

3D-УЛЬТРАСТРУКТУРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ НЕФРОНА С УВЕЛИЧЕНИЕМ В 10000 РАЗ В ПРОЦЕССЕ РЕАЛИЗАЦИИ ТУБУЛОИНТЕРСТИЦИАЛЬНОГО НЕФРИТА

Зубик Г. В.

*Научные руководители: д-р мед. наук, проф., Василькова Т. Н., д-р мед. наук, проф. Бердичевский Б. А. **

Тюменский государственный медицинский университет, г. Тюмень

**Клиника нефро-урологии Тюменского государственного медицинского университета, г. Тюмень*

Резюме. В исследовании показана возможность использования высокотехнологичных методов для оценки ультраструктурных изменений нефронов при реализации тубулоинтерстициального нефрита инфекционного генеза. В рамках пилотного исследования пациентам была выполнена совмещённая позитронно-эмиссионная томография с компьютерной томографией с ^{18}F -ФДГ и просвечивающая электронная микроскопия ($\times 10000$) с последующей 3D-реконструкцией нефрона. Результаты показали, что снижение уровня SUVmax коррелирует с значимыми ультраструктурными изменениями основных элементов нефрона. Применение современных методов позволило получить детализированную визуализацию структурных нарушений и определить прогрессирование патологии. Полученные данные подтверждают перспективность мультидисциплинарного подхода к диагностике ХБП с использованием ультраструктурной 3D-реконструкции нефрона.

Ключевые слова: просвечивающая электронная микроскопия, нефрон, хроническая болезнь почек.

Актуальность. Почечная паренхима состоит из нефронов - чрезвычайно чувствительных микроскопических структур, которые служат мишенью для уропатогенных микроорганизмов и поражаются инфекциями верхних мочевых путей, что в дальнейшем приводит к развитию хронической болезни почек [1]. Морфологические исследования элементов нефрона при хроническом пиелонефрите свидетельствуют о том, что выявляемые изменения связаны с формированием капиллярно-паренхиматозного блока, сопровождающегося склерозом клубочков и гибелью подоцитов, что, в свою оче-

редь, приводит к возникновению и прогрессированию хронической болезни почек. Подоциты играют ключевую роль в поддержании функциональной целостности фильтрационного барьера, а их повреждение при инфекционной нефропатии может проявляться выраженной фокальной или диффузной клеточной гибелью. Ультраструктурная состоятельность элементов нефрона является важнейшим компонентом нормального функционирования почек, а нарушение их структурной целостности может свидетельствовать о наличии почечной патологии в целом, что активно изучается современными высокотехно-

логичными и наукоемкими исследованиями [2-3]. Позитронно-эмиссионная томография с 18F-ФДГ совмещенная с компьютерной томографией доказала свою эффективность в оценке функций почек, а также может служить перспективным инструментом для выявления воспалительных процессов в почках [4]. Повышение или снижение SUVmax более чем на 25% считается достоверным диагностическим критерием. Традиционная гистология ограничена в изучении ультраструктуры, тогда как просвечивающая электронная микроскопия даёт детальное, но двухмерное изображение, которое зачастую трудно оценить без глубоких знаний в этой области. Современные реконструктивные методики и программные комплексы позволяют получать объёмные 3D-модели нефрона, улучшая диагностику и анализ состояния почек [5]. Таким образом, углублённое изучение структурно-функциональных изменений нефронов с применением современных высокотехнологичных методик являются перспективным направлением современной нефрологии, необходимое для глубокого изучения хронической болезни почек.

Цель: оценить ультраструктурной 3D-визуализации нефрона в процессе реализации тубулоинтерстициального нефрита инфекционного генеза (N16.0).

Задачи:

1. На основе данных просвечивающей электронной микроскопии биоптатов почечной паренхимы с увеличением в 10000 раз создать 3D-

модели нефронов при тубулоинтерстициальном нефрите.

2. Оценить связь основного цифрового ПЭТ/КТ показателя стандартизированного уровня захвата (SUVmax) почечной паренхимой 18F-ФДГ с созданными 3D-реконструкциями.

Материалы и методы. В рамках настоящего пилотного исследования изучены результаты обследования 4 пациентов, направленных нефрологом в урологическое отделение ГБУЗТО «Тюменская областная клиническая больница №2» для проведения нефробиопсии с целью установления причин нефропатии. Пациентам проведена позитронно-эмиссионная томография совмещенная с компьютерной томографией и выполнен расчет стандартизированного уровня захвата 18F-ФДГ (SUVmax) почечной паренхимы. Биоптаты почечной паренхимы направлены на просвечивающую электронную микроскопию с увеличением в 10000 раз. По результатам просвечивающей микроскопии выполнялась ультраструктурная 3D-реконструкция нефрона (x10000). У пациентов верифицирована хроническая болезнь почек/тубулоинтерстициальный нефрит инфекционного генеза (хронический пиелонефрит) N16.0.

Результаты и их обсуждение. В рамках исследования проведён сравнительный анализ ПЭТ/КТ с 18F-ФДГ и ультраструктурной 3D-визуализации нефрона у четырёх пациентов с хронической болезнью почек. В первом клиническом наблюдении пациент А, 41 года, с диагнозом

ХБП на начальной стадии, имел показатель SUVmax, равный 7,95 у.е. По результатам программного моделирования создана блочная 3D-ультраструктурная реконструкция нефрона с увеличением в 10000 раз. Ультраструктурный анализ не выявил значимых нарушений базальной мембраны и капсулы Боумена, мочевое пространство клубочка было свободно от патологических включений. Подоциты структурированы, нормального размера. Проксимальный и дистальный канальцы сохраняли морфологическую целостность. Во втором наблюдении пациент В, 45 лет, имел SUVmax 5,48 у.е. Ультраструктурная 3D-реконструкция нефрона продемонстрировала изменения, характерные для тубулоинтерстициального нефрита инфекционного генеза/хронического пиелонефрита. Выявлено утолщение и дезорганизация базальных мембран с очаговыми разрушениями и фокальным некрозом, что соответствовало прогрессированию ХБП и развитию нефрогенной гипертонии. В третьем случае у пациентки С, 50 лет показатель SUVmax составил 3,21 у.е. 3D ультраструктурный анализ выявил выраженные морфологические изменения: утолщение базальной мембраны с её дезорганизацией, очаговые раз-

рушения и фиброзные замещения, что указывает на длительное течение тубулоинтерстициального нефрита с формированием сморщенной почки. Четвёртый пациент Д, 52 года, с установленным диагнозом хронической болезни почек, характеризовался сниженным уровнем SUVmax до 2,65 у.е. 3D-реконструкция нефрона с увеличением в 10000 раз выявила деструктивные изменения базальной мембраны, наличие очагов некроза и воспалительных инфильтратов. Таким образом, у всех пациентов с ХБП наблюдалась достоверная связь между снижением SUVmax и структурными изменениями нефрона, выявленными с помощью 3D-ультраструктурной реконструкции, что указывает на значимость комплексного подхода к диагностике и оценке прогрессирования хронической патологии почек.

Выводы:

1. В рамках проведенного пилотного исследования показана возможность оценки цифрового ПЭТ/КТ молекулярно-клеточного метаболизма 18F-ФДГ в почечной паренхиме и 3D-ультраструктурного состояния нефрона (x10000) в процессе реализации тубулоинтерстициального нефрита инфекционного генеза.

Литература

1. Anumudu, Samaya 1,2 ; Eknayan, Garabed 1,2 . Pyelonephritis: A Historical Reassessment. Journal of the American Society of Nephrology 30(6):pp. 914-917, June 2019 | DOI: 10.1681/ASN.2019010017
2. Dondi F, Pisani AR, Lucarelli NM, Gazzilli M, Talin A, Albano D, Rubini D, Maggioletti N, Rubini G, Bertagna F. Correlation between Kidney Uptake at [18F]FDG PET/CT and Renal Function. J Pers Med. 2023 Dec 28;14(1):40. doi: 10.3390/jpm14010040. PMID: 38248741; PMCID: PMC10817585.
3. Cui Y, Chen Y, Zhao J. Application of 3D reconstruction technology for congenital

anomalies of the kidney and urinary tract: a case report. *Quantum Imaging Med Surg* 2021. doi: 10.21037/qims-21-691

4. Jiao H, Qiu Y, Chen Z, Zhang Y, Huang W, Yang Q, Kang L. Multiple metabolic analysis of [18F]FDG PET/CT in patients with kidney disease. *Heliyon*. 2025 Feb 6;11(4):e42522. doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42522. PMID: 40028531; PMCID: PMC11870161.

5. Б.А. Бердичевский, Г.В. Зубик. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663706 Российская Федерация. Компьютерная программа визуальной и блочной 3D-ультраструктурной оценки вероятности воспалительных изменений в нефроне по результатам ПЭТ/КТ всего тела 18F-ФДГ глюкозой : заявл. 29.05.2025 : опубл. 29.05.2025.

3D ULTRASTRUCTURAL RECONSTRUCTION OF A NEPHRON WITH 10,000X MAGNIFICATION DURING THE IMPLEMENTATION OF TUBULOINTERSTITIAL NEPHRITIS

Zubik G. V.

*Tutors: professor Vasilkova T. N., professor Berdichevsky B. A. **

Tyumen State Medical University, Tyumen

**Nephrourology Clinic, Tyumen State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Tyumen*

Resume. The study demonstrates the feasibility of using high-tech methods to assess ultrastructural changes in nephrons during infectious tubulointerstitial nephritis. In a pilot study, patients underwent combined positron emission tomography with 18F-FDG and transmission electron microscopy (10,000x) followed by 3D nephron reconstruction. The results showed that a decrease in SUVmax correlates with significant ultrastructural changes in the main nephron components. The use of modern methods allowed for detailed visualization of structural abnormalities and determination of disease progression. The findings support the potential of a multidisciplinary approach to CKD diagnosis using ultrastructural 3D nephron reconstruction.

Keywords: transmission electron microscopy, nephron, chronic kidney disease.