/КТ тропность стенки мочевого пузыря к 11С-холину в пределах нормы. Б – цистоскопическая 3D-реконструкция по данным смотровой цистоскопии и ультраструктурная 3D-реконструкция стенки мочевого пузыря с увеличением в 6000 раз при отсутствии патологического процесса.

Figure 2. A - PET/CT scan of the bladder wall showing 11C-choline affinity within normal limits. B - cystoscopic 3D reconstruction based on visual cystoscopy data and ultrastructural 3D reconstruction of the bladder wall with 6000x magnification in the absence of pathological process.

¹ Бердичевский Б.А., Бердичевский В.Б., Зубик Г.В., и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025610931. Компьютерная программа визуальной и блочной 3D-ультраструктурной визуализации вероятности нарушения мочетканевого барьера мочевого пузыря по результатам ПЭТ/КТ всего тела 11С-холином. Оpubл. 15.01.2025. Заявл. Тюменский ГМУ Минздрава России.

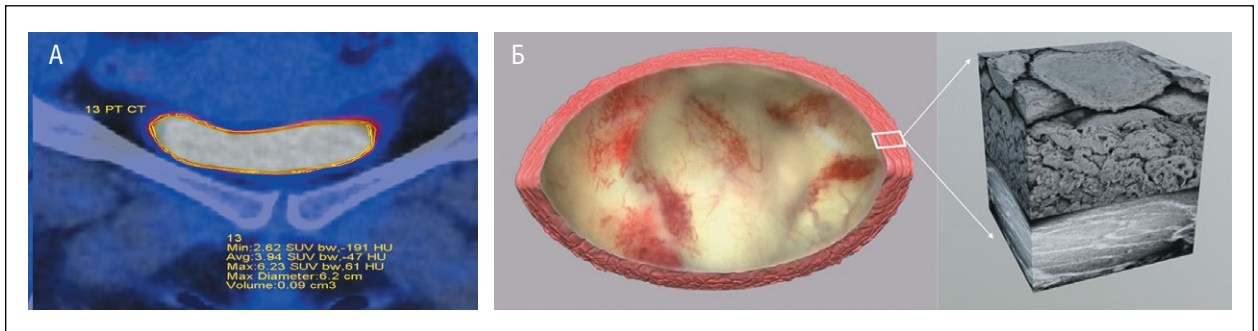


Рисунок 3. А – ПЭТ/КТ тропность стенки мочевого пузыря к 11С-холину при минимальных воспалительных изменениях. Б – цистоскопическая 3D-реконструкция по данным смотровой цистоскопии и ультраструктурная 3D-реконструкция стенки мочевого пузыря с увеличением в 6000 раз при минимальных изменениях.

Figure 3. A - PET/CT tropism of the bladder wall to 11C-choline with minimal inflammatory changes. B - cystoscopic 3D reconstruction based on viewing cystoscopy data and ultrastructural 3D reconstruction of the bladder wall with a magnification of 6000 times with minimal changes.

проникновению агрессивных компонентов урины в подслизистый и мышечный слой (рисунок 2).

Во втором клиническом наблюдении представлен пациент А., 47 лет. ПЭТ/КТ сканирование показало повышенную тропность стенки мочевого пузыря, с максимальным значением стандартизированного накопления (SUVmax), равным 6,23. Данный показатель свидетельствует о высокой метаболической активности в исследуемой области, что может быть связано с наличием воспалительного или другого патологического процесса. При проведении смотровой цистоскопии с последующим созданием 3D-реконструкции визуальной картины слизистой оболочки мочевого пузыря были выявлены единичные очаги гиперемии. Эти участки характеризовались локальным покраснением и повышенной васкуляризацией, что отражает наличие воспалительной реакции на уровне слизистой оболочки. Ультраструктурная 3D-реконструкция снимков СЭМ с увеличением в 6000 раз выявила выраженные изменения в строении уротелия – отмечались деформация клеток эпителия, а также незначительное расширение межклеточных пространств. Расширение межклеточных контактов способствует нарушению плотности барьерного слоя, что значительно снижает его изолирующую функцию. Данные ультраструктурные изменения создают предпосылки для проникновения

агрессивных компонентов урины, таких как ионы, токсины и микроорганизмы, в подслизистый слой, вызывая набухание коллагеновых волокон подслизистого слоя. Это, в свою очередь, запускает процесс асептического воспаления, который, несмотря на отсутствие инфекционного агента, сопровождается активацией иммунных клеток и дальнейшим повреждением ткани. Таким образом, выявленные изменения коррелируют с повышенной метаболической активностью, зарегистрированной при ПЭТ/КТ, и локальными проявлениями воспаления, обнаруженными цистоскопически (рисунок 3).

В третьем клиническом наблюдении представлен пациент Б., 53 года. По данным ПЭТ/КТ с 11С-холином выявлена тропность стенки мочевого пузыря, с максимальным значением SUVmax 8,59. Данный показатель указывает на умеренно усиленный метаболизм в тканях мочевого пузыря, что связано с выраженным патологическим процессом воспалительного и деструктивного характера. Цистоскопическая 3D-реконструкция состояния слизистой оболочки выявила множественные очаги гиперемии, сопровождающиеся обширными изъязвлениями слизистой оболочки. Очаги поражения характеризовались выраженным покраснением, отеком и нарушением целостности эпителиального слоя, что свидетельствует о глубоком

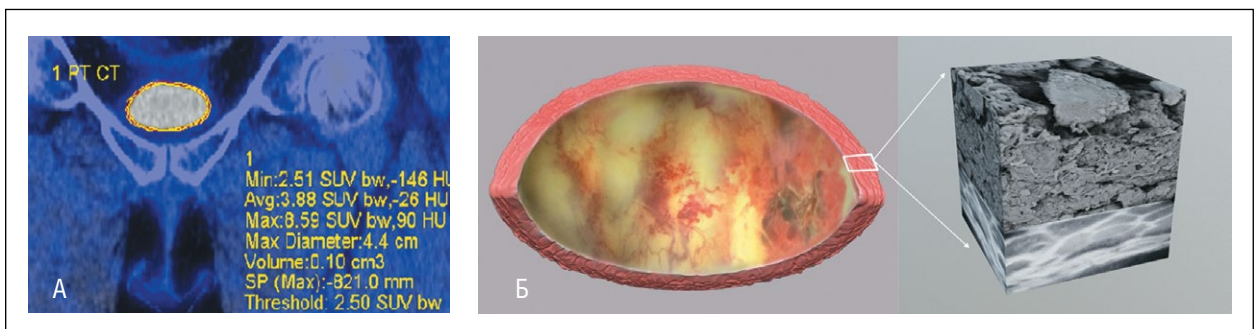


Рисунок 4. А – ПЭТ/КТ тропность стенки мочевого пузыря к 11С-холину при умеренных воспалительных изменениях. Б – цистоскопическая 3D-реконструкция по данным смотровой цистоскопии и ультраструктурная 3D-реконструкция стенки мочевого пузыря с увеличением в 6000 раз при умеренных изменениях.

Figure 4. A - PET/CT tropism of the bladder wall to 11C-choline with moderate inflammatory changes. B - cystoscopic 3D reconstruction based on viewing cystoscopy data and ultrastructural 3D reconstruction of the bladder wall with a magnification of 6000 times with moderate changes.

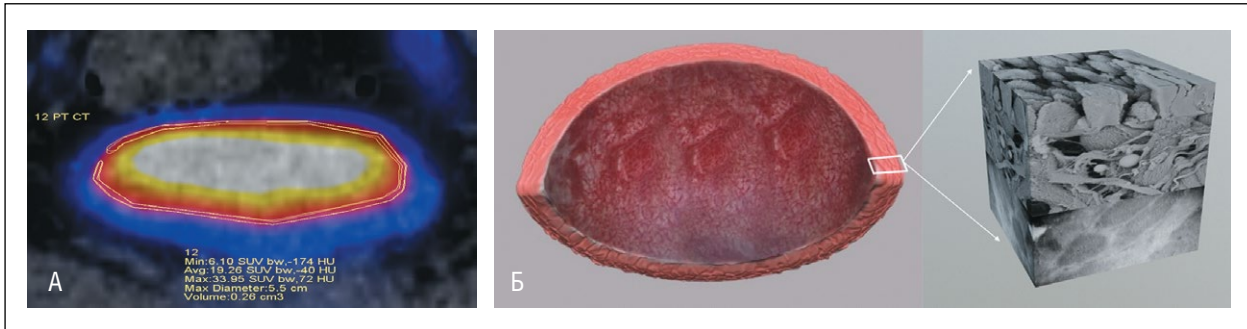


Рисунок 5. А – ПЭТ/КТ тропность стенки мочевого пузыря к 11С-холину при выраженных воспалительных изменениях. Б – цистоскопическая 3D-реконструкция по данным смотровой цистоскопии и ультраструктурная 3D-реконструкция стенки мочевого пузыря с увеличением в 6000 раз при выраженных изменениях.

Figure 5. A - PET/CT tropism of the bladder wall to 11C-choline with pronounced inflammatory changes. B - cystoscopic 3D reconstruction based on viewing cystoscopy data and ultrastructural 3D reconstruction of the bladder wall with a magnification of 6000 times with pronounced changes.

повреждении барьерного слоя и активном воспалительном процессе. 3D-ультраструктурный анализ биоптатов стенки мочевого пузыря с увеличением в 6000 раз подтвердил значительную деструкцию клеток уротелия. На фоне деструктивных изменений формировались широкие межклеточные каналы, значительно превышающие физиологическую ширину межклеточных пространств. Крупные межклеточные разрывы резко снижают барьерные свойства эпителия, способствуя беспрепятственному проникновению агрессивных компонентов урины в глубокие слои мочевого пузыря. Данная трансмуральная проницаемость сопровождается асептическим воспалением, инициирующим прогрессирующую деструкцию тканей и нарушение функции мочевого пузыря. Воспалительный процесс сопровождается инфильтрацией иммунных клеток, отеком и нарушением микроциркуляции, что усугубляет повреждение подслизистого и мышечного слоев, приводя к развитию фиброзных изменений и нарушению механической прочности стенки мочевого пузыря (рисунок 4).

В четвертом клиническом наблюдении представлен пациент В., 49 лет. Показатель тропности стенки мочевого пузыря к 11С-холину по ПЭТ/КТ был существенно повышен – SUVmax составил 33,95, что свидетельствует о выраженной метаболической активности и интенсивном патологическом процессе. Цистоскопическая 3D-реконструкция выявила тотальную гиперемию слизистой оболочки, характеризующуюся равномерным покраснением и отеком по всей поверхности.

Ультраструктурный анализ на основании 3D-реконструкций снимков СЭМ показал выраженные морфологические изменения уротелиальных клеток, включая формирование широких и глубоких межклеточных каналов, напоминающих структуру «сита». Эти изменения свидетельствуют о серьезном нарушении барьерной функции эпителия, что обеспечивает прямой путь для проникновения агрессивных компонентов урины в глубокие слои стенки, усугубляя воспалительный процесс и деструкцию ткани (рисунок 5).

Таким образом, полученные результаты подтверждают вышеупомянутую тесную корреляцию между повышенной метаболической активностью, выявленной ПЭТ/КТ,

макроскопическими изменениями слизистой оболочки и выраженными ультраструктурными повреждениями.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовании корреляция между повышенной метаболической активностью по данным ПЭТ/КТ (SUVmax) и морфологическими изменениями, выявленными цистоскопией и СЭМ, подтверждает возможность использования ПЭТ/КТ в качестве неинвазивного маркера степени и распространенности воспалительного процесса.

На ранних стадиях изменений (низкий SUVmax) наблюдается сохранение структуры уротелия с незначительными нарушениями межклеточных контактов, что соответствует минимальному воспалению и локальной гиперемии. При прогрессировании патологического процесса наблюдается значительное расширение межклеточных каналов, деструкция уротелиальных клеток и изъязвления слизистой, что сопровождается резким повышением SUVmax. Эти ультраструктурные изменения свидетельствуют о тяжелом нарушении барьерной функции и активном воспалении, что подтверждается визуализацией широких и глубоких межклеточных щелей, формирующих структуру «сита».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеграция данных ПЭТ/КТ с 11С-холином, цистоскопических 3D-реконструкций и 3D-ультраструктурного анализа СЭМ является перспективным подходом для комплексной оценки нарушений барьерной функции стенки мочевого пузыря. Полученные результаты свидетельствуют о тесной взаимосвязи между метаболической активностью тканей, визуальными изменениями слизистой оболочки и ультраструктурными повреждениями уротелия. Данный комплексный метод позволяет повысить точность диагностики воспалительных и деструктивных процессов, а также оптимизировать выбор лечебной тактики. Внедрение подобных мультидисциплинарных подходов в урологическую практику может значительно улучшить качество медицинской помощи пациентам с воспалительными патологиями мочевого пузыря.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Jafari NV, Rohn JL. The urothelium: a multi-faceted barrier against a harsh environment. *Mucosal Immunol.* 2022;15(6):1127-42. DOI: [10.3569310.1038/s41385-022-00565-0](https://doi.org/10.3569310.1038/s41385-022-00565-0)
- Hou C, Gu Y, Yuan W, et al. Construction of a three-dimensional urothelium on-chip with barrier function based on urinary flow microenvironment. *Biofabrication.* 2023;15(3). DOI: [10.1088/1758-5090/acc4ec](https://doi.org/10.1088/1758-5090/acc4ec)
- Wu SY, Jiang YH, Jhang JF, et al. Inflammation and barrier function deficits in the bladder urothelium of patients with chronic spinal cord injury and recurrent urinary tract infections. *Biomedicines.* 2022;10(2):220. DOI: [10.3569310.3390/biomedicines10020220](https://doi.org/10.3569310.3390/biomedicines10020220)
- Berdichevsky BA, Zubik GV, et al. The role of the urethral barrier in the manifestation of bacterial infections. *Ural University Medicine.* 2024;10(4):7-9. (In Russ.). [Бердичевский Б.А., Зубик Г.В., и др. Роль уретериального барьера в манифестации бактериальных инфекций. *Университетская медицина Урала.* 2024;10(4):7-9]. URL: [https://www.tyumsmu.ru/upload/iblock/db9/ip6anvu8n102yg8cke078yc8xqxt32b2/%D0%A3%D0%9C%D0%A3%202024-4%20\(%D1%82.10,%2038\).pdf](https://www.tyumsmu.ru/upload/iblock/db9/ip6anvu8n102yg8cke078yc8xqxt32b2/%D0%A3%D0%9C%D0%A3%202024-4%20(%D1%82.10,%2038).pdf)
- Birder L, Andersson KE. Urothelial signaling. *Physiol Rev.* 2013;93(2):653-80. DOI: [10.3569310.1152/physrev.00030.2012](https://doi.org/10.3569310.1152/physrev.00030.2012)
- Xu Z, Zhu H, Wang H. Segmentation of the urothelium in optical coherence tomography images with dynamic contrast. *J Biomed Opt.* 2021;26(8):086002. DOI: [10.3569310.1117/1.JBO.26.8.086002](https://doi.org/10.3569310.1117/1.JBO.26.8.086002)
- Fry CH, Vahabi B. The role of the mucosa in normal and abnormal bladder function. *Basic Clin Pharmacol Toxicol.* 2016;119(3):57-62. DOI: [10.3569310.1111/bcpt.12626](https://doi.org/10.3569310.1111/bcpt.12626)
- Shormanov IS, Kulikov SV, Soloviev AS. Functional morphology of the bladder and its vascular system in relation to age changes and evolution of BPH. *Urologiia.* 2023;(1):20-27. [Шорманов И.С., Куликов С.В., Соловьев А.С. Функциональная морфология мочевого пузыря и его сосудистой системы в аспектах возрастных изменений и эволюции ДГПЖ. *Urologiia.* 2023;(1):20-27]. DOI: [10.18565/urology.2023.1.20-27](https://doi.org/10.18565/urology.2023.1.20-27)
- Trostorf R, Morales-Orcajo E, Siebert T, Böhl M. Location- and layer-dependent biomechanical and microstructural characterisation of the porcine urinary bladder wall. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2021;115:104275. DOI: [10.3569310.1016/j.jmbbm.2020.104275](https://doi.org/10.3569310.1016/j.jmbbm.2020.104275)
- de Jong BW, Bakker Schut TC, Wolffenbuttel KP, et al. Identification of bladder wall layers by Raman spectroscopy. *J Urol.* 2002;168(4 Pt 2):1771-8. DOI: [10.3569310.1097/01.ju.0000030059.28948.c6](https://doi.org/10.3569310.1097/01.ju.0000030059.28948.c6)
- van Ginkel C, Hurst RE, Janssen D. The urothelial barrier in interstitial cystitis/bladder pain syndrome: its form and function, an overview of preclinical models. *Curr Opin Urol.* 2024;34(2):77-83. DOI: [10.3569310.1097/MOU.0000000000001147](https://doi.org/10.3569310.1097/MOU.0000000000001147)
- Pandey A, Chaudhary S, Singh CB, et al. PET Imaging in Renal Inflammation: Insights into Diagnosis and Disease Progression. *J Nucl Med.* 2025;66(1):251736. URL: https://jnm.snmjournals.org/content/66/supplement_1/251736
- Jiao H, Qiu Y, Chen Z, et al. Multiple metabolic analysis of [18F]FDG PET/CT in patients with kidney disease. *Heliyon.* 2025;11(4):e42522. DOI: [10.3569310.1016/j.heliyon.2025.e42522](https://doi.org/10.3569310.1016/j.heliyon.2025.e42522)

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	ADDITIONAL INFORMATION
Источник финансирования. Работа выполнена по инициативе авторов без привлечения финансирования.	Study funding. The study was the authors' initiative without external funding.
Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с содержанием настоящей статьи.	Conflict of interest. The authors declare that there are no obvious or potential conflicts of interest associated with the content of this article.
Участие авторов. Зубик Г.В.: написание текста, обработка материала; анализ полученных данных; обзор публикаций по теме статьи. Бердичевский Б.А.: идея исследования, редактирование. Гоняев А.Р., Павлова И.В.: сбор материала. Учаев Д.А., Корабельников М.А.: обработка материалов. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией, выразили согласие нести ответственность за все аспекты работы, подразумевающую надлежащее изучение и решение вопросов, связанных с точностью или добросовестностью любой части работы.	Contribution of individual authors. Zubik G.V.: writing, data processing; data analysis; review of publications on the topic of the article. Berdichevsky B.A.: research concept, text writing and editing. Gonyaev A.R., Pavlova I.V.: data collection. Uchaev D.A., Korabelnikov M.A.: data processing. The authors gave their final approval of the manuscript for submission, and agreed to be accountable for all aspects of the work, implying proper study and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the work.
Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).	Statement of originality. No previously published material (text, images, or data) was used in this work.
Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима.	Data availability statement. The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work.
Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.	Generative AI. No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.
Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали 2 внешних рецензента.	Provenance and peer review. This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved 2 external reviewers.