

Научная статья

УДК 614.2

doi:10.69541/NRIPH.2026.01.014

Гемодинамические детерминанты в структуре цифрового фенотипа старения: результаты кросс-секционного исследования

Михаил Александрович Якушин¹, Константин Олегович Селиверстов²,
Анна Владимировна Воробьева³✉

^{1–3}ФГБНУ «Национальный научно-исследовательский институт общественного здоровья
имени Н. А. Семашко» Минобрнауки России, 105064, г. Москва, Российская Федерация

¹yakushinma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1198-1644>

²<https://orcid.org/0009-0005-7693-2845>

³vorobievaanna2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4609-5343>

Аннотация. В контексте глобальной инициативы Всемирной организации здравоохранения «Десятилетие здорового старения» (2021—2030 гг.) разработка объективных методов оценки темпов старения становится приоритетной задачей современной медицины. Цифровое фенотипирование старения (ЦФС) является перспективным междисциплинарным подходом, позволяющим осуществлять количественную оценку процессов старения через анализ комплексных цифровых биомаркеров.

Целью настоящего кросс-секционного исследования явилось структурирование и оценка значимости гемодинамических параметров системной гемодинамики (СГД) в качестве ключевых компонентов фенотипа старения. В исследование была включена когорта из 905 пациентов в возрасте от 1 до 89 лет. Для комплексной оценки гемодинамики применялся метод неинвазивной компрессионной осциллометрии с регистрацией двадцати двух параметров СГД. В качестве интегрального маркера темпа старения использовался расчетный биологический возраст (БВ), определяемый автоматизированно на основе алгоритма, учитывающего индекс кровообращения и индекс периферического сопротивления сосудов.

В результате проведенного анализа установлен комплекс статистически значимых корреляционных связей между негативным трендом БВ (превышение БВ над календарным возрастом) и рядом гемодинамических нарушений у лиц старше 45 лет. В их число вошли повышенные значения систолического, пульсового, среднего и бокового артериального давления, а также высокие показатели расхода энергии сердца и общего периферического сопротивления сосудов. Отдельно выявлена U-образная зависимость между сердечным индексом и темпом старения, при которой риск ускоренного старения ассоциирован как с гипер-, так и с гипокинетическим типом кровообращения. Полученные данные расширяют арсенал предиктивных инструментов ЦФС и открывают новые возможности для формирования персонализированных превентивных сценариев, направленных на замедление темпов старения и профилактики возраст-ассоциированной патологии.

Ключевые слова: цифровое фенотипирование, старение, гемодинамика, биологический возраст, артериальное давление, системное периферическое сопротивление, сердечный индекс, осциллометрия.

Для цитирования: Якушин М. А., Селиверстов К. О., Воробьева А. В. Гемодинамические детерминанты в структуре цифрового фенотипа старения: результаты кросс-секционного исследования // Бюллетень Национального научно-исследовательского института общественного здоровья имени Н. А. Семашко. 2026. № 1. С. 92—96. doi:10.69541/NRIPH.2026.01.014.

Original article

Hemodynamic determinants in the structure of the digital phenotype of aging: results of a cross-sectional study

Mikhail Alexandrovich Yakushin¹, Konstantin Olegovich Seliverstov², Anna Vladimirovna Vorobeva³✉

^{1–3}N. A. Semashko National Research Institute of Public Health, 105064, Moscow, Russian Federation

¹yakushinma@mail.ru, <https://orcid.org/0000000311981644>

²<https://orcid.org/0009-0005-7693-2845>

³vorobievaanna2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4609-5343>

Annotation. In the context of the global initiative of the World Health Organization «Decade of Healthy Aging» (2021—2030), the development of objective methods for assessing the rate of aging is becoming a priority task of modern medicine. Digital phenotyping of aging (DFS) is a promising interdisciplinary approach that makes it possible to quantify aging processes through the analysis of complex digital biomarkers.

The purpose of this cross-sectional study was to structure and evaluate the significance of hemodynamic parameters of systemic hemodynamics (SRS) as key components of the aging phenotype. The study included a cohort of 905 patients aged 1 to 89 years. For a comprehensive assessment of hemodynamics, the method of noninvasive compression oscillometry was used with the registration of twenty-two parameters of the SRS. The calculated biological age (BV), determined automatically based on an algorithm that takes into account the circulatory index and the peripheral vascular resistance index, was used as an integral marker of the aging rate.

As a result of the analysis, a set of statistically significant correlations was established between the negative trend of BV (excess of BV over the calendar age) and a number of hemodynamic disorders in people over 45 years of age. These included increased values of systolic,

pulse, mean and lateral blood pressure, as well as high rates of cardiac energy expenditure and total peripheral vascular resistance. Separately, a U-shaped relationship between the cardiac index and the rate of aging was revealed, in which the risk of accelerated aging is associated with both hyper- and hypokinetic types of blood circulation. The data obtained expand the arsenal of predictive tools of the CFS and open up new opportunities for the formation of personalized preventive scenarios aimed at slowing the rate of aging and preventing age-associated pathology.

К е y w o r d s: *digital phenotyping, aging, hemodynamics, biological age, blood pressure, systemic peripheral resistance, cardiac index, oscillometry.*

For citation: Yakushin M. A., Seliverstov K. O., Vorobeva A. V. Hemodynamic determinants in the structure of the digital phenotype of aging: results of a cross-sectional study. *Bulletin of Semashko National Research Institute of Public Health.* 2026;(1):92–96. (In Russ.). doi:10.69541/NRIPH.2026.01.014.

Введение

Глобальный демографический тренд, характеризующийся неуклонным ростом доли пожилого населения, обусловил запуск под эгидой Всемирной организации здравоохранения масштабного проекта «Десятилетие здорового старения» (2021—2030 гг.) [1]. Ключевой целью данной инициативы является пролонгация периода здоровой, активной жизни (healthspan). В связи с этим, поиск и валидация высокочувствительных методов предиктивной оценки темпов старения приобретают первостепенное значение для превентивной медицины [2].

В последнее время в качестве одного из наиболее перспективных подходов зарекомендовало себя цифровое фенотипирование старения (ЦФС). ЦФС представляет собой междисциплинарную методологию, использующую возможности вычислительных технологий и искусственного интеллекта для количественного анализа многокомпонентных цифровых биомаркеров, оказывающих доказанное влияние на скорость инволюционных процессов [3]. Концептуальной основой ЦФС является конвергенция гетерогенных данных, получаемых из медицинских информационных систем, носимых устройств (wearables), персональных гаджетов и сенсоров, интегрированных в окружающую среду [4]. Это позволяет формировать комплексные, динамические фенотипы, отражающие различные аспекты старения: интеллектуальный (когнитивная активность, паттерны запросов), социальный (геолокация, круг общения) и, что наиболее важно — физиологический [5].

Сердечно-сосудистая система является одним из ключевых органов-мишеней старения, а гемодинамические параметры — высокоинформативными маркерами общего состояния организма. Общеизвестно, что такие факторы, как артериальная гипертензия (АГ), повышенное пульсовое давление (АДп) и увеличение жесткости магистральных артерий являются не только предикторами кардиоваскулярных катастроф, но и маркерами ускоренного общеорганизменного старения [6, 7]. Патогенез гемодинамических нарушений при старении сложен и гетероген. Он определяется тонким взаимодействием центральных (сердечный индекс — СИ, частота сердечных сокращений — ЧСС) и периферических (общее периферическое сопротивление сосудов — ОПСС, эластичность артерий) компонентов. Примечательно, что изменения этих фундаментальных параметров СГД могут предшествовать манифестации стойкой АГ за многие годы, а в некоторых случаях — и за десятилетия [8]. Это делает их чрезвы-

чайно перспективными объектами для раннего, до-нозологического выявления рисков в рамках концепции ЦФС.

В качестве интегрального показателя, суммирующего влияние множества факторов на состояние организма, широко используется парадигма биологического возраста (БВ). Расхождение между БВ и календарным возрастом является чувствительным индикатором темпа старения [9]. Однако существующие модели расчета БВ не всегда учитывают комплексную оценку параметров СГД, ограничиваясь рутинными показателями артериального давления (АД).

Цель исследования: выявить, систематизировать и оценить диагностическую значимость широкого спектра гемодинамических параметров СГД, ассоциированных с темпом старения, оцененным через динамику БВ, рассчитанного с учетом гемодинамических констант.

Материалы и методы исследования

Дизайн исследования и характеристика когорты: проведено одноцентровое кросс-секционное исследование. В исследование была включена когорта из 905 пациентов (395 мужчин, 510 женщин) в возрасте от 1 до 89 лет (медиана возраста — 54 года). Наблюдение за пациентами осуществлялось на базе ГБУЗ МО «Московский областной госпиталь для ветеранов войн» (Московская область) и клиники микронутриентарной терапии, косметологии и ИРМ-диетологии «New time medical» (Москва) в период с 2024 по 2025 год. Критерии включения: наличие неинфекционных, неонкологических заболеваний, подписанное информированное согласие. Критерии исключения: острые состояния, фибрилляция предсердий и другие значимые аритмии, затрудняющие проведение осциллометрии.

Методы исследования. Для комплексной оценки показателей СГД применялась неинвазивная компрессионная осциллометрия на сертифицированном приборе «КАП ЦГ осм. „ГЛОБУС“» (ООО «Глобус», Россия). Метод позволяет с высокой точностью регистрировать 22 гемодинамических параметра, включая систолическое (АДсис), диастолическое (АДдиаст), среднее (СрАД), пульсовое (АДп) и боковое (АДб) артериальное давление, сердечный индекс (СИ), общее периферическое сопротивление сосудов (ОПСС), расход энергии сердца (РЭ) и скорость пульсовой волны (СПВ). Все измерения проводились в стандартных условиях после 15-минутного отдыха, в положении сидя.

Оценка биологического возраста и темпа старения. Интегральным маркером темпа старения слу-

жил БВ. Расчет БВ проводился в автоматическом режиме прибором по запатентованной методике, основанной на алгоритме А. А. Горелкина⁹⁷. В основе расчета лежит формула, учитывающая два ключевых гемодинамических параметра: индекс кровообращения (ИК, л/мин/м²) — показатель, производный от минутного объема крови, и индекс периферического сопротивления сосудов (ИПСС, дин×с/см⁵/м²) — показатель, характеризующий тонус артериол. ИПСС рассчитывался по формуле:

$$\text{ИПСС} = (\text{СрАД} / \text{ИК}) \times 80 \text{ [10]}.$$

На основе сравнения БВ и фактического возраста (ФВ) определялся тренд старения:

- Негативный тренд (ускоренное старение): БВ>ФВ.
- Позитивный тренд (замедленное старение): БВ<ФВ.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета статистических программ SPSS 26.0 (IBM, США). Для оценки нормальности распределения количественных признаков применялся критерий Шапиро-Уилка. Описательная статистика для количественных данных, имеющих нормальное распределение, представлена в виде $M \pm \sigma$ (среднее \pm стандартное отклонение), для данных с распределением, отличным от нормального — в виде медианы и межквартильного размаха ($Me [Q25; Q75]$). Качественные данные описаны в виде абсолютных и относительных частот ($n, \%$). Для сравнения качественных признаков между группами использовался критерий χ^2 (хи-квадрат) Пирсона с поправкой Йетса на непрерывность для таблиц 2×2. Для оценки различий между двумя независимыми группами по количественному признаку применялся U-критерий Манна-Уитни. Уровень статистической значимости был установлен на уровне $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

1. Демографическая и базовая гемодинамическая характеристика когорты. Всего в анализ было включено 905 пациентов. Распределение по возрастным группам было неравномерным, с преобладанием лиц зрелого и пожилого возраста, что репрезентативно для задач исследования. При первичном анализе когорты была стратифицирована на две группы: с позитивным (БВ<ФВ, $n=458$) и негативным (БВ>ФВ, $n=447$) трендом старения. Группы были сопоставимы по полу и базовым антропометрическим показателям.

2. Анализ корреляций классических параметров АД с трендом БВ. На первом этапе был проведен анализ связи тренда БВ с классическими предикторами сердечно-сосудистого риска.

АДсист: подтверждена статистически достоверная связь ($p < 0,001$) между повышенным АДсист и негативным трендом БВ в группе пациентов старше 45 лет. В подгруппе с БВ<ФВ преобладали лица с нормальным и оптимальным АДсист, тогда как в

группе с БВ>ФВ доминировали пациенты с гипертензией. Важно отметить, что в возрастной группе до 45 лет однозначной связи не наблюдалось: у части пациентов с нормальным АДсист также регистрировался негативный тренд БВ, что указывает на мультифакторность процесса старения в молодом возрасте и возможный вклад иных, негемодинамических факторов.

АДп: распределение категорий АДп достоверно различалось между группами ($p < 0,001$). В группе с позитивным трендом почти половина пациентов (45,9%) имели пониженное АДп, а повышенное регистрировалось лишь в 12,4% случаев. В группе с негативным трендом наблюдалась зеркальная картина: у 41,2% пациентов было зафиксировано повышенное АДп, а доля лиц с пониженным АДп не превышала 14,5%. Наиболее рельефно эта зависимость проявилась в старшей возрастной группе (старше 70 лет), где у всех пациентов с БВ>ФВ регистрировалось повышенное АДп. Этот результат согласуется с данными о том, что АДп является интегральным показателем, отражающим как величину сердечного выброса, так и жесткость магистральных артерий [6], что делает его высокочувствительным маркером возраст-ассоциированного сердечно-сосудистого ремоделирования.

СрАД: анализ выявил, что у пациентов с БВ>ФВ достоверно чаще регистрировалось повышенное СрАД. Сила статистической связи для СрАД оказалась более выраженной по сравнению с АДсист, что позволяет предположить его большую чувствительность в качестве маркера ускоренного старения. Поскольку СрАД представляет собой среднюю гемодинамическую силу, поддерживающую перфузию органов, его хроническое повышение свидетельствует о перманентной нагрузке на сосудистое русло и может рассматриваться как ключевой компонент гемодинамического фенотипа старения.

3. Роль альтернативных и интегральных гемодинамических параметров.

АДб: одним из значимых результатов исследования стало выявление статистически высокодостоверной связи ($p < 0,00001$) между трендом БВ и величиной бокового артериального давления. В группе с БВ<ФВ преобладали нормальные и пониженные значения АДб (<110 мм рт. ст.), тогда как в группе с БВ>ФВ в три раза чаще регистрировалось повышенное АДб (>110 мм рт. ст.). АДб, являясь пиковым давлением в аорте, более точно отражает гемодинамическую нагрузку на центральные артерии. Его связь с темпом старения, выявленная в нашем исследовании, указывает на то, что именно центральное, а не периферическое давление, может быть более точным предиктором возраст-ассоциированных изменений.

СИ и тип кровообращения: анализ модуля сердечной деятельности выявил сложную, нелинейную зависимость между СИ и трендом БВ ($p < 0,00001$). Установлено, что риск ускоренного старения ассоциирован как с высоким (гиперкинетический тип), так и с низким (гипокинетический тип) значением СИ. У 25% пациентов с БВ>ФВ регистрировался

⁹⁷ Патент на изобретение. Способ определения биологического возраста человека. Горелкин А. А.

низкий СИ, что, вероятно, отражает скрытую систолическую дисфункцию миокарда. В то же время, повышенный СИ, характерный для ранних стадий формирования АГ и повышенного симпатического тонуса, также был значимо представлен в группе с негативным трендом. Таким образом, можно говорить о U-образной зависимости, где любое значимое отклонение СИ от условной нормы является неблагоприятным прогностическим признаком.

РЭ: продемонстрирована высокодостоверная и сильная связь ($p < 0,001$) между БВ и РЭ — интегральным показателем, характеризующим эффективность работы миокарда. В группе с $БВ < ФВ$ у подавляющего большинства (76,3%) пациентов РЭ находился в условно-нормальном диапазоне (9—12,7 Вт). В группе с $БВ > ФВ$ у более чем половины (52,4%) пациентов регистрировался высокий РЭ ($> 12,7$ Вт), в то время как низкий РЭ встречался крайне редко. Высокий РЭ напрямую связан с повышенным потреблением кислорода миокардом и свидетельствует о его неэкономном, расточительном режиме работы, что является прямым следствием комбинации тахикардии, повышенного АД и объемной нагрузки. Данный феномен четко коррелирует с негативным трендом БВ и может рассматриваться как ключевой индикатор «изнашивания» сердечно-сосудистой системы.

ОПСС: выявлена высокодостоверная связь ($p < 0,001$) между БВ и величиной ОПСС. Наиболее рельефное различие между группами наблюдалось в категории низкого ОПСС (< 1066 дин \times см²/с). В группе пациентов с $БВ < ФВ$ таких пациентов оказалось в 9 раз больше (8,5%), чем в группе $БВ > ФВ$ (0,9%). Это позволяет квалифицировать низкое ОПСС как прогностически благоприятный признак, ассоциированный с замедленным темпом старения. Напротив, начиная с 45-летнего возраста, в группе с $БВ > ФВ$ наблюдалась абсолютная связь с повышенным уровнем ОПСС, что однозначно позволяет причислить его к числу ведущих маркеров ускоренного старения.

4. Параметры артериальной жесткости и их парадоксальная индифферентность. Статистический анализ не обнаружил достоверной связи ($p > 0,05$) между трендом БВ и показателями, традиционно считающимися «золотым стандартом» неинвазивной оценки состояния артерий — скоростью пульсовой волны (СПВ) и податливостью сосудистой стенки (ПСС). Данный результат противоречит устоявшимся представлениям [7] и требует отдельного осмысления. Можно предположить, что в нашей когорте интегральный показатель БВ, рассчитанный на основе гемодинамических констант (ИК и ИПСС), оказался более чувствительным к функциональным, нежели к структурным изменениям сосудистого русла. Возможно, что увеличение жесткости артерий является более поздним событием в каскаде возраст-ассоциированных гемодинамических нарушений, следующем за дисфункцией резистивных сосудов и изменением сердечного выброса. Аналогичным образом, не было обнаружено значи-

мых корреляций со скоростью пульсового артериального давления (СкПАД) и ударным артериальным давлением (АДу).

Заключение

Проведенное комплексное исследование демонстрирует высокую диагностическую и прогностическую ценность расширенного гемодинамического мониторинга методом компрессионной осциллометрии в рамках концепции цифрового фенотипирования старения.

1. Подтверждена и детализирована возрастная зависимость связи между ускоренным старением и классическими гемодинамическими маркерами — повышенным систолическим, пульсовым и средним артериальным давлением, которая является абсолютной для лиц старше 45 лет.
2. Впервые в качестве высокозначимого маркера ускоренного старения идентифицировано повышенное боковое артериальное давление, отражающее нагрузку на центральные артерии.
3. Установлен комплекс предикторов, характеризующих состояние сердечно-сосудистой системы. В их число вошли: повышенные значения расхода энергии сердца и общего периферического сопротивления сосудов, а также отклонение сердечного индекса от нормы по U-образному принципу.
4. Выявлена ограниченная значимость параметров артериальной жесткости (СПВ, ПСС) для оценки интегрального темпа старения в данной модели, что указывает на приоритетность функциональных гемодинамических нарушений над структурными на определенных этапах старения.

Выявленные гемодинамические паттерны предлагается интегрировать в алгоритмы ЦФС для формирования «гемодинамического паспорта старения» индивидуума. Это позволит не только констатировать текущий темп старения, но и идентифицировать целевые точки для превентивного вмешательства (например, снижение ОПСС, ЧСС, СИ). Разработка персонализированных сценариев, направленных на коррекцию выявленных гемодинамических нарушений, открывает новые возможности для управления процессом старения и продления здорового периода жизни.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Decade of Healthy Ageing: Baseline Report. Geneva: World Health Organization; 2020.
2. López-Otin C, Blasco MA, Partridge L, Serrano M, Kroemer G. The hallmarks of aging. *Cell*. 2013;153(6):1194—1217.
3. Zhang Y, Wang J, Zong H, et al. Comprehensive clinical benefits of digital phenotyping: from wide implementation to full effect. *npj Digit. Med*. 2025;(8):196.
4. Лопсан А. А. Медицинские информационные системы: понятие, классификация, функции. *Инновации. Наука. Образование*. 2021;(46):1404—1411.
5. Hackett K, Xu S, McNeish M, Paglia L, Barnett I, Giovannetti T. Smartphone Mobility-Based Digital Phenotypes for Unobtrusive Capture of Community Everyday Cognition, Mood, and Life-Space in Older Adults: Feasibility, Acceptability, and Preliminary Validity Study. *JMIR Hum Factors*. 2024;11:e59974.

6. Asmar R, Rudnichi A, Blacher I, et al. Pulse pressure and aortic pulse wave are markers of cardiovascular risk in hypertensive populations. *Am J Hypertens*. 2001;14(2):91—97.
7. Van Bortel LM, Laurent S, Boutouyrie P, et al. Expert consensus document on the measurement of aortic stiffness in daily practice using carotid-femoral pulse wave velocity. *J Hypertens*. 2012;30(3):445—448.
8. Близнюк Е. Г., Котова А. А., Куликов Д. А., Пивоварова О. А., Якушин М. А. Выявление предрасположенности к развитию артериальной гипертензии у студентов при исследовании показателей системной гемодинамики. *Ремедиум*. 2025;29(2):124—128.
9. Jylhävä J, Pedersen NL, Hägg S. Biological Age Predictors. *EBioMedicine*. 2017;(21):29—36.
10. Дегтярев В. А., Дорошев В. Г. Использование ЭВМ для автоматического измерения некоторых физиологических параметров. *Космическая биология и авиакосмическая медицина*. 1981;(4):70.
4. Lopsan A. A. Medical information systems: concept, classification, functions. *Innovation. Science. Education. [Innovatsii. Nauka. Obrazovaniye]*. 2021;(46):1404—1411 (in Russian).
5. Hackett K, Xu S, McNeish M, Paglia L, Barnett I, Giovannetti T. Smartphone Mobility-Based Digital Phenotypes for Unobtrusive Capture of Community Everyday Cognition, Mood, and Life-Space in Older Adults: Feasibility, Acceptability, and Preliminary Validity Study. *JMIR Hum Factors*. 2024;11:e59974.
6. Asmar R, Rudnichi A, Blacher I, et al. Pulse pressure and aortic pulse wave are markers of cardiovascular risk in hypertensive populations. *Am J Hypertens*. 2001;14(2):91—97.
7. Van Bortel LM, Laurent S, Boutouyrie P, et al. Expert consensus document on the measurement of aortic stiffness in daily practice using carotid-femoral pulse wave velocity. *J Hypertens*. 2012;30(3):445—448.
8. Bliznyuk E. G., Kotova A. A., Kulikov D. A., Pivovarov O. A., Yakushin M. A. Identification of predisposition to arterial hypertension in students in the study of systemic hemodynamics. *Remedium. [Remedium]*. 2025;29(2):124—128 (in Russian).
9. Jylhävä J, Pedersen NL, Hägg S. Biological Age Predictors. *EBioMedicine*. 2017;(21):29—36.
10. Degtyarev V. A., Doroshev V. G. The use of computers for automatic measurement of certain physiological parameters. *Space biology and aerospace medicine. [Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina]*. 1981;(4):70 (in Russian).

REFERENCES

1. Decade of Healthy Ageing: Baseline Report. Geneva: World Health Organization; 2020.
2. López-Otín C, Blasco MA, Partridge L, Serrano M, Kroemer G. The hallmarks of aging. *Cell*. 2013;153(6):1194—1217.
3. Zhang Y, Wang J, Zong H, et al. Comprehensive clinical benefits of digital phenotyping: from wide implementation to full effect. *npj Digit. Med*. 2025;(8):196.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 07.12.2025; одобрена после рецензирования 14.01.2026; принята к публикации 24.02.2026. The article was submitted 07.12.2025; approved after reviewing 14.01.2026; accepted for publication 24.02.2026.