

Рисковый критерий роста малых церебральных аневризм

Д.В. Тихвинский¹, Д.С. Чутков¹, А.В. Бервицкий², М.В. Резакова³, А.А. Тулупов⁴,
Ю.А. Станкевич⁴, Д.В. Паршин¹

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15

² Федеральный центр нейрохирургии Минздрава России
630087, г. Новосибирск, ул. Немировича-Данченко, 132/1

³ Региональный сосудистый центр «Центральная клиническая больница»
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 25/1

⁴ Институт «Международный томографический центр» СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3а

Резюме

Церебральные аневризмы являются значимым заболеванием, которое может приводить как к инвалидизации пациента, так и к летальному исходу. Если в настоящее время достаточно хорошо развиваются технологии рискового анализа для средних по размеру и гигантских аневризм, то малые аневризмы исследованы достаточно слабо. При этом до 30 % всех разрывов фиксируется именно по средним и малым аневризмам. Целью нашей работы было построение модели предсказания роста малых аневризм на основе динамического анализа их морфологических и гемодинамических характеристик. **Материал и методы.** Выполнен динамический рисковый анализ роста малых церебральных аневризм для группы пациентов одного клинического центра по данным компьютерно-томографической ангиографии. Кроме измерения динамики морфологии аневризм, также выполнена реконструкция сосудистого дерева в программе ITK Snap и рассчитана церебральная гемодинамика для 19 пациентов в программном комплексе ANSYS CFX 2020R2. **Результаты и их обсуждение.** В ходе исследования получен массив данных долгосрочного наблюдения за пациентами с малыми церебральными аневризмами, на его основе построена модель логистической регрессии, которая показала площадь под ROC-кривой 0,8. Пополнение выборки обследованных пациентов позволит улучшить показатели модели, что делает ее адекватной для клинического применения. **Заключение.** Представлены уникальные данные о длительном наблюдении пациентов с малыми аневризмами. Построенная модель показала свою перспективность при условии расширения выборки пациентов.

Ключевые слова: церебральная аневризма, рисковый анализ, регрессионный анализ, малые аневризмы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Министерства образования и науки РФ № FWGG-2021-0009.

Благодарности. Ю.А. Станкевич, А.А. Тулупов благодарят Министерство науки и высшего образования РФ за доступ к компьютерно-томографическому оборудованию Международного томографического центра СО РАН

Автор для переписки. Тихвинский Д.В., e-mail: d.tikhvinskii@g.nsu.ru

Для цитирования. Тихвинский Д.В., Чутков Д.С., Бервицкий А.В., Резакова М.В., Тулупов А.А., Станкевич Ю.А., Паршин Д.В. Рисковый критерий роста малых церебральных аневризм. *Сиб. науч. мед. ж.* 2026;46(1):165–175. doi: 10.18699/SSMJ20260115

The risk criterion for the growth of small cerebral aneurysms

D.V. Tikhvinskii¹, D.S. Chutkov¹, A.V. Bervitskiy², M.V. Rezakova³, A.A. Tulupov⁴,
Yu.A. Stankevich⁴, D.V. Parshin¹

¹ *Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS
630090, Novosibirsk, Akademika Lavrentieva ave., 15*

² *Federal Neurosurgical Center of Minzdrav of Russia
630087, Novosibirsk, Nemirovicha-Danchenko st., 132/1*

³ *Regional Vascular Center "Central Clinical Hospital"
630090, Novosibirsk, Pirogova st., 25/1*

⁴ *International Tomography Center of SB RAS
630090, Novosibirsk, Institutskaya st., 3a*

Abstract

Cerebral aneurysms are a significant disease that can lead to both disability of the patient and death. Despite the fact that risk analysis technologies for medium-sized and giant aneurysms are currently developing quite well, small aneurysms have been poorly studied. At the same time, up to 30 % of all aneurysm ruptures are recorded specifically for medium and small aneurysms. The aim of our work was to build a model for predicting the growth of small aneurysms based on a dynamic analysis of their morphological and hemodynamic characteristics. **Material and methods.** A dynamic risk analysis of the growth of small cerebral aneurysms was performed for a group of patients from one clinical center according to computed tomography angiography. In addition to measuring the dynamics of aneurysm morphology for the studied patients, vascular tree reconstruction was also performed in the ITK Snap program and cerebral hemodynamics was calculated for 19 patients in the ANSYS CFX 2020R2 software package. **Results and discussion.** During the study, an array of long-term follow-up data was obtained for patients with small cerebral aneurysms. Based on it, a logistic regression model was built, which showed area under the curve 0.8. Replenishment of the sample of examined patients will improve the performance of the model, which makes it adequate for clinical use. **Conclusions.** The unique data on long-term follow-up of patients with small aneurysms are presented, and the constructed model has shown its promise provided that the sample of patients is expanded

Key words: cerebral aneurysm, risk analysis, regression analysis, small aneurysms.

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

Financing. The work was carried out with the financial support of the project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. FWGG-2021-0009

Acknowledgments. Yu.A. Stankevich, A.A. Tulupov thank the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for access to the computed tomography scanner of the International Tomography Center of SB RAS

Correspondence author. Tikhvinskii D.V., e-mail: d.tikhvinskii@g.nsu.ru

Citation. Tikhvinskii D.V., Chutkov D.S., Bervitskiy A.V., Rezakova M.V., Tulupov A.A., Stankevich Yu.A., Parshin D.V. The risk criterion for the growth of small cerebral aneurysms. *Sibirskij nauchnyj medicinskij zhurnal = Siberian Scientific Medical Journal*. 2026;46(1):165–175. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20260115

Введение

По данным всемирного агентства здравоохранения, церебральные аневризмы можно относить к социально значимым заболеваниям, приводящим к инвалидизации или даже смерти пациента [1]. Статистика говорит о том, что церебральные аневризмы встречаются в среднем у 2–5 % взрослого населения, что зависит от пола [2], возраста [3], расовых [4, 5] и генетических [6] особенностей, а также могут возникать вследствие травмы [7] или системных расстройств организма [8]. При этом давно известно о статистической значимости размера аневризмы как фактора ее роста и разрыва [9]. Однако следует отметить, что, хотя крупные аневризмы имеют высокий риск разрыва, все же большое число

разорвавшихся аневризм являются малыми (до 3,5 мм) [10].

Если исследованию рисков особенностей средних и гигантских аневризм посвящено множество статей, как в области морфологического анализа [11], так и в области анализа гемодинамических характеристик [12], то для малых аневризм эта ниша остается почти пустой и вопрос рискованного прогнозирования роста и разрыва малых церебральных аневризм остается открытым. Основной причиной тому является, во-первых, недостаточно развитый на сегодняшний день механизм визуализации сосудистого русла – магнитно-резонансные и компьютерные томографы (КТ) с высоким разрешением только начинают получать массовое распространение, а погрешность в 1 мм является достаточно большой для

оценки динамики объекта величиной до 3,5 мм. Во-вторых, на сегодняшний день в принципе существует не так много пролонгированных исследований для групп с асимптомными церебральными аневризмами, что объясняет проблему набора достаточной статистической значимости критериев на выборке.

Существующие модели рискованного анализа роста и разрыва церебральных аневризм, такие как PHASES [11], не приспособлены для малых церебральных аневризм в силу специфики своей разработки и валидации (например, минимальный размер аневризмы, использующийся в анализе модели PHASES, равен 7 мм). Основная часть имеющихся на данный момент моделей рискованного анализа построена на анализе однократного сканирования большого количества пациентов, но не учитывает развитие аневризм в динамике. Поэтому существует необходимость в разработке более чувствительных критериев роста и разрыва малых церебральных аневризм.

Целью настоящего исследования была разработка регрессионной модели роста малой церебральной аневризмы на основе длительного наблюдения морфологических и гемодинамических параметров сосудов Виллизиевого круга.

Материал и методы

Выборка

В работу включались пациенты Федерального центра нейрохирургии (Новосибирск), все пациенты давали собственноручно подписанное согласие на участие в исследовании. Согласие этического комитета на его проведение получено в ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии» Минздрава России (протокол № 5 от 25 июня 2025 г.). Критерии включения в группу: наличие одной или нескольких малых церебральных аневризм, асимптомность аневризм. Критерии исключения: смерть (наличие данных только для одного состояния церебральной сосудистой сети), плохое качество данных о церебральной сосудистой сети. Первоначальная выборка пациентов состояла из 19 пациентов, для шести из которых не удалось восстановить 3D-конфигурацию сосудов Виллизиевого круга в виду плохого качества первичной ангиографии. Для семи пациентов исследованы два состояния морфологии и гемодинамики церебральной сосудистой сети (Наблюдения 1 и 2), для четырех – три состояния (Наблюдения 1–3), для одного – четыре состояния (Наблюдение 4) (рис. 1).

Мультиспиральное компьютерно-томографическое (МСКТ) исследование

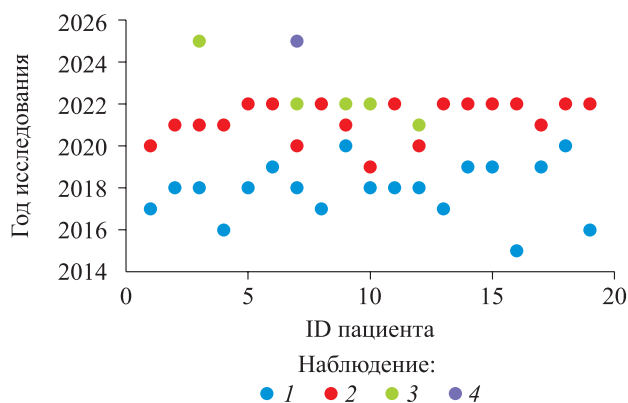


Рис. 1. Динамика КТ-исследований по годам для каждого пациента

Fig. 1. Dynamics of computed tomography studies by year for each patient

Морфологию церебральной сосудистой сети оценивали по результатам МСКТ-ангиографии. Первичный диагноз и наблюдательная тактика ведения пациентов, вошедших в выборку, определялись нейрорадиологами и нейрохирургами ФГБУ «Федеральный центр нейрохирургии» Минздрава России (ФЦН) г. Новосибирска. Дальнейшее наблюдение включало повторное выполнение МСКТ-ангиографии через 6 мес. с момента установки диагноза, через год и далее каждые три года при отсутствии динамики рентгенологической картины в амбулаторном порядке в ФГБУН Институт «Международный томографический центр» СО РАН (МТЦ) и в Региональном сосудистом центре на базе ГБУЗ НСО «Центральная клиническая больница» (РСЦ ЦКБ).

МСКТ-ангиография интра- и экстракраниальных артерий выполнялась на томографах Siemens SOMATOM Definition AS (Siemens, ФРГ) (128 срезов; ФЦН), Philips Ingenuity (Philips Medical Systems, США) (128 срезов; МТЦ), Philips Ingenuity Elite 128 (Philips Medical Systems, США, 128 срезов; РСЦ). Протокол сканирования был стандартизирован для вышеперечисленных томографов и учреждений. Перед исследованием в правую кубитальную вену устанавливался периферический венозный катетер (18/20G). После стандартной укладки и позиционирования пациента выполнялось планирование исследования по данным двух топограмм в прямой и боковой проекциях от уровня дуги аорты до контура мягких тканей теменной области. Обследования проводились с использованием контрастного препарата «Ультравист 370» (Bayer Schering Pharma, Германия) в объеме 60 мл и скоростью введения 4,5–5 мл/с, которое осуществлялось с помощью

автоматического шприца-инжектора. После детекции изменения порогового значения плотности по данным болюс-трекинга на уровне дуги аорты автоматически запускалось сканирование с каудокраниальным направлением с получением изображений толщиной среза 1 мм.

В течение суток после выполнения обследования пациенты получали заключения. По результатам МСКТ-ангиографии проводилась оценка наличия и количества аневризм, их локализации и соотношения с костными структурами, размеров (диаметр купола и шейки аневризмы) и формы, обызвествления стенки и пристеночных тромбов, анатомии Виллизиева круга, извитостей и сужений просветов брахиоцефальных артерий. Оценка динамики изменения морфологии аневризм выполнялась одним и тем же квалифицированным рентгенологом для всех наблюдений в течение всего периода исследования по ранее использованной методике [13] с точностью до 0,1 мм в программной среде IntelliSpace Portal. Измерялись следующие параметры аневризм: N (neck) – шейка, диаметр наиболее широкой части шейки аневризмы; H (height) – высота аневризмы, расстояние от шейки до наиболее удаленной части купола аневризмы, измеренное перпендикулярно диаметру шейки; W (width) – ширина аневризмы, диаметр аневризмы в наиболее широкой части, измеренный перпендикулярно высоте; D (diameter) – диаметр материнского сосуда аневризмы вблизи шейки, измеренный перпендикулярно направлению сосуда. В случае неправильной (неокруглой) конфигурации аневризмы делают два взаимоперпендикулярных измерения, отражающие больший и меньший диаметры.

Критерием роста аневризмы считали увеличение более чем на 0,4 мм минимум в одном измерении или более чем на 0,5 мм в двух измерениях, или явное изменение формы аневризмы [14]. В работах, посвященных рисковому критерию роста средних и гигантских аневризм, подобные критерии составляют 1–2 мм [15], что составляет для них в среднем 20 и 5 % соответственно, однако для малых аневризм, на наш взгляд, эта оценка слишком грубая, поскольку в таком случае критерием роста будет увеличение размеров аневризмы на 50 % и более.

Вычислительная гемодинамика

Для проведения персонализированного моделирования необходимо наличие релевантной геометрии сосудов пациента, содержащей интересующую область исследования: место локализации патологии и окрестные сосуды, которые наиболее подвержены влиянию локальных изменений кровотока. Геометрия такой области строится на

основе массива изображений в формате DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), полученного после прохождения пациентом КТ. Для реконструкции 3D-области используются, как правило, изображения, которые представляют собой набор снимков срезов головного мозга в аксиальной (поперечной плоскости тела) проекции. Специализированное программное обеспечение, такое как ITK-Snap (пакет для трехмерной сегментации медицинских изображений), выполняет их автоматическую сегментацию с заданными пользователем настройками, к числу которых относится диапазон контраста пикселей, позволяющий убрать лишние шумы с изображения и предотвратить попадание артефактов в итоговую геометрию. В итоге были получены 3D-конфигурации сосудов Виллизиева круга для всех пациентов, у кого КТ было хорошего качества.

Для каждой из построенных конфигураций в пакете ANSYS CFX 2020R2 (лицензия Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН) проведены численные расчеты без учета эффекта взаимодействия кровотока со стенкой артерии (задача с жесткими стенками). Для решения использована стандартная схема [16–18], реализованная в пакете ANSYS CFX 2020R2 [19]. Применена неструктурированная тетраэдрическая сетка, которая является «золотым стандартом» при расчетах гидродинамики областей течения с циркуляцией [19]. Для корректной реализации условий прилипания в численной постановке использован призматический слой ячеек вдоль стенок сосуда. Подобная постановка рекомендована для описания течения вязкой несжимаемой жидкости [19]. Для задания граничных условий на входных границах (inlet) Виллизиева круга пациентам был задан равномерный поток: во внутренние сонные артерии – с расходом 4,5 г/с, в базилярную (если она необходима) – с расходом 3,55 г/с [20]. Также на каждой выходной границе (outlet) задано условие типа «открытой границы» (opening), которое в случае возникновения рядом с ними вихрей позволяло жидкости свободно протекать обратно в конфигурацию. Давление на этих границах полагалось равным атмосферному. По результатам численного моделирования получали значения максимальной скорости в зоне аневризмы и максимальные значения касательного напряжения на стенке сосуда.

Статистический анализ

На основе полученных морфологических и гемодинамических параметров аневризм строилась модель предсказания роста аневризмы с использованием статистической модели логистической регрессии в программном пакете RStudio

Таблица 1. Морфологические характеристики аневризм пациентов, мм
 Table 1. Morphological characteristics of patients' aneurysms, mm

Пациент	Возраст, лет	Н				W				N				D			
		Наблюдение 1	Наблюдение 2	Наблюдение 3	Наблюдение 4	Наблюдение 1	Наблюдение 2	Наблюдение 3	Наблюдение 4	Наблюдение 1	Наблюдение 2	Наблюдение 3	Наблюдение 4	Наблюдение 1	Наблюдение 2	Наблюдение 3	Наблюдение 4
P1	35	8,5	9,5			5,3 г	6,0 г			2,4	2,8			2,5 × 2,3	2,3 × 2,4		
P2	66	5,4	5,3	5,3		4,6	4,6	4,8		3,1	3,0	3,1		3,4 × 3,3	3,4 × 3,5	3,8 × 3,9	
P3	66	2,1	1,9	2,0	2,0	1,8	2,1	2,2		2,1	2,4	2,9	2,9	4,1 × 4,0	4,1 × 4,1	4,3 × 4,1	4,3 × 4,4
P4	63	5,2	5,2			6,2	6,2			4,5	4,8			3,2 × 3,0	3,4 × 3,2		
P5	38		2,4	2,4			2,1	2,2			3,0	3,0			4,3 × 4,3	4,2 × 4,2	
P6	43	3,8	3,8			6,2 г	6,6 г			4,1	4,1			3,8 × 3,8	3,7 × 3,8		
P7	53	1,9	2,0	2,3	2,3	2,1	2,1	2,3		2,5	3,0	3,0	3,0	4,8 × 4,8	4,8 × 4,8	4,8 × 4,8	4,8 × 4,8
P8	39	1,7	1,7			2,3	2,2			2,6	2,6			3,6 × 3,8	3,6 × 3,8		
P9	54	3,2	3,5	3,6		3,5	3,5	4,3		3,0	3,0	3,0		2,3 × 2,4	2,4 × 2,4	2,4 × 2,5	
P10	59					5,0	5,1	5,2						4,0 × 2,9	3,9 × 2,8	4,0 × 3,2	
P11	68	1,6	1,6			1,9	1,9			2,4	2,3			4,9 × 5,0	4,8 × 5,0		
P12	63	1,7	1,8	2		2,0	2,7	2,7		3,2	3,9	3,9		5,3 × 5,3	5,2 × 5,2	5,2 × 5,2	
P13	69	3,2	3,2			4,2	4,2			5,1	5,4			4,3 × 4,4	4,3 × 4,4		
P14	61	1,5	1,5			1,5	1,5			2,3	2,4			4,3 × 3,9	4,4 × 3,8		
P15	74	4,7	5,2			4,7	4,7			3,1	3,0			2,9 × 2,9	2,9 × 3,0		
P16	71	23,0	15,1			18	20,3			17,0	8,5						
P17	76	11,0	11,3			10,1	10,1			4,0	4,0			3 × 4,9	3,3 × 4,7		
P18	67	4,9	4,9			6,1	6,2							3,3 × 3,4	3,3 × 3,3		
P19	61	2,2	2,0			2,1	2,1			1,9	2,8			4,3 × 4,5	4,3 × 4,1		

Таблица 2. Гемодинамические характеристики аневризм пациентов

Table 2. Hemodynamic characteristics of patients' aneurysms

Пациент	Максимальная скорость, м/с				Касательное напряжение на стенке, Па			
	Наблюде- ние 1	Наблюде- ние 2	Наблюде- ние 3	Наблюде- ние 4	Наблюде- ние 1	Наблюде- ние 2	Наблюде- ние 3	Наблюде- ние 4
P2	71,55	61,97	52,73		19,52	16,99	13,57	
P3	58,10	51,80	50,70		19,15	14,92	18,52	
P4	45,40	50,20			10,91	12,86		
P5	116,00	150,00			27,95	17,04		
P6	73,50	72,50			23,60	20,97		
P7	68,36	52,61	57,11	43,3	18,84	14,42	23,52	41,51
P8	99,45	68,23			26,68	16,63		
P9	53,20	52,40	51,05		27,41	25,72	23,44	
P10	110,02	108,70	125,00		61,14	47,1	56,81	
P11	64,11	66,48			19,90	18,32		
P12		40,60	50,50			5,78	8,68	
P13	22,60	67,30				3,13	17,35	

на языке R версии 4.5.1. Первая итерация модели включала в себя анализ параметров для Наблюдения 1 и Наблюдения 2, а также возраст (аналогично модели PHASES [11]) и параметры изменения максимальной скорости и максимального значения касательного напряжения на стенке в зоне аневризмы в качестве регрессоров. Финальная версия включает в себя и Наблюдение 3, и Наблюдение 4, а также были добавлены параметры изменения размеров шейки аневризмы и диаметра материнского сосуда (аналогично работе [21]) в качестве регрессоров. Для регрессионного анализа выбирались пациенты только с полным набором данных (морфология и гемодинамика).

Результаты

По результатам измерений морфологических характеристик аневризм пациентов в динамике (табл. 1) и проведения численных расчетов, результаты которых представлены в табл. 2, получен массив данных долгосрочного наблюдения за пациентами с малыми церебральными аневризмами (пример см. на рис. 2). Модель прогноза роста аневризмы основана на данных, представленных в табл. 1 и 2. ROC-кривые первой итерации и финальной версии модели приведены на рис. 3, из которого видно, что площадь величина AUC уве-

личилась с 0,65 до 0,8, а коэффициенты регрессионной модели стали одного порядка по сравнению с моделью первой итерации. Это означает, что увеличение выборки вместе с добавлением в модель параметров изменения диаметра шейки аневризмы и изменения диаметров материнских сосудов улучшило качество прогнозирования роста аневризмы. Тем не менее полученные результаты измерения морфологических параметров указывают на отсутствие явных показаний к госпитализации пациентов, согласно, например, шкале PHASES [11]. На текущем этапе статистическая значимость модели прогноза роста аневризмы не достигнута (для всех коэффициентов регрессии $p > 0,05$). Увеличение выборки хотя бы до 90–120 пациентов [21], в зависимости от количества этапов измерения для каждого из них, позволит достигнуть статистической значимости для данной настройки логистической регрессии.

Обсуждение

Как упомянуто выше, малые церебральные аневризмы остаются одной из наименее исследованных церебральных сосудистых патологий, а разработка рискованных критериев для них приносит все больше и больше противоречащих друг другу результатов [22]. Все же, несмотря на тех-

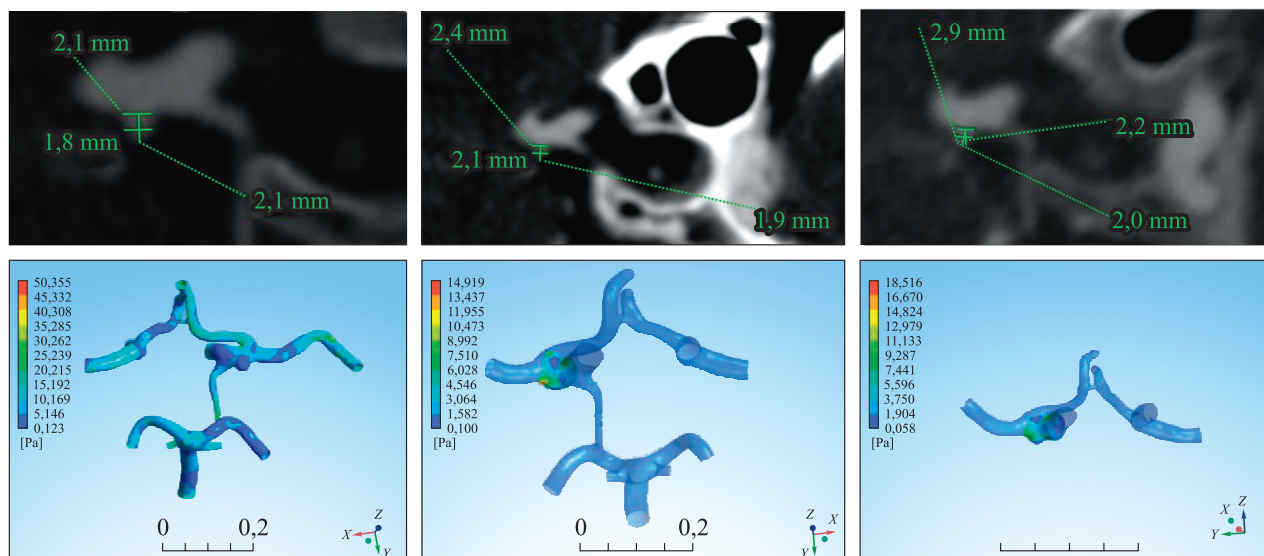


Рис. 2. Результаты измерений морфологических характеристик и данные численных расчетов на примере Пациента P3: верхний ряд – измерение размеров аневризмы, нижний ряд – результаты численного моделирования течения крови, слева направо – исходное состояние (Base-line), первое контрольное наблюдение (Follow Up), повторное контрольное наблюдение (Follow Up-1)

Fig. 2. The results of measurements of morphological characteristics and numerical calculations using the example of Patient P3: upper row - measurement of aneurysm size, lower row - results of numerical modeling of blood flow, from left to right - Base-line, Follow Up, Follow Up-1

нические сложности, в этой области существует определенный прогресс. Например, благодаря развитию методики визуализации становится возможным использование данных о толщине стенки аневризмы и материнской артерии для расчета рисков индексов церебральных аневризм [23]. А применение машинного обучения для автоматической сегментации области течения [24] позволяет существенно увеличить предсказательную способность моделей рискованного анализа роста и разрыва церебральных аневризм. Между тем гемодинамические характеристики в большей части принимаются во внимание все же для какого-то конкретного состояния аневризмы, что, по нашему опыту [13], не дает полноценных оснований заявлять о росте или о стабилизации аневризмы.

Множество работ по данной тематике по-прежнему посвящены исследованию статистической значимости сложных комплексов морфологических и гидродинамических параметров [25–27]. Кроме того, абсолютно все подобные работы рассматривают одно конкретное состояние сосудистой сети пациента, не учитывая динамику. Однако, по нашему мнению, будущее анализа риска разрыва аневризм за простыми классификационными моделями, которые, например,

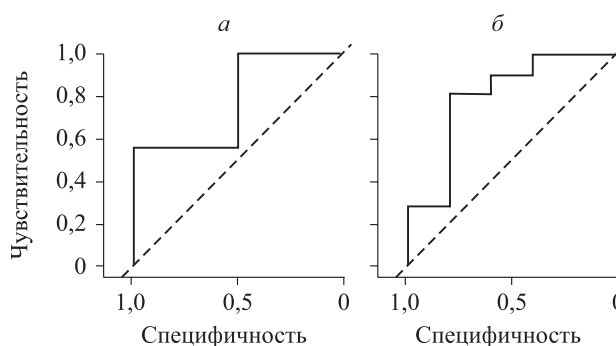


Рис. 3. ROC-кривые для первой итерации (а) и финальной версии модели роста аневризмы (б)

Fig. 3. The ROC curve for the first iteration (a) and for the final version of the aneurysm growth model (b)

стратифицируют риски возникновения аневризм в определенных местах внутричерепных артерий [28] или основаны на идеализированных подходах к оценкам геометрии [29], гемодинамики церебральных аневризм [30]. Такие подходы призваны уловить главные эффекты рассматриваемой патологии и минимальным образом учи-

тывают данные конкретного пациента, которые следует, на наш взгляд, использовать в валидационных целях для проверки разработанных математических и численных предиктивных моделей.

В основном работы, посвященные длительному наблюдению за протекающим заболеванием, являются сугубо медицинскими, в них рассматривается влияние лекарственных средств на процесс лечения аневризм [31], изменение техник скрининга аневризм [32] и влияние аневризм на качество жизни [33]. Исследования с продолжительным мониторингом морфологических и гемодинамических параметров практически отсутствуют. Главной новизной настоящей работы является то, что в ней представлены морфологические и гемодинамические параметры когорты реальных пациентов в динамике. Данные изменения морфологических характеристик укладываются в результаты статистического анализа, опубликованного в 2025 г. [34]: на временном отрезке в 20–40 месяцев в нашей когорте, согласно принятой медицинской трактовке, произошел рост аневризмы для четырех пациентов. Литературных данных по изменению гемодинамических параметров для сопоставления с полученными результатами найти не удалось.

Феномен изменения диаметра материнского (несущего) сосуда можно считать реальным анатомическим. Даже небольшие изменения углов могут приводить к существенной перестройке течения и перераспределению гемодинамической нагрузки и, как следствие, ремоделированию стенки и изменению диаметра материнской артерии. Феномен изменения конфигурации и просвета материнской артерии зафиксирован и анализируется в работах по изучению не только предикторов роста и разрыва аневризм [34], но и изменений гемодинамики после эндоваскулярного лечения аневризм [35]. Полученный результат показывает важность учета динамики морфологических показателей малых церебральных аневризм для построения моделей рискованного анализа.

К безусловным ограничениям настоящей работы следует отнести малую выборку, неравномерное качество ангиографии на первом наблюдении у некоторых пациентов, ошибку оператора при измерениях морфологических характеристик аневризм и материнских сосудов, погрешности при восстановлении 3D-конфигураций сосудов Виллизиевого круга, а также ограничения модели логистической регрессии, в том числе ее статистическую устойчивость.

Заключение

На группе добровольцев с малыми церебральными аневризмами разработана математическая модель прогноза их роста. Модель показывает недостаточно высокую точность для ее непосредственного клинического применения, однако является первой в мире для аневризм подобного размера и основана на их динамическом наблюдении. Показано, что с увеличением размера базы данных пациентов точность разработанной модели повышается, что делает ее перспективной для клинического применения. Представлены уникальные данные о длительном наблюдении пациентов с малыми аневризмами.

Список литературы / References

1. International Study of Unruptured Intracranial Aneurysms Investigators. Unruptured intracranial aneurysms – risk of rupture and risk of surgical intervention. *N. Engl. J. Med.* 1998;339:1725–1733. doi: 10.1056/NEJM199812103392401
2. Zuurbier C.C., Molenberg R., Mensing L.A., Wermer M.J., Juvela S., Lindgren A. E. Jääskeläinen J.E., Koivisto T., Yamazaki T., Uyttenboogaart M., Aalbers M.W., Morita A., Tominari S., Arai H., Nozaki K., Murayama Y., Ishibashi T., Takao H., Gondar R., Bijlenga P., Rinkel G.J.E., Greving J.P., Ruijgrok Y.M. Sex difference and rupture rate of intracranial aneurysms: an individual patient data meta-analysis. *Stroke.* 2022;53(2):362–369. doi: 10.1161/STROKEAHA.121.035187
3. Mahane K.B., Brown R.D., Meissner I., Piepgras D.G., Huston J., Zhang J., Torner J.C. Age-related differences in unruptured intracranial aneurysms: 1-year outcomes. *J. Neurosurg.* 2014;121(5):1024–1038. doi: 10.3171/2014.6.JNS121179
4. Чугунова С.А. Этнические особенности локализации аневризм сосудов головного мозга. *Неврол., нейропсихиатрия, психосоматика.* 2019;11(2):60–64. doi: 10.14412/2074-2711-2019-2-60-64
- Chugunova S.A. Ethnic characteristics of location for cerebral aneurysms. *Nevrologiya, neyropsikhiatriya, psikhosomatika = Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics.* 2019;11(2):60–64. [In Russian]. doi: 10.14412/2074-2711-2019-2-60-64
5. Becerril-Gaitan A., Mokua C., Liu C., Nguyen T., Shaker F., Nguyen J., Gusdon A.M., Brown R.J., Cochran J., Blackburn S., Chen P.R., Dannenbaum M., Choi H.A., Chen C.J. Racial and ethnic differences in mortality and functional outcomes following aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *Stroke.* 2024;55(6):1572–1581. doi: 10.1161/STROKEAHA.123.045489
6. Toader C., Eva L., Bratu B.-G., Covache-Busuioac R.-A., Costin H.P., Dumitrascu D.-I., Glavan L.A., Corlatescu A.D., Ciurea A.V. Intracranial

- aneurysms and genetics: An extensive overview of genomic variations, underlying molecular dynamics, inflammatory indicators, and forward-looking insights. *Brain Sci.* 2023;13(10):1454. doi: 10.3390/brainsci13101454
7. O'Brien Jr D., O'Dell M.W., Eversol A. Delayed traumatic cerebral aneurysm after brain injury. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 1997;78(8):883–885 doi: 10.1016/S0003-9993(97)90205-7
8. Can A., Castro V.M., Yu S., Dligach D., Finan S., Gainer V.S., Shadick N.A., Savova G., Murphy S., Cai T., Weiss S.T., Du R. Antihyperglycemic agents are inversely associated with intracranial aneurysm rupture. *Stroke.* 2018;49(1):34–39 doi: 10.1161/STROKEAHA.117.019249
9. Sanchez S., Miller J.M., Samaniego E.A. Clinical scales in aneurysm rupture prediction. *Stroke Vasc. Interv. Neurol.* 2024;4(1):e000625. doi: 10.1161/SVIN.123.000625
10. Lee G.J., Eom K.S., Lee C., Kim D.W., Kang S.D. Rupture of very small intracranial aneurysms: incidence and clinical characteristics. *J. Cerebrovasc. Endovasc. Neurosurg.* 2015;17(3):217–222. doi: 10.7461/jcen.2015.17.3.217
11. Greving J.P., Wermer M.J., Brown R.D. Jr., Morita A., Juvela S., Yonekura M., Ishibashi T., Torner J.C., Nakayama T., Rinkel G.J., Algra A. Development of the PHASES score for prediction of risk of rupture of intracranial aneurysms: a pooled analysis of six prospective cohort studies. *Lancet. Neurol.* 2014;13(1):59–66. doi: 10.1016/S1474-4422(13)70263-1
12. Neyazi B., Swiatek V.M., Skalej M., Beuing O., Stein K.P., Hattingen J., Preim B., Berg P., Saalfeld S., Sandalcioglu I.E. Rupture risk assessment for multiple intracranial aneurysms: why there is no need for dozens of clinical, morphological and hemodynamic parameters. *Ther. Adv. Neurol. Disord.* 2020;13:1756286420966159. doi: 10.1177/1756286420966159
13. Тихвинский Д.В., Куянова Ю.О., Бервицкий А.В., Обединская Н.Р., Тулупов А.А., Паршин Д.В. Динамическое наблюдение изменения морфологических и гемодинамических характеристик малых церебральных аневризм. *Комплекс. пробл. серд.-сосуд. заболевл.* 2023;12(1):172–180. doi: 10.17802/2306-1278-2023-12-1-172-180
- Tikhvinskii D.V., Kuyanov Yu.O., Bervitskiy A.V., Obedinskaya N.R., Tulupov A.A., Parshin D.V. Dynamic monitoring of morphological and hemodynamic evolution of small cerebral aneurysms. *Kompleksnye problemy serdechno-sosudistykh zabolevaniy = Complex Issues of Cardiovascular Diseases.* 2023;12(1):172–180. [In Russian]. doi: 10.17802/2306-1278-2023-12-1-172-180
14. Chien A., Liang F., Sayre J., Salamon N., Villablanca P., Viñuela F. Enlargement of small, asymptomatic, unruptured intracranial aneurysms in patients with no history of subarachnoid hemorrhage: the different factors related to the growth of single and multiple aneurysms. *J. Neurosurg.* 2013;119(1):190–197. doi: 10.3171/2013.3.JNS121469
15. Brinjikji W., Zhu Y.Q., Lanzino G., Cloft H.J., Murad M.H., Wang Z., Kallmes D.F. Risk factors for growth of intracranial aneurysms: a systematic review and meta-analysis. *AJNR Am. J. Neuroradiol.* 2016;37(4):615–620. doi: 10.3174/ajnr.A4575
16. Kuyanov Yu.O., Chupakhin A.P., Parshin D.V., Presnyakov S.S., Dubovoi A.V. Numerical study of the tee hydrodynamics in the model problem of optimizing the low-flow vascular bypass angle. *J. Appl. Mech. and Tech. Phys.* 2019;60(6):1038–1045. doi: 10.1134/S0021894419060087
17. Kuianova Iu.O., Dubovoy A.V., Parshin D.V. Towards the numerical assessment in solving the problem of the effectiveness of vascular anastomosis in neurosurgical operations. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1359:012085. doi: 10.1088/1742-6596/1359/1/012085
18. Tikhvinskii D., Kuianova J., Kislitsin D., Orlov K., Gorbatykh A., Parshin D. Numerical assessment of the risk of abnormal endothelialization for diverter devices: Clinical data driven numerical study. *J. Pers. Med.* 2022;12(4):652. doi: 10.3390/jpm12040652
19. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Canonsburg, 2006. Available at: <http://www.ansys.com/2006>
20. Zarrinkoob L., Ambarki K., Wählin A., Birgander R., Eklund A., Malm J. Blood flow distribution in cerebral arteries. *J. Cereb. Blood. Flow. Metab.* 2015;35(4):648–654. doi: 10.1038/jcbfm.2014.241
21. Bujang M.A., Sa'at N., Bakar T.M.I.T.A., Joo L.C. Sample size guidelines for logistic regression from observational studies with large population: emphasis on the accuracy between statistics and parameters based on real life clinical data. *Malays. J. Med. Sci.* 2018;25(4):122–130. doi: 10.21315/mjms2018.25.4.12
22. Swiatek V.M., Voss S., Sprenger F., Fischer I., Kader H., Stein K.P., Schwab R., Saalfeld S., Rashidi A., Behme D., Berg P., Sandalcioglu I.E., Neyazi B. Predictive modeling and machine learning show poor performance of clinical, morphological, and hemodynamic parameters for small intracranial aneurysm rupture. *Sci. Rep.* 2025;15(1):24051. doi: 10.1038/s41598-025-08478-1
23. Street S., Johnson M.D., Na J., Palmisciano P., Hoz S., Schaffer L., Shukla G., Grossman A., Smith M., Shirani P., Forbes J., Andaluz N., Dierker D., Prestigiacomo C.J. Validation of a mathematical model for rupture status of spherical intracranial aneurysms. *Cardiovasc. Eng. Technol.* 2025;16(4):400–409. doi: 10.1007/s13239-025-00782-1
24. Ru X., Zhang Z., Wang X., Liu J.Y., Zhu Y.C., Wu Z. automatic geometric quantification and rupture risk evaluation of 3D intracranial aneurysms. In: *2025 IEEE International Conference on Acoustics,*

Speech and Signal Processing. 2025;1–5. doi: 10.1109/ICASSP49660.2025.10888305

25. Nagy J., Fenz W., Thumfart S., Maier J., Major Z., Stefanits H., Gollwitzer M., Oberndorfer J., Stroh N., Giretzlehner M., Sonnberger M., Gruber A., Rauch P.-R., Gmeiner M. Fluid structure Interaction analysis for rupture risk assessment in patients with middle cerebral artery aneurysms. *Sci. Rep.* 2025;15(1):1965. doi: 10.1038/s41598-024-85066-9

26. Cui X., Zhao Y., Wang L., Jin Y., Yang Z., Li Y., Zhao Z., Zhang H., Wei K., Sun Z., Huai P., Chen L., Yang X. Prevalence, geometry, and hemodynamics of small and medium-sized intracranial aneurysms with and without blebs in the Chinese Han population. *J. Cent. Nerv. Syst. Dis.* 2025;17:11795735251364919. doi: 10.1177/11795735251364919

27. Tang Y., Wei H., Zhang Z., Fu M., Feng J., Li Z., Liu X., Wu Y., Zhang J., Chen T., You W., Xue R., Liu A., Zhuo Y., Jiang Y., Li Y., Li R., Liu P. Separate aneurysmal neck is essential for analyzing hemodynamics and predicting instability of intracranial aneurysms. *Ann. Med.* 2025;57(1):2539308. doi: 10.1080/07853890.2025.2539308

28. Aburto-Murrieta Y., Marquez-Romero J.M., Martínez-Arellano P., Serrano-Arias F.E., Montenegro-Rosales H.A., López-Mena D. Anatomical variations of the intracranial arteries and their association with intracranial aneurysms: Insights from digital subtraction angiographies. *Neuroradiol. J.* 2025;19714009251313516. doi: 10.1177/19714009251313516

29. Hume S, Tshimanga J.-M.I., Geoghegan P., Malan A.G., Ho W.H., Ngoepe M.N. Effect of pulsatility on the transport of thrombin in an idealized cerebral aneurysm geometry. *Symmetry*. 2022;14(1):133. doi: 10.3390/sym14010133

30. Nair P., Chong B.W., Indahlastari A., Lindsay J., DeJeu D., Parthasarathy V., Ryan J., Babiker H.,

Workman C., Gonzalez L.F., Frakes D. Hemodynamic characterization of geometric cerebral aneurysm templates. *J. Biomech.* 2016;49(11):2118–2126. doi: 10.1016/j.jbiomech.2015.11.034

31. Liu H., Feng W., Guan S., Li T., Mao G., Maimaitili A., Ma Y., Wang D., Ye M., Zhang H., Zhang P. Subgroup analysis of pipeline Flow-Diverter devices in the treatment of intracranial aneurysms: A long-term real-world study involving 190 patients. *Neurosurg. Rev.* 2025;48(1):1–8. doi: 10.1007/s10143-025-03830-5

32. Rinkel G.J., Ruigrok Y.M., Krings T., Etminan N., Vergouwen M.D. Advances in screening and management of unruptured intracranial aneurysms. *Lancet Neurol.* 2025;24(11):958–968. doi: 10.1016/S1474-4422(25)00265-0

33. Penchev P., Ivanov K., Milanova-Ilieva D., Gaydarski L., Kostov K., Boyadzhiev N., Petrov P.P., Mehandzhiev P., Hyusein R., Velchev V., Ilyov I., Kuzmanov V., Dzhikova G., Dobрева D., Toptchiyska L., Dimitrova V., Petrova V., Yorov S., Stanchev P., Gyulbaharov M., Husain N., Ramadanov N. Mental health and quality of life in patients with untreated unruptured intracranial aneurysms: A systematic review and meta-analysis of 417,152 patients with trial sequential analysis. *Brain Sci.* 2025;15(7):764. doi: 10.3390/brainsci15070764

34. Fattahi M., Abdollahi S.A., Alibak A.H., Hosseini S., Dang P. Influence of parent vessel feature on the risk of internal carotid artery aneurysm rupture via computational method. *Sci. Rep.* 2023;13(1):20544. doi: 10.1038/s41598-023-47927-7

35. Ma Y., Krepuska M., Madjidyar J., Schubert T., Thurner P., Kulcsar Z. Ongoing geometric remodeling of the parent artery after flow-diverter stent reconstruction in cerebral aneurysms: The device design matters. *World Neurosurg.* 2024;182:e597–e601.

Сведения об авторах:

Тихвинский Денис Вячеславович, ORCID: 0000-0001-8661-5345, e-mail: d.tikhvinskii@g.nsu.ru

Чутков Денис Сергеевич, ORCID: 0009-0007-6365-6823, e-mail: dench123456787@mail.ru

Бервицкий Анатолий Владимирович, ORCID: 0000-0001-9034-2212, e-mail: Dr.abervitskiy@gmail.com

Резакова Мария Викторовна, ORCID: 0000-0002-3976-8979, e-mail: m.rezakova@g.nsu.ru

Тулупов Андрей Александрович, д.м.н., проф., чл.-корр. РАН, ORCID: 0000-0002-1277-4113,
e-mail: taa@tomo.nsc.ru

Станкевич Юлия Александровна, к.м.н., ORCID: 0000-0002-7959-5160, e-mail: stankevich@tomo.nsc.ru

Паршин Даниил Васильевич, к.ф.-м.н., ORCID: 0000-0002-2496-3042, e-mail: danilo.skiman@gmail.com

Information about the authors:

Denis V. Tikhvinskii, ORCID: 0000-0001-8661-5345, e-mail: d.tikhvinskii@g.nsu.ru

Denis S. Chutkov, ORCID: 0009-0007-6365-6823, e-mail: dench123456787@mail.ru

Anatoliy V. Bervitskiy, ORCID: 0000-0001-9034-2212, e-mail: Dr.abervitskiy@gmail.com

Mariya V. Rezakova, ORCID: 0000-0002-3976-8979, e-mail: m.rezakova@g.nsu.ru

Andrey A. Tulupov, doctor of medical sciences, professor, corresponding member of RAS,
ORCID: 0000-0002-1277-4113, e-mail: taa@tomo.nsc.ru

Yuliya A. Stankevich, candidate of medical sciences, ORCID: 0000-0002-7959-5160,
e-mail: stankevich@tomo.nsc.ru

Daniil V. Parshin, candidate of physical and mathematical sciences, ORCID: 0000-0002-2496-3042,
e-mail: danilo.skiman@gmail.com

Поступила в редакцию 03.09.2025

После доработки 23.11.2025

Принята к публикации 13.01.2026

Received 03.09.2025

Revision received 23.11.2025

Accepted 13.01.2026