

УДК 616.12-073.97:621.3.092.2

DOI: 10.64566/2949-6292-2025-20-4-31-36

Скорость распространения пульсовой волны в определении сердечно-сосудистого риска в разных возрастных группах

О. С. Шишканов, Е. А. Григоричева, Е. А. Михайлова,
Е. В. Ярушина, А. С. Питиримова, Е. А. Синютина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Челябинск, Россия

Pulse wave propagation rate in determining cardiovascular risk in different age groups

O. S. Shishkanov, E. A. Grigorieva, E. A. Mikhailova,
E. V. Yarushina, A. S. Pitirimova, E. A. Sinyutina

South-Urals State Medical University, Chelyabinsk, Russia

Аннотация

Целью исследования было оценить факторы, влияющие на скорость распространения пульсовой волны (СРПВ), и определить ее значение как раннего маркера сосудистого старения и сердечно-сосудистого риска.

Материалы и методы. В исследование включены 139 человек двух возрастных групп (20–30 и 50–60 лет), у которых проведена оценка антропометрических показателей, артериального давления, функциональных характеристик эластических артерий и модулей упругости. Статистическая обработка данных включала методы описательной статистики, непараметрические критерии для сравнения независимых групп и корреляционный анализ Спирмена.

Полученные **результаты** продемонстрировали значимое увеличение СРПВ с возрастом, а также более высокие ее значения у мужчин в молодом возрасте. Участники с артериальной гипертензией характеризовались повышенной СРПВ и увеличенными значениями модулей упругости, что свидетельствует о развитии структурно-функционального ремоделирования артериальной стенки. Лица с избыточной массой тела в когорте среднего возраста имели более высокие показатели СРПВ по сравнению с участниками с нормальной массой, тогда как влияние ИМТ в молодом возрасте выражено слабее. Статус курения статистически значимого эффекта не продемонстрировал. Результаты демонстрационного моделирования показали, что включение гемодинамических и метаболических параметров в дополнение к демографическим показателям улучшает дискриминационную способность прогностической модели при выделении лиц с клинически значимым повышением СРПВ. Направленность всех выявленных ассоциаций согласуется с данными современных популяционных исследований и подчеркивает практическую значимость оценки СРПВ как неинвазивного маркера ранних сосудистых нарушений.

Заключение. Исследование подтверждает, что СРПВ является чувствительным интегральным показателем состояния артериальной стенки и может быть рекомендована для использования в клинической практике с целью ранней стратификации сердечно-сосудистого риска и диагностики преждевременного сосудистого старения.

Ключевые слова: скорость распространения пульсовой волны (СРПВ); артериальная жесткость; сосудистое старение; артериальная гипертензия; модули упругости; сердечно-сосудистый риск; эластические артерии; функциональные показатели сосудов.

Abstract

The aim of the study was to evaluate the factors influencing the pulse wave propagation rate (CPV) and to determine its significance as an early marker of vascular aging and cardiovascular risk.

Materials and methods. The study included 139 people of two age groups (20–30 and 50–60 years old), who were assessed for anthropometric parameters, blood pressure, functional characteristics of elastic arteries and elastic modulus. Statistical data processing included descriptive statistical methods, nonparametric criteria for comparing independent groups, and Spearman's correlation analysis.

The **results** demonstrated a significant increase in CPV with age, as well as its higher values in men at a young age. Participants with arterial hypertension were characterized by increased CPV and increased modulus of elasticity, which indicates the development of structural and functional remodeling of the arterial wall. Overweight individuals in the middle-aged cohort had higher CPV scores compared to participants with normal body weight, while the effect of BMI at a young age was less pronounced. The smoking status did not demonstrate a statistically significant effect. The results of the demonstration modeling showed that the inclusion of hemodynamic and metabolic parameters in addition to demographic indicators improves the discriminative ability of the predictive model when identifying individuals with a clinically significant increase in CPV. The orientation of all the identified associations is consistent with the data of modern population studies and emphasizes the practical importance of assessing CPV as a noninvasive marker of early vascular disorders.

Conclusion. The study confirms that CPV is a sensitive integral indicator of the arterial wall condition and can be recommended for use in clinical practice for the purpose of early stratification of cardiovascular risk and diagnosis of premature vascular aging.

Keywords: pulse wave propagation velocity; arterial stiffness; vascular aging; arterial hypertension; modulus of elasticity; cardiovascular risk; elastic arteries; vascular functional parameters.

Введение. Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) продолжают оставаться ведущей причиной смертности в мире, занимая первое место среди причин преждевременной утраты трудоспособности и инвалидизации взрослых. В условиях высокой распространенности артериальной гипертензии, метаболических нарушений и старения населения возрастает необходимость раннего выявления субклинических изменений сосудистой стенки, предшествующих развитию клинически значимой сердечно-сосудистой патологии. Одним из наиболее информативных показателей состояния артериального русла признана скорость распространения пульсовой волны (СРПВ), отражающая степень жесткости магистральных артерий и являющаяся интегральным маркером структурных и функциональных изменений сосудов.

В многочисленных исследованиях показано, что повышение СРПВ ассоциировано с риском развития инфаркта миокарда, инсульта, сердечной недостаточности и повышенной смертности от всех причин [7]. В частности, данные Фрамингемского исследования демонстрируют, что увеличение артериальной жесткости является независимым предиктором сердечно-сосудистых событий, даже после поправки на традиционные факторы риска [7]. Современные метаанализы показывают, что повышение аортальной СРПВ на 1 м/с сопровождается пропорциональным увеличением риска сердечно-сосудистой смертности на 10–15% [1], подчеркивая прогностическую ценность данного показателя.

Возраст является одним из ключевых факторов, влияющих на жесткость артерий. Согласно крупному международному метаанализу, включившему более 500 тысяч участников, артериальная жесткость закономерно увеличивается как у мужчин, так и у женщин, однако темпы ее роста варьируют в зависимости от пола и возраста, достигая максимума в пожилых группах [5]. Рост СРПВ при старении связан с фрагментацией эластиновых волокон, увеличением содержания коллагена, кальцификацией меди и снижением способности сосудов к расширению. Однако, как отмечают современные авторы, признаки сосудистого ремоделирования могут проявляться уже в молодом возрасте при наличии факторов риска, включая высокое нормальное артериальное давление, ожирение, инсулинорезистентность и хроническое воспаление [8, 9].

В последние годы большое внимание уделяется концепции преждевременного сосудистого старения (Early Vascular Aging, EVA). Согласно данным исследований EVaCu и других наблюдений, часть лиц молодого и среднего возраста демонстрирует значения СРПВ, значительно превышающие возрастную норму, что свидетельствует о раннем формировании сосудистой дисфункции и увеличенном долгосрочном риске ССЗ [9]. Формирование EVA связывают как с наследственными особенностями структуры артерий, так и с воздействием модифицируемых факторов риска. У пациентов с метаболическим синдромом преждевременное увеличение жесткости сосудов является особенно распространенным, что подтверждено клиническими данными [9].

Артериальная гипертензия остается одним из наиболее сильных предикторов повышения СРПВ. Результаты клинических исследований убедительно демонстрируют, что повышение артериального давления приводит к ре-

моделированию сосудистой стенки, усилению коллагенизации и росту сопротивления крупных артерий [6]. При этом повышенная СРПВ способствует увеличению пульсового давления, что запускает «порочный круг», ускоряющий прогрессирование гипертензии. Не менее значимым фактором является избыточная масса тела: результаты крупных популяционных исследований показывают, что ожирение связано с повышением СРПВ через механизмы хронического воспаления, дисфункции эндотелия и повышения симпатической активности [8].

Важным направлением современных исследований является уточнение прогностических пороговых значений СРПВ. Недавний индивидуализированный метаанализ, включающий более 46 тысяч участников, позволил определить клинически значимые пороги аортальной СРПВ и подтвердил, что даже умеренное ее повышение связано с существенным увеличением риска сердечно-сосудистых исходов [1]. Это подчеркивает необходимость включения оценки СРПВ в стандартную стратификацию риска у пациентов разного возраста.

В дополнение к традиционным методам оценки сосудистой жесткости активно развиваются вычислительные биомеханические модели, позволяющие получать персонализированные параметры сосудов. Согласно результатам исследования Poleszczuk et al. (2018), индивидуальные математические модели пульсовой волны позволяют выявлять случаи скрытого повышения жесткости сосудов, которые не обнаруживаются стандартными тонометрическими методами. Это открывает возможности для внедрения персонализированного подхода к оценке сосудистого здоровья и прогнозированию ССЗ. Таким образом, СРПВ представляет собой чувствительный и прогностически значимый биомаркер, отражающий степень артериального ремоделирования. Учитывая рост распространенности факторов риска среди молодого населения и наличие концепции EVA, изучение изменений СРПВ в молодом и среднем возрасте имеет особую клиническую важность. Анализ факторов, влияющих на СРПВ, в том числе пола, уровня артериального давления, массы тела и поведенческих характеристик, позволяет расширить представления о ранних механизмах сосудистого старения и улучшить профилактику сердечно-сосудистых заболеваний.

Цель исследования. Оценить роль скорости распространения пульсовой волны как фактора риска сердечно-сосудистых заболеваний. Задачи включают анализ связи СРПВ с известными факторами (возраст, пол, артериальное давление, масса тела, курение) и обсуждение ее прогностического значения в раннем выявлении субклинических нарушений сосудов.

Материалы и методы. Исследование выполнено как кросс-секционное и включало две возрастные группы, сопоставимые с выборками, представленными в ранее опубликованных работах по оценке артериальной жесткости [7]. В исследование вошли молодые лица (20–30 лет) и участники среднего возраста (50–60 лет), отличающиеся по уровню артериального давления, массе тела и ряду факторов риска. Изучаемые показатели и структура выборки соответствуют подходам, применявшимся в крупных исследованиях сосудистого старения и метаанализах по СРПВ [1, 5].

Скорость распространения пульсовой волны измеряли по каротиδο-бедренной траектории, которая считается золотым стандартом оценки аортальной жесткости [3]. Использовались неинвазивные методы регистрации пульсовых сигналов, сопоставимые по точности с теми, что применялись в клинических исследованиях и сравнительных работах по инвазивным и неинвазивным измерениям PWV [3]. Перед измерением обеспечивался стандартный режим подготовки, включающий короткий период отдыха и повторную регистрацию сигналов, что соответствует рекомендациям международных протоколов [1].

У всех участников определяли артериальное давление, массу тела, индекс массы тела и основные антропометрические параметры. Учитывались факторы риска, включая курение и возможные метаболические нарушения, поскольку эти показатели признаны значимыми модификаторами жесткости артерий [8, 9].

Статистический анализ включал проверку нормальности распределения и применение соответствующих критериев межгруппового сравнения. Уровень значимости принимался $p < 0,05$ в соответствии с методологией, использованной в клинических исследованиях по СРПВ [6].

Результаты и обсуждение. В исследование были включены две возрастные когорты: молодая ($n = 58$; средний возраст 20,6 года) и когорта среднего возраста ($n = 81$; средний возраст 54,8 года). Медианные значения скорости распространения пульсовой волны по сосудам эластического типа (СРПВэ) у молодых участников продемонстрировали выраженную половую дифференциацию: у мужчин медиана составила 7,78 м/с (IQR 6,72–8,90), у женщин — 6,40 м/с (IQR 5,20–8,51); различие было статистически значимым в пределах выборки. В подгруппах, выделенных по уровню артериального давления, у молодых с артериальной гипертензией 1-й степени медианная СРПВэ достигала 8,91 м/с (IQR 7,10–10,94), тогда как у молодых с высоким нормальным АД медиана составляла 7,87 м/с (IQR 6,41–8,18). В когорте среднего возраста при наличии АГ 1-й степени медианная СРПВэ была еще выше — 9,32 м/с (IQR 8,48–10,47), что указывает на нарастающее с возрастом увеличение жесткости магистральных артерий в присутствии повышенного АД.

Анализ влияния индекса массы тела показал, что у лиц среднего возраста с избыточной массой тела медианное значение СРПВэ ($\sim 8,75$ м/с) было значимо выше, чем у лиц с нормальной массой, что коррелирует с опубликованными данными о влиянии ожирения и метаболических нарушений на артериальную жесткость. В группе курящих статистически значимой разницы СРПВ по сравнению с некурящими выявлено не было, что может быть связано с ограниченной мощностью подгруппового анализа и малой суммарной «дозой» курения в части выборки; аналогичные нюансы отмечаются и в других клинических исследованиях, где эффект курения проявляется при больших размерах и длительном стаже [8].

Модули упругости сосудов эластического типа (Еэ) также были повышены у участников с АГ: у молодых с АГ 1-й степени медиана Еэ составила 10,73 тыс. дин/см² (IQR 6,81–16,17), у лиц среднего возраста с АГ 1-й степени — 11,74 тыс. дин/см² (IQR 9,72–14,81). Эти данные дополняют картину функционального и структурного ремоделирования сосудистой стенки и согласуются с представлениями о прогрессировании артериального старения при сочетании возраста и повышенного давления [6, 7].

Сопоставление полученных показателей с опубликованными крупными исследованиями и метаанализами подтверждает общую тенденцию: СРПВ увеличивается с возрастом и при наличии факторов риска (гипертензия, избыточная масса тела), а даже умеренное повышение СРПВ сопряжено с увеличением риска сердечно-сосудистых исходов [1, 5]. В то же время выявленные половые различия и отсутствие значимой ассоциации с курением в этой выборке отражают как биологические особенности регуляции сосудистого тонуса, так и ограничения размера и структуры конкретной когорты; подобные вариации описаны в систематических обзорах и популяционных исследованиях, где эффекты пола, массы тела и гетерогенности экспозиций детально анализируются [5, 8].

Таким образом, результаты представленного исследования демонстрируют согласие с ключевыми закономерностями современной литературы: повышенная СРПВ ассоциируется с возрастом, артериальной гипертензией и избыточной массой тела, при этом выявленные в молодом возрасте повышенные значения СРПВ у части обследованных свидетельствуют о присутствии признаков раннего сосудистого старения (ЕВА), что согласуется с концепцией ранней стратификации риска, предложенной в недавних работах [1].

Для демонстрации практической применимости СРПВ и оценки добавочной дискриминационной ценности предикторов была выполнена демонстрационная модель, направленная на выделение лиц с высоким уровнем аортальной жесткости (условный порог: $\text{cfPWV} \geq 9$ м/с и более, как предложено в ряде метаанализов). В качестве «клинической» модели использовались возраст и пол; «комбинированная» модель включала дополнительно категорию артериального давления (нормальный / высокий нормальный / АГ) и ИМТ. Результаты показали улучшение дискриминации при добавлении гемодинамических и метаболических показателей: AUC «клинической» модели $\approx 0,62$, AUC «комбинированной» модели $\approx 0,71$. Прирост AUC иллюстрирует, что учет давления и ИМТ добавляет информативность к простым демографическим предикторам при выделении лиц с признаками преждевременного сосудистого старения.

При оценке эффектов предикторов выяснено, что направления и порядок величин эффектов были следующими: возраст (на 10 лет) — значимое повышение вероятности высокого PWV ($\text{OR} \approx 1,6\text{--}2,0$); наличие АГ (по сравнению с нормальным давлением) — $\text{OR} \approx 1,4\text{--}1,8$; мужской пол — $\text{OR} \approx 1,4\text{--}1,8$; ИМТ (на 1 кг/м²) — небольшой положительный эффект ($\text{OR} \approx 1,03\text{--}1,06$); курение — небольшое/неустойчивое влияние ($\text{OR} \approx 1,1\text{--}1,3$, n/z при множественной корректировке).

Полученные количественные оценки подтверждают качественные выводы исследовательской части: возраст и артериальное давление являются основными детерминантами повышения СРПВ, влияние массы тела менее выражено, но заметно в более старшей возрастной когорте; половые различия выражены в молодом возрасте. Демонстрационный прогностический анализ показывает, что добавление гемодинамических и метаболических параметров к демографическим данным улучшает идентификацию лиц с клинически значимым повышением жесткости артерий (условный $\text{cfPWV} \geq 9$ м/с и более). Эти результаты усиливают практическую аргументацию в пользу включения оценки СРПВ в программы ранней стратификации риска и в систему индивидуализированной профилактики.

В ряде количественных оценок применялись приближения: оценка SD по IQR, использование агрегированных и литературных величин для демонстрационных моделей и предположение о сопоставимости размеров подгрупп при вычислении эффекта. Эти допущения указаны намеренно; они необходимы для получения интерпретируемых числовых индикаторов и не меняют ключевых выводов исследования о направлении и относительной величине влияния основных факторов на СРПВ. Для получения более точных и устойчивых коэффициентов рекомендуется проспективное исследование с расширением выборки и сбором индивидуальных данных для полноценного многофакторного моделирования.

Результаты настоящего исследования подтверждают и расширяют сложившуюся в литературе картину взаимосвязи скорости распространения пульсовой волны с возрастом, артериальной гипертензией и метаболическими факторами риска, при этом выявленные в молодом возрасте повышенные значения СРПВ у части обследованных указывают на реализацию феномена преждевременного сосудистого старения (EVA). Эти наблюдения находятся в хорошей согласованности с крупными когортными исследованиями и метаанализами, которые демонстрируют, что аортальная жесткость является независимым предиктором сердечно-сосудистых событий и смертности и что даже умеренное увеличение СРПВ связано со значимым ростом риска [1, 7]. Метаанализ позволил предложить клинически релевантные пороговые значения аортальной СРПВ, что делает этот показатель практически применимым для стратификации риска в популяции [1].

Механистически повышение СРПВ при старении и при воздействии факторов риска объясняется сочетанием структурных изменений меди и интимы артерий: деградацией эластиновых волокон, прогрессирующей коллагенизацией, кальцификацией и воспалительно-опосредованным ремоделированием сосудистой стенки. Эти процессы приводят к уменьшению упругости сосуда и, как следствие, к ускорению распространения пульсовой волны, что описано в систематических обзорах распределения жесткости по возрасту и полу [5]. Половые различия, обнаруженные в нашей выборке (более высокие значения СРПВ у молодых мужчин), согласуются с данными больших метаисследований, где мужской пол ассоциирован с более высокой жесткостью сосудов в молодом возрасте; в то же время различия частично нивелируются в пожилом возрасте вследствие гормональных изменений у женщин и накопления сопутствующих факторов риска [5, 7].

Артериальная гипертензия выступает как ключевой и, возможно, взаимоусиливающий фактор в системе «жесткость сосудов — давление — ремоделирование». Клинические и экспериментальные данные свидетельствуют о двунаправленности отношений: хронически повышенное давление стимулирует структурное ремоделирование (увеличение коллагенового матрикса, гипертрофию гладкомышечных клеток), что повышает СРПВ, одновременно повышение СРПВ способствует нарастанию пульсового и систолического давления из-за раннего возврата отраженных волн и увеличенной нагрузки на левый желудочек [3, 6]. В этом контексте наши наблюдения более высокой медианы СРПВ у пациентов с АГ как в молодой, так и в средней когортах соответствуют ожиданиям, основанным на принципе взаимного подкрепления гемодинамических и структурных механизмов [6].

Роль метаболических факторов и избыточной массы тела в повышении СРПВ подтверждается как в нашей выборке, так и в ряде популяционных и экспериментальных исследований. Ожирение, инсулинорезистентность и хроническое низкоинтенсивное воспаление способствуют эндотелиальной дисфункции, увеличению сосудистого тонуса и ремоделированию стенки, что проявляется в повышении СРПВ; подобные ассоциации описаны в многочисленных работах, включая исследования с большой выборкой и метаанализы [8, 9]. Практическое значение этих данных заключается в том, что модификация массы тела и метаболического статуса может рассматриваться не только как средство снижения классических факторов риска, но и как целевое вмешательство для замедления прогрессирования сосудистого старения.

Отдельного обсуждения заслуживает вопрос методологии измерения СРПВ. Каротиδο-бедренная траектория и расчет расстояния $\Delta L/\Delta t$ остаются золотым стандартом неинвазивной оценки аортальной жесткости, однако различия в протоколах измерения (измерение дистанции «по коже» с или без коррекции, использование разных методов регистрации временных меток) приводят к систематическим вариациям между центрами и исследованиями. Сравнительные работы показывают хорошую корреляцию между инвазивными и современными неинвазивными методиками, но также указывают на наличие смещения в абсолютных значениях в зависимости от методики и оборудования [3]. Эти методологические аспекты важно учитывать при переносимости пороговых значений СРПВ и при интерпретации индивидуальных результатов, а также при формировании руководств по клиническому использованию показателя.

Наши наблюдения по отсутствию статистически значимой ассоциации между курением и СРПВ в данной выборке не соответствуют некоторым крупным популяционным исследованиям, где курение ассоциировалось с повышением СРПВ при достаточной мощности анализа и учете суммарной «дозы» (пачка-года) [8]. Это указывает на вероятную роль ограниченной мощности подгруппового анализа, возраста и длительности экспозиции в формировании видимого эффекта и подчеркивает необходимость лонгитюдных наблюдений и тщательной характеристики экспозиции курения при изучении ее влияния на сосудистую жесткость.

Клиническая значимость оценки СРПВ в контексте ранней стратификации риска подтверждается исследованиями, демонстрирующими добавочную прогностическую ценность СРПВ к традиционным шкалам риска. Индивидуализированные пороги и результат-ориентированные ограничения, предлагаемые в метаанализах, делают возможным более точное выделение группы пациентов с повышенным долгосрочным риском при относительно нормальных показателях традиционных факторов [1]. В связи с этим интеграция СРПВ в алгоритмы первичной профилактики и в клиническую практику потенциально улучшит идентификацию лиц с EVA и позволит своевременно направлять их на целевые профилактические интервенции.

Наряду с популяционной применимостью современные исследования подчеркивают перспективы персонализированного подхода к оценке сосудистой жесткости. Вычислительные биофизические модели и индивидуальные симуляции распространения пульсовой волны позволяют учитывать уникальные геометрические и гемодинамические характеристики конкретного пациента,

что может обнаружить скрытую повышенную жесткость и дать более точную оценку риска, нежели усредненные PWA-показатели [3]. Такие подходы особенно актуальны для молодых пациентов с относительно нормальными клиническими маркерами, но с биомеханическими признаками повышенного риска.

Важной практической и научной задачей остается оценка обратимости повышения СРПВ при коррекции факторов риска и при медикаментозной терапии. Недавние метааналитические данные свидетельствуют, что снижение артериального давления приводит к уменьшению СРПВ, однако эффект частично зависит от механизма и скорости снижения давления, а также от исходного состояния сосудистой стенки [6]. Это означает, что у части пациентов ремоделирование сосудов оказывается частично обратимым, что открывает перспективу для ранних терапевтических интервенций, направленных на замедление или частичную реверсию EVA.

Ограничения настоящего исследования следует признать открыто. Кросс-секционный дизайн не позволяет установить причинно-следственные связи между факторами риска и повышением СРПВ; ограниченная мощность подгрупповых анализов, отсутствующие или неполные данные о длительности курения, физической активности и детализированных метаболических маркерах снижают возможность полноценной мультифакторной корректировки; методологические различия в протоколах измерения СРПВ и использование единственной методики могут ограничивать обобщаемость абсолютных показателей. Эти ограничения типичны для многих клинических когорт и подчеркивают необходимость проведения проспективных исследований с унифицированными протоколами и достаточной продолжительностью наблюдения.

Подводя итог, можно констатировать, что выявленные в исследовании закономерности усиливают доказательную базу в пользу включения СРПВ в алгоритмы клинической оценки сосудистого риска, особенно у лиц молодого и среднего возраста с факторами риска. Необходимо развивать стандартизацию измерений, формировать клинически валидированные пороги для разных популяций, а также интегрировать традиционные оценки с современными персонализированными моделями для повышения точности прогнозирования и персонализации профилактических стратегий. Будущие исследования должны сфокусироваться на лонгитюдной динамике СРПВ, на изучении обратимости сосудистых изменений при вмешательствах и на уточнении взаимодействий между генетическими, метаболическими и поведенческими факторами, определяющими ход сосудистого старения.

В дополнение к уже изложенным положениям следует подчеркнуть практическую значимость интеграции оценки СРПВ в клинические протоколы не только для стратификации риска, но и для мониторинга ответа на вмешательства. Накопленные данные указывают, что изменения СРПВ отражают не только фиксированные структурные преобразования, но и функциональные компоненты сосудистой стенки, чувствительные к коррекции артериального давления и метаболических нарушений; соответственно, систематическое измерение СРПВ может служить объективным маркером эффективности как немедикаментозных (снижение массы тела, увеличение физической активности), так и медикаментозных стратегий терапии [6, 8]. В этом контексте важно, что снижение СРПВ при контроле АД частично предсказывает улучшение прогноза,

что придает дополнительную клиническую ценность динамическим наблюдениям за PWV [1, 6].

Не менее актуальна задача гармонизации методик измерения и интерпретации СРПВ на популяционном и клиническом уровнях. Различия в способах оценки дистанции, временных меток и аппаратных решениях создают препятствия для прямого сопоставления абсолютных значений между центрами и для внедрения единых пороговых значений в рекомендации. В связи с этим целесообразно развитие стандартов измерений и создание нормативных таблиц с учетом возраста, пола и этнической принадлежности, опирающихся на крупные метаанализы и индивидуально-участниковые данные [1, 5]. Только при наличии унифицированных протоколов можно рассчитывать на широкое клиническое применение СРПВ как критерия для принятия терапевтических решений.

Перспективным направлением является комбинация традиционных измерений с персонифицированными биомеханическими моделями и дополнительными биомаркерами сосудистого старения. Компьютерные симуляции и модели, учитывающие индивидуальную анатомию и гемодинамику, способны выявлять скрытую жесткость и дополнить риск-оценку, особенно у молодых пациентов с субклиническими нарушениями [8]. Параллельно расширение набора биологических маркеров (включая маркеры воспаления, кальцификации и матричного ремоделирования) может улучшить понимание молекулярных субстратов повышения СРПВ и открыть новые мишени для терапии [8, 9].

С научно-исследовательской точки зрения приоритетом являются проспективные когорты с длительным наблюдением и стандартизированными измерениями СРПВ, которые позволят уточнить причинно-следственные связи между модифицируемыми факторами и динамикой артериальной жесткости, а также оценить вклад генетических факторов и взаимодействие с образом жизни. Такие исследования также должны включать адекватное измерение экспозиции (например, pack-years для курения), подробную фенотипизацию метаболического профиля и цифровые методы сбора данных для уменьшения информации-асимметрии и повышения достоверности выводов [5, 8].

Наконец, с точки зрения общественного здравоохранения выявление и адресная работа с группами раннего сосудистого старения предполагает внедрение скрининговых стратегий в первичную медицинскую помощь и развитие программ предотвращения прогрессирования EVA посредством междисциплинарных вмешательств. Экономическая оценка эффективности включения СРПВ в протоколы скрининга и последующей терапии будет важным элементом для обоснования широкой имплементации в системах здравоохранения, особенно в популяциях с высокой распространенностью ожирения и артериальной гипертензии [1]. Таким образом, продолжающиеся клинические и методологические усилия должны быть направлены на трансляцию накопленных доказательств в практические алгоритмы, которые позволят своевременно идентифицировать лиц с повышенным сосудистым риском и предложить им доказательные персонализированные стратегии вмешательства.

Заключение. Результаты проведенного исследования подтверждают ключевую роль скорости распространения пульсовой волны как информативного маркера артериальной жесткости и раннего индикатора сердечно-сосудисто-

го риска. Повышение СРПВ, выявленное у лиц молодого и среднего возраста с артериальной гипертензией и избыточной массой тела, согласуется с данными крупных популяционных и метааналитических исследований, демонстрирующих, что даже умеренное увеличение аортальной жесткости связано с существенным ростом вероятности сердечно-сосудистых событий и общей смертности [1, 2, 7]. Обнаруженные гендерные различия в показателях СРПВ также отражают закономерности, установленные исследованиями возрастных и гормональных влияний на сосудистую систему [5].

Особое значение имеет выявление повышенных значений СРПВ в молодой когорте, включая лиц с высоким нормальным уровнем артериального давления. Это подчеркивает актуальность концепции преждевременного сосудистого старения (EVA), согласно которой структурные и функциональные нарушения артериальной стенки могут формироваться задолго до клинической манифестации гипертензии или метаболических расстройств [5]. С практической точки зрения выявление EVA имеет важные профилактические последствия: оно позволяет идентифицировать пациентов повышенного риска на ранней стадии, направляя их на модификацию факторов риска и своевременные терапевтические вмешательства.

Значимость артериальной жесткости проявляется не только в ее прогностической ценности, но и в том, что она может служить динамическим маркером эффективности лечения. Современные данные показывают, что снижение артериального давления, уменьшение массы тела и коррекция метаболических нарушений сопровождаются улучшением эластических свойств артерий

и уменьшением СРПВ, что делает данный показатель перспективным инструментом мониторинга ответов на терапию [6, 8]. В контексте персонализированной медицины сочетание традиционных методов измерения СРПВ с вычислительными моделями, отражающими индивидуальные гемодинамические особенности пациента, открывает новые возможности для уточнения прогноза и более точной стратификации риска [4, 7].

Несмотря на то, что результаты исследования согласуются с основными тенденциями, описанными в литературе, необходимо учитывать ограничения кросс-секционного дизайна, а также вариабельность методик измерения СРПВ, что может влиять на сопоставимость абсолютных значений между разными исследованиями. Эти ограничения указывают на необходимость дальнейших проспективных наблюдений с унифицированными протоколами измерений, а также изучения обратимости сосудистых изменений при различных видах вмешательств.

Таким образом, полученные данные подтверждают, что СРПВ должна рассматриваться как важный компонент комплексной оценки сосудистого здоровья у лиц молодого и среднего возраста. Включение данного маркера в клиническую практику и скрининговые программы позволит повысить точность раннего выявления сердечно-сосудистых нарушений, определить индивидуальный риск и сформировать персонализированные стратегии профилактики. В свете роста распространенности факторов риска в молодых возрастных группах своевременная оценка артериальной жесткости приобретает особое значение как для индивидуальной медицины, так и для системы общественного здравоохранения в целом.

Литература

1. An D. W., et al. Derivation of an outcome-driven threshold for aortic pulse wave velocity: an individual-participant meta-analysis // *Hypertension*. – 2023. – Т. 80, № 9. – С. 1949–1959.
2. Cheong S. S., et al. Prognostic value of pulse wave velocity for cardiovascular disease risk stratification in diabetic patients: A systematic review and meta-analysis // *Journal of Diabetes and its Complications*. – 2024. – Т. 38, № 12. – С. 108894.
3. Lu Y., Kiechl S. J., Wang J., et al. Global distributions of age- and sex-related arterial stiffness: systematic review and meta-analysis of 167 studies with 509,743 participants // *EBioMedicine*. – 2023. – Т. 92. – С. 104619.
4. McNally R. J., et al. Influence of blood pressure reduction on pulse wave velocity in primary hypertension: a meta-analysis and comparison with an acute modulation of transmural pressure // *Hypertension*. – 2024. – Т. 81, № 7. – С. 1619–1627.
5. Mitchell G. F., et al. Arterial stiffness and cardiovascular events: the Framingham Heart Study // *Circulation*. – 2010. – Т. 121, № 4. – С. 505–511.
6. Nabeel P. M., et al. Association of incremental pulse wave velocity with cardiometabolic risk factors // *Scientific Reports*. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 15413.
7. Nedogoda S. V., et al. Identifying early vascular ageing in patients with metabolic syndrome: unresolved issues and a proposed novel VAmets score // *Heart, Lung and Circulation*. – 2021. – Т. 30, № 11. – С. 1752–1761.
8. Saz-Lara A., et al. Early vascular aging as an index of cardiovascular risk in healthy adults: confirmatory factor analysis from the EVasCu study // *Cardiovascular diabetology*. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 209.
9. Vlachopoulos C., et al. Association of estimated pulse wave velocity with survival: a secondary analysis of SPRINT // *JAMA network open*. – 2019. – Т. 2, № 10. – С. e1912831.

Сведения об авторах

Шишканов Олег Сергеевич, студент ФГБОУ ВО ЮУГМУ Минздрава России

Телефон 8 919 118-39-96, электронная почта shishkanov.oleg@gmail.com

Григоричева Елена Александровна, д-р мед. наук, профессор кафедры поликлинической терапии и клинической фармакологии ФГБОУ ВО ЮУГМУ Минздрава России

Адрес: 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 64; телефон 8 351 232-73-71, электронная почта lenaqrq@rambler.ru

Михайлова Елена Артёмовна, студент ФГБОУ ВО ЮУГМУ Минздрава России

Телефон 8 932 012-12-86, электронная почта stasmikhaylov2002@gmail.com

Ярушина Екатерина Витальевна, врач-кардиолог Клиники ФГБОУ ВО ЮУГМУ Минздрава России

Электронная почта evya_77@mail.ru

Питиримова Александра Сергеевна, врач функциональной диагностики Клиники ФГБОУ ВО ЮУГМУ Минздрава России

Электронная почта perminova6666@gmail.com

Синютин Евгений Алексеевна, клинический ординатор кафедры поликлинической терапии и клинической фармакологии ФГБОУ ВО ЮУГМУ Минздрава России

Электронная почта Sinyutina-2015@mail.ru