

DOI: 10.7868/S2658655X26040092
УДК 616.13-073.756.8

Методическая статья

Новый доплерографический метод оценки сосудистого старения: жесткость аорты и церебральный кровоток

В.Р. Мкртчян^{1,*}, В.Д. Хайкин¹, Л.Г. Иванова²

¹Научно-практический психоневрологический центр им. Соловьева,
Москва, Российская Федерация

²Лечебно-реабилитационный центр Минэкономразвития России,
Москва, Российская Федерация

*E-mail: vrm1958@gmail.com

Аннотация. Жесткость аорты признана независимым предиктором сердечно-сосудистых событий и маркером раннего сосудистого старения. «Золотой стандарт» оценки – каротидно-феморальная скорость распространения пульсовой волны (кфСРПВ) – имеет существенные ограничения: необходимость доступа к паховой области, требование специального оборудования с каналом ЭКГ и зависимость от оператора. Это затрудняет его широкое применение в клинической практике. В качестве решения предложен новый метод оценки кфСРПВ по аорте на основе анализа каротидной доплерограммы. Методика основана на измерении временного интервала между началом ранней систолической волны и отраженной пульсовой волны при ультразвуковом исследовании сонных артерий. Сравнительное исследование с участием 157 пациентов показало высокую корреляцию между новым методом и кфСРПВ ($r = 0,758$), при этом анализ по Бланду–Альтману подтвердил возможность взаимозаменяемости методов с поправочным коэффициентом 1,157. Важным преимуществом подхода является возможность одновременной оценки жесткости церебральных артерий и степени систолической нагрузки на них через анализ конечно-диастолической скорости и пульсаторного индекса на тех же доплерограммах. Метод интегрирован в рутинное ультразвуковое исследование брахиоцефальных артерий, обеспечивая комплексную оценку системной и церебральной гемодинамики без увеличения времени процедуры и дополнительного оборудования, что открывает перспективы для широкого скрининга сосудистого возраста.

Ключевые слова: жесткость аорты, скорость распространения пульсовой волны, раннее сосудистое старение, доплерография, церебральная гемодинамика, пульсаторный индекс

Финансирование. Исследование выполнено за счет бюджета Научно-практического психоневрологического центра им. Соловьева.

Соблюдение этических стандартов. Исследование проведено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации 1964 года и ее последующими

изменениями. Все процедуры, выполненные в настоящем исследовании, соответствуют этическим стандартам. От каждого из включенных в исследование участников было получено информированное добровольное согласие. Протокол исследования был одобрен Этическим комитетом Научно-практического психоневрологического центра им. Соловьева (протокол 74 от 3 ноября 2023 г.).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. ХВД – идея работы и планирование эксперимента; ХВД – сбор данных; ХВД, МВР, ИЛГ – обработка данных; ХВД, МВР, ИЛГ – написание и редактирование манускрипта.

Ссылка для цитирования: Мкртчян В.Р., Хайкин В.Д., Иванова Л.Г. Новый доплерографический метод оценки сосудистого старения: жесткость аорты и церебральный кровоток. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова / Russian Journal of Physiology.* 2026. Т. 112. № 4. С. 985–998. <https://doi.org/10.7868/S2658655X26040092>

DOI: 10.7868/S2658655X26040092

Methodological Article

A Novel Doppler Assessment of Vascular Aging: Integrating Aortic Stiffness and Cerebral Hemodynamics

V.R. Mkrтчyan^{1,*}, V.D. Khaikin¹, L.G. Ivanova²

¹*Solovyov Research and Clinical Center for Neuropsychiatry,
Moscow, Russian Federation*

²*Treatment and Rehabilitation Centre of the Ministry
of Economic Development of Russian Federation,
Moscow, Russian Federation*

*E-mail: vrm1958@gmail.com

Abstract. Aortic stiffness is recognized as an independent predictor of cardiovascular events and a marker of early vascular aging. The gold standard assessment method, carotid-femoral pulse wave velocity (cfPWV), has significant limitations: the necessity of access to the groin area, the requirement for specialized equipment with an ECG channel, and operator dependency. This complicates its widespread use in clinical practice. As a solution, a novel method for assessing aortic pulse wave velocity based on carotid Doppler waveform analysis has been proposed. The technique is based on measuring the time interval between the onset of the early systolic upstroke and the reflected pulse wave during an ultrasound examination of the carotid arteries. A comparative study involving 157 patients demonstrated a high correlation between the new method and cfPWV ($r = 0.758$), while Bland–Altman analysis confirmed the potential interchangeability of the methods with a correction factor of 1.157. A key advantage of the approach is the possibility of simultaneously assessing cerebral artery stiffness and the degree of systolic load on them through analysis of the end-diastolic flow velocity and pulsatility index from the same Doppler

waveforms. The method is integrated into a routine ultrasound examination of the brachiocephalic arteries, providing a comprehensive assessment of systemic and cerebral hemodynamics without increasing procedure time or requiring additional equipment, which opens prospects for large-scale vascular age screening.

Keywords: aortic stiffness, pulse wave velocity, early vascular aging, Doppler ultrasonography, cerebral hemodynamics, pulsatility index

Funding. The study was funded by the Solovyev Scientific and Clinical Psychoneurological Center.

Ethics declarations. The study was conducted in accordance with the principles of the 1964 Helsinki Declaration and its later amendments. All procedures performed in this study comply with ethical standards. Informed voluntary consent was obtained from each participant. The study protocol was approved by the Ethics Committee of the Solovyev Scientific and Clinical Psychoneurological Center (Protocol 74 dated November 3, 2023).

Conflict of interests. The authors declare no obvious or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Authors contribution. KhVD – concept of the study and experimental design; KhVD – data collecting; KhVD, MVR, ILG – data processing; KhVD, MVR, ILG – manuscript writing and editing.

For Citation: Mkrtchyan V.R., Khaikin V.D., Ivanova L.G. A novel Doppler assessment of vascular aging: integrating aortic stiffness and cerebral hemodynamics. *Rossiiskij fiziologicheskij zhurnal im. I.M. Sechenova / Russian Journal of Physiology.* 2026;112(4):985–998. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S2658655X26040092>

ВВЕДЕНИЕ

Эластичность магистральных артерий, в первую очередь аорты, является ключевым адаптационным механизмом, обеспечивающим эффективную демпфирующую функцию сохранения кинетики сердечного выброса, что позволяет провести пульсовую волну (ПВ) по артериальным стенкам вплоть до самых дистальных отделов артерий, сохранить стабильную перфузию органов, в том числе головного мозга.

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) остаются значимой проблемой мирового здравоохранения, ограничивая продолжительность активной жизни и снижая уровень здоровья. Примерно 70% случаев ССЗ обусловлены модифицируемыми факторами риска [1], что определяет большие потенциальные возможности для их коррекции.

Важнейшими патофизиологическими процессами и предикторами рисков ССЗ являются два основных склеротических процесса в артериях – атеросклероз и артериосклероз (повышение жесткости артерий) [2].

В процессе онтогенеза жесткость артериальной стенки закономерно увеличивается, что отражает общие закономерности старения организма. Однако в современных условиях этот процесс часто приобретает патологически ускоренный характер (феномен раннего сосудистого старения – EVA), что обуславливает его ключевую роль в развитии кардиоваскулярной патологии [3].

С физико-биохимической точки зрения повышение жесткости артерий является следствием структурных изменений всей толщи сосудистой стенки, главным образом меди, дегенерации ее эластической структуры, включая эластические волокна мышц и накопления коллагена I типа. Эти процессы обусловлены сложным каскадом биохимических реакций, включая хроническое воспаление, оксидативный стресс и нарушение функции эндотелия. В отличие от очагового атеросклероза, артериосклероз носит диффузный характер, затрагивая всю артериальную систему, и служит интегральным маркером ее «биологического возраста».

Аорта как центральный эластический резервуар и церебральные артерии, отвечающие за ауторегуляцию мозгового кровотока, представляют собой критически важные звенья одной системы. Повышение жесткости аорты приводит к увеличению скорости ПВ и усилению нагрузки на тонкорегулируемую сосудистую сеть головного мозга. Таким образом, комплексная оценка состояния обоих отделов необходима для понимания механизмов цереброваскулярных нарушений, ассоциированных со старением.

Во многих случаях в рутинной клинической практике отсутствие простых, быстрых и стандартизированных методов оценки жесткости артерий негативно сказывается на доступности и своевременности оказания медицинской помощи [4]. Так, имеются существенные ограничения измерения каротидно-фemorальной скорости распространения пульсовой волны (кфСРПВ) — «золотого стандарта» оценки жесткости. Метод требует доступа к паховой области, наличия специализированного оборудования (часто с каналом электрокардиограммы (ЭКГ) и сложен для стандартизации. Это создает барьер для его широкого использования как в клинической практике, так и в фундаментальных физиологических исследованиях, где необходим простой и воспроизводимый инструмент для динамических наблюдений [5].

Целью настоящего исследования стало сравнение ранее разработанного метода определения СРПВ по аорте (аоСРПВ) с «золотым стандартом» кфСРПВ и валидация нового экспресс-метода оценки жесткости аорты, основанного на анализе временных интервалов между прямой и отраженной ПВ на каротидной доплерограмме [6, 7].

Ключевой задачей было сопоставление этого метода с «золотым стандартом» (кфСРПВ). Основная гипотеза состояла в том, что параметры отраженной волны на сонных артериях несут информацию о жесткости аорты и могут быть использованы для ее надежной оценки. Важной отличительной чертой предлагаемого подхода является возможность его интеграции в рутинное ультразвуковое (УЗ) исследование, что позволяет одновременно оценивать как центральную гемодинамику (жесткость аорты), так и периферическую (пульсаторный индекс и диастолический кровотоков в церебральных артериях).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследование включались пациенты, проходившие стационарное лечение в Научно-практическом психоневрологическом центре им. З.П. Соловьева. Проведено одноцентровое сравнительное исследование. В качестве модели для валидации метода была выбрана когорта пациентов 18 лет и старше с пограничными психическими расстройствами ($n = 157$), поскольку данная группа характеризуется высокой распространенностью дисрегуляции вегетативного тонуса и ранних

доклинических изменений сосудистой функции, что представляет особый интерес для патофизиологии стресс-индуцированных состояний. Таким образом, выборка позволяет проверить метод в условиях, релевантных для изучения раннего сосудистого старения.

Критериями не включения были: наличие противопоказаний к проведению ультразвукового дуплексного исследования брахиоцефальных артерий; двигательное возбуждение на фоне психических нарушений; выраженное нарушение когнитивных функций дементного уровня.

Характеристика больных представлена в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика лиц, включенных в исследование

Table 1. Characteristics of individuals included in the study

Показатель	Значение
Средний возраст	59,65
Мужчины/Женщины	38/119
Наличие АГ	144
Тревожные расстройства	23
Депрессивные расстройства	17
Прочие пограничные психические расстройства	117

Стандартная методика кфСРПВ была реализована с использованием ультразвукового сканера Philips Epiq 7 с подключенным каналом ЭКГ и рассчитывалась по формуле $cfPWV = (Sf - Sc) / (Tf - Tc)$. Расстояние (Sf) измерялось от яремной вырезки до точки наложения датчика на бедренную артерию, Sc измерялось от яремной вырезки до точки наложения датчика на сонную артерию. Временные интервалы (Tc, Tf) определялись относительно зубца R ЭКГ. Методика соответствует современным консенсусным рекомендациям и позволяет оценить интегральную жесткость отрезка аорты между сонной и бедренной артериями.

Новый метод основан на анализе временной динамики ПВ в общей сонной артерии. Поздний систолический пик на каротидной доплерограмме соответствует волне, отраженной от дистальных бифуркаций аорты (рис. 1). При увеличении жесткости аорты скорость распространения волны увеличивается, что сокращает время между прямой (T1) и отраженной (T2) волнами.

Показатель СРПВ по аорте (аоСРПВ) рассчитывался с учетом области измерения по запатентованной нами формуле [6, 7] расчета СРПВ по аорте: $(L \times 2) / (T2 - T1)$, где T1 – время начала ранней систолической волны, T2 – время начала поздней систолической волны, L – расстояние от яремной вырезки грудины до локации измерения на бедренной артерии, данное расстояние соответствовало показателю Sf (L = Sf) в протоколе измерений расстояний для оценки кфСРПВ. Время начала ранней систолической волны отмечалось в точке начала систолического подъема доплерограммы, начало поздней систолической волны отмечалось в точке окончания снижения скорости потока крови ранней систолической волны

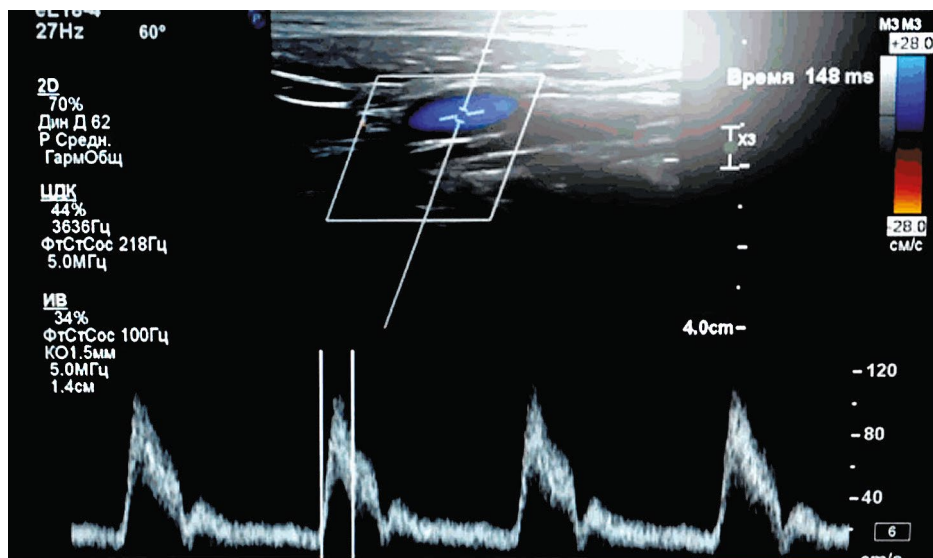


Рис. 1. Начало раннего и позднего систолических пиков на каротидной доплерограмме

Fig. 1. Onset of early and late systolic peaks in the carotid Doppler waveform

(«точка перегиба», после которой начинается нарастание скорости потока крови вплоть до пика поздней систолической волны).

В ряде публикаций одновременными измерениями установлено точное синхронное изменение временных параметров поздней систолической волны каротидной доплерограммы и давления отраженной аортальной ПВ по данным каротидной аппланационной тонометрии [8]. Такое одновременное измерение позволило убедительно продемонстрировать, что параметры отраженной волны на сонных артериях (скорость распространения, давление и пиковая скорость потока) определяются жесткостью аорты и ее ветвей, увеличиваются при прогрессировании склеротических процессов в аорте и тем самым увеличивают (амплифицируют) гемодинамическую перегрузку церебральных артерий, повышая цереброваскулярный риск [9].

Одновременно оценивали состояние дистального церебрального сосудистого русла двумя ключевыми доплерографическими показателями: пульсаторным индексом и конечной диастолической скоростью. Пульсаторный индекс (PI) рассчитывался автоматически по формуле $(PSV - EDV) / MV$, где PSV (peak systolic velocity, см/с) – максимальная систолическая скорость потока крови, а MV (mean velocity, см/с) – средняя скорость потока крови на протяжении всего кардиоцикла [10].

PI является суррогатным показателем, в который вносит вклад как сосудистое сопротивление церебральных артерий дистальнее места измерения, так и систолическая пульсовая нагрузка на данные артерии, определяемая уровнем пиковой систолической скорости потока. Его повышение интерпретируется как маркер увеличения жесткости и/или сопротивления мелких церебральных артерий. Конечная диастолическая скорость (EDV) отражает уровень периферического

перфузионного сопротивления церебральных резистивных сосудов и проходимость микрососудистого русла. Снижение EDV свидетельствует о повышении дистального сопротивления, что может быть следствием как структурных (артериосклероз), так и функциональных (вазоконстрикция) изменений.

Статистический анализ был нацелен на решение двух задач: 1) оценка силы связи между методами и 2) оценка степени их согласованности. Для оценки связи применялся корреляционный анализ Пирсона, так как распределение было нормальным. Для определения границ согласия между методами и выявления систематической ошибки использовался метод Бланда–Альмана. Анализ проводился с использованием Statistica 12 и GraphPadPrism 10 ($p < 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Следует подчеркнуть, что в исследуемой когорте, включавшей 157 пациентов со средним возрастом $59,7 \pm 14,8$ лет, с преобладанием женщин (75,8%), у подавляющего большинства участников (91,7%) была диагностирована артериальная гипертензия, что делает данную выборку релевантной для изучения сосудистого старения (табл. 1).

Средние показатели результатов измерения жесткости аорты методиками определения кфСРПВ и СРПВ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты средних показателей кфСРПВ и СРПВ

Table 2. Results of average values of cfPWV and PWV

Показатель	<i>n</i>	Единицы измерения	$M \pm \sigma$
кфСРПВ	157	м/с	$8,59 \pm 2,61$
СРПВ	157	м/с	$9,36 \pm 1,85$

Сравнение предложенного экспресс-метода оценки аортальной СРПВ с классическим измерением кфСРПВ выявило сильную положительную линейную зависимость. Корреляционный анализ по Пирсону показал высокодостоверный коэффициент $r = 0,758$ ($p < 0,001$), это свидетельствует о том, что оба метода регистрируют один и тот же базовый физиологический параметр – жесткость аорты (рис. 2).

Для определения возможности клинической взаимозаменяемости методов был применен анализ согласованности по Бланду–Альману (рис. 3). Анализ выявил систематическое смещение (Bias): показатели экспресс-метода в среднем на 0,77 м/с превышали значения кфСРПВ; 95%-ные границы согласия составили от $-4,11$ до $+2,58$ м/с.

Поскольку величина разброса увеличивалась с ростом значений СРПВ, был проведен дополнительный анализ процентного соотношения (рис. 4). Он показал более стабильную картину: систематическое смещение составило 10,57% с границами согласия от $-45,45\%$ до $+24,31\%$. Относительная стабильность ошибки across the scale позволяет компенсировать ее с помощью постоянного поправочного коэффициента.

Таким образом, результаты демонстрируют, что предложенный экспресс-метод обладает высокой степенью согласованности с «золотым стандартом» и может

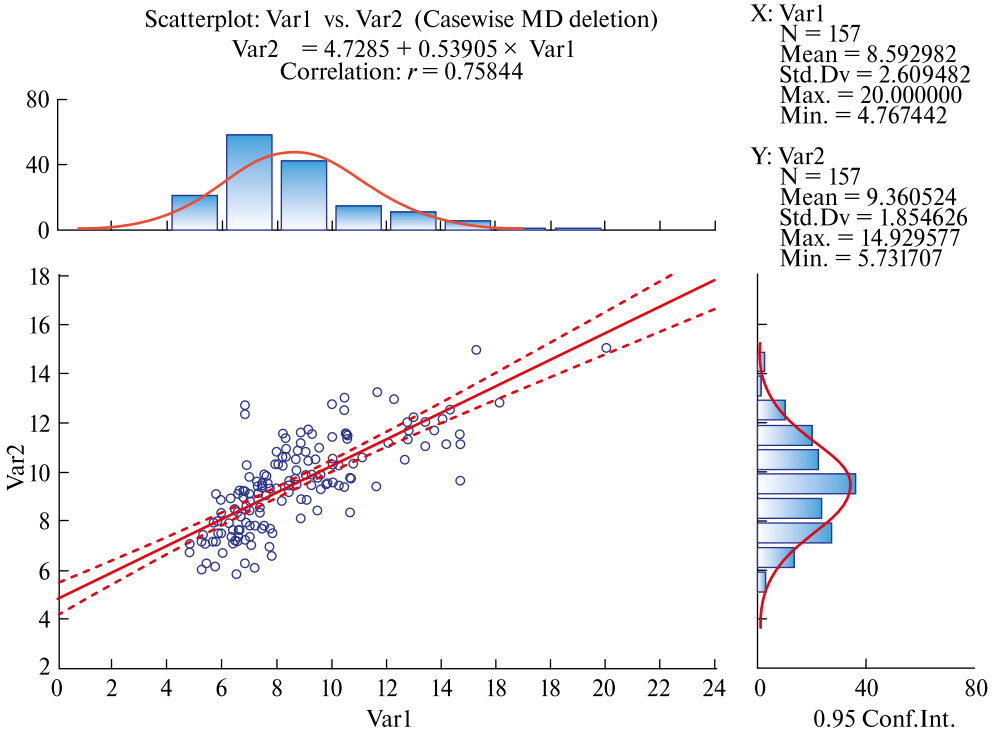


Рис. 2. Корреляция между кфСРПВ (VAR1) и аоСРПВ (VAR2)

Fig. 2. Correlation between cfPWV (VAR1) and aoPWV (VAR2)

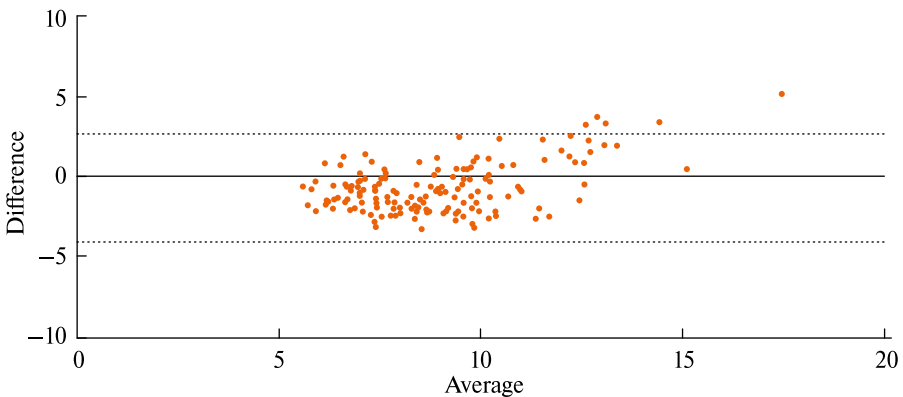


Рис. 3. Согласованность методов по Бланду–Альтману (абсолютные значения). Сплошная линия – среднее смещение (Bias = −0,77 м/с), пунктирные линии – 95%-ные границы согласия

Fig. 3. Agreement of the Bland–Altman methods (absolute values). The solid line – the mean bias (Bias = −0.77 m/s), the dashed lines – the 95% agreement limits

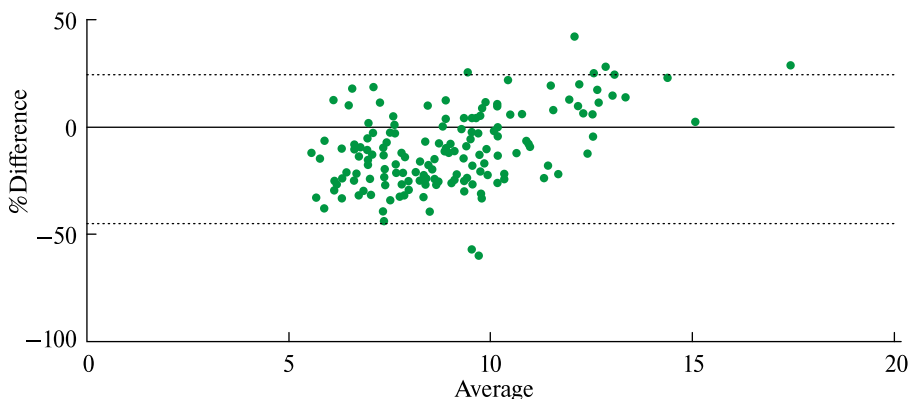


Рис. 4. Согласованность методов по Бланду–Альтману (процентная разность). Сплошная линия – среднее смещение ($Bias = -10,57\%$), пунктирные линии – 95%-ные границы согласия

Fig. 4. Agreement of the Bland–Altman methods (percentage difference). The solid line – the mean bias ($Bias = -10.57\%$), dashed lines – the 95% agreement limits

быть использован для оценки жесткости аорты после применения поправочного коэффициента 1,157.

Параллельно в рамках исследования были зарегистрированы средние значения PI в каротидном бассейне, который составил $1,714 \pm 0,353$, и EDV, равнявшаяся $21,316 \pm 6,097$ см/с. Полученные значения демонстрируют значительный разброс, отражающий гетерогенность состояния региональной жесткости церебрального сосудистого русла в исследуемой когорте.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Настоящее исследование демонстрирует, что жесткость аорты может быть с высокой достоверностью оценена с помощью анализа временных интервалов каротидной доплерограммы. Это подтверждает исходную гипотезу о том, что характеристики отраженной ПВ в сонных артериях несут информацию об упруго-эластических свойствах аорты. Принципиальная новизна предлагаемого подхода заключается в его способности интегрировать оценку системной (аортальной) и регионарной (церебральной) сосудистой жесткости в рамках единого, технически простого и быстрого измерения.

Выявленная сильная корреляция ($r = 0,758$) закономерна, поскольку оба метода – и кфСРПВ, и аоСРПВ – измеряют скорость распространения ПВ, которая физически определяется жесткостью сосудистой стенки. Обнаруженное систематическое смещение ($\sim 0,77$ м/с или $10,57\%$), вероятно, связано с фундаментальным различием в измеряемых путях: классический кфСРПВ оценивает скорость на отрезке «сонная-бедренная артерия», в то время как аоСРПВ оценивает скорость на пути «сердце – точка отражения – сонная артерия». Эта разница в физической модели, а не погрешность, и ее постоянный характер, подтвержденный анализом в процентах, позволяет нивелировать ее простым поправочным коэффициентом (1,157).

Необходимость упрощения оценки жесткости аорты определяется ключевой ролью данного показателя в оценке EVA и вероятности прогрессирования ССЗ, планировании лечения и профилактики не только у пациентов пожилого и старческого возраста, но и у молодых пациентов с высоким сердечно-сосудистым риском.

Необходимо также отметить, что некоторые другие экспресс-методы оценки аортальной СРПВ уже исследованы на различных популяциях с большим количеством испытуемых. Так, ряд авторов показал, что в течение 10 лет наблюдения в рамках международного проекта «Многонационального мониторинга тенденций и детерминант сердечно-сосудистых заболеваний» (MONICA) в парижской когорте пациентов с эссенциальной гипертонией без известных ССЗ скрининговый показатель – расчетная скорость ПВ (estimated pulse wave velocity, ePWV) может быть определен без каких-либо методик, только на основе расчетов, использующих возраст и среднее АД пациента в уравнении, полученном на основе использования результатов массового исследования значений артериальной жесткости традиционными методами [11].

В недавнем исследовании Liu K., Lin Z., Chen Y., Hong с соавт. использовали показатель ePWV в качестве потенциальной замены кфСРПВ [12]. АД испытуемым измерялось после 5 мин отдыха в положении сидя, после чего еще трехкратно с помощью стандартизированного сфигмоманометра. Итоговое значения усреднялось.

Проанализированы данные 48 257 участников в возрасте 20 лет и старше Национального исследования здоровья и питания (NHANES) с 1999 по 2018 гг. Авторы пришли к выводу о том, что повышенное значение ePWV независимо связано с повышенной смертностью от ССЗ у взрослых в США и демонстрирует значительную положительную корреляцию со смертностью от всех причин у взрослых в США, при превышении порогового значения ePWV, равного 8.267. Подробная информация о смертности была получена из Национального индекса смертности (NDI).

Показатель ePWV в данном исследовании рассчитывается по формуле [12]: $ePWV = 9,587 - 0,402 \times \text{age} + 4,560 \times 10^{-3} \times \text{age}^2 - 2,621 \times 10^{-5} \times \text{age}^2 \times \text{mean blood pressure (MBP)} + 3,176 \times 10^{-3} \times \text{age} \times \text{MBP} - 1,832 \times 10^{-2} \times \text{MBP}$, где измеряемыми показателями являлись возраст и среднее АД. MBP рассчитывалось, в свою очередь, по формуле: диастолическое АД + 0,4 × (систолическое АД – диастолическое АД).

Анализируя результаты использования экспресс-методик оценки артериальной жесткости, нужно обращать внимание, прежде всего, на измеряемые параметры. Так, использование ePWV, разработанного на основе исследований в когортах с десятками тысяч испытуемых, убедительно показывает, что повышение жесткости аорты в популяции преимущественно формируется при увеличении возраста и повышения среднего уровня АД. Преимуществом данного метода является то, что из оборудования достаточно иметь только тонометр.

Полученные данные позволяют провести важное методологическое разграничение. Расчетный показатель ePWV, основанный исключительно на возрасте и среднем АД [11, 12], является мощным эпидемиологическим инструментом, но отражает лишь популяционный риск. Он нечувствителен к индивидуальным вариациям жесткости аорты, обусловленным, например, генетическими факторами, физической тренированностью или эффектом терапии. В отличие от ePWV, предлагаемый нами метод основан на прямом измерении гемодинамических параметров у конкретного пациента, что открывает возможности для индивидуального динамического наблюдения и оценки непосредственного воздействия лечебных и профилактических вмешательств.

Ключевым преимуществом методики является ее комплексность. Одновременная оценка PI и EDV в сонных артериях предоставляет уникальную возможность изучать взаимосвязь между центральной гемодинамикой и церебральным кровотоком. Можно предположить, что повышение аортальной жесткости в сочетании со снижением EDV и ростом PI указывает на синхронное поражение магистральных и дистальных церебральных сосудов, это является неблагоприятным прогностическим признаком. Таким образом, метод позволяет выявлять не просто «старение аорты», а формирование специфического «сосудистого профиля риска» цереброваскулярных осложнений.

Основным ограничением работы является влияние опыта оператора на ручную разметку точек T1 и T2 на доплерограмме. В будущем разработка алгоритмов автоматического анализа позволит минимизировать эту погрешность. Кроме того, валидация метода проводилась на специфической когорте пациентов с пограничными психическими расстройствами, что требует подтверждения результатов на других популяциях, включая здоровых лиц и пациентов с иными формами сердечно-сосудистой патологии. Также перспективным представляется изучение взаимосвязи между параметрами предлагаемого метода и биохимическими маркерами эндотелиальной дисфункции и ремоделирования сосудистой стенки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В перспективе предлагаемый экспресс-метод может стать стандартным элементом протокола ультразвукового исследования брахиоцефальных артерий, существенно расширяя его диагностическую ценность без увеличения времени и стоимости. Он представляет особый интерес для исследований в области физиологии старения, позволяя изучать траекторию раннего сосудистого старения и эффективность превентивных вмешательств в динамике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yusuf S., Joseph P., Rangarajan S. et al. Modifiable risk factors, cardiovascular disease, and mortality in 155 722 individuals from 21 high-income, middle-income, and low-income countries (PURE): a prospective cohort study. *The Lancet*. 2020. Vol. 395. No. 10226. Pp. 795–808. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)32008-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)32008-2)
2. Мкртчян В.Р., Хайкин В.Д., Гудкова А.А. и др. Склеротические изменения артерий: атеросклероз, артериосклероз. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2022. Т. 15. № 3. С. 261–269. <https://doi.org/10.17116/kardio202215031261>
3. Nilsson P.M., Boutouyrie P., Cunha P. et al. Early vascular ageing in translation: from laboratory investigations to clinical applications in cardiovascular prevention. *J. Hypertens*. 2013. Vol. 31. No. 8. Pp. 1517–1526. <https://doi.org/10.1097/HJH.0b013e328361e4bd>
4. Qi Y., Mohamad E., Azlan A. et al. Digital Health Solutions for Cardiovascular Disease Prevention: Systematic Review. *J. Med. Internet Res*. 2025. Vol. 27. e64981. <https://doi.org/10.2196/64981>

5. Azhim A., Katai M., Akutagawa M. et al. Exercise improved age-associated changes in the carotid blood velocity waveforms. *J. Biomed. Pharmac. Engineer.* 2007. Vol. 1. No. 1. Pp. 17–26.
6. Мкртчян В.Р., Хайкин В.Д., Лесс Ю.Э. и др. *Способ комплексной оценки формирования раннего атеросклероза в аорте и церебральных артериях у пациентов молодого и среднего возраста с пограничными психическими расстройствами*: пат. РФ № 2799633: МПК А 61 В 8/00-06. ФИПС, 2023.
7. Гехт А.Б., Акжигитов Р.Г., Гудкова А.А. и др. *Способ комплексной оценки степени атеросклероза в аорте и церебральных артериях у пациентов старшего возраста*: пат. РФ № 2788413: МПК А 61 В 8/00-06. ФИПС, 2022.
8. Heffernan K.S., Lefferts W.K., Augustine J.A. Hemodynamic Correlates of Late Systolic Flow Velocity Augmentation in the Carotid Artery. *Int. J. Hypertens.* 2013. Vol. 2013. Pp. 1–7. <https://doi.org/10.1155/2013/920605>
9. Hashimoto J., Ito S. Aortic stiffness determines diastolic blood flow reversal in the descending thoracic aorta: potential implication for retrograde embolic stroke in hypertension. *Hypertension.* 2013. Vol. 62. No. 3. Pp. 542–549. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.113.01318>
10. Bleakley C., McCann A., McClenaghan V. et al. Ultrasound entropy may be a new non-invasive measure of pre-clinical vascular damage in young hypertensive patients. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2015. Vol. 13. 12. <https://doi.org/10.1186/s12947-015-0006-7>
11. The Reference Values for Arterial Stiffness' Collaboration. Determinants of pulse wave velocity in healthy people in the presence of cardiovascular risk factors: “establishing normal and reference values”. *Eur. Heart J.* 2010. Vol. 31. No. 19. Pp. 2338–2350. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehq165>
12. Liu K., Lin Z., Chen Y., Hong H. Elevated pulse wave velocity as a marker of arterial stiffness and its association with mortality in US adults. *Sci. Rep.* 2025. Vol. 15. No. 1. 23026. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07198-w>

REFERENCES

1. Yusuf S., Joseph P., Rangarajan S. et al. Modifiable risk factors, cardiovascular disease, and mortality in 155 722 individuals from 21 high-income, middle-income, and low-income countries (PURE): a prospective cohort study. *The Lancet.* 2020; **395**(10226):795–808. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)32008-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)32008-2)
2. Mkrтчян В.Р., Хайкин В.Д., Гудкова А.А. et al. Skleroticheskiye izmeneniya arteriy: ateroskleroz, arterioskleroz [Sclerotic lesions of arteries: atherosclerosis, arteriosclerosis]. *Kardiologiya i serdechno-sosudistaya khirurgiya = Russian Journal of Cardiology and Cardiovascular Surgery.* 2022; **15**(3):261–269. <https://doi.org/10.17116/kardio202215031261>
3. Nilsson P.M., Boutouyrie P., Cunha P. et al. Early vascular ageing in translation: from laboratory investigations to clinical applications in cardiovascular prevention. *J. Hypertens.* 2013; **31**(8):1517–1526. <https://doi.org/10.1097/HJH.0b013e3283361e4bd>
4. Qi Y., Mohamad E., Azlan A. et al. Digital health solutions for cardiovascular disease prevention: systematic review. *J. Med. Internet Res.* 2025; **27**:e64981. <https://doi.org/10.2196/64981>

5. Azhim A., Katai M., Akutagawa M. et al. Exercise improved age-associated changes in the carotid blood velocity waveforms. *J. Biomed. Pharmacol. Eng.* 2007;**1**(1):17–26.
6. Mkrtchyan V.R., Khaikin V.D., Less Yu.E. et al. *Sposob kompleksnoy otsenki formirovaniya rannego arterioskleroza v aorte i tserebral'nykh arteriyakh u patsiyentov molodogo i srednego vozrasta s pogranichnymi psikhicheskimi rasstroystvami* [Method for comprehensive assessment of early arteriosclerosis formation in the aorta and cerebral arteries in young and middle-aged patients with borderline mental disorders] (Russian Patent No. 2799633). Federal Institute of Industrial Property. 2023.
7. Gekht A.B., Akzhigitov R.G., Gudkova A.A. et al. *Sposob kompleksnoy otsenki stepeni arterioskleroza v aorte i tserebral'nykh arteriyakh u patsiyentov starshogo vozrasta* [Method for comprehensive assessment of the degree of arteriosclerosis in the aorta and cerebral arteries in elderly patients] (Russian Patent No. 2788413). Federal Institute of Industrial Property. 2022.
8. Heffernan K.S., Lefferts W.K., Augustine J.A. Hemodynamic correlates of late systolic flow velocity augmentation in the carotid artery. *Int. J. Hypertens.* 2013;**2013**:1–7. <https://doi.org/10.1155/2013/920605>
9. Hashimoto J., Ito S. Aortic stiffness determines diastolic blood flow reversal in the descending thoracic aorta: potential implication for retrograde embolic stroke in hypertension. *Hypertension.* 2013;**62**(3):542–549. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.113.01318>
10. Bleakley C., McCann A., McClenaghan V. et al. Ultrasound entropy may be a new non-invasive measure of pre-clinical vascular damage in young hypertensive patients. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2015;**13**:12. <https://doi.org/10.1186/s12947-015-0006-7>
11. The Reference Values for Arterial Stiffness' Collaboration. Determinants of pulse wave velocity in healthy people in the presence of cardiovascular risk factors: 'establishing normal and reference values'. *Eur. Heart J.* 2010;**31**(19):2338–2350. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehq165>
12. Liu K., Lin Z., Chen Y., Hong H. Elevated pulse wave velocity as a marker of arterial stiffness and its association with mortality in US adults. *Sci. Rep.* 2025;**15**(1):23026. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07198-w>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мкртчян Виолетта Рафаэлевна – д-р мед. наук; зав. отделом пограничных психических расстройств у больных с заболеванием ЦНС и старшего возраста
ГБУЗ НПЦ им. Соловьева ДЗМ, Москва, Российская Федерация
E-mail: vrm1958@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5289-2205>

Хайкин Вадим Данилович – канд. мед. наук; вед. науч. сотр., отдел пограничных психических расстройств у больных с заболеванием ЦНС и старшего возраста,
ГБУЗ НПЦ им. Соловьева ДЗМ, Москва, Российская Федерация
E-mail: vadim.astaldo@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6288-8004>

Иванова Людмила Геннадиевна – врач-невролог, неврологическое отделение
ФБУЗ «Лечебно-реабилитационный центр Минэкономразвития России»,
Москва, Российская Федерация
E-mail: liudmila.gennadievna@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6440-7032>

Поступила в редакцию 03.10.2025

После доработки 10.12.2025

Принята к публикации 11.12.2025

ABOUT THE AUTHORS

Mkrtchyan, Violetta R. – Ph.D. (Medicine); Head of the Department of Borderline Mental Disorders in Elderly Patients with CNS Diseases, Solovyev Scientific and Clinical Center, Moscow Health Department, Moscow, Russian Federation
E-mail: vrm1958@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5289-2205>

Khaikin, Vadim D. – Ph.D. (Medicine); Head Scientist Researcher, Department of Borderline Mental Disorders in Elderly Patients with CNS Diseases, Solovyev Scientific and Clinical Center, Moscow Health Department, Moscow, Russian Federation
E-mail: vadim.astaldo@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6288-8004>

Ivanova, Ludmila G. – Neurologist, Neurological Department, Federal Budgetary Institution of Health “Treatment and Rehabilitation Center of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation”, Moscow, Russian Federation
E-mail: liudmila.gennadievna@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6440-7032>

Received October 03, 2025

Revised December 10, 2025

Accepted December 11, 2025