

УДК: 616-053: 616.12-008.331

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СИНДРОМА ПАДЕНИЙ ПРИ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ В ГЕРИАТРИИ

Сергеев В.В.

Академия постдипломного образования ФГБУ ФНКЦ ФМБА России, г. Москва

Синдром падений у пожилых пациентов с артериальной гипертензией (АГ) остается одной из самых частых и затратных проблем гериатрии. Традиционные клинические шкалы прогнозирования имеют ограниченную чувствительность из-за нелинейного взаимодействия множества факторов (ортостатические реакции, полипрагмазия, саркопения, когнитивные нарушения). Современные методы искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) позволяют интегрировать большие массивы данных из электронных медицинских записей и носимых устройств. В обзоре на основе работ 2024–2026 гг. показано, что модели (CatBoost, XGBoost, Random Forest) в отдельных исследованиях (преимущественно на ограниченных выборках) показатели значения AUC достигали 0,97. С помощью SHAP-анализа (Shapley Additive Explanations) осуществлялась интерпретация моделей и оценка вклада признаков в прогноз, при этом наибольшую важность демонстрировали: предшествующие падения, коморбидность, нарушения сна. Применение методов машинного обучения позволило выделить различные гемодинамические профили ортостатических реакций, включая паттерн ортостатической гипертензии, ассоциированный с признаками хрупкости. Технологии «объяснимого ИИ» и многогоризонтного прогнозирования позволяет дифференцировать острые и хронические компоненты риска и поддерживает персонализацию терапии.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, синдром падений, артериальная гипертензия, гериатрия, ортостатическая гипертензия, ортостатическая гипотензия, прогнозирование, объяснимый ИИ (XAI), SHAP-анализ, саркопения, носимые устройства, цифровой двойник

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR PREDICTING FALLS IN GERIATRIC PATIENTS WITH HYPERTENSION

Sergeev V.V.

Academy of Postgraduate Education of the Federal State Budgetary Institution Federal Scientific and Clinical Center of Specialized Types of Medical Care of the Federal Medical and Biological Agency, Moscow

Falls in elderly patients with arterial hypertension (HTN) remain one of the most common and costly problems in geriatrics. Traditional clinical prognostic scales have limited sensitivity due to the nonlinear interaction of multiple factors (orthostatic reactions, polypharmacy, sarcopenia, cognitive impairment). Modern artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) methods enable the integration of large datasets from electronic medical records and wearable devices. A review based on studies from 2024–2026 demonstrated that ensemble models (CatBoost, XGBoost, Random Forest) in individual studies (primarily with limited samples) achieved AUC values of up to 0.97. Using SHAP analysis (Shapley Additive Explanations), key predictors were identified: previous falls, comorbidity, sleep disturbances, and a new phenotype—orthostatic hypertension (OHTYPE)—associated with frailty. Explainable AI and multi-horizon prediction technologies make it possible to distinguish between acute and chronic risk mechanisms, paving the way for personalized adjustments to antihypertensive therapy and fall prevention.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, falls syndrome, hypertension, geriatrics, orthostatic hypertension, orthostatic hypotension, prediction, explainable AI (XAI), SHAP analysis, sarcopenia, wearables, digital twin

Введение: По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно 684 000 человек умирают в результате падений, при этом взрослые старше 60 лет составляют наибольшую долю среди погибших. Каждый год регистрируется 37,3 миллиона падений, достаточно серьезных, чтобы потребовать медицинской помощи [1]. Внутрибольничные падения отнесены Центрами Medicare и Medicaid Services (CMS) к категории «недопустимых событий», так называемых «never-событий» — происшествий, которые являются явно идентифицируемыми, предотвратимыми и серьезными по своим последствиям. В дополнение к человеческим потерям, финансовые затраты огромны: только в 2018 году они составили 50 миллиардов долларов [2].

Традиционные методы прогнозирования с помощью клинических шкал имеют ограниченную чувствительность. Для помощи могут быть использованы методы МО. В обзоре 2025 года, проанализировавшем 19 исследований, показано, что падения можно успешно прогнозировать с помощью МО без использования датчиков на основе данных электронных медицинских записей, если объем и качество данных достаточны. Метрики эффективности в этих исследованиях были стабильно высоки: точность более 0,70. Наиболее часто используемыми предикторами были сердечно-сосудистый статус и показатели мобильности пациента [2].

Связь между АГ и риском падений действительно сложна. Длительно существующая гипертензия увеличивает уязвимость за счёт хронической ишемии головного мозга и снижения когнитивных функций. Однако, не меньшее значение имеет и обратная сторона: «чрезмерное лечение гипертонии было определено как основной фактор риска падений у пациентов с низким артериальным давлением», как подчёркивается в работе Steinberg и соавторов (2024) [3], где авторы акцентируют внимание на пациентах с исходно низким систолическим АД (менее 100 мм рт. ст.). Традиционные методы прогнозирования с помощью клинических шкал часто не учитывают эту нелинейность и имеют ограниченную чувствительность. На помощь приходят методы МО.

Цель: обобщить современные данные научной литературы о применении искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования риска падений у гериатрических пациентов с артериальной гипертензией.

Материалы и методы: Контент-анализ, выборка по запросу в российских и международных реферативных базах данных (PubMed, Scopus, Web of Science, РИНЦ) за 2019–2026 гг., по ключевым словам, искусственный интеллект, машинное обучение, падения, пожилые, артериальная гипертензия, прогнозирование риска.

Результаты:

Часть 1. Машинное обучение и традиционные шкалы.

Современные систематические обзоры демонстрируют, что модели МО в ряде исследований демонстрируют более высокую прогностическую эффективность, чем традиционные методы прогнозирования падений. Обзор, посвящённый анализу данных только на основе электронных медицинских записей (без использования датчиков), охватил 6331 исследование, из которых 19 статей соответствовали критериям отбора. Показатели эффективности моделей, о которых сообщали авторы, были стабильно высоки и превышали 0,70. Наиболее часто используемыми предикторами в этих моделях оказались показатели сердечно-сосудистого статуса и оценки мобильности пациентов [2,3]. Другой всесторонний систематический обзор (33 исследования) показал, что модели прогнозирования на основе МО демонстрируют от умеренной до высокой эффективности в оценке риска падений. При этом нейросетевые и градиентно-бустинговые модели были наиболее эффективны для обработки непрерывных данных о походке, тогда как регрессионные и бустинговые подходы успешно применялись для категориальных данных из электронных медицинских карт [4].

Часть 2. Новый фенотип: ортостатическая гипертензия и хрупкость.

В последние годы методы МО позволили описать новый клинический фенотип. Группа исследователей под руководством Owen и соавторов (2024) применила МО к данным непрерывного неинвазивного мониторинга артериального давления у пожилых людей, проживающих дома в обычных условиях, и выделила 3 чётких кластера: начальная ортостатическая гипотензия (iOHYPH), классическая ортостатическая гипотензия (OHYPH) и ортостатическая гипертензия (OHYPH) [5].

Основным выводом исследования стало то, что пациенты из кластера OHYPH (парадоксальный подъём артериального давления при вставании) демонстрировали более выраженные признаки хрупкости и саркопении по сравнению с гипотензивными группами, включая снижение скорости походки и нарушения равновесия [5]. Авторы дополнительно отмечают, что данный фенотип сопровождался снижением функциональной независимости и более высокими показателями старческой астении (frailty) [5].

Полученные результаты позволяют изменить классический подход к гипотензивной терапии: агрессивное снижение давления у таких пациентов может быть неоправданно

опасным. Исследование подтверждает, что ортостатическая гипертензия должна рассматриваться как самостоятельное заболевание, заслуживающая дальнейшего изучения в гериатрической практике [5].

Часть 3. Инструменты персонализации: SHAP-анализ для «прозрачности» ИИ.

Одним из основных ограничений ИИ в клинической практике является неспособность алгоритма объяснить, на основании каких факторов было принято решение. Эта проблема успешно решается с помощью технологии SHAP, которая позволяет ранжировать факторы по степени их влияния на прогноз и делает работу ИИ-моделей более прозрачной и простой для врача [6]. Исследование на основе Китайского лонгитюдного исследования здоровья и долголетия (CLHLS, 2026) включало 10 моделей МО: логистическую регрессию, случайный лес (Random Forest), метод k-ближайших соседей (KNN), машину опорных векторов (SVM), градиентный бустинг (GBM), нейронную сеть (NNET), XGBoost, LightGBM, CatBoost и AdaBoos [6]. Сравнение моделей показало, что GBM продемонстрировала наилучшую общую эффективность с AUC 0,844, точностью 0,794 и специфичностью 0,967 [6]. SHAP-анализ выявил, что наибольший вклад в прогнозировании риска падения вносят субъективная оценка здоровья, нарушения базовой повседневной активности (BADL) и небезопасные условия жилья [6].

Ещё более детальный анализ временной динамики риска был проведён Khani и соавторами (2026), которые проанализировали данные 198 156 пациентов (99 078 случаев падений и 99 078 контрольных пациентов) [7]. Авторы обучили 7 моделей машинного обучения для прогнозирования риска падений на 7 различных временных горизонтах (3, 6, 12, 24, 36, 48 и 60 месяцев) [7]. Лучшей моделью для каждого горизонта последовательностей оказался XGBoost [7].

Ключевое открытие заключается в том, что разные факторы риска по-разному влияют на вероятность падения на различных временных промежутках. На коротком горизонте (3–12 месяцев) риск в первую очередь связан с острыми состояниями: синкопе (обмороки), респираторные симптомы и инфекции мочевыводящих путей [7]. В долгосрочной перспективе (до 5 лет) главную роль играют хронические, накопительные факторы: спондилопатии (заболевания позвоночника), дефицит питания и доброкачественные новообразования [7]. Были также выявлены 3 траектории риска падений (возрастающая, стабильная и убывающая), каждая из которых соответствует различным клиническим профилям пациентов [7]. Это открытие имеет важное практическое значение. Авторы подчёркивают, что «риск падения — это динамический процесс, а не статическое

состояние» [7]. Предложенный ими подход позволяет перейти от общих ярлыков «высокого риска» к персонализированным, адаптируя тип и время вмешательства под конкретные предикторы и факторы риска пациента [7].

Часть 4. Прогнозирование у пациентов с саркопенией и высоким риском.

Ещё одним примером с интересными результатами применения МО является исследование Wan R., Long D., Wang K., Xu K., Sun Y., Sun X., He W., Liu Z. (2026), посвящённое прогнозированию 6-летнего риска падений у пожилых пациентов с саркопенией на основе данных лонгитюдного исследования CHARLS (China Health and Retirement Longitudinal Study). В исследование были включены 1087 участников со средним возрастом 71 год (68,54% женщин), из которых 246 человек испытали падения за период наблюдения [8]. Исходный уровень включал 110 переменных [8].

Шесть моделей машинного обучения прошли строгую перекрёстную валидацию. Модель случайного леса (RF) продемонстрировала результаты: AUC = 0,971, чувствительность — 89,31%, специфичность — 95,19%, общая точность — 92,26% [8]. Анализ важности признаков выявил 48 ключевых предикторов, причём наиболее сильными детерминантами риска стали функциональные показатели, психосоциальные факторы и когнитивная функция [8].

Авторы делают важный вывод: оптимизированный алгоритм случайного леса (RF) представляет собой эффективный инструмент для выявления пациентов с саркопенией, входящих в группу высокого риска, которые могут получить пользу от целенаправленных стратегий предотвращения падений. Данные результаты подчёркивают важность многомерных вмешательств, направленных на функциональное снижение, когнитивных нарушений и психосоциальное благополучие при ведении саркопении [8].

Аналогичные выводы были получены в другом ретроспективном исследовании (2025) для общей популяции пожилых людей, проживающих в специализированных домах (community-dwelling elders). В исследование были включены 977 пожилых людей из района Ханьнань города Ухань (Китай), из которых 195 человек (20,0%) имели падения в анамнезе [9]. Было проведено сравнение логистической регрессии с пятью методами ML: случайный лес (RF), градиентный бустинг (GBDT), LightGBM, XGBoost и CatBoost.

Лучшим по прогностической эффективности оказался CatBoost (AUC = 0,8719), за ним следовали XGBoost (0,8705) и LightGBM (0,8614) [9]. SHAP-анализ подтвердил, что ключевыми рисками являются предшествующие падения в анамнезе (history of falls), коморбидность (comorbidities), полипрагмазия (polypharmacy), нарушения сна, нарушения

повседневной активности (ADL), результаты теста Timed Up and Go (TUG), наличие старческой астении (frailty) и использование вспомогательных средств [9]. Авторы делают заключение, что разработанная на основе CatBoost модель прогнозирования риска падений показала отличную производительность и может помочь в ранней клинической оценке и предотвращении падений [9].

Часть 5. Технологии мониторинга: внедрение и результаты.

Систематический анализ, посвящённый цифровым подходам в стационарах и учреждениях длительного ухода, включил 33 исследования (20 систем обнаружения падений и 13 моделей прогнозирования) [4]. Системы обнаружения падений с использованием инерционных, тензометрических и радиолокационных датчиков достигли высокой приемлемости у пациентов [4]. Однако, ключевой проблемой остаётся «тревожная усталость» из-за частых ложных срабатываний [4].

Эффективность прогностических моделей в снижении частоты травмирующих падений оценивается как нестабильная: в одном рандомизированном контролируемом исследовании зафиксировано незначительное снижение травмирующих падений (скорректированный относительный риск, aRR 0,56; 95% доверительный интервал 0,17–1,79), тогда как другое исследование продемонстрировало незначительное повышение риска (скорректированный коэффициент заболеваемости, aIRR 1,60; 95% ДИ 0,83–3,08) [4]. Авторы подчёркивают, что, несмотря на технический прогресс, «современные данные остаются противоречивыми и ограниченными» [4].

Одним из перспективных направлений, которое находится в разработке является создание «цифровых двойников» (Digital Twins). Компания LogicMark в 2025 году разработала технологию Care Village Digital Twin, которая создаёт персонализированную виртуальную копию пациента, анализируя в реальном времени его ежедневную пошаговую активность, приём лекарств, жизненные показатели и другие данные [10]. Эта технология, как заявляет компания, призвана перейти от обычной системы помощи при уже случившемся экстренном событии к проактивной предиктивной модели: непрерывный мониторинг и прогнозирование потенциальных падений и угроз здоровью до их реального возникновения [11]. Приводимый пример исходит из официального пресс-релиза LogicMark: рассматривается ситуация с 70-летним пациентом, проживающим в одиночестве, чьи показатели ежедневной активности и приверженность медикаментозной терапии отслеживаются через систему Care Village. Когда в течение 48 часов его пошаговая активность отклоняется от его же обычного повседневного уровня, система на основе

анализа этих данных и их сопоставления с профилями «цифровых двойников» в экосистеме оценивает риск падения как высокий и направляет предупреждение ухаживающему лицу для принятия мер до наступления экстренной ситуации [11].

Заключение: Искусственный интеллект и методы машинного обучения в ряде исследований демонстрируют высокую прогностическую эффективность в оценке риска падений у пожилых пациентов, включая пациентов с АГ. Использование интерпретируемых методов (в частности, SHAP) позволяет повысить прозрачность моделей и оценить вклад клинических факторов в прогноз. Временная стратификация риска и анализ различных горизонтов прогнозирования позволяют выделять как острые, так и хронические компоненты риска. Несмотря на многообещающие результаты, большинство моделей требуют дальнейшей внешней валидации и оценки клинической применимости в проспективных исследованиях.

Список литературы:

1. <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/falls>
2. Capodici A, Fanconi C, Curtin C, Shapiro A, Noci F, Giannoni A, Hernandez-Boussard T. A scoping review of machine learning models to predict risk of falls in elders, without using sensor data. *Diagn Progn Res.* 2025 May 6;9(1):11. doi: 10.1186/s41512-025-00190-y. PMID: 40325490; PMCID: PMC12054167.
3. Steinberg K. Identifying Patients at High Risk for Falls using an AI/ML model. *Ann Fam Med.* 2024 Nov 20;22(Suppl 1):6049. doi: 10.1370/afm.22.s1.6049. PMCID: PMC11627759.
4. Lee A, Lee H, Lee SH. Digital Healthcare Approaches for Fall Detection and Prediction in Older Adults: A Systematic Review of Evidence from Hospital and Long-Term Care Settings. *Medicina (Kaunas).* 2025 Oct 27;61(11):1926. doi: 10.3390/medicina61111926. PMID: 41303763; PMCID: PMC12654721.
5. Owen CM, Bacardit J, Tan MP, Saedon NI, Goh CH, Newton JL, Frith J. Artificial intelligence driven clustering of blood pressure profiles reveals frailty in orthostatic hypertension. *Exp Physiol.* 2025 Feb;110(2):230-247. doi: 10.1113/EP091876. Epub 2024 Nov 11. PMID: 39526963; PMCID: PMC11782190.
6. Zhang Q, Yang Y, Hou Q, Shi Q, Yi Y, Gan X, Gao X. Research on fall prediction in elderly patients with chronic diseases based on explainable machine learning: an aging perspective. *BMC Geriatr.* 2026 Feb 9;26(1):346. doi: 10.1186/s12877-026-07090-w. PMID: 41663995; PMCID: PMC12990403.
7. Khani M, Friedland DR, Widlansky M, Harris MS, Adams J, Fan L, Oh H, Lu Q, Luo J. Explainable AI reveals temporal risk pathways in fall prediction: Extracting clinical insights from multi-horizon machine learning models. *Geroscience.* 2026 Feb 4. doi: 10.1007/s11357-026-02117-x. Epub ahead of print. PMID: 41637029.
8. Wan R, Long D, Wang K, Xu K, Sun Y, Sun X, He W, Liu Z. Predicting fall risk among older adults with sarcopenia in China using machine learning models: a six-year longitudinal study

from CHARLS. BMC Geriatr. 2026 Jan 22;26(1):417. doi: 10.1186/s12877-026-06977-y. PMID: 41572187; PMCID: PMC13032265.

9. Liu A, Zhang L, Huang D, Qu L. Predicting fall risk among older adults in Chinese communities with advanced machine learning techniques: a retrospective study. Front Public Health. 2025 Sep 1;13:1628493. doi: 10.3389/fpubh.2025.1628493. PMID: 40959638; PMCID: PMC12433870.

10. LogicMark, Inc. LogicMark Launches Predictive Activity Metrics in Freedom Alert Max Device Press release. September 23, 2025.

11. LogicMark, Inc. LogicMark Launches AI-Powered Digital Twin Technology to Predict Falls, Safety Risks Before They Occur. Press release. November 11, 2025.