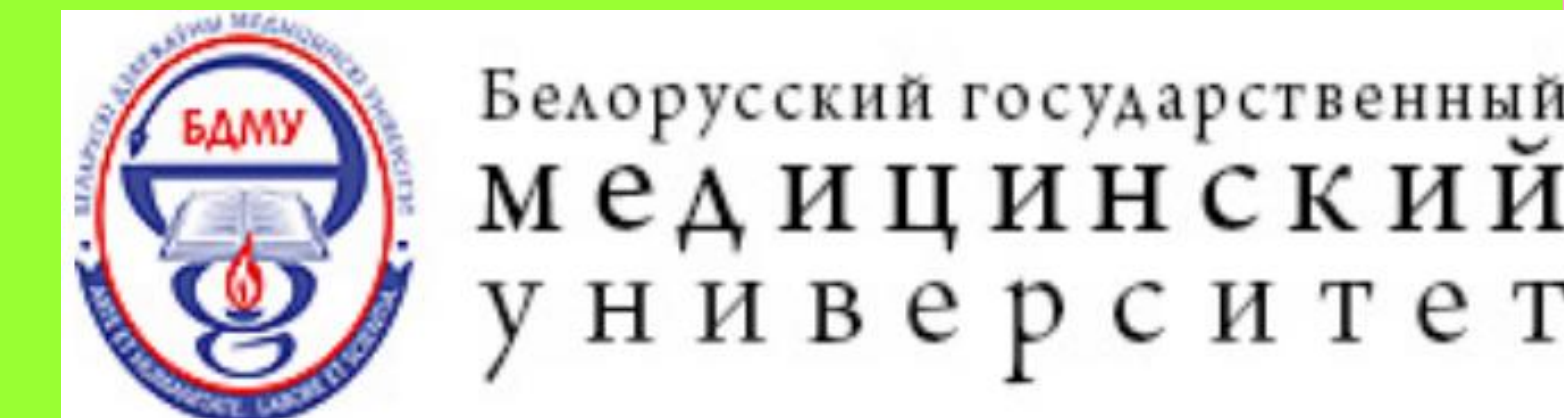


# Нелинейность вариабельности артериального давления в оценке вегетативных нарушений



B. I. Stepanov  
Institute of Physics  
National Academy of Sciences of Belarus

**М.В. Войтикова**, Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: [m.voitikova@dragon.bas-net.by](mailto:m.voitikova@dragon.bas-net.by)  
**Р.В. Хурса**, Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь, e-mail: [rvkhursa@tut.by](mailto:rvkhursa@tut.by)



Белорусский государственный  
МЕДИЦИНСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

**Введение.** Изучение нелинейных свойств вариабельности артериального давления на основе “beat-to-beat” сигналов артериального давления (АД) позволяет дифференцировать вегетативные колебания АД здорового пациента и вариабельность, связанную с вегетативной дисфункцией и старением сосудов, тем самым определяя риски сердечно-сосудистых поражений и дисфункциональных состояний гемодинамики. Сравнение диагностической силы линейных и нелинейных параметров вариабельности АД показывает полезность мониторинга нелинейности АД и практическое преимущество включения его в рутинную клиническую практику.

**Целью** настоящей работы является оценка возможностей нелинейной динамики для анализа сигналов АД, определение и верификация нелинейных параметров сигналов АД у больных при различных гемодинамических нарушениях.

**Задача** исследования состоит в определении с позиций теории хаоса динамических инвариантов, оценивающих функционирование, регулярность и сложность гемодинамики, как клинически значимых показателей, в разработке алгоритмов нелинейно-динамического анализа сигналов вариабельности АД и сердечного ритма (ВСР) для оценки физиологического состояния и патологий пациентов. Изменение нелинейных свойств АД (систолического, диастолического, пульсового АД - САД, ДАД, ПАД) или ВСР может свидетельствовать о вегетативной дисфункции гемодинамики пациентов, служить показателем угрожающих сердечно-сосудистых состояний (неблагоприятного исхода оперативного вмешательства, вероятности повторного инсульта, когнитивных нарушений), параметром жесткости артерий и др. Авторы предлагают разработку методов нелинейного анализа биомедицинских сигналов, в частности, “beat-to-beat” сигналов АД и ВСР, где в качестве маркера нарушений гемодинамики используется набор инвариантов нелинейного моделирования (корреляционная и фрактальная размерности сигнала, старший показатель Ляпунова, аппроксимированная энтропия и энтропия Шеннона, методы графического анализа Пуанкаре и DFA, построение аттрактора и др.). Утверждается, что методы нелинейного анализа АД и ВСР открывают новые аспекты функционирования гемодинамики, обнаруживают нетривиальные диагностические показатели патологии, неизвестные при применении традиционных методов анализа, которые исчерпали свой прогностический потенциал.

**Материалы и методы.** Определение линейных и нелинейных параметров осуществлялось для группы из 20 испытуемых, здоровых и пациентов реанимационного отделения с различными заболеваниями (инфаркт, инсульт, травма и т.п.) из 2 баз данных [EUROBAVAR, MIMIC II Database]. Использовались 10-мин измерения “beat-to-beat” САД, ДАД и ПАД, а также ряды RR-интервалов здоровых и гипо- или гипертензивных пациентов. В работе реализованы нелинейные методы анализа АД: вычисление корреляционной размерности, выборочной энтропии, анализ флуктуаций по методу Пенга и др.

**Результаты:** Мы исходим из предположения, что в основе гемодинамики лежит детерминированный нелинейный процесс с небольшими линейными стохастическими возмущениями, а временной ряд “beat-to-beat” измерений АД и ВСР является его реализацией. Согласно теории динамических систем эволюцию системы определяет вектор состояния, координаты которого есть измерения временных рядов САД, ДАД или ПАД (для нашей задачи). К “beat-to-beat” сигналам АД здоровых и больных пациентов применялись различные методы нелинейной динамики (расчет корреляционной размерности, старшего показателя Ляпунова, выборочной энтропии, расчет фрактальных характеристик, графический анализ Пуанкаре, анализ флуктуаций, построение аттрактора и др.), что позволило определить новые диагностические маркеры гемодинамики, основанных на нелинейной компоненте сигнала АД и имеющих прогностический потенциал.

**Заинтересованных исследователей мы приглашаем к сотрудничеству:** Маргарита Войтикова [m.voitikova@dragon.bas-net.by](mailto:m.voitikova@dragon.bas-net.by), Раиса Хурса [rvkhursa@tut.by](mailto:rvkhursa@tut.by)

Например, сравнительный анализ данных АД здорового пациента и больного с трансплантацией сердца показал, что инварианты нелинейного моделирования АД и ВСР значительно отличаются, в то время как основные линейные статистические показатели гемодинамики являются сопоставимыми (статистический и линейный анализ проводился методом регрессионного моделирования с применением авторской диагностической номограммы [M. V. Voitikova, R. V. Khursa. Nonlinear Phenomena in Complex Systems.2020;23;3; 291 - 298]).

Для таких пациентов наблюдаются снижение общей мощности спектра АД и характерные изменения параметров графика Пуанкаре. Аналогичные изменения свойств рядов АД и ВСР характерны для пациентов реанимационного отделения с тяжелыми нарушениями кровообращения (инфаркт, инсульт, травмы и т.п.), гемодинамика которых демонстрирует отсутствие или крайне низкий уровень нелинейности. В теории гемодинамики таких пациентов можно анализировать методами статистики, при этом временной ряд АД и ВСР представляет собой реализацию стохастического процесса (дробный гауссовский шум или дробное броуновское движение). С другой стороны, наибольшее значение фрактальной размерности сигналов ВСР наблюдалось у пациентов с желудочковой фибрилляцией.

В наших исследованиях делается вывод, что сигналы АД и ВСР характеризуются наличием хаотической составляющей, причем степень хаотичности сигнала меняется в зависимости от физиологического состояния пациента и наличия патологии (например, энтропия и фрактальная размерность увеличивается при увеличении нелинейной составляющей в сигнале).

Кроме того, в нашей работе было показано, что при традиционных периодических измерениях АД (с периодом десятки мин и более) могут быть упущены (нелинейные) параметры сигналов, которые определяют механизмы контроля уровня АД.

Таким образом, нелинейные параметры сигнала АД здорового индивидуума свидетельствуют о управляющем нелинейном детерминированном процессе и демонстрируют фундаментальные особенности: само-аффинность (фрагменты ряда имеют статистические свойства целого ряда), масштабирование по степенному закону и др. Показано, что гемодинамические нарушения, вызванные жесткостью сосудов или артериальной гипертензией достоверно сопровождаются изменением величины корреляционной размерности и выборочной энтропии. Кроме того, нами было продемонстрировано, что отсутствие нелинейных свойств и невозможность определения нелинейных инвариантов сигнала АД и ВСР всегда ассоциировано с тяжелыми вегетативными нарушениями.

**Заключение** Применение линейных и нелинейных методов анализа АД создает разные правила диагностики патологических состояний. Так, нелинейное моделирование дает возможность определения ранее неизвестных маркеров заболеваний, сопровождающихся характерным изменением вариабельности АД. “Beat-to-beat” сигналы АД здорового индивидуума демонстрируют фундаментальные особенности, свидетельствующие о управляющем нелинейном детерминированном процессе. При этом отсутствие или слабые нелинейные свойства АД всегда ассоциированы с тяжелыми вегетативными нарушениями. Нами была предложена методика количественной оценки сложности сигналов АД на основе нелинейных инвариантов, определяемых в фазовом пространстве на основе измерений “beat-to-beat” АД. Разработанный алгоритм нелинейного анализа дифференцирует сигналы АД с учетом его амплитудных, временных и нелинейных характеристик. Методика верифицирована на сигналах АД здоровых лиц и пациентов реанимационного отделения с различными поражениями гемодинамики. Наши исследования свидетельствуют о целесообразности использования нелинейных параметров АД и ВСР в рутинной клинической практике с целью получения неочевидной ранней диагностической информации.