

3D-моделирование артериального русла почки: сравнительный анализ методов визуализации (УЗИ, компьютерная томография и МРТ)

Ш.И. Акбаев¹, З.У. Лечиев¹, И.У. Вагабов¹, Х.М. Батаев¹, Х.А. Абдувосидов²,
Ю.В. Довгялло³, Э.С. Кафаров¹, С.В. Федоров⁴, С.Т. Гусейнова⁵

¹ Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова
364024, г. Грозный, ул. Асланбека Шерипова, 32

² Российский биотехнологический университет
125080, г. Москва, Волоколамское ш., 11

³ Волгоградский государственный медицинский университет Минздрава России
400066, г. Волгоград, пл. Павших Борцов, 1

⁴ Башкирский государственный медицинский университет Минздрава России
450008, г. Уфа, ул. Ленина, 3

⁵ Дагестанский государственный медицинский университет Минздрава России
367000, г. Махачкала, пл. Ленина, 1

Резюме

Современные методы визуализации предоставляют различные возможности для оценки сосудистой анатомии, однако их сравнительная эффективность для создания точных трехмерных моделей артериального русла почки остается недостаточно изученной. **Материал и методы.** Проведен систематический обзор научной литературы за период 2005–2022 гг. с использованием баз данных PubMed, Scopus, Web of Science и eLIBRARY.RU. Проанализированы технические характеристики, диагностические возможности и ограничения УЗИ, компьютерной томографии (КТ) и МРТ. **Результаты.** УЗИ является доступным скрининговым методом, но имеет ограничения в построении точных 3D-моделей. КТ-ангиография обеспечивает наивысшее пространственное разрешение и детализацию сосудистой архитектоники, но сопряжена с лучевой нагрузкой и риском нефропатии. МРТ представляет оптимальный баланс между качеством визуализации и безопасностью, особенно с применением бесконтрастных методик и динамических последовательностей. **Заключение.** Целесообразен комплексный подход с использованием взаимодополняющих методов визуализации для создания точных трехмерных моделей артериальных сосудов почки, позволяющих компенсировать ограничения каждого отдельного метода. Внедрение современных технологий 3D-моделирования в клиническую практику способствует улучшению предоперационного планирования и повышению безопасности органосохраняющих операций на почке, что имеет принципиальное значение для персонализированного подхода в современной урологии и сосудистой хирургии.

Ключевые слова: почечная артерия, 3D-моделирование, визуализация, компьютерная томография, МРТ, УЗИ, почечная ангиография.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Автор для переписки. Абдувосидов Х.А., e-mail: sogdian99@gmail.com

Для цитирования. Акбаев Ш.И., Лечиев З.У., Вагабов И.У., Батаев Х.М., Абдувосидов Х.А., Довгялло Ю.В., Кафаров Э.С., Федоров С.В., Гусейнова С.Т. 3D-моделирование артериального русла почки: сравнительный анализ методов визуализации (УЗИ, компьютерная томография и МРТ). *Сиб. науч. мед. ж.* 2025;45(5):6–13. doi: 10.18699/SSMJ20250501

3D modeling of the renal arterial bed: comparative analysis of visualization methods (ultrasonography, computed tomography and magnetic resonance imaging)

Sh.I. Akbaev¹, Z.U. Lechiev¹, I.U. Vagabov¹, Kh.M. Bataev¹, Kh.A. Abduvosidov²,
Yu.V. Dovgyallo³, E.S. Kafarov¹, S.V. Fedorov⁴, S.T. Guseynova⁵

¹ Kadyrov Chechen State University
364907, Grozny, Aslanbeka Sheripova st., 32

² Russian Biotechnological University
125080, Moscow, Volokolamskoe hwy., 1

³ Volgograd State Medical University of Minzdrav of Russia
400066, Volgograd, Pavshikh Bortsov sq., 1

⁴ Bashkir State Medical University of Minzdrav of Russia
450008, Ufa, Lenina st., 3

⁵ Dagestan State Medical University of Minzdrav of Russia
367000, Makhachkala, Lenina sq., 1

Abstract

Modern imaging techniques provide various opportunities for assessing vascular anatomy, but their comparative effectiveness in creating accurate three-dimensional models of the renal arterial bed remains poorly understood. **Material and methods.** A systematic review of the scientific literature for the period 2005–2022 was conducted using the PubMed, Scopus, Web of Science and eLIBRARY.RU databases. Technical characteristics, diagnostic capabilities and limitations of ultrasonography, computed tomography and magnetic resonance imaging were analyzed. **Results.** Ultrasonography is an accessible screening method, but has limitations in constructing accurate 3D models. Computed tomography angiography provides the highest spatial resolution and detailing of vascular architecture, but is associated with radiation exposure and the risk of nephropathy. Magnetic resonance imaging represents an optimal balance between visualization quality and safety, especially with the use of non-contrast techniques and dynamic sequences. **Conclusions.** It is advisable to use a comprehensive approach using complementary visualization methods to create accurate three-dimensional models of renal arterial vessels, which allows compensating for the limitations of each individual method. The introduction of modern 3D modeling technologies into clinical practice helps improve preoperative planning and increase the safety of organ-preserving kidney surgeries, which is of fundamental importance for a personalized approach in modern urology and vascular surgery.

Key words: renal artery, 3D modeling, visualization, computed tomography, magnetic resonance imaging, ultrasonography, renal angiography.

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

Correspondence author. Abduvosidov Kh.A. email: sogdiana99@gmail.com

Citation. Akbaev Sh.I., Lechiev Z.U., Vagabov I.U., Bataev Kh.M., Abduvosidov Kh.A., Dovgyallo Yu.V., Kafarov E.S., Fedorov S.V., Guseynova S.T. 3D modeling of the renal arterial bed: comparative analysis of visualization methods (ultrasonography, computed tomography and magnetic resonance imaging). *Sibirskij nauchnyj medicinskij zhurnal* = *Siberian Scientific Medical Journal*. 2025;45(5):6–13. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20250501

Введение

В современной медицине детальное изучение сосудистой анатомии почки приобретает ключевое значение для эффективной диагностики и лечения. Развитие органосохраняющей хирургии требует точного понимания индивидуальных особенностей ветвления почечных артерий. Существующие теории интраорганный артериального ветвления (классическая трехветвевая и более современная с делением на переднюю и заднюю ветви) демонстрируют сложность и вариативность почечной сосудистой архитектоники [1, 2]. Современные методы визуализации (УЗИ), компьютерная томография (КТ), МРТ) предоставляют различные возможности для оценки сосудистой анатомии, однако их сравнительная

эффективность для создания точных трехмерных моделей артериального русла почки остается недостаточно изученной. Клинически значимым является не только количество артериальных ветвей, но и их пространственное расположение относительно почечных структур, что определяет необходимость комплексного сравнительного анализа существующих методов визуализации [1, 3].

Материал и методы

Проведен систематический обзор научной литературы по методам визуализации артериального русла почки для 3D-моделирования. Информационный поиск осуществлялся в электронных базах данных PubMed, Scopus, Web of Science и eLIBRARY.RU за период с 2005 по 2022 г. Поиск

выполнялся по ключевым словам: «почечная артерия», «визуализация», «3D-моделирование», «компьютерная томография», «магнитно-резонансная томография», «ультразвуковое исследование», «почечная ангиография» и их англоязычным эквивалентам. Отбор публикаций проводился согласно критериям включения: оригинальные исследования, систематические обзоры и метаанализы, посвященные визуализации почечных артерий с использованием УЗИ, КТ и МРТ.

Результаты

УЗИ является наиболее доступным и безопасным методом визуализации сосудистой системы почки. Он не требует контрастных агентов и ионизирующего излучения, что особенно важно для пациентов с противопоказаниями к другим методам. Однако УЗИ ограничено в пространственном разрешении и глубине проникновения, что затрудняет построение точных 3D-моделей, особенно у пациентов с избыточной массой тела или при сложной анатомии. Как правило, УЗИ эффективно для первичной оценки, но уступает КТ и МРТ по детализации сосудистого русла и точности сегментации.

3D-моделирование артериального русла почки при УЗИ базируется на доплерографии и трехмерном сканировании. Доплерография позволяет визуализировать кровоток в сосудах, а трехмерное сканирование обеспечивает получение серии двумерных изображений с последующей их реконструкцией в 3D-модель. Современные ультразвуковые аппараты оснащены специализированными датчиками, способными получать объемные данные в реальном времени, что относится к технологии 4D. УЗИ для 3D-моделирования почечных артерий имеет ряд преимуществ. Метод неинвазивен, безопасен, доступен и характеризуется относительно низкой стоимостью. Технология обеспечивает возможность динамического наблюдения в режиме реального времени без необходимости контрастирования, а также позволяет многократно повторять исследование [4]. Однако при использовании УЗИ глубина визуализации ограничена, особенно у пациентов с ожирением; результаты исследования зависят от опыта и квалификации специалиста; возникают трудности в визуализации мелких сосудов (диаметром менее 1–2 мм); наблюдаются артефакты от газа в кишечнике и костных структур. Кроме того, 3D-реконструкции характеризуются невысоким пространственным разрешением.

Как отмечают A. Fenster et al., трехмерное УЗИ позволило достичь возможности визуализации

в режиме реального времени с использованием двухмерных матричных датчиков и почти реального времени при механическом сканировании линейными датчиками [5]. Однако для моделирования сосудистой системы почки ультразвуковая технология имеет свои особенности. Доплеровские режимы УЗИ открывают дополнительные возможности для анализа кровотока. В частности, в исследованиях, проведенных P.A. Picot et al., продемонстрирована методика трехмерной цветовой доплеровской визуализации, которая может применяться для оценки почечной васкуляризации [6]. Аналогично, D.H. Pretorius et al. представили метод трехмерного сонографического анализа, основанного на данных цветowego доплера и изображениях в серой шкале [7].

Автоматизированные алгоритмы сегментации сосудистых структур для трехмерных ультразвуковых изображений пока недостаточно надежны для использования в повседневной клинической практике [5]. Полуавтоматизированные подходы обычно требуют от пользователя идентификации исследуемого органа или патологии, после чего компьютерный алгоритм выполняет разметку автоматически. Хотя такой подход проще ручного выделения, он все еще требует взаимодействия с пользователем, что создает определенные трудности в рутинной практике. Для улучшения навигации при инвазивных процедурах разрабатываются специальные интерфейсы трехмерного УЗИ, которые позволяют врачу манипулировать 3D-изображением и выбирать локации для вмешательства. Такие системы включают визуализацию планируемой траектории инструмента и помогают в систематическом наведении на заранее выбранные точки [8].

КТ с ангиографией в настоящее время считается одним из наиболее информативных методов для детальной оценки артериального русла почки и построения трехмерных моделей. Именно КТ позволяет визуализировать не только основные стволы почечных артерий, но и их внутриорганные ветвления — до сегментарных и даже междольковых артерий, что особенно важно с учетом выраженной анатомической вариабельности сосудистой системы почки. Например, как показано в исследовании И.У. Вагапова и соавт., использование 3D-реконструкций на основе КТ-данных дало возможность количественно оценить варианты деления главной почечной артерии: в 84,6 % случаев выявлена бифуркация на вентральную и дорсальную ветви, а в 17,1 % — деление на верхнюю, центральную и нижнюю ветви, что отражает как индивидуальные особенности, так и сложность кровоснабжения различных сегментов почки [9]. КТ-ангиография позволяет получать

детальные изображения сосудистой анатомии почек с высоким пространственным и временным разрешением, что критически важно для предоперационного планирования и интраоперационной навигации [10].

Современные мультиспиральные компьютерные томографы обеспечивают получение тонких срезов (до 0,5 мм), что существенно повышает точность последующей реконструкции и сегментации сосудов почки. КТ-изображения служат основой для создания наиболее детализированных трехмерных моделей, позволяющих визуализировать не только магистральные артерии, но и сегментарные ветви почечных артерий вплоть до междольковых артерий. Это особенно важно при планировании органосохраняющих операций на почке, требующих точной оценки зон кровоснабжения [11].

Особую ценность представляет способность КТ визуализировать множественные почечные артерии, которые, по данным литературы, встречаются в 6–10 % случаев. Наличие дополнительных почечных артерий существенно влияет на диаметр основного сосуда, что необходимо учитывать при планировании хирургических вмешательств. КТ-ангиография позволяет не только обнаружить такие анатомические особенности, но и точно определить место отхождения, ход и зону кровоснабжения каждой артерии [12].

В то же время, несмотря на высокую информативность и детализацию получаемых изображений, метод имеет ряд существенных ограничений, которые необходимо учитывать при выборе оптимальной стратегии визуализации почечных артерий [13]. Одним из ключевых недостатков КТ является необходимость использования йодсодержащих контрастных препаратов, что сопряжено с риском развития контраст-индуцированной нефропатии, особенно у пациентов с исходно нарушенной функцией почек. Так, у пациентов с хронической болезнью почек 3–4-й стадии вероятность развития острого почечного повреждения после введения контраста может достигать 25–30 %, что делает КТ-ангиографию нежелательной или даже противопоказанной в данной группе [14].

Значительным ограничением КТ является высокая лучевая нагрузка на пациента; для получения качественных изображений сосудистой анатомии почек часто требуется многофазное сканирование, что существенно увеличивает дозу облучения. Эффективная доза при КТ-ангиографии почек может составлять от 10 до 25 мЗв, что эквивалентно 500–1250 рентгенограммам органов грудной клетки. Данное обстоятельство ограничивает возможность повторного применения ме-

тода для динамического наблюдения, особенно у молодых пациентов и детей [15].

Технические аспекты создания трехмерных моделей на основе КТ-данных также заслуживают внимания. Описаны трудности, возникающие при сегментации сосудистых структур из-за наличия артефактов от движения, металлических имплантатов или недостаточного контрастирования. В случаях КТ-сканирования низкого качества время, необходимое для построения 3D-модели, может значительно увеличиваться (более 48 ч), а в некоторых случаях требуется мультидисциплинарное обсуждение с участием опытных радиологов [16].

При построении 3D-моделей сосудистого русла критическое значение имеет программное обеспечение, используемое для реконструкции. Современные решения включают системы, обученные нейронными сетями, которые способны автоматически рассчитывать диаметр и длину сосудов, значительно ускоряя процесс создания модели. В процессе реконструкции двухмерные срезы объединяются и интерпретируются специализированными алгоритмами или опытным специалистом. Роль квалифицированного оператора остается критически важной: он может корректировать автоматические сегментации, исправлять ошибки алгоритмической обработки, выбирать оптимальные параметры отображения различных структур, что в конечном итоге определяет качество и диагностическую ценность итоговой 3D-модели [17].

Важным ограничением применения трехмерных моделей на основе КТ является их ограниченная доступность в повседневной клинической практике. Создание качественных трехмерных виртуальных моделей (3DVM) требует тесного сотрудничества с биомедицинскими инженерами и специалистами по медицинской визуализации. Процесс включает несколько этапов: сегментацию почечной паренхимы с использованием селективного порогового подхода, выделение сосудистых структур методом динамического наращивания регионов, математическое моделирование и создание интерактивного файла [18]. Весь этот процесс требует участия специализированного биоинженера и занимает от 24 до 48 ч, что ограничивает возможность широкого применения метода в экстренных случаях.

МРТ, особенно с применением ангиографических протоколов, также используется для 3D-моделирования сосудистой системы почки. В современной клинической практике применяются различные МР-последовательности. Контрастная МР-ангиография с использованием гадолиний-содержащих препаратов обеспечивает

высокое пространственное разрешение до 0,5 мм, что позволяет четко визуализировать как основной ствол почечной артерии, так и сегментарные ветви вплоть до мелких артериальных ветвлений [19]. Значительный прогресс достигнут и в области бесконтрастных методик МР-ангиографии, включая технологии time-of-flight (TOF) и фазовоконтрастную ангиографию. Особую ценность представляет методика TWIST (time-resolved imaging with stochastic trajectories), позволяющая наблюдать динамику контрастирования сосудистого русла в реальном времени [20].

Динамическая контрастная МР-ангиография с применением последовательностей с радиальным заполнением k-пространства (KWIC) и спойлированных градиентных последовательностей (FLASH) обеспечивает высокое временное разрешение при сохранении качества изображений. Обе эти последовательности активно применяются в клинических исследованиях почечной перфузии, хотя имеют различные характеристики по качеству изображения и чувствительности к артефактам движения [21]. Так, сравнительный анализ эффективности МР-ангиографических методик для визуализации почечных артерий, выполненный с участием 43 пациентов с подозрением на стеноз артериального анастомоза почечного трансплантата, продемонстрировал высокую эффективность МРТ для создания диагностических изображений почечного артериального русла [22]. МР-ангиография обеспечила диагностическое качество изображения почти у всех обследованных, с высокими оценками качества изображений от независимых экспертов. Межэкспертное согласие составило статистически значимый уровень ($p < 0,001$), что подтверждает надежность метода.

МРТ обладает рядом существенных преимуществ при исследовании артериального русла почек. Отсутствие ионизирующего излучения делает данный метод безопасным даже для пациентов, нуждающихся в повторных обследованиях. Высокая контрастность мягких тканей позволяет дифференцировать различные анатомические структуры гораздо лучше, чем при использовании других методов визуализации. Возможность проведения мультипланарных и трехмерных реконструкций обеспечивает всестороннюю оценку сосудистой архитектоники почки. Кроме того, современные методики МРТ позволяют проводить количественную оценку почечного кровотока и даже рассчитывать скорость клубочковой фильтрации, что подтверждается приведенными в контексте данными сравнительных исследований МР-перфузии и традиционных методов определения скорости клубочковой фильтрации [23].

Технологии параллельного сбора данных, недосэмплинга k-пространства и итеративных реконструкций значительно сокращают время сканирования, сохраняя высокое пространственное и временное разрешение, что критически важно для визуализации артериального русла почек.

Существует ряд недостатков, ограничивающих применение МРТ. Процедура требует значительного времени (20–40 минут), что затрудняет диагностику у беспокойных пациентов. Получение качественных изображений с минимальным шагом сканирования малодоступно по нескольким причинам: МРТ-сканеры, способные выполнять высокоточные исследования с минимальным шагом, являются более дорогостоящими; исследования с детальным разрешением требуют значительно больше времени, поскольку необходимо получать большее количество срезов; не все МРТ-аппараты оснащены современными технологиями и программным обеспечением для высокоточной съемки. Увеличенная продолжительность исследования создает дополнительные трудности для пациентов с клаустрофобией или двигательными нарушениями [24]. Метод чувствителен к движениям, что может снижать качество изображений. Наличие металлических имплантатов создает артефакты, искажающие результаты. Существуют абсолютные противопоказания, включая установленные кардиостимуляторы и выраженную клаустрофобию. Экономические факторы также ограничивают доступность МРТ из-за высокой стоимости оборудования и самого исследования. В техническом аспекте МРТ несколько уступает КТ по пространственному разрешению получаемых изображений [25].

Обсуждение

Сравнительный анализ методов визуализации артериального русла почки для 3D-моделирования выявляет существенные различия в диагностических возможностях каждой технологии. УЗИ, являясь наиболее доступным и безопасным методом, обеспечивает возможность первичной оценки почечного кровотока в реальном времени без контрастных препаратов. Однако технология трехмерной реконструкции сосудистого русла на основе УЗИ ограничена несовершенством алгоритмов автоматической сегментации. Полуавтоматические подходы требуют значительного взаимодействия с пользователем, снижая их практическую ценность в рутинной клинической работе. КТ с ангиографией обеспечивает высокую точность в детализации сосудистой анатомии почки. Особую ценность представляет способность КТ визуализировать множествен-

ные почечные артерии, встречающиеся в 6–10 % случаев, а также определять их точное расположение, ход и зону кровоснабжения. Эти данные критически важны для планирования хирургических вмешательств, особенно органосохраняющих операций. Однако метод имеет существенные ограничения, связанные с необходимостью использования йодсодержащих контрастных препаратов. МРТ демонстрирует высокую эффективность для создания диагностических изображений почечного артериального русла; так, метод QISS обеспечил диагностическое качество изображения у 100 % обследованных пациентов, с высокой межэкспертной согласованностью [22]. Данные бесконтрастные последовательности особенно ценны для пациентов с почечной недостаточностью.

При сопоставлении трех методов очевидно, что УЗИ уступает в точности и детализации КТ и МРТ, но выигрывает в безопасности и доступности. КТ превосходит другие методы в пространственном разрешении и скорости получения данных, но связана с лучевой нагрузкой и риском нефропатии. МРТ обеспечивает оптимальный баланс между детализацией изображения и безопасностью, особенно при использовании бесконтрастных методик. Динамические контрастные МР-последовательности, такие как TWIST и KWIC, открывают новые возможности для оценки почечной перфузии и функционального состояния паренхимы, что недоступно при использовании КТ и УЗИ. Корреляция между результатами неинвазивной МР-ангиографии и цифровой субтракционной ангиографии свидетельствует о том, что современные МР-технологии могут успешно заменять инвазивные методики в диагностическом процессе.

Важным аспектом создания качественных 3D-моделей является выбор соответствующего программного обеспечения и квалификация специалистов. Внедрение систем автоматической сегментации на основе машинного обучения показывает перспективные результаты в ускорении процесса создания моделей, однако экспертная оценка и коррекция остаются необходимыми для обеспечения диагностической точности. В контексте трехмерного моделирования артериального русла почки важно учитывать взаимодополняющий характер различных методов визуализации. Так, УЗИ может служить скрининговым методом, КТ обеспечивает детальную анатомическую информацию, а МРТ предоставляет функциональную оценку без нефротоксичных контрастов.

Заключение

Анализ современных методов визуализации артериального русла почки для создания трехмерных моделей выявил специфические преимущества и ограничения каждого из них. УЗИ, несмотря на доступность и безопасность, имеет существенные ограничения в возможностях детализации сосудистой архитектоники и трехмерного моделирования. КТ-ангиография обеспечивает наивысшее пространственное разрешение с детальной визуализацией вариантной анатомии почечных артерий, однако сопряжена с рисками контраст-индуцированной нефропатии и лучевой нагрузкой. МРТ представляет оптимальный баланс между детализацией изображений и безопасностью, особенно при использовании бесконтрастных методик, а технологии TWIST и KWIC открывают дополнительные возможности для функциональной оценки почечной перфузии. Комплексный подход с использованием взаимодополняющих методов визуализации представляется наиболее эффективным для создания точных трехмерных моделей, позволяя компенсировать ограничения каждого отдельного метода. Внедрение современных технологий 3D-моделирования в клиническую практику способствует улучшению предоперационного планирования и повышению безопасности органосохраняющих операций на почке, что имеет принципиальное значение для персонализированного подхода в современной урологии и сосудистой хирургии.

Список литературы / References

1. Колсанов А.В., Иванова В.Д., Назарян А.К., Яремин Б.И., Чаплыгин С.С., Мякотных М.Н. Вариантная трехмерная анатомия почечных артерий: клиническое применение. *Морфол. ведомости*. 2016;24(4):46–52. doi: 10.20340/mv-mn
- Kolsanov A.V., Ivanova V.D., Nazaryan A.K., Yaremin B.I., Chaplygin S.S., Myakotnykh M.N. Variant three-dimensional anatomy of the renal arteries: the clinical application. *Morfologicheskkiye vedomosti = Morphological Newsletter*. 2016;24(4):46–52. [In Russian]. doi: 10.20340/mv-mn
2. Колсанов А.В., Иванова В.Д., Чаплыгин С.С., Яремин Б.И., Назарян А.К., Юнусов Р.Р. Проблемы вариантной анатомии почечных артерий. *Бюл. мед. интернет-конф.* 2017;7(12):1655–1657.
- Kolsanov A.V., Ivanova V.D., Chaplygin S.S., Yaremin B.I., Nazaryan A.K., Yunusov R.R. The problems of variant anatomy of the renal arteries. *Byulleten' meditsinskikh internet-konferentsiy = Bulletin of Medical Internet Conferences*. 2017;7(12):1655–1657. [In Russian].

3. Докаева Т.С., Кафаров Э.С., Верзиханов А.З. Структурно-количественный анализ сегментарных артерий почек человека. *Ж. теор. клинич. и эксперимент. морфологии*. 2021;2(1-2):49–59. doi: 10.28942/jtcem.v3i1-2.167.
- Dokaeva T.S., Kafarov E.S., Verzikhanov A.Z. Structural and quantitative analysis of the segmental arteries of the human kidney. *Zhurnal teoreticheskoy, klinicheskoy i eksperimental'noy morfologii = Journal of Theoretical, Clinical and Experimental Morphology*. 2021;2(1-2):49–59. [In Russian]. doi: 10.28942/jtcem.v3i1-2.167
4. Trunz L.M., Balasubramanya R. Doppler renal assessment, protocols, and interpretation. In: *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; June 5, 2023.
5. Fenster A., Parraga G., Bax J. Three-dimensional ultrasound scanning. *Interface Focus*. 2011;1(4):503–519. doi: 10.1098/rsfs.2011.0019
6. Picot P.A., Rickey D.W., Mitchell R., Rankin R.N., Fenster A. Three-dimensional colour Doppler imaging. *Ultrasound Med. Biol.* 1993;19(2):95–104. doi: 10.1016/0301-5629(93)90001-5
7. Pretorius D.H., Nelson T.R., Jaffe J.S. 3-dimensional sonographic analysis based on color flow Doppler and gray scale image data: a preliminary report. *J. Ultrasound Med.* 1992;11(5):225–232. doi: 10.7863/jum.1992.11.5.225
8. Pourtaherian A., Scholten H., Kusters L., Zinger S., Mihajlovic N., Kolen A., Zou F., Ng G., Korsten H., de With P.H.N. Medical instrument detection in 3-Dimensional ultrasound data volumes. *IEEE Trans. Med. Imaging*. 2017;36(8):1664–1675. doi: 10.1109/TMI.2017.2692302
9. Вагабов И.У., Зенин О.К., Кафаров Э.С. Трехмерный структурный анализ вариантов деления артериального русла почки человека. *Изв. вузов. Поволж. регион. Мед. науки*. 2020;(3):48–57. doi: 10.21685/2072-3032-2020-3-5
- Vagabov I.U., Zenin O.K., Kafarov E.S. 3-D structural analysis of human kidney's arterial channel branching variants. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskiye nauki = University Proceedings. Volga Region. Medical Sciences*. 2020;(3):48–57. [In Russian]. doi: 10.21685/2072-3032-2020-3-5
10. Колсанов А.В., Иванова В.Д., Гелашвили О.А., Назарян А.К. Клиническая анатомия почечных артерий по данным компьютерного моделирования. *Морфология*. 2019;155(3):28–32.
- Kolsanov A.V., Ivanova V.D., Gelashvili O.A., Nazaryan A.K. Clinical anatomy of the renal arteries according to computer modeling. *Morfologiya = Morphology*. 2019; 155(3):28–32. [In Russian].
11. Глыбочко П.В., Аляев Ю.Г., Терновой Н.К., Дзеранов Н.К., Ахведиани Н.Д., Фиев Д.Н., Хохлачев С.Б., Петровский Н.В., Матюхов И.П., Песегов С.В. Компьютерное моделирование – инновационная методика в диагностике и планировании лечения пациентов с хирургическими заболеваниями почек. *Урал. мед. ж.* 2012;(9):84–87.
- Glybochko P.V., Alyaev Yu.G., Ternovoy N.K., Dzeranov N.K., Akhvediani N.D., Fiev D.N., Khohlachev S.B., Petrovsky N.V., Matyukhov I.P., Pesegov S.V. Computer-assisted simulation as an innovation technique in diagnosis and planning of treatment of patients with surgical kidney diseases. *Ural'skiy meditsinskiy zhurnal = Ural Medical Journal*. 2012;(9):84–87. [In Russian].
12. Majos M., Stefańczyk L., Szemraj-Rogucka Z., Elgalal M., De Caro R., Macchi V., Polguy M. Does the type of renal artery anatomic variant determine the diameter of the main vessel supplying a kidney? A study based on CT data with a particular focus on the presence of multiple renal arteries. *Surg. Radiol. Anat.* 2018;40(4):381–388. doi: 10.1007/s00276-017-1930-z
13. Amparore D., Pecoraro A., Piramide F., Verri P., Checcucci E., de Cillis S., Piana A., Burgio M., Di Dio M., Manfredi M., Fiori C., Porpiglia F. Three-dimensional imaging reconstruction of the kidney's anatomy for a tailored minimally invasive partial nephrectomy: A pilot study. *Asian Journal of Urology*. 2022;9(3):263–271. doi: 10.1016/j.ajur.2022.06.003
14. Porpiglia F., Amparore D., Checcucci E., Manfredi M., Stura I., Migliaretti G., Autorino R., Ficarra V., Fiori C. Three-dimensional virtual imaging of renal tumours: a new tool to improve the accuracy of nephrometry scores. *BJU Int.* 2019;124(6):945–954. doi: 10.1111/bju.14894
15. Buffi N., Lista G., Larcher A., Lughezzani G., Ficarra V., Cestari A., Lazzeri M., Guazzoni G. Margin, ischemia, and complications (MIC) score in partial nephrectomy: a new system for evaluating achievement of optimal outcomes in nephron-sparing surgery. *Eur. Urol.* 2012;62(4):617–618. doi: 10.1016/j.euro.2012.06.001
16. Koetzier L.R., Mastrodicasa D., Szczykutowicz T.P., van der Werf N.R., Wang A.S., Sandfort V., van der Molen A.J., Fleischmann D., Willemink M.J. Deep learning image reconstruction for CT: technical principles and clinical prospects. *Radiology*. 2023;306(3):e221257. doi: 10.1148/radiol.221257
17. Ramazanli B., Yagmur O., Sarioglu E.C., Salman H.E. Modeling techniques and boundary conditions in abdominal aortic aneurysm analysis: latest developments in simulation and integration of machine learning and data-driven approaches. *Bioengineering (Basel)*. 2025;12(5):437. doi: 10.3390/bioengineering12050437
18. Amparore D., Pecoraro A., Piramide F., Verri P., Checcucci E., de Cillis S., Piana A., Burgio M., Di Dio M., Manfredi M., Fiori C., Porpiglia F. Three-dimensional imaging reconstruction of the kidney's anatomy for a tailored minimally invasive partial nephrectomy: A pilot study. *Asian J. Urol.* 2022;9(3):263–271. doi: 10.1016/j.ajur.2022.06.003

19. Wigh Lipsø K., Hansen E.S.S., Tougaard R.S., Laustsen C., Ardenkjaer-Larsen J.H. Renal MR angiography and perfusion in the pig using hyperpolarized water. *Magn. Reson. Med.* 2017;78(3):1131–1135. doi: 10.1002/mrm.26478
20. Lim R., Shapiro M., Wang E., Law M., Babb J.S., Rueff L.E., Jacob J.S., Kim S., Carson R.H., Mulholland T.P., Laub G., Hecht E. 3D time-resolved MR angiography (MRA) of the carotid arteries with time-resolved imaging with stochastic trajectories: comparison with 3D contrast-enhanced bolus-chase MRA and 3D time-of-flight MRA. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2008;29(10):1847–1854. doi: 10.3174/ajnr.A1252
21. Eikefjord E., Andersen E., Hodneland E., Zöllner F., Lundervold A., Svarstad E., Rørvik J. Use of 3D DCE-MRI for the estimation of renal perfusion and glomerular filtration rate: an intrasubject comparison of FLASH and KWIC with a comprehensive framework for evaluation. *AJR Am. J. Roentgenol.* 2015;204(3):W273–W281. doi: 10.2214/AJR.14.13226
22. Serhal A., Aouad P., Serhal M., Serhal A., Aouad P., Serhal M., Pathrose A., Lombardi P., Carr J., Avery R., Edelman R.R. Evaluation of renal allograft vasculature using non-contrast 3D inversion recovery balanced steady-state free precession MRA and 2D quiescent-interval slice-selective MRA. *Explor. Res. Hypothesis Med.* 2021;6(3):90–98. doi: 10.14218/ERHM.2021.00011
23. Buchanan C.E., Mahmoud H., Cox E.F., McCulloch T., Prestwich B.L., Taal M.W., Selby N.M., Francis, S.T. Quantitative assessment of renal structural and functional changes in chronic kidney disease using multi-parametric magnetic resonance imaging. *Nephrol. Dial. Transplant.* 2020;35(6):955–964. doi: 10.1093/ndt/gfz129
24. Murali S., Ding H., Adedjei F., Qin C., Obun-goloch J., Asllani I., Anazodo U., Ntusi N.A.B., Mammen R., Niendorf T., Adeleke S. Bringing MRI to low- and middle-income countries: Directions, challenges and potential solutions. *NMR Biomed.* 2024;37(7):e4992. doi: 10.1002/nbm.4992
25. Терновой С.К., Синицын В.Е., Беличенко О.И., Стукалова О.В. Клиническое применение магнитно-резонансной томографии. *ПМЖ.* 1996;(7):1.
- Ternovoy S.K., Sinityn V.E., Belichenko O.I., Stukalova O.V. Clinical application of magnetic resonance imaging. *Russkiy meditsinskiy zhurnal = Russian Medical Journal.* 1996;(7):1. [In Russian].

Сведения об авторах:

Акбаев Шамиль Исмаилович, ORCID: 0009-0004-1614-0742, e-mail: shamil-akbaev@mail.ru
Лечиев Зелимхан Умарович, ORCID: 0009-0000-8673-1346, e-mail: drzelimhan@gmail.com
Вагабов Ислам Узгенбайевич, к.м.н., ORCID: 0000-0002-6033-8148, e-mail: malsi_85@mail.ru
Батаев Хизир Мухидинович, д.м.н., проф., ORCID: 0000-0003-3213-6474, e-mail: hizir62@mail.ru
Абдувосидов Хуршед Абдувохидович, д.м.н., ORCID: 0000-0002-5655-338X, e-mail: sogdiana99@gmail.com
Довгялло Юлия Викторовна, д.м.н., ORCID: 0000-0002-6626-0361, e-mail: dovgyallo1@mail.ru
Кафаров Эдгар Сабирович, д.м.н., ORCID: 0000-0001-9735-9981, e-mail: edgar.kafaroff@yandex.ru
Федоров Сергей Владимирович, д.м.н., ORCID: 0000-0002-6106-0301, e-mail: fedorow707@mail.ru
Гусейнова Сабина Тагировна, д.м.н., ORCID: 0000-0002-7672-3606, e-mail: vagabova80@mail.ru

Information about the authors:

Shamil' I. Akbaev, ORCID: 0009-0004-1614-0742, e-mail: shamil-akbaev@mail.ru
Zelimkhan U. Lechiev, ORCID: 0009-0000-8673-1346, e-mail: drzelimhan@gmail.com
Islam U. Vagabov, candidate of medical sciences, ORCID: 0000-0002-6033-8148, e-mail: malsi_85@mail.ru
Khizir M. Bataev, doctor of medical sciences, professor, ORCID: 0000-0003-3213-6474, e-mail: hizir62@mail.ru
Khurshed A. Abduvosidov, doctor of medical sciences, ORCID: 0000-0002-5655-338X, e-mail: sogdiana99@gmail.com
Iuliya V. Dovgyallo, doctor of medical sciences, ORCID: 0000-0002-6626-0361, e-mail: dovgyallo1@mail.ru
Edgar S. Kafarov, doctor of medical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0001-9735-9981, e-mail: edgar.kafaroff@yandex.ru
Sergei V. Fedorov, doctor of medical sciences, ORCID: 0000-0002-6106-0301, e-mail: fedorow707@mail.ru
Sabina T. Guseynova, doctor of medical sciences, ORCID: 0000-0002-7672-3606, e-mail: vagabova80@mail.ru

Поступила в редакцию 13.05.2025
 После доработки 05.06.2025
 Принята к публикации 15.09.2025

Received 13.05.2025
 Revision received 05.06.2025
 Accepted 15.09.2025