

# Возможности ультразвуковой трехмерной визуализации при изучении размеров и структуры атеросклеротической бляшки

М.В. Кошурникова, Т.В. Балахонова, Ю.А. Карпов  
ФГБУ РКНПК МЗ РФ, Москва

## Абстракт

Проведен анализ литературных данных о возможностях и перспективах использования метода трехмерной ультразвуковой визуализации для оценки атеросклеротических поражений сосудов. 3D-ультразвуковое исследование представляет собой один из наиболее эффективных и высокоинформативных неинвазивных методов диагностики поражения различных артериальных бассейнов. Трехмерная реконструкция значительно увеличила возможности традиционного ультразвукового исследования, позволив получать изображение исследуемого сосуда в пространстве, его проекции и наклонные сечения, повысив возможности детального описания признаков патологического процесса. Рассмотрены особенности и этапы построения трехмерного изображения, алгоритмы его анализа, возможность оценки характеристик атеросклеротической бляшки (АСБ): объема, структуры и состояния поверхности бляшки. Сравнение диагностических возможностей 3D-УЗИ и других методов визуализации в изучении атеросклеротического поражения артерий показало преимущества метода: неинвазивность, портативность, уменьшение дискомфорта для пациента. Перспективы трехмерной ультразвуковой визуализации состоят в выявлении атеросклеротических изменений сонных, бедренных артерий и аорты, определении структуры и объема атеросклеротических бляшек, а также в оценке состояния артериальной стенки после эндоваскулярных и хирургических вмешательств.

**Ключевые слова:** 3D-ультразвуковое исследование (3D-УЗИ), дуплексное сканирование, атеросклеротические бляшки, магнитно-резонансная томография.

## 3D-ultrasonic visualization capabilities studying size and structure of atherosclerotic plaques

M.V. Koshurnikova, T.V. Balakhonova, Y.A. Karpov  
Russian Cardiology Research Complex, Moscow

## Abstract

It was studied the analysis of published data on the opportunities and prospects of using the three-dimensional ultrasound imaging method for the atherosclerotic vascular lesions evaluation. It is shown that 3D-ultrasound is one of the most effective and highly informative diagnostic noninvasive lesions of arterial pools. Three-dimensional reconstruction significantly increased the capabilities of traditional ultrasound, allowing a vessel in the image of the investigated area, and receive its projections sloping section, raising the possibility of a detailed description of the pathological process features.

The features and stages of three-dimensional images construction, the algorithms of its analysis, the ability to assess the atherosclerotic plaques characteristics: volume, structure and surface condition of the plaque. The analysis reports comparing diagnostic features 3D-ultrasound and other imaging techniques in the study of atherosclerotic arteries, the advantages of the method: non-invasive, portable, reducing discomfort for the patient. It was concluded about the prospects of research on possibilities of three-dimensional ultrasound in the atherosclerotic changes of the carotid, femoral artery and aorta visualization; defining the structure and volume of atherosclerotic plaques, as well as to assess the state of the arterial wall after endovascular or surgical procedures.

**Key words:** 3D-ultrasound, duplex scanning, atherosclerotic plaque, magnetic resonance imaging.

Понимание атеросклероза как системного заболевания, поражающего сразу несколько отделов артериальной системы, изменило стандартные представления об этой патологии. В клинической практике специалистам все реже приходится сталкиваться с локальными проявлениями атеросклеротического процесса [1, 2]. Появилось понятие мультифокального атеросклероза, объединившего особую категорию пациентов с гемодинамически значимыми поражениями артерий в нескольких сосудистых бассейнах, при этом все более актуальной становится проблема клинической и инструментальной диагностики сочетанных поражений сосудов. В настоящее время в диагностике патологических изменений сосудов важнейшее

место занимает применение ультразвуковых методов исследования, к преимуществам которых относятся хорошая переносимость, относительно невысокая стоимость исследований и возможность их выполнения в амбулаторной практике [1, 2]. Совершенствование аппаратуры, поиск новых режимов ультразвукового исследования (УЗИ), внедрение в клиническую практику новых технологий, в первую очередь трехмерной визуализации сосудов, позволили расширить возможности УЗИ и с качественно новых позиций подойти к оценке структурных изменений артериальной стенки [2-5].

Очевидной является необходимость широкого использования эффективных неинвазивных методов диагностики атеросклеротических поражений

сосудов, особенно на ранних стадиях их развития. В связи с этим необходимо изучение возможностей и расширение спектра применения современных методов лучевой диагностики, которые позволяли бы выявлять степень поражения, не требовали проведения обезболивания и госпитализации пациентов, обладали минимумом побочных эффектов и противопоказаний.

**Цель работы** — анализ литературных данных о возможностях и перспективах использования метода трехмерной ультразвуковой визуализации для оценки атеросклеротических поражений сосудов.

### **Трехмерная ультразвуковая визуализация – общие сведения о методе.**

В настоящее время в клинической практике все более востребованными становятся методы определения толщины комплекса интима-медиа (ТИМ) пораженных артерий и выявления атеросклеротических бляшек с оценкой их объема и структуры. Для этих целей используют неинвазивные методы исследования атеросклеротического поражения артерий: компьютерную томографию (КТ) и магнитно-резонансную томографию (МРТ) [6], которые благодаря высокому разрешению и неинвазивности постепенно вытесняют инвазивные методы диагностики [6, 7].

Одним из наиболее эффективных и информативных неинвазивных методов диагностики поражения различных артериальных бассейнов является дуплексное сканирование [8-10]. Метод превосходит по своим возможностям ангиографию в диагностике малых поражений сосудов, позволяя определять структурные особенности атеросклеротической бляшки и с высокой точностью оценивать состояние кровотока в исследуемых сосудах [11, 12].

К достоинствам ультразвукового исследования следует отнести: неинвазивность, безопасность для пациента, воспроизводимость, умеренную стоимость. Однако имеются технические ограничения, не позволяющие в полной мере оценить состояние артерий. Так, при проведении традиционного УЗИ эффективность исследования во многом зависит от опыта и навыка специалиста, выполняющего исследование [13]. В частности, необходимость выполнения мысленной трансформации нескольких полученных изображений и представления его в трехмерном пространстве может привести к различиям в интерпретации результатов [14].

Благодаря высокой производительности современных компьютерных систем, составляющих основу современных ультразвуковых приборов, появилась возможность интерактивной трехмерной реконструкции крупных сосудов (3D- и 4D-изображения), что облегчает пространственное восприятие и способствует более точной диагностике признаков заболеваний [15, 16]. По

мнению ряда авторов, трехмерное ультразвуковое исследование по сравнению с КТ и МРТ дает возможность оценки патологических изменений в органах и тканях на качественно новом уровне, позволяя детально визуализировать признаки поражения [15-17].

Концепция трехмерной ультразвуковой визуализации впервые была описана Baum G. и Greenwood I. в 1961 г. [18], первоначально метод применялся главным образом для исследования сердца и сосудов. R. Campani et al. (1998), отмечая интенсивное развитие метода трехмерных измерений в начале 90-х гг., подтвердили перспективы метода, позволяющие повысить «диагностическую уверенность», расширить возможности мониторинга, уменьшить применение инвазивных и дорогостоящих исследований [19]. Автоматизация процесса с помощью компьютерных систем позволила получать изображение в нескольких плоскостях и получать объемное изображение [20].

Трехмерное ультразвуковое сканирование по сравнению с дуплексным сканированием имеет ряд преимуществ при визуализации анатомических и патологических структур. Основным из них при визуализации атеросклеротического поражения периферических артерий является возможность оценки бляшки с различных ракурсов. Кроме того, большая прозрачность получаемого трехмерного изображения дает возможность детализации структурных особенностей АСБ [21, 22].

Построение трехмерного изображения состоит из следующих этапов:

1. Сбор информации (оптимизация изображения и настроек аппарата, а также получение серии двумерных изображений в ходе одной непрерывной развертки).
2. Процедура просмотра полученного объемного изображения, которая включает в себя повороты сформированного изображения в горизонтальном и вертикальном направлениях под разными углами вращения. Подбирая плоскость вращения, исследователь получает наиболее информативные изображения исследуемых анатомических структур [23, 24].

При плоскостном срезе 3D-данными можно манипулировать, изменяя плоскость сечения 3D-массива для просмотра 2D-серошальных изображений в любой плоскости. Поверхностная реконструкция помогает точно воспроизводить особенности поверхности выбранных объектов, при этом может выполняться ручное оконтуривание структур или автоматизированная обработка изображения [25].

После того как трехмерное изображение реконструировано, оно готово к анализу. Просмотр данных, представленных в виде куба трехмерных изображений, основывается на мультипланарной реконструкции с картированием структуры. При этом трехмерное изображение выглядит как многогранник, соответствующее ультразвуковое



изображение для данной плоскости изображено на каждой грани (картированная структура). Исследователь может вращать многогранник, чтобы получать желаемую проекцию трехмерного изображения, или перемещать любую из поверхностей, то есть осуществить послойный просмотр трехмерного изображения, имея возможность оценки необходимых структур. Современные приборы позволяют проводить исследование в режиме реального времени.

Для анализа данных используют также ортогональные плоскости, которые выглядят как три перпендикулярные плоскости, создающие трехмерное изображение. Оператор может выбрать одну или несколько плоскостей, передвигать их в пределах трехмерного изображения, чтобы получить поперечное сечение в нужной точке и в нужном направлении, включая косые проекции [26, 27].

Для описания процесса получения и визуализации трехмерных объектов в медицине применяют термин «трехмерный рендеринг» (от англ. rendering – представление, изображение). 3D-рендеринг использует специальные компьютерные алгоритмы для трансформации 2D-изображений в реалистичное объемное представление объекта.

Другими словами, объемный рендеринг – это процесс получения изображения по трехмерной модели с помощью компьютерной программы, представляющий собой полное трехмерное изображение после того, как оно было сконструировано из серии двумерных изображений. Был разработан ряд алгоритмов объемного рендеринга, из которых в настоящее время используются два основных: создание проекции максимальной (минимальной) интенсивности и оценка степени прозрачности. Данный вид анализа используется в первую очередь в акушерстве для описания анатомии эмбриона, однако широко применяется и при изучении сосудов [28]. Для улучшения картины полученных изображений могут быть использованы изменения степени прозрачности, что позволяет изменять визуализацию элементов за пределами поверхности. Для усиления отображения особенностей объекта используются различные алгоритмы фильтрации, в том числе для улучшения качества изображения поверхности и внутренней структуры исследуемых образований [23].

Сегментация трехмерного массива представляет собой метод селективного отображения областей или объемов, который может выполняться с помощью ручного либо автоматизированного алгоритма [29, 30]. Основными его преимуществами являются: возможность исключения искажения изображений зоны интереса за счет влияния окружающих структур и отчетливое наглядное представление интересующего объекта [31].

Наиболее сложной с методологической точки зрения при выполнении трехмерного УЗИ является проблема автоматизированной сегментации ультрасонограмм.

Именно корректностью выделения на ультразвуковом изображении экспертно значимых зон определяется общая пригодность трехмерных диагностических данных. В большинстве работ текстурная сегментация не проводилась, поскольку трехмерные данные представлены упорядоченным набором двумерных срезов, обладающих прозрачностью, прямо связанной с величиной отраженного эхосигнала. Очевидно, если в трехмерном изображении известны координаты его основных текстур, то «полезность» такого изображения многократно возрастает, поскольку появляется возможность произвольных манипуляций с однородными текстурными зонами, составляющими в этом случае широко применяемые в трехмерном моделировании параметрические объекты. Такие объекты могут независимо друг от друга масштабироваться, изменяя геометрическую конфигурацию и даже анимироваться, как составляющие сложной сцены [32].

### **Измерение объема атеросклеротической бляшки.**

Важнейшим применением рассматриваемого метода в клинической практике является оценка объема АСБ. При этом из трехмерного изображения получают изображения поперечных сечений сосуда с толщиной среза приблизительно 1 мм. В каждом поперечном сечении измеряют границы АСБ, затем полученные значения площадей, измеренные в каждом сечении, суммируются и умножаются на расстояния между каждыми срезами для вычисления объема АСБ [14].

Возможности 3D-УЗИ в отношении измерения объема АСБ интенсивно изучались в течение последних двух десятилетий, их результаты показали значительную вариабельность измерений объема и геометрии АСБ [33, 34]. Так, в работах Delcker A. et al. колебания измерения объема АСБ сонных артерий составили от 2 до 200 мм<sup>3</sup>. Вариабельность оценки размера АСБ составила 2,8 и 3,8% при оценке одним либо разными исследователями, что свидетельствовало о возможности использования 3D-ультразвуковой визуализации для оценки измерения объемов АСБ сонной артерии [35, 36].

В одной из работ исследователи продемонстрировали, что оценка объема АСБ сонных артерий *in vivo* с использованием ЭКГ-синхронизации является более эффективной вследствие снижения вариабельности измерений по сравнению с измерениями без синхронизации с ЭКГ [35].

Несмотря на то, что в значительном количестве работ продемонстрирована высокая информативность 3D-УЗИ, лишь в отдельных сообщениях приведены результаты количественной оценки измерений сонных артерий путем расчета общего объема каждой АСБ. Так, Landry A. et al. использовали сосудистые фантомы для измерения объема АСБ. Для симуляции гипеохогенных

бляшек использовался агар, который был помещен в «бляшки» различной длины и протяженности с известным объемом. Модулируемые АСБ были вставлены в просвет фантома. При использовании данного фантома ошибка в измерении объема АСБ составила  $3,1 \pm 0,9\%$ . Вариабельность измерения объема АСБ составила  $4,0 \pm 1,0\%$  и  $5,1 \pm 1,4\%$  при оценке одним и разными исследователями, соответственно. При этом коэффициент вариации определялся различиями между экспериментально и теоретически определенными значениями объема АСБ и составил  $9\%$  [37].

В другой работе Landry A. et al. оценивали вариабельность измерения общего объема АСБ *in vivo* как функцию среднего значения. Значения коэффициента вариации составили  $6,5$  и  $6,9\%$  при оценке одним и разными исследователями, соответственно, что сопоставимо со значениями, полученными в других работах. При измерении объема АСБ численное значение ошибки уменьшалось одновременно с увеличением размера АСБ [38].

Fenster A. et al. [14] выполнили сравнение результатов полуавтоматических измерений АСБ с ручными, которые использовали в качестве «золотого» стандарта. Было установлено, что точность измерений колебалась от  $1,5\%$  до  $4,2\%$  для объемов от  $68$  до  $286$  мм<sup>3</sup>. При этом коэффициент вариации, как и в работе Landry A. et al. [14], уменьшался с увеличением размера АСБ. При использовании автоматического определения количества АСБ были получены более высокие значения коэффициента вариации, чем при подсчете вручную.

В исследовании Makris G.C. et al. [39] воспроизводимость трехмерной ультразвуковой визуализации при оценке объема АСБ составила от  $2,8$ – $6,0\%$  до  $4,2$ – $7,6\%$  по данным одного и разных исследователей, соответственно.

Метод 3D-УЗИ позволяет также выполнить измерение объема АСБ, которые не видны в В-режиме, так называемых гомогенных гипозоногенных бляшек. Такая бляшка лабильна, соответствует морфологическим проявлениям прогрессирования атероматоза, приводит к осложнению бляшки изъязвлением и кровоизлиянием. Гипозоногенный компонент в АСБ может быть представлен включениями липидов с высоким содержанием холестерина, детрита с участками фиброза, а также кровоизлиянием на поверхности бляшки. Гипозоногенные бляшки чаще обнаруживаются у больных с симптомами хронической цереброваскулярной недостаточности и являются прогностически особенно неблагоприятными. Поэтому количественная оценка таких бляшек является важной задачей.

Следует отметить, что для анализа прогрессирования атеросклеротического поражения необходимо оценить как объем АСБ, так и его изменения, поскольку динамика этого показателя на различных стадиях роста АСБ может быть различным образом интерпретирована [14, 40].

Hennerici M. et al. [41] с помощью 3D-УЗИ оценивали рост и регресс  $17$  мягких и  $4$  твердых АСБ на протяжении  $17$  месяцев у  $7$  пациентов. В результате у всех обследованных пациентов было выявлено уменьшение объема АСБ на фоне проводимого лечения одновременно со снижением уровня липопротеидов низкой плотности (ЛПНП), общего холестерина и уровня фибриногена. Schminke U. et al. [45] наблюдали в течение  $18,9$  месяцев за  $32$  пациентами. Увеличение размеров АСБ было отмечено у  $15\%$  обследуемых с увеличением объема АСБ в среднем на  $59\%$ . Объем бляшки оставался постоянным у  $85\%$  пациентов. Авторы пришли к заключению, что увеличение АСБ сонных артерий было невозможно выявить в одной плоскости, необходима была трехмерная реконструкция с помощью 3D-УЗИ [41].

По мнению ряда исследователей, измерение объема АСБ представляет собой чувствительный метод оценки эффективности терапии [39–41]. В целом большинство сообщений по использованию визуализации с помощью 3D-УЗИ при атеросклеротическом поражении стенки сосудов посвящены оценке объема АСБ. Как показывает анализ литературных данных, этот метод является эффективным также в отношении визуализации структуры АСБ, состояния поверхности бляшки, при оценке её изъязвления.

### Исследование структуры атеросклеротической бляшки.

Следует отметить, что, по мнению большинства исследователей, возможности традиционного дуплексного сканирования в оценке структурных особенностей содержимого сосуда и состояния поверхности АСБ (выявление неровностей и изъязвлений) ограничены [25, 39–41]. В то же время трехмерная ультразвуковая визуализация позволяет выявить факторы, предрасполагающие к развитию церебральной микроэмболии: структурные особенности АСБ и состояние поверхности бляшки [42, 43].

Большинство исследователей указывают на необходимость первоочередной оценки морфологии поверхности АСБ по данным 3D-УЗИ [44, 45]. Schminke U.L. et al. сообщают о хорошей воспроизводимости 3D-УЗИ при изучении состояния поверхности АСБ и выявлении её изъязвлений. В рамках данного исследования изъязвления АСБ за время наблюдения были зарегистрированы в  $23,5\%$  случаев, большинство АСБ имели гладкую поверхность. Лишь в одном случае было прогрессирующее увеличение изъязвления, что указывало на нестабильность АСБ [45].

Markis C. и соавт. на основании изучения баз данных PubMed, Scopus и Cochrane был проведен анализ клинических исследований по оценке воспроизводимости и эффективности 3D-ультразвукового метода при изучении атеросклеротических бляшек



сонной артерии с оценкой их размеров, объема, морфологии и состава [39]. Исследователи отмечают, что во всех работах приведены данные о воспроизводимости 3D-УЗИ или эффективности метода в оценке прогрессии каротидных бляшек в ходе проводимого лечения. Авторы сделали заключение о хорошей воспроизводимости метода при выполнении разными и одним автором, различия при оценке каротидных бляшек составили соответственно 2,8-6,0% и 4,2-7,6%.

В ряде исследований оценена также воспроизводимость 3D-УЗИ при описании морфологии и состава бляшек, при этом главным образом изучено состояние поверхности бляшек при наличии изъязвлений [43, 44]. Была выявлена удовлетворительная воспроизводимость характеристик бляшки: 8,9-9,4% и 9,7-2,3% соответственно при оценке одним и разными исследователями [43]. Таким образом, была подтверждена возможность применения метода 3D-УЗИ для изучения поверхности атеросклеротических бляшек.

В исследовании Heliopoulos J. et al. было показано, что 3D-УЗИ превосходило 2D-УЗИ исследование при оценке изъязвлений на поверхности 62 бляшек [43]. При исследовании в трехмерном режиме кальцинированных бляшек удалось избежать препятствия в виде акустической тени и увидеть контуры АСБ, оценить процент стеноза. Четкость изображения была лучше при пользовании методом 3D-УЗИ, чем при дуплексном сканировании. Выявлены абсолютные показания к выполнению 3D-УЗИ – кальциноз стенок сосуда в случае уточнения изъязвленности АСБ.

Ряд сообщений был посвящен изучению эффективности 3D-УЗИ в оценке прогрессии бляшек сонной артерии в ходе лечения заболевания или в отсутствие терапии. При этом существенно различался дизайн исследований, длительность их варьировала от 7 [46] до 3 месяцев [47]. Только 5 исследований были рандомизированными контролируемыми, размеры выборки составили от 7 до 165 пациентов. Во всех работах было сделано заключение о том, что 3D-УЗИ является адекватным методом оценки различных характеристик каротидной бляшки при исследовании динамики ее размеров и структуры в течение определенного промежутка времени и при оценке эффекта терапии. Сделано заключение о большей чувствительности 3D-УЗИ при измерении объема бляшки, чем оценки толщины комплекса интима-медиа в качестве характеристик прогрессии каротидных бляшек при проведении лечения. Еще более значимыми были изменения 3D-характеристик объема бляшки в периоде наблюдения после проведенного лечения по сравнению с соответствующей динамикой толщины комплекса интима-медиа [48].

### **Сравнение диагностических возможностей 3D-УЗИ и других методов визуализации атеросклеротического поражения артерий.**

По данным Бурцевой Е.А., при сопоставлении данных дуплексного сканирования с интраоперационными результатами чувствительность, специфичность и точность дуплексного сканирования в оценке структурных особенностей атеросклеротической бляшки сонных артерий составила 88%, 100% и 98%, соответственно, в то время как при трехмерной реконструкции значения были несколько выше, составив 97%, 100% и 99%, соответственно [21]. В отличие от результатов Keberle M. [22], оценивая сопоставимость результатов трехмерного и двумерного УЗИ, автор сообщает, что оба метода дают схожие результаты с высокой корреляцией ( $r=0,95$ ,  $p<0,001$ ). По мнению автора, трехмерная реконструкция сосудов имеет преимущества при архивировании полученных данных [21].

Существует ограниченное количество работ, посвященных сравнительной оценке определения объема АСБ с помощью МРТ и 3D-УЗИ [49, 50]. Так, Krasinski A. et al. сообщают, что измерение толщины сосудистой стенки по данным МРТ было более точным, чем при выполнении 3D-УЗИ. Анализ Бленд-Альтмана, выполненный в рамках данной работы, показал, что различия между результатами МРТ и 3D-УЗИ значительно увеличивались при возрастании толщины сосудистой стенки. Такого рода явление, по мнению авторов, могло быть связано с отсутствием точной оценки толщины сосудистой стенки в тех зонах, где сосудистая стенка и АСБ плохо визуализировались из-за помех по данным УЗ или неоднородного утолщения адвентиции, выявленного при МРТ. В то же время, МРТ-исследование толщины сосудистой стенки включает в себя только оценку АСБ и оценку толщины всей сосудистой стенки (интимы, меди и адвентиции), в то время как данные 3D-УЗИ включают в себя оценку АСБ, интимы и меди без оценки адвентиции [50]. Такое различие при оценке структур сосудистой стенки увеличивает толщину сосудистой стенки по данным МРТ (0,3 мм). Необходимость оценки адвентиции связана с тем, что, по мнению некоторых авторов, толщина адвентиции увеличивается при наличии атеросклеротического поражения сосудистой стенки как результат ремоделирования артериальной стенки [51].

Krasinski A. et al. Полагают, что вышеописанные различия данных МРТ и 3D-УЗИ связаны не только с артефактами или невозможностью оценки адвентиции по данным УЗИ, но и другими причинами, в частности различиями контрастности внутренней и наружной поверхностей стенки артерии [50]. Так, для МРТ характерна более высокая интенсивность градиентов, что позволяет более точно визуализировать границы сосудистой стенки и способствует

повышению точности оценки толщины сосудистой стенки и объема АСБ.

Egger M. et al. показали, что значение толщины артериальной стенки было значительно больше по результатам 3Т МРТ ( $1050 \pm 90$  мм<sup>3</sup>) по сравнению с данными 3D-УЗИ толщины сосудистой стенки ( $780 \pm 50$  мм<sup>3</sup>) или 3D УЗ-визуализации общего объема АСБ ( $140 \pm 40$  мм<sup>3</sup>). При этом измерение общего объема АСБ включает в себя только оценку АСБ без оценки компонентов сосудистой стенки. Кроме того, данными авторами была показана взаимосвязь между результатами 3D-УЗИ и МРТ при оценке толщины сосудистой стенки и отсутствие связи между данными 3D-УЗИ визуализации и толщины комплекса интима-медиа [49]. В то же время в других работах были выявлены умеренные корреляции между толщиной комплекса интима-медиа артериальной стенки, общим объемом АСБ по данным 3D-УЗИ и общей площадью АСБ [52, 53]. Степень стеноза, площадь и объем атеросклеротической бляшки более тесно связаны с факторами риска развития атеросклероза [54].

## Заключение.

Внедрение в клиническую практику трехмерной ультразвуковой реконструкции дало возможность не только описания АСБ, но и ее количественной оценки. Трехмерная реконструкция значительно увеличила возможности традиционного УЗИ, позволяя получить изображение исследуемого сосуда в пространстве, его проекций и наклонных сечений, повысив возможности детального описания признаков патологического процесса.

В настоящее время являются общепризнанными преимущества трехмерного УЗИ по сравнению с другими методами (КТ и МР-ангиографии) при исследовании состояния сосудов такие как неинвазивность и портативность, минимальный дискомфорт, который испытывает пациент, за счет сокращения времени исследования и проведения манипуляций. Трехмерное УЗИ позволяет получить объемное изображение не только свободного просвета сонной артерии, но и атеросклеротической бляшки, стенки сосуда, а также окружающих артерию тканей. Метод позволяет количественно оценить объемы атеросклеротической бляшки, участка свободного просвета сосуда, истинного просвета сосуда.

Основное количество публикаций посвящено оценке объема АСБ и его изменений в результате проводимого лечения. Однако, количество работ по оценке структурных изменений АСБ, а также сопоставление возможностей трехмерного УЗИ и МРТ ограничено. Кроме того, практически не описаны возможности 3D- и 4D-ультразвуковых реконструкций для оценки эффективности эндоваскулярного и хирургического лечения атеросклеротических изменений. Перспективным представляется проведение исследований возможностей трехмерной ультразвуковой визуализации в выявлении атеросклеротических изменений сонных, бедренных артерий и аорты; по определению структуры и объема при пролонгированных стенозах высокой степени, а также по оценке состояния артериальной стенки после инвазивных (эндоваскулярных и хирургических) вмешательств.

## Список литературы.

1. Лелюк С.Э., Лелюк В.Г., Арутюнян Н.М. Ультразвуковые критерии диагностики диабетической ангиопатии у пациентов с сахарным диабетом 2-го типа. М.: РМАПО. 2009;29с.
2. Кунцевич Г.И., Покровский А.В. Ультразвуковые особенности неспецифического аортоартериита. Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2004;3:98-105.
3. Achenbach S. Top 10 indications for coronary CTA. *Appl. Radiol.* 2006; 35 (Suppl.12):22-31.
4. Kopp AF, Schroeder S, Kuettner A, et al. Non-invasive coronary angiography with high resolution multidetector-row computed tomography: Results in 102 patients. *Eur. Heart J.* 2002;23:1714-25.
5. Saraste M, Vesalainen RK, Ylitalo A, et al. Transthoracic Doppler echocardiography as a noninvasive tool to assess coronary artery stenoses - a comparison with quantitative coronary angiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2005;18:679-85.
6. Angeli E, Vanzulli A, Venturini M, et al. The role of radiology in the diagnosis and management of Takayasu's arteritis. *J. Nephrol.* 2001;14:514-24.
7. McCutloch M, Andronikou S. Angiographic features of 26 Children with Takayasu's arteritis. *Pediatr. Radiol.* 2003;33:230-5.
8. Fraga A, Medina F. Takayasu's arteritis. *Curr. Rheumatol. Rep.* 2002;4:30-8.
9. Chaubal N, Dighe M, Shab M. Sonographic and color doppler findings in aortoarteritis (Takayasu arteritis). *J. Ultrasound Med.* 2004;23:937-44.
10. Launay D, Hasbulla E. Inflammatory aortitis. *J. H. Pressc. Med.* 2004;33:1334-40.
11. Джибладзе Д.Н., Томилини А.А., Лагода О.В. Детекция церебральной эмболии у больных с атеросклеротическими стенозами внутренней сонной артерии. *Ангиология и сосудистая хирургия.* 2000;2:28-35.
12. Kurklinsky A, Mankad S. Three-dimensional Echocardiography in Valvular Heart Disease. *Cardiol. Rev.* 2012;20:66-71.



13. Frary G, Hasselman T, Patel P. Atypical left ventricular outflow tract aneurysm diagnosed by three-dimensional echocardiography. *Cardiol. Young.* 2012;6:1-3.
14. Fenster A, Landry A, Downey DB, et al. 3D ultrasound imaging of the carotid arteries. *Curr. Drug Targets Cardiovasc. Haematol. Disord.* 2004;4:161-75.
15. Врублевский А.В., Боцченко А.А., Карнов Р.С. Комплексная ультразвуковая оценка атеросклероза грудного отдела аорты и коронарных артерий. Томск. 2007:147с.
16. Miller CA, Pearce K, Jordan P, et al. Comparison of real-time three-dimensional echocardiography with cardiovascular magnetic resonance for left ventricular volumetric assessment in unselected patients. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2012;13:187-95.
17. Munoz AF, Varas Lorenzo MJ. Tridimensional ultrasonography. *Revista Espanola De Enfermedades Digestivas.* 2005;97:125-34.
18. Baum G, Greenwood I. Orbital lesion localization by three-dimensional ultrasonography. *NY State J. Med.* 1961;61:4149-57.
19. Campani R, Bottinelli O, Calliada F, Coscia D. The latest in ultrasound: three-dimensional imaging. Part II. *Eur. J. Radiol.* 1998;27:183-7.
20. Beloblavek M, Foley D, Gerber T, et al. Three- and four-dimensional cardiovascular ultrasound imaging: a new era for echocardiography. *Mayo Clin. Proc.* 1993;68:221-40.
21. Бурцева Е.А. Оценка гемодинамики и структуры атеросклеротической бляшки у больных с окклюзирующими поражениями внутренней сонной артерии по данным комплексного ультразвукового исследования: Дисс. д-ра мед. наук. М. 2002:146с.
22. Keberle M. Three-Dimensional Power Doppler Sonography in Screening for Carotid Artery Disease. *J. Clin. Ultrasound.* 2000;28:441-51.
23. Тимина И.Е. Ультразвуковые методы исследования в диагностике атеросклеротических поражений сонных артерий на этапах каротидной эндартерэктомии: Автореф. дисс. д-р мед. наук. М. 2005:20с.
24. Janvier MA, Soulez G, Allard L, Cloutier G. Validation of 3D reconstructions of a mimicked femoral artery with an ultrasound imaging robotic system. *Med Phys.* 2010;37:3868-79.
25. Yu H, Pattichis MS, Agurto C, et al. A 3D freehand ultrasound system for multi-view reconstructions from sparse 2D scanning planes. *Biomed. Engl. Online.* 2011;20(10).
26. Kirbach D, Whittingham TA. 3D ultrasound - the kretztechnik voluson approach. *European Journal of Ultrasound.* 1994;1:85-9.
27. Zosmer N, Jurkovic D, Jaumiaux E, et al. Selection and identification of standard cardiac views from three-dimensional volume scans of the fetal thorax. *J. Ultrasound Med.* 1996;15:25-32.
28. Downey DB, Fenster A. Vascular imaging with a three-dimensional power Doppler system. *Am. J. Roentgenol.* 1995;165:665-8.
29. Hausken T, Sondenaa K, Svebak S, et al. Common pathogenetic mechanisms in symptomatic, uncomplicated gallstone disease and functional dyspepsia: volume measurement of gallbladder and antrum using three-dimensional ultrasonography. *Dig. Dis. Sci.* 1997;42:2505-12.
30. Sanches JM, Marques JS. A multiscale algorithm for three-dimensional free-band ultrasound. *Ultrasound Med. Biol.* 2002;8:1029-40.
31. Abusaid GH, Ahmad M. Real time three-dimensional stress echocardiography advantages and limitations. *Echocardiography.* 2012;29:200-6.
32. Потанин А.В., Кучвальский Д. Ф. 3Dstudio MAX. М.: ЭКОМ. 1997:479с.
33. Allot CP, Barry CD, Pickford R, Waterton JC. Volumetric assessment of carotid artery bifurcation using free-hand acquired, compound ultrasound. *British J. Radiology.* 1999;72:289-92.
34. Palombo C, Kozakova M, Morizzo C, et al. Ultra-fast three-dimensional ultrasound: application to carotid artery imaging. *Stroke.* 1998;29:1631-7.
35. Delcker A, Diener HC, Wilhelm H. Influence of vascular risk factors for atherosclerotic carotid artery plaque progression. *Stroke.* 1995;26:2016-22.
36. Delcker A, Tegeler C. Influence of ECG-triggered data acquisition on reliability for carotid plaque volume measurements with a magnetic sensor 3-dimensional ultrasound system. *Ultrasound Med Biol.* 1998;24:601-5.
37. Landry A, Fenster A. Theoretical and Experimental Quantification of Carotid Plaque Volume Measurements made by 3D Ultrasound Using Test Phantoms. *Medical. Physics.* 2002;29:2319-27.
38. Landry A, Spence JD, Fenster A. Measurement of carotid plaque volume by 3-dimensional ultrasound. *Stroke.* 2004;35:864-9.
39. Makris GC, Lavidia A, Griffin M, et al. Three-dimensional ultrasound imaging for the evaluation of carotid atherosclerosis. *Atherosclerosis.* 2011;219:207-11.
40. Haruki N, Takeuchi M, Kaku K, et al. Prevalence and clinical implication of complex atherosclerotic plaque in the descending thoracic aorta of Japanese patients assessed by transesophageal echocardiography. *Circ. J.* 2010;74:2627-32.
41. Hennerici M, Kleophas W, Gries FA. Regression of carotid plaques during low-density lipoprotein cholesterol elimination. *Stroke.* 1991;22:989-92.
42. Cbiu B, Beletsky V, Spence JD, et al. Analysis of carotid lumen surface morphology using three-dimensional ultrasound imaging. *Phys. Med. Biol.* 2009;54:1149-67.
43. Heliopoulos J, Vadiolias K, Mitsias P, et al. A three-dimensional ultrasonographic quantitative analysis of non-ulcerated carotid plaque morphology in symptomatic and asymptomatic carotid stenosis. *Atherosclerosis.* 2008;198:129-35.
44. Fuster V. The Vulnerable Atherosclerotic Plaque: Understanding, Identification, and Modification. Futura Publishing Company. NY: Armonk. 1999.
45. Schminke U, Motsch L, Griewing B, et al. Three - dimensional power-mode ultrasound for quantification of the progression of carotid artery atherosclerosis. *J. Neurol.* 2000;247:106-11.
46. Pollex RL, Spence JD, House AA, et al. A comparison of ultrasound measurements to assess carotid atherosclerosis development in subjects with and without type 2 diabetes. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2005;15:15.
47. Ainsworth CD, Blake CC, Tamayo A, et al. 3D ultrasound measurement of change in carotid plaque volume: a tool for rapid evaluation of new therapies. *Stroke.* 2005;36:1904-9.

48. Mallett C, House AA, Spence JD, et al. Longitudinal ultrasound evaluation of carotid atherosclerosis in one, two and three dimensions. *Ultrasound Med. Biol.* 2009;35:367-75.
  49. Egger M, Krasinski A, Rutt BK, et al. Comparison of B-mode ultrasound, 3-dimensional ultrasound, and magnetic resonance imaging measurements of carotid atherosclerosis. *J. Ultrasound Med.* 2008;27:1321-34.
  50. Krasinski A, Chiu B, Fenster A, Parraga G. Magnetic resonance imaging and three-dimensional ultrasound of carotid atherosclerosis: mapping regional differences. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2009;29:901-8.
  51. Rioufol G, Elbaz M, Dubreuil O, et al. Adventitia measurement in coronary artery: an in vivo intravascular ultrasound study. *Heart.* 2006;92:985-6.
  52. Al Shali K, House AA, Hanley AJ, et al. Differences between carotid wall morphological phenotypes measured by ultrasound in one, two, and three dimensions. *Atherosclerosis.* 2005;178:319-25.
  53. Riccio SA, House AA, Spence JD, et al. Carotid ultrasound phenotypes in vulnerable populations. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2006;16:4-44.
  54. Spence JD. Technology Insight: ultrasound measurement of carotid plaque--patient management, genetic research, and therapy evaluation. *Nature Clinical Practice Neurology.* 2006;2:611-9.
-