



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1283>

Современные нейрорентгенологические методы диагностики внутричерепных артериальных аневризм: обзор литературы

© Семин К.С.*, Пронин И.Н., Элиава Ш.Ш., Коновалов А.Н.,
Баталов А.И., Захарова Н.Е.

ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России; 125047 Москва, 4-я Тверская-Ямская ул., д. 16, Российская Федерация

Цель. Анализ мировой литературы, посвящённый современной диагностике внутричерепных артериальных аневризм с акцентом на возможности МР-визуализации сосудистой стенки.

Материал и методы. Проведен поиск научных публикаций и клинических рекомендаций в информационно-аналитической системе PubMed за 2012–2020 гг. по ключевым словам: “aneurysm” (аневризма), “СТ” (КТ), “MRI” (МРТ), “CFD – computational hydrodynamics” (вычислительная гидродинамика), “vessel wall imaging” (визуализация сосудистой стенки). В результате поиска было отобрано и изучено 137 статей, из которых в обзоре использовались 27 статей, дополненные 10 статьями из списков литературы 1990–2012 гг.

Результаты. Были продемонстрированы современные возможности диагностики интракраниальных аневризм с особым вниманием на преимущества метода МР-визуализации сосудистой стенки. Определены основные технические аспекты, на которых базируется специализированная методика МР-визуализации сосудистой стенки.

Выводы. Современные методики КТ- и МР-визуализации способны предоставить дополнительную информацию о происходящих в просвете аневризмы и ее стенке процессах, которая может явиться ключевым фактором при предоперационном нейрохирургическом планировании.

Ключевые слова: аневризма, МР-визуализация, сосудистая стенка, воспаление, неоваскуляризация

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Семин К.С., Пронин И.Н., Элиава Ш.Ш., Коновалов А.Н., Баталов А.И., Захарова Н.Е. Современные нейрорентгенологические методы диагностики внутричерепных артериальных аневризм: обзор литературы. *Медицинская визуализация*. 2023; 27 (1): 11–18. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1283>

Поступила в редакцию: 11.11.2022. **Принята к печати:** 02.02.2023. **Опубликована online:** 24.03.2023.

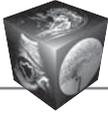
Modern neuroradiological diagnostic methods for intracranial arterial aneurysms: a review

© Kirill S. Semin*, Igor N. Pronin, Shalva Sh. Eliava, Anton N. Konovalov,
Artem I. Batalov, Natalia E. Zakharova

N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 16, 4rd Tverskaya-Yamskaya str., Moscow 125047, Russian Federation

Aim. Analysis of modern neuroimaging methods of intracranial arterial aneurysms with an emphasis on the possibilities of MR imaging of the vessel wall.

Methods. Scientific articles and clinical recommendations from the PubMed from 2012 to 2020 were included into analysis, using keywords: aneurysm, CT, MRI, CFD (computational hydrodynamics), vessel wall imaging. As a result of the search, 137 articles were selected of which 27 articles were used in the review, supplemented by 10 articles from the reference lists 1990–2012.



Results. Modern possibilities of intracranial arterial aneurysms imaging were demonstrated, with particular attention to the advantages of the method of MR imaging of the vessel wall. The main technical aspects of MR vessel wall imaging were demonstrated.

Conclusion. Modern CT and MR imaging can provide additional information about the processes occurring in the lumen of the aneurysm and its wall. This information can be a key factor in the neurosurgical patient management.

Keywords: aneurysm, magnetic resonance imaging, vessel wall, inflammation, neovascularization

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Semin K.S., Pronin I.N., Eliava Sh.Sh., Konovalov A.N., Batalov A.I., Zakharova N.E. Modern neuroradiological diagnostic methods for intracranial arterial aneurysms: a review. *Medical Visualization*. 2023; 27 (1): 11–18. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1283>

Received: 11.11.2022.

Accepted for publication: 02.02.2023.

Published online: 24.03.2023.

Аневризматическое субарахноидальное кровоизлияние (аСАК) возникает с частотой от 6 до 20 человек на 100 000 в год по данным различных исследований и сопряжено с высокой смертностью и инвалидизацией [1]. Около 10% пациентов умирают до того, как попадают в больницу, и только 1/3 имеют хорошее восстановление после лечения [2]. Причиной аСАК в 85% случаев является разрыв аневризмы сосудов головного мозга [3]. Аневризма – это локальное расширение просвета артерии вследствие изменения структуры или повреждения ее стенок. Распространенность внутричерепных мешотчатых артериальных аневризм (АА) по данным рентгенологических исследований и аутопсий оценивается в 2–5% в популяции без сопутствующих заболеваний [2, 4]. Средний возраст пациентов около 50 лет при соотношении полов в этом возрасте 1:1. В группах населения старше 50 лет АА чаще встречаются у женщин – 2 : 1 [2]. Множественные поражения наблюдаются в 30% от всех неразорвавшихся АА [5].

Большинство АА (по разным оценкам – от 62 до 85%) локализуется в переднем отделе артериального круга основания мозга [6–8]. В этой зоне кровообращения аневризмы локализуются чаще всего в области слияния передней соединительной артерии с передней мозговой артерией, слияния задней соединительной артерии с внутренней сонной артерией и в области разветвления средней мозговой артерии. В проекции вертебробазиллярного бассейна АА чаще диагностируются в области бифуркации основной артерии и в области отхождения верхней мозжечковой и передней нижней мозжечковой артерий [7, 9].

Кроме локализации и множественности, аневризмы можно охарактеризовать с точки зрения их формы и размеров, а также этиологии. Мешотчатые АА являются наиболее распространенным типом интракраниальных аневризм. Они представляют собой округлую выпуклость стенки сосуда с хорошо выраженным куполом и более узкой шейкой, сое-

динящейся с родительским сосудом [10]. По размеру АА делятся на микроаневризмы (до 3 мм), средние (от 4 до 15 мм), крупные (от 16 до 25 мм) и гигантские (более 25 мм). Отдельно рассматриваются микроаневризмы, связанные с хронической гипертензией, также известные как аневризмы Шарко–Бушара. Они чаще всех встречаются в кровеносных сосудах базальных ганглиев, обычно не превышают 0,3 мм [10]. Считается, что аневризмы Шарко–Бушара являются результатом липогиалиноза мелких перфорирующих сосудов (диаметром <300 мкм), вторичного по отношению к хронической, плохо контролируемой гипертензии. Аневризмы Шарко–Бушара склонны к разрыву, что приводит к развитию массивных глубоких внутримозговых кровоизлияний [11].

Особую группу АА составляют аневризмы более 25 мм или гигантские. Несмотря на их “псевдоопухоловое” течение с развитием локального неврологического дефицита, у нелеченых гигантских АА риск разрыва может достигать 50%, а смертность при двухлетнем наблюдении приближается к 100% (от 88 до 100%) [10].

Также отдельную группу АА составляют инфекционные аневризмы. Это редкие воспалительные поражения стенки артериального сосуда, которые составляют 0,7–6,5% от всех внутричерепных аневризм и часто локализуются на дистальных артериальных ветвях [12]. Считается, что наиболее частой причиной их развития является инфекционный эндокардит [13], тогда как проксимальные ветви с большей вероятностью будут поражены инфекцией, распространяющейся при тромбозе кавернозного синуса или базальном менингите [14, 15].

Современный комплекс диагностики интракраниальных аневризм включает в себя три основные методики: цифровую субтракционную ангиографию, КТ-ангиографию и МР-ангиографию. Данные методики, в целом, визуализируют движение контрастного препарата или помеченных

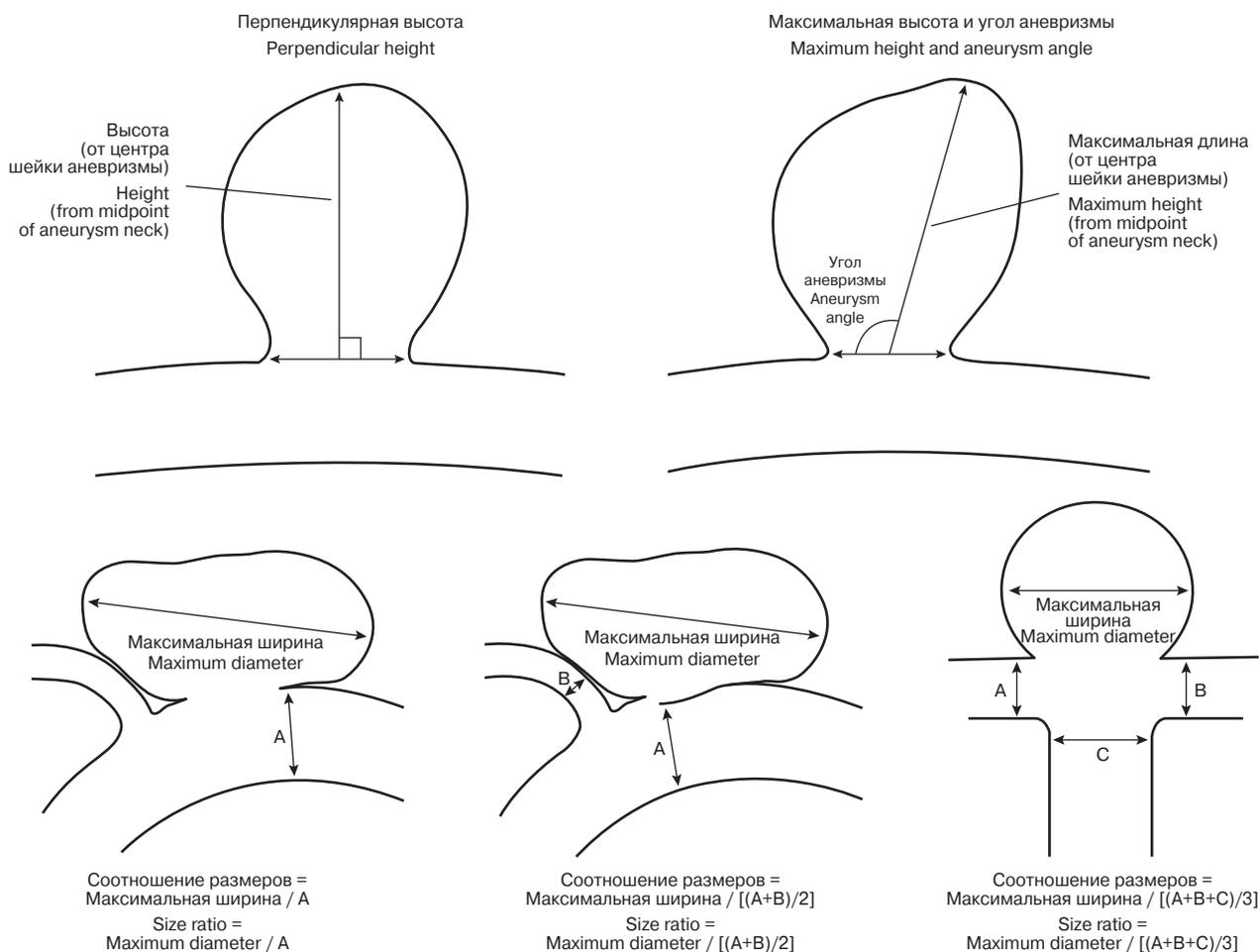
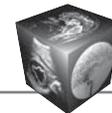


Рис. 1. Пример расчета перпендикулярной высоты, максимальной высоты, угла аневризмы, соотношения размеров (адаптировано из [16]).

Fig. 1. Calculation example for perpendicular height, maximum height, aneurysm angle, size ratio (adapted from [16]).

протонов воды (в случае МР-ангиографии) по кровеносному руслу, хотя формирование регистрируемого сигнала основано на разных физических характеристиках тканей мозга.

При морфометрическом анализе АА оцениваются следующие параметры: 1) максимальный диаметр; 2) угол аневризмы; 3) локализация; 4) диаметр шейки; 5) наличие дочерней аневризмы (<50% размера родительской аневризмы); 6) наличие множественных камер (определяется как >50% размера родительской аневризмы); 7) соотношение сторон (отношение максимальной высоты аневризмы к диаметру шейки); 8) максимальная высота (максимальное измерение от центра шейки аневризмы до купола аневризмы); 9) соотношение размеров (отношение максимального диаметра в любом направлении к диаметру родительского сосуда); 10) диаметр материнского

сосуда; 11) перпендикулярная высота (измерение высоты аневризмы перпендикулярно центру шейки аневризмы к куполу аневризмы); 12) объем аневризмы, рассчитанный по формуле $(4/3)\pi$ (radius A) (radius B) (radius C), где A, B и C – ортогональные измерения (рис. 1) [16].

В последние два десятилетия активно изучаются новые методики оценки АА, основанные на изучении количественных характеристик потока крови с измерением напряжения сдвига стенки аневризмы, а также визуализации самой сосудистой стенки в области мешка АА с помощью современных методик МРТ.

Технология, основанная на измерении потоковых характеристик крови и выраженности показателей напряжения сдвига стенки, требует применения не только современных сканеров, но также и разработки методов компьютерного



моделирования на основе теории вычислительной гидродинамики. До сих пор это остается времязатратным процессом с точки зрения обработки диагностических данных [17]. Моделирование на основе вычислительной гидродинамики должно основываться на целом ряде параметров, в частности на точной геометрии аневризмы, граничных условиях потока крови для конкретного пациента, реальной реологии крови и свойств стенок сосудов. Однако на практике из-за отсутствия указанных данных для конкретного пациента и во избежание высоких вычислительных затрат обычно принимается несколько допущений [18]. Эта практика вызывает опасения по поводу надежности результатов моделирования, влияя на ее внедрение в клинику.

Опуская технические аспекты процесса моделирования потока крови, кратко остановимся на описании некоторых допущений и их влиянии на различные гемодинамические показатели.

Одним из допущений вычислительной гидродинамики, в основе которого лежат данные диагностических изображений, является применение стандартных граничных значений потока крови на входе и выходе из зоны интереса, поскольку в текущей клинической практике измерения указанных показателей для каждого пациента обычно не проводятся. Входные граничные условия потока обычно устанавливаются на основе предположения, что артерия поддерживает определенную скорость потока, скорость или напряжение сдвига стенки в определенном месте. Таким образом, одни и те же граничные условия потока и форма входной волны, обычно измеряемые у здоровых добровольцев, применяются к разным пациентам. Обычно предполагается, что поток на бифуркациях разделяется согласно закону Мюррея, который связывает сечение сосудов с расходом крови, протекающей через него [19, 20]. Однако внутричерепной артериальный кровоток не всегда соответствует этому закону и может варьировать у разных пациентов в зависимости от их возраста, пола, наличия сосудистых заболеваний и конфигурации большого артериального круга основания мозга и даже индивидуальной деятельности.

Для уточнения граничных условий для входящих и исходящих потоков при внутричерепных аневризмах, расположенных в средних мозговых артериях, Н. Rajabzadeh-Oghaz и соавт. (2020) использовали возможности фазоконтрастной МР-ангиографии в количественной оценке кровотока внутричерепных артерий, выполненной на МР-аппарате 7,0 Тл [19]. По мнению авторов, это увеличивает точность построения модели анев-

ризмы, однако доступность таких сканеров на данное время ограничена.

Среди новых методик оценки АА рассматривается **технология визуализации сосудистой стенки с высокой разрешающей способностью на основе МРТ**. В основе метода лежат импульсные последовательности с использованием подавления сигнала от крови, жира и спинномозговой жидкости, между которыми визуализируется сосудистая стенка. Предпочтение отдается МР-томографам с напряженностью магнитного поля 3,0 Тл и выше.

Среди методов визуализации сосудистой стенки можно выделить следующие.

– Использование подавления сигнала от ткани с конкретным временем продольной релаксации (T1) – импульсная последовательность инверсия-восстановление: 180° радиочастотный (РЧ) импульс разворачивает вектор намагниченности в обратном направлении или изменяет фазу продольной намагниченности протонов ткани через время T1 (время инверсии), которое соответствует моменту обращения продольной намагниченности от крови в нуль, подается комбинация 90- и 180-градусных РЧ-импульсов. В итоге МР-сигнал от крови будет подавлен. Считается, что этот метод имеет некоторую зависимость от кровотока с появлением артефактов от медленного тока крови.

– Использование временипролетного эффекта – спиновое эхо: 90° РЧ-импульс изменяет намагниченность крови в сосуде, проходящем в заданном слое ткани. За время до включения 180° РЧ-импульса поток крови с измененной намагниченностью покидает визуализируемый слой, и, следовательно, пришедшие протоны с неизменной намагниченностью не дают МР-сигнала, что в итоге приводит к подавлению сигнала крови.

– Использование предварительного пространственного насыщения протонов (полосы насыщения). В практике МР-сканирования сосудов применяются дополнительные пространственно-селективные РЧ-импульсы и градиентные магнитные поля, которые подавляют МР-сигнал от крови в соседней с зоной интереса области, в результате сигнал от входящей в зону интереса крови в просвете сосуда будет подавлен.

– Метод двойной инверсии-восстановления. Этот метод использует как особенности потока, так и свойства T1 времени релаксации крови для подавления сигнала от нее в просвете сосуда в зоне интереса.

Все перечисленные выше методы используют в основном 2D-технологии МР-сканирования, что накладывает ряд ограничений на пространствен-



ное разрешение и визуализацию мелких объектов. Поэтому при визуализации сосудистой стенки в настоящее время используют специализированные 3D быстрые последовательности (CUBE, VISTA, 3D MVOX, SPACE). Это позволяет получать субмиллиметровые, изотропные 3D-наборы данных, которые можно реконструировать в любой плоскости для визуализации даже небольших и низкоконтрастных элементов без эффектов частичного объема [21].

МРТ с внутривенным введением контрастного препарата может предоставить дополнительную информацию о наличии и характере структурных изменений в самой сосудистой стенке аневризмы. По данным целого ряда авторов, это может являться ключевым фактором в предсказании скорого разрыва аневризмы [22–26].

T. Matsushige и соавт. (2019) получили данные о том, что локальное контрастирование стенки аневризмы при МРТ может указывать на наличие внутрипросветного тромба. В более раннем исследовании было выявлено, что наличие тромба выявляется в большей части ранее разорвавшихся аневризм [27]. Образование тромба может происходить за счет активных клеток грануляционной ткани, образующихся из мягкой мозговой оболочки, в области микроразрыва [28].

N. Larsen и соавт. (2020), а также T. Sato и соавт. (2019) было замечено, что при наличии тромбов может выявляться двухслойное контрастирование стенки аневризмы за счет визуализации накопления контрастного препарата по контуру тромба в просвете аневризмы и в стенке аневризмы, прилегающей к тромбу [29, 30].

Интересным с прогностической и диагностической точки зрения является феномен тонкого периферического контрастирования по всему контуру аневризматического мешка. Некоторые исследователи связывают это с воспалительными процессами в стенке аневризмы – инфильтрация макрофагами, лейкоцитами и тучными клетками в стенки аневризмы, а также процессом неоваскуляризации [29, 31].

Воспалительные клетки вызывают ремоделирование и разрушение стенки аневризмы, что может привести к ее разрыву [32]. В некоторых исследованиях выявляется корреляция между неоваскуляризацией и количеством тучных клеток, которые способствуют неоваскуляризации [33].

В исследовании, в котором для контрастирования стенки аневризмы использовался ферумокситол, D. Hasan и соавт. (2012) выявили, что у 7 из 30 аневризм имело место выраженное раннее поглощение данного контрастного препара-

та. У этих 7 пациентов были клипированы 4 аневризмы, а 3 аневризмы лечились консервативно. Все 3 АА разорвались в течение 6 мес наблюдения. В 53% (16/30) аневризм наблюдалось выраженное поглощение ферумокситола через 72 ч. Из этой группы (16 человек) 8 аневризм были отсечены хирургическим путем и 8 лечились консервативно, при этом в последнем случае ни одна не разорвалась и не увеличилась в размерах через 6 мес. По мнению авторов, ранние изменения МР-сигнала, отмеченные на последовательности T2* градиентное эхо, вызваны повышенным поглощением наночастиц ферумокситола макрофагами, локализованными в стенках аневризмы, что предполагает развитие воспалительного процесса в стенке АА. Эта гипотеза была подтверждена гистологическими исследованиями, поскольку было обнаружено, что воспалительные клетки и молекулы (COX-2, mPGES-1 и макрофаги) значительно активированы в стенках аневризм, где соответственно отражаются ранними изменениями МР-характеристик [34].

Существует мнение о том, что макрофаги могут захватывать и гадолинийсодержащий МР-препарат. Однако в исследовании E. Weng и соавт. (2018), где такое воздействие на макрофаги контрастным препаратом осуществлялось в течение 24 ч, не выявлено данных проявлений [35].

E. Korkmaz и соавт. в 2017 г. обнаружили *vasa vasorum* в аблюминальных слоях сосудистой стенки как неразорвавшейся, так и разорвавшейся интракраниальной аневризмы [36]. Наличие явления гипоксии в стенке аневризмы предполагает развитие компенсаторного ангиогенеза, приводящего к прорастанию *vasa vasorum* в стенку артерии [37]. Хотя *vasa vasorum* присутствовали как в неразорвавшихся, так и в разорвавшихся интракраниальных аневризмах, ультраструктурный анализ этих микрососудов показал поразительную разницу. В разорвавшейся интракраниальной аневризме они демонстрируют наличие пор, которые, по-видимому, действуют как ворота для проникновения в стенку аневризмы воспалительных клеток. Эндотелиальная выстилка этих *vasa vasorum* имела гипертрофированный вид с неровной поверхностью и вакуолями на границах соседних эндотелиальных клеток. Это является признаком повышенной проницаемости эндотелия для циркулирующих липопротеинов, инфильтратов воспалительных клеток и эритроцитов и, возможно, служит в дальнейшем причиной нестабильности стенки интракраниальной аневризмы [36].

В нашем пилотном исследовании, проведенном в НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бур-

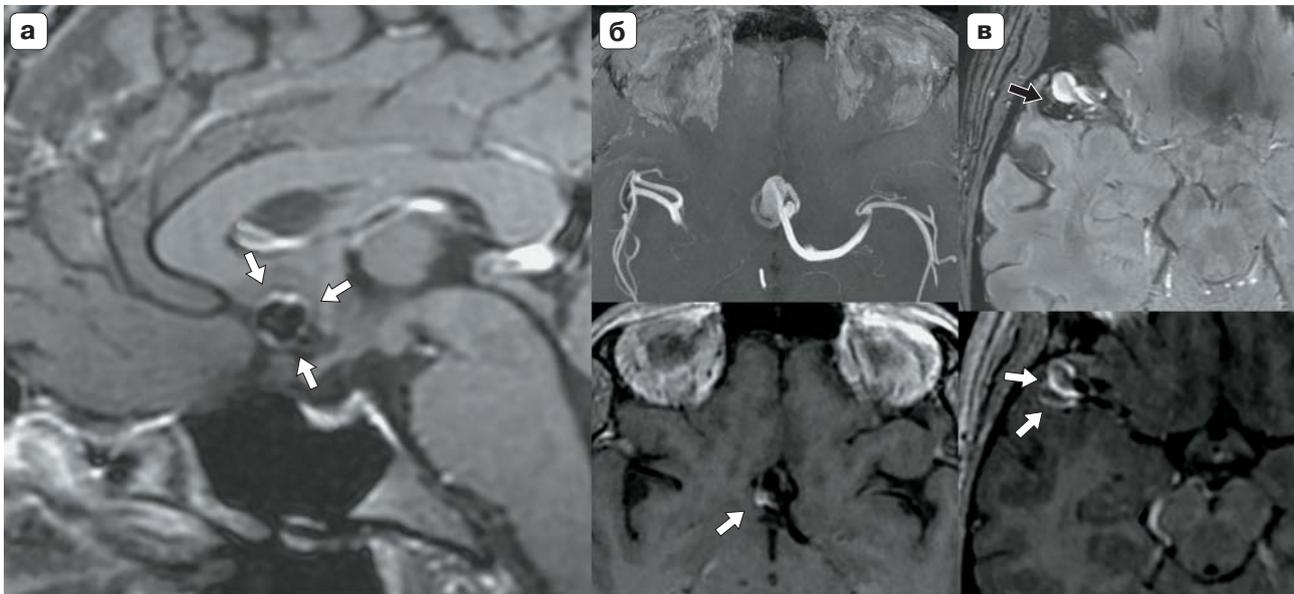


Рис. 2. Разные паттерны контрастирования интракраниальных аневризм. **а** – диффузное циркулярное контрастирование (белые стрелки); **б** – локальное контрастирование (белая стрелка) в пришеечной части аневризмы; **в** – двойное контрастирование (белые стрелки) аневризмы с пристеночным тромбом (черная стрелка).

Fig. 2. Different patterns of contrast enhancement of intracranial aneurysms. **a** – diffuse circular enhancement (white arrows); **б** – local enhancement (white arrow) in the cervical part of the aneurysm; **в** – double contrast enhancement (white arrows) of an aneurysm with parietal thrombus (black arrow).

денко, были также выявлены различные паттерны контрастирования стенки аневризмы, которые будут детально рассмотрены в наших дальнейших публикациях (рис. 2).

Современные литературные данные свидетельствуют о том, что визуализация сосудистой стенки потенциально может предоставить новые данные о патогенезе развития АА и предикторах их разрыва. Изучение и сбор рентгенологических данных разорвавшихся, неразорвавшихся, тромбированных аневризм, а также аневризм с воспалительными изменениями в стенке могут стать важным отправным пунктом в поиске и отборе неинвазивных биомаркеров нестабильности аневризмы. Использование современных диагностических технологий, в частности МРТ высокого разрешения с визуализацией сосудистой стенки, является перспективным направлением в области предоперационной диагностической сосудистой нейровизуализации.

Участие авторов

Семин К.С. – написание статьи, сбор данных.
Пронин И.Н. – редакция, дизайн исследования.
Элиава Ш.Ш. – редакция, дизайн исследования.
Коновалов А.Н. – написание статьи, сбор данных.
Баталов А.И. – редакция, дизайн исследования.
Захарова Н.Е. – редакция, дизайн исследования.

Authors' participation

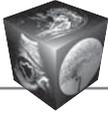
Semin K.S. – writing text, collection of data.
Pronin I.N. – editing, design of the study.
Eliava Sh.Sh. – editing, design of the study.
Konovalov A.N. – writing text, collection of data.
Batalov A.I. – editing, design of the study.
Zakharova N.E. – editing, design of the study.

Список литературы [References]

1. Etminan N., Chang H.S., Hackenberg K. et al. Worldwide Incidence of Aneurysmal Subarachnoid Hemorrhage According to Region, Time Period, Blood Pressure, and Smoking Prevalence in the Population: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Neurol.* 2019; 76 (5): 588–597. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2019.0006>
2. Robert J.S., Christopher S.O., Guy R. Unruptured intracranial aneurysms [media]. UpToDate Feb 11, 2020. Accessed December 21. https://www.uptodate.com/contents/unruptured-intracranial-aneurysms?search=Unruptured%20intracranial%20aneurysms&source=search_result&selectedTitle=1~150&usage_type=default&display_rank=1
3. Oppenheim C., Domigo V., Gauvrit J.Y. et al. Subarachnoid hemorrhage as the initial presentation of dural sinus thrombosis. *Am. J. Neuroradiol.* 2005; 26 (3): 614–617.
4. Vernooij M.W., Ikram M.A., Tanghe H.L. et al. Incidental findings on brain MRI in the general population. *N. Engl. J. Med.* 2007; 357 (18): 1821–1828. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa070972>
5. Rosi Junior J., Gomes dos Santos A., da Silva S.A. et al. Multiple and mirror intracranial aneurysms: study of



- prevalence and associated risk factors. *Br. J. Neurosurg.* 2021; 35 (6): 780–784.
<https://doi.org/10.1080/02688697.2020.1817849>
6. Kassell N.F., Torner J.C., Haley E.C. et al. The International Cooperative Study on the Timing of Aneurysm Surgery. Part 1: Overall management results. *J. Neurosurg.* 1990; 73 (1): 18–36. <https://doi.org/10.3171/jns.1990.73.1.0018>
 7. Schievink W.I. Intracranial aneurysms. *N. Engl. J. Med.* 1997; 336 (1): 28–40.
<https://doi.org/10.1056/NEJM199701023360106>
 8. Rosi J., Telles J.P.M., da Silva S.A. et al. Epidemiological analysis of 1404 patients with intracranial aneurysm followed in a single Brazilian institution. *Surg. Neurol. Int.* 2019; 10: 249. https://doi.org/10.25259/SNI_443_2019
 9. Thompson B.G., Brown R.D., Amin-Hanjani S. et al. Guidelines for the Management of Patients With Unruptured Intracranial Aneurysms: A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke.* 2015; 46 (8): 2368–2400. <https://doi.org/10.1161/STR.0000000000000070>
 10. Zhao J., Lin H., Summers R. et al. Current Treatment Strategies for Intracranial Aneurysms: An Overview. *Angiology.* 2018; 69 (1): 17–30.
<https://doi.org/10.1177/0003319717700503>
 11. Loh C., Vadera S. Charcot-Bouchard aneurysm [media]. *Radiopaedia.org.* 2015. Accessed January 2022.
<https://doi.org/10.53347/rid-40553>
 12. Kuo I., Long T., Nguyen N. et al. Ruptured intracranial mycotic aneurysm in infective endocarditis: A natural history. *Case Rep. Med.* 2010; 2010: 168408.
<https://doi.org/10.1155/2010/168408>
 13. Bohmfalk G.L., Story J.L., Wissinger J.P. et al. Bacterial intracranial aneurysm. *J. Neurosurg.* 1978; 48 (3): 369–382. <https://doi.org/10.3171/jns.1978.48.3.0369>
 14. Wang X., Chen G., Li M. et al. Rapid formation and rupture of an infectious basilar artery aneurysm from meningitis following suprasellar region meningioma removal: A case report. *BMC Neurol.* 2020; 20 (1).
<https://doi.org/10.1186/s12883-020-01673-9>
 15. Tambuzzi S., Boracchi M., Maciocco F. et al. Fungal aneurism of the right posterior inferior cerebellar artery (PICA). *Med. Mycol. Case Rep.* 2019; 26: 25–27.
<https://doi.org/10.1016/j.mmcr.2019.09.004>
 16. Mocco J., Brown R.D., Torner J.C. et al. Aneurysm morphology and prediction of rupture: An international study of unruptured intracranial aneurysms analysis. *Neurosurgery.* 2018; 82 (4): 491–495.
<https://doi.org/10.1093/neuros/nyx226>
 17. Lee U.Y., Jung J., Kwak H.S. et al. Wall shear stress and flow patterns in unruptured and ruptured anterior communicating artery aneurysms using computational fluid dynamics. *J. Korean Neurosurg. Soc.* 2018; 61 (6): 689–699. <https://doi.org/10.3340/jkns.2018.0155>
 18. Shiba M., Ishida F., Furukawa K. et al. Relationships of Morphologic Parameters and Hemodynamic Parameters Determined by Computational Fluid Dynamics Analysis with the Severity of Subarachnoid Hemorrhage. *J. Neuroend. Ther.* 2017; 11 (10): 512–519.
<https://doi.org/10.5797/jnet.0a.2016-0099>
 19. Rajabzadeh-Oghaz H., van Ooij P., Veeturi S.S. et al. Inter-patient variations in flow boundary conditions at middle cerebral artery from 7T PC-MRI and influence on Computational Fluid Dynamics of intracranial aneurysms. *Comput. Biol. Med.* 2020; 120: 103759.
<https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.103759>
 20. Murray C.D. The physiological principle of minimum work applied to the angle of branching of arteries. *J. Gen. Physiol.* 1926; 9 (6): 835–841.
 21. Majigsuren M., Abe T., Kageji T. et al. Comparison of brain tumor contrast-enhancement on t1-cube and 3d-sprg images. *Magn. Reson. Med. Sci.* 2016; 15 (1): 34–40.
<https://doi.org/10.2463/mrms.2014-0129>
 22. Hartman J.B., Watase H., Sun J. et al. Intracranial aneurysms at higher clinical risk for rupture demonstrate increased wall enhancement and thinning on multicontrast 3D vessel wall MRI. *Br. J. Radiol.* 2019; 92 (1096). <https://doi.org/10.1259/bjr.20180950>
 23. Lv N., Karmonik C., Chen S. et al. Relationship between Aneurysm Wall Enhancement in Vessel Wall Magnetic Resonance Imaging and Rupture Risk of Unruptured Intracranial Aneurysms. *Neurosurgery.* 2019; 84 (6): E385–E391. <https://doi.org/10.1093/neuros/nyy310>
 24. Omodaka S., Endo H., Niizuma K. et al. Circumferential wall enhancement on magnetic resonance imaging is useful to identify rupture site in patients with multiple cerebral aneurysms. *Neurosurgery.* 2018; 82 (5): 638–644.
<https://doi.org/10.1093/neuros/nyx267>
 25. Wang G.X., Wen L., Lei S. et al. Wall enhancement ratio and partial wall enhancement on MRI associated with the rupture of intracranial aneurysms. *J. Neurointerv. Surg.* 2018; 10 (6): 569–573.
<https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2017-013308>
 26. Matsushige T., Shimonaga K., Mizoue T. et al. Lessons from vessel wall imaging of intracranial aneurysms: New era of aneurysm evaluation beyond morphology. *Neurol. Med. Chir.* 2019; 59 (11): 407–414.
<https://doi.org/10.2176/nmc.ra.2019-0103>
 27. Frösen J., Piippo A., Paetau A. et al. Remodeling of saccular cerebral artery aneurysm wall is associated with rupture: Histological analysis of 24 unruptured and 42 ruptured cases. *Stroke.* 2004; 35 (10): 2287–2293.
<https://doi.org/10.1161/01.STR.0000140636.30204.da>
 28. Медведев Ю.А., Мацко Д.Е. Аневризмы и пороки развития сосудов головного мозга. Этиология. Патогенез. Классификация. Патологическая анатомия: РНХИ, 1993. Medvedev Yu.A., Matsko D.E. Aneurysms and malformations of cerebral vessels. Etiology. Pathogenesis. Classification. Pathological anatomy: RNHI, 1993. (In Russian)
 29. Larsen N., Flüh C., Saalfeld S. et al. Multimodal validation of focal enhancement in intracranial aneurysms as a surrogate marker for aneurysm instability. *Neuroradiology.* 2020; 62 (12): 1627–1635.
<https://doi.org/10.1007/s00234-020-02498-6>
 30. Sato T., Matsushige T., Chen B. et al. Wall contrast enhancement of thrombosed intracranial aneurysms at 7T MRI. *Am. J. Neuroradiol.* 2019; 40 (7): 1106–1111.
<https://doi.org/10.3174/ajnr.A6084>
 31. Samaniego E.A., Roa J.A., Hasan D. Vessel wall imaging in intracranial aneurysms. *J. Neurointerv. Surg.* 2019; 11 (11): 1105–1112.
<https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2019-014938>
 32. Hoh B.L., Hosaka K., Downes D.P. et al. Stromal cell-derived factor-1 promoted angiogenesis and inflammatory cell infiltration in aneurysm walls: Laboratory investigation. *J. Neurosurg.* 2014; 120 (1): 73–86.
<https://doi.org/10.3171/2013.9.JNS122074>



33. Ollikainen E., Tulamo R., Frösen J. et al. Mast Cells, Neovascularization, and Microhemorrhages are Associated With Saccular Intracranial Artery Aneurysm Wall Remodeling. *J. Neuropathol. Exp. Neurol.* 2014; 73 (9): 855–864. <https://academic.oup.com/jnen/article/73/9/855/2917690>
34. Hasan D., Chalouhi N., Jabbour P. et al. Early change in ferumoxytol-enhanced magnetic resonance imaging signal suggests unstable human cerebral aneurysm: A pilot study. *Stroke.* 2012; 43 (12): 3258–3265. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.112.673400>
35. Weng T.I., Chen H.J., Lu C.W. et al. Exposure of Macrophages to Low-Dose Gadolinium-Based Contrast Medium: Impact on Oxidative Stress and Cytokines Production. *Contrast. Media Mol. Imaging.* 2018; 2018:3535769. <https://doi.org/10.1155/2018/3535769>
36. Korkmaz E., Kleinloog R., Verweij B.H. et al. Comparative ultrastructural and stereological analyses of unruptured and ruptured saccular intracranial aneurysms. *J. Neuropathol. Exp. Neurol.* 2017; 76 (10): 908–916. <https://doi.org/10.1093/jnen/nlx075>
37. Hickey M.M., Simon M.C. Regulation of Angiogenesis by Hypoxia and Hypoxia-Inducible Factors. *Curr. Top. Dev. Biol.* 2006; 76: 217–257. [https://doi.org/10.1016/S0070-2153\(06\)76007-0](https://doi.org/10.1016/S0070-2153(06)76007-0)

Для корреспонденции*: Семин Кирилл Сергеевич – тел. +7-916-586-49-88. E-mail: kirillsemin1@rambler.ru

Семин Кирилл Сергеевич – аспирант отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-1897-9312>. E-mail: kirillsemin1@rambler.ru

Пронин Игорь Николаевич – академик РАН, доктор мед. наук, профессор НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>. E-mail: pronin@nsi.ru

Элиава Шалва Шалвович – доктор мед. наук, профессор, заведующий отделением сосудистой нейрохирургии НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-6103-9329>. E-mail: eliava@nsi.ru

Коновалов Антон Николаевич – канд. мед. наук, младший научный сотрудник, врач-нейрохирург НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-0932-4752>. E-mail: Ankonovalov@nsi.ru

Баталов Артем Игоревич – канд. мед. наук, младший научный сотрудник, врач-рентгенолог рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>. E-mail: abatalov@nsi.ru

Захарова Наталья Евгеньевна – доктор мед. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, врач-рентгенолог рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>. E-mail: nzakharova@nsi.ru

Contact*: Kirill S. Semin – phone: +7-916-586-49-88. E-mail: kirillsemin1@rambler.ru

Kirill S. Semin – post-graduate student Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Healthcare of Russia, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-1897-9312>. E-mail: kirillsemin1@rambler.ru

Igor N. Pronin – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Healthcare of Russia, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-4480-0275>. E-mail: pronin@nsi.ru

Shalva Sh. Eliava – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the neurovascular Department N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Healthcare of Russia, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-6103-9329>. E-mail: eliava@nsi.ru

Anton N. Konovalov – Cand. of Sci. (Med.), neurosurgeon of the neurovascular Department, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Healthcare of Russia, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-0932-4752>. E-mail: Ankonovalov@nsi.ru

Artem I. Batalov – Cand. of Sci. (Med.), researcher of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Healthcare of Russia, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-8924-7346>. E-mail: abatalov@nsi.ru

Natalia E. Zakharova – Doct. of Sci. (Med.), Professor of Russian Academy of Science, professor of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Healthcare of Russia, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-0516-3613>. E-mail: nzakharova@nsi.ru