

УДК 616.1- 072

# Вариабельность и устойчивость — важнейшие свойства сердечно-сосудистой системы

А. В. Фролов

Республиканский научно-практический центр  
«Кардиология», Минск, Республика Беларусь

## Резюме

Цель работы — изучение устойчивости сердечно-сосудистой системы у спортсменов, здоровых лиц и больных ишемической болезнью сердца по данным variability сердечного ритма. Обследовано 137 лиц в покое, при физических нагрузках и в послеоперационном периоде.

Уменьшение параметров variability сердечного ритма SDNN, MxMn и HF сопровождается переходом от нормы к патологии. Снижение чувствительности параметров variability сердечного ритма при нагрузке, а также после операции АКШ наглядно отражает потерю устойчивости. Депрессия ритма с симпатoadrenalовой доминантой является маркером неблагоприятных исходов после АКШ.

Ухудшение регуляторных качеств приводит к потере устойчивости сердечно-сосудистой системы при действии внешних нагрузок. Степень нарушений параметров variability сердечного ритма связана со стадией развития патологического процесса.  
**Ключевые слова:** variability сердечного ритма (BCP), сердечно-сосудистая система, устойчивость.

Клин. информат. и Телемед.  
2005. Т.2. №1. с.32–36

*«Устойчивость — способность системы возвращаться в исходный режим после прекращения действия возмущающего фактора»*

великий русский математик  
А. М. Ляпунов (1857–1918)

## Введение

Сердечно-сосудистая система (ССС) — яркий пример уникальной системы управления, построенной по многоиерархическому принципу, где каждый нижний уровень в нормальных условиях функционирует автономно. При изменениях внешней среды и/или при развитии патологического процесса с целью сохранения гомеостаза активизируются высшие уровни управления. Здоровое сердце реагирует на малейшие психоэмоциональные возмущения, информацию и физическую нагрузку. Еще С. П. Боткин отметил: «способность к регуляции сердечной деятельности, так тонко развитая у здоровых, у сердечных больных нарушается, ее, так сказать, не хватает и притом у различных субъектов в разной степени» [4]. Разработанные математические модели ССС успешно описывают поведение системы в целом и ее компонентов в эксперименте и клинике (Н. М. Амосов, В. А. Лищук, С. А. Пацкина и др., 1969; Ю. Г. Антомонов, 1977; В. А. Лищук, 1991) [1,2,6]. Важное значение данных работ состоит в том, что они впервые сместили акцент внимания клиницистов от интегральных выходных функций, к которым относится артериальное давление (АД), к регуляторным системам организма, которые

непосредственно управляют данными функциями.

Постоянно взаимодействующие тормозящие и ускоряющие регуляторные механизмы поддерживают гомеостаз. Частота сердечных сокращений, сердечный выброс и тонус сосудов варьируют beat-to-beat с целью стабилизации и демпфирования колебаний АД при непрерывных «возмущениях» внешней среды. Поэтому свойство variability определяет адаптационные ресурсы организма и является адекватным критерием эффективности лечения многих патологических состояний.

Если речь идет о замкнутых системах регулирования, прежде всего анализируются такие их свойства как устойчивость и качество переходных процессов. Великий русский математик А. М. Ляпунов разработал общую теорию устойчивости для линейных и нелинейных систем. На ее основе создан ряд таких критериев устойчивости как Рауса, Михайлова, Найквиста и др [10]. По соотношению параметров дифференциальных уравнений можно установить границы устойчивости. Тем не менее, глубина теоретических работ А. М. Ляпунова еще не раскрыта относительно сложных систем в медицине, биологии, экологии и экономике.

Потеря устойчивости ССС прежде всего определена ухудшением качества функционирования регуляторных механизмов. Сложность биологических объектов не допускает возможность применения классических разделов математики для их анализа, следовательно, оправдан поиск и применение неких косвенных критериев. В этой связи рассматривается гипотеза. Не является ли свойство variability таким критерием устойчивости сердечно-сосудистой системы?

В рамках данной гипотезы выполнен анализ результатов использования метода вариабельности сердечного ритма (ВСР) по всей шкале состояний: от спортсменов высшей квалификации до практически здоровых лиц, от хронических форм сердечно-сосудистой патологии до больных ИБС тяжелых стадий, перенесших операцию аорто-коронарного шунтирования (АКШ).

## Материал и методы

Всего было обследовано 137 лиц. Среди них выделены группа спортсменов высшей квалификации (мастера спорта и мастера спорта международного класса по гребле) — 37 человек, практически здоровые лица — 45 человек, больные стенокардией напряжения функционального класса (ФК) I-II — 45 пациентов, группа больных, перенесших инфаркта миокарда — 45 пациентов. Средний возраст спортсменов составил  $25 \pm 3$  года, в остальных группах средний возраст равнялся  $50 \pm 15$  лет, без достоверных статистических различий между группами. Всем проводили исследования по 5 минутному протоколу ВСР в покое. Кроме того, обследуемые выполняли велоэргометрическую пробу по стандартному, ступенчато-возрастающему и стохастическому протоколам. Обе нагрузки были эквиваленты по выполненной работе (28 кДж), средней мощности (50 Вт) и полному времени тестирования (9 мин). Данные велоэргометрической пробы у спортсменов не сопоставлялись с другими группами, так как они выполняли протокол нагрузки до 400 Вт и временем пробы до 25 мин. Через 5 мин после прекращения нагрузки проводили дополнительное обследование ВСР. Условно считали, что в течение данного периода сохраняется напряженность системы вегетативной регуляции, вызванная физической нагрузкой. В качестве показателя реакции ССС на физическую нагрузку вычисляли относительные приросты показателей ВСР по отношению к состоянию покоя. Проведена статистическая обработка параметров ВСР в группах обследуемых. С целью упрощения изложения, разбросы статистических характеристик не приведены.

Использовались сертифицированные программно-технические системы: 12-канальный цифровой электрокардиограф «Интекард» с цифровым выходом USB, анализатор вариабельности сердеч-

ного ритма «Бриз-М» (г. Минск), программируемый велоэргометр М32-В1 (г. Гомель).

## Результаты исследования

На рис. 1 представлена динамика основного показателя ВСР — среднего квадратического отклонения SDNN по шкале состояний от спортсменов к больным ИБС. Наглядно видно, что показатель SDNN экспоненциально убывает по мере возрастания тяжести патологии. Аналогичную зависимость проявляет вариационный размах сердечного ритма MxdMn, а стресс-индекс Si, наоборот, возрастает по закону, близкому к экспоненциальному (рис. 2).

Активность парасимпатического контура по данным высокочастотной компоненты спектра HF максимальна у спортсменов и имеет негативную тенденцию снижения при прогрессе патологии (рис. 3). Понижается также активность вазомоторного центра по данным низкочастотной компоненты LF. Активность подкоркового симпатического центра VLF самая низкая у спортсменов. При переходе от здоровых лиц к группе больных со стенокардией напряжения она возрастает, далее у больных ИМ обратно падает. Следует отметить, что эти спектральные характеристики демонстрируют лишь процентное соотношение между активностью разных отделов регуляции, общая мощность спектра по мере развития патологии достоверно снижается. То есть, при переходе от физиологической нормы к тяжелой форме патологии развивается так называемая «вегетативная денервация», описанная также В. Г. Воронковым и Н. В. Богачевой [5].

Несомненный интерес представляет реакция регуляторных систем организма на нагрузку, в частности при велоэргометрической пробе (ВЭП). На рис. 4 представлены сдвиги параметров ВСР при ВЭП у разных категорий обследованных: а) здоровые лица, б) больные стенокардией напряжения, в) больные инфарктом миокарда.

В норме реакция на физическую нагрузку заключается в повышении активности симпатического отдела регуляции при неизменном парасимпатическом. Переход от нормы к патологии сопровождается близким к линейному уменьшению сдвигов временных параметров ВСР. Усиливается выраженность симпатического типа реакции с одновремен-

SDNN, mc

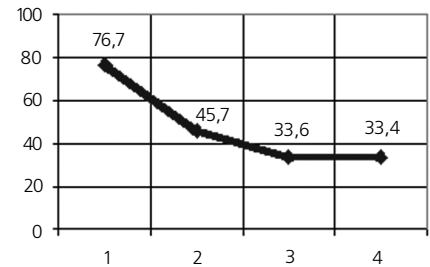


Рис. 1. Эволюция среднего квадратического отклонения SDNN по шкале состояний:

- 1 — спортсмены высшей квалификации;
- 2 — практически здоровые лица;
- 3 — больные стенокардией напряжения ФК I-II;
- 4 — больные инфарктом миокарда.

MxdMn, mc

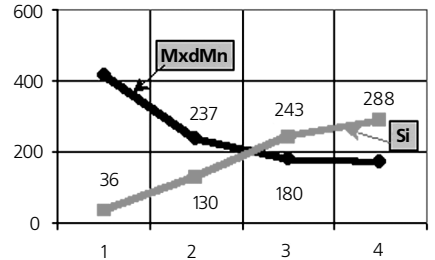
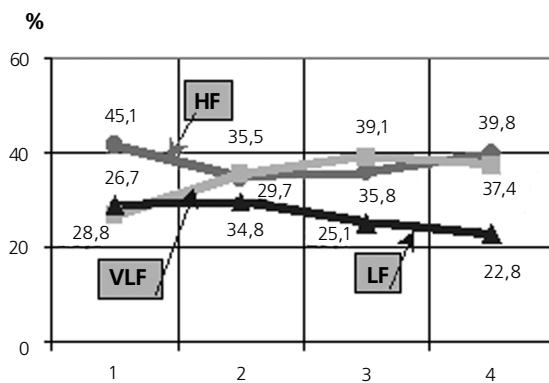


Рис. 2. Эволюция вариационного размаха MxdMn и стресс-индекса Si по шкале состояний:

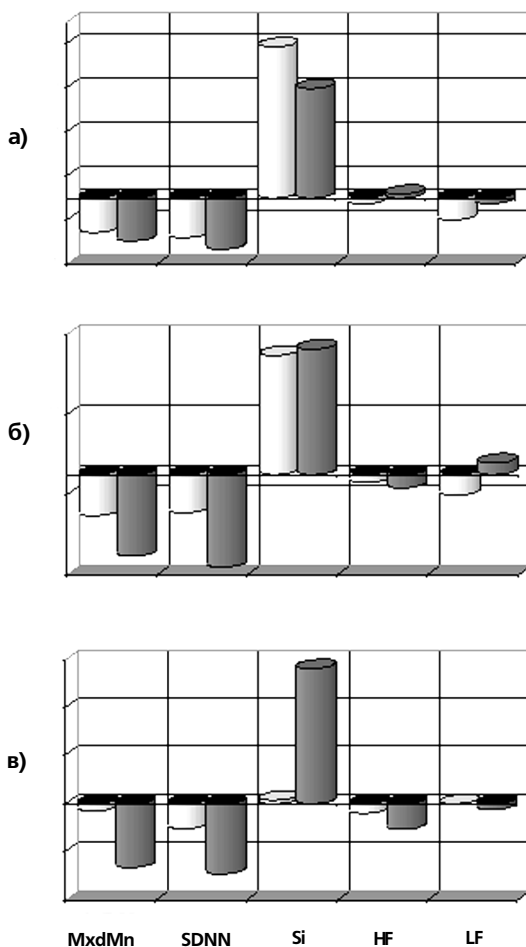
- 1 — спортсмены высшей квалификации;
- 2 — практически здоровые лица;
- 3 — больные стенокардией напряжения ФК I-II;
- 4 — больные инфарктом миокарда.

ным ослаблением парасимпатического отдела регуляции. В пределе у больных инфарктом миокарда чувствительность вегетативной регуляции на физическую нагрузку снижается и практически приближается к нулю. При этом мы выявили, что стохастические нагрузки обладают большей нагрузочной способностью, чем суррогатные, ступенчато-возрастающие [8].

При наблюдении за состоянием больных ИБС, перенесших операцию АКШ, выявлено следующее. В ближайший послеоперационный период 1–3 сутки развивается депрессия сердечного ритма с симпатической доминантой, т.е. среднее квадратическое отклонение SDNN и MxdMn падают, а амплитуда моды aMo% и отношение симпатовагусного баланса LF/HF растут (см. рис. 5). При



**Рис. 3. Эволюция соотношения спектральных характеристик HF, LF и VLF по шкале состояний:**  
**1 — спортсмены высшей квалификации;**  
**2 — практически здоровые лица;**  
**3 — больные стенокардией напряжения ФК I-II;**  
**4 — больные инфарктом миокарда.**



**Рис. 4. Реакция системы регуляции сердечного ритма на физическую нагрузку в % от исходного состояния:**  
**а) здоровые лица (n = 45);**  
**б) больные стенокардией напряжения ФК I-II (n = 45);**  
**в) больные инфарктом миокарда (n = 45).**

□ ступенчато-возрастающая нагрузка  
 ■ стохастическая нагрузка

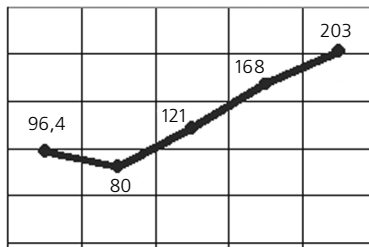
этом исходные уровни MxdMn, SDNN соответствуют тяжести патологии, наилучшие исходные значения ВСР у больных ИМ. На 10-е сутки послеоперационного периода и далее MxdMn, SDNN постепенно возрастают, к 6 неделе и 6 месяцу наблюдения LF/HF достоверно снижается в основном за счет увеличения мощности в диапазоне высоких частот HF. VLF недостоверно снижалась на 3 и 10 сутки и затем достоверно продолжала уменьшаться при последующих наблюдениях. Рост стресс-индекса Si прекращается к 10-м суткам, далее происходит его устойчивое снижение (рис. 6). Видно, что исходное значение наиболее высокое у больных ИМ, несколько ниже у больных НС (нестабильной стенокардией), еще ниже у больных СН (стенокардия напряжения).

Отдельно выделена подгруппа больных с острым коронарным синдромом, в которой отмечены какие-либо конечные точки (смерть, повторные госпитализации по поводу инфаркта миокарда или нестабильной стенокардии, возвратная стенокардия высокого класса). И. Д. Шугай (2004) с помощью регрессионной модели пропорциональных рисков Кокса установила, что наиболее мощными предикторами смертельного исхода являются признаки MxdMn < 80 мс (чувствительность 100%, специфичность 95%), SDNN < 15 мс (100% и 90%, соответственно). При этих ситуациях наблюдаемое сочетание параметров ВСР представлено в таблице 1.

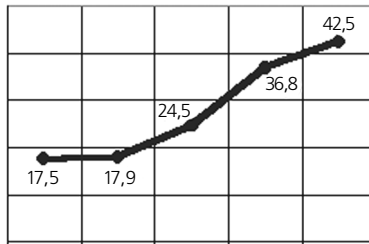
## Обсуждение результатов

Сдвиг от нормы к патологии по шкале состояний сопровождается ухудшением регуляторных влияний на синусовый узел, что наглядно видно по динамике временных (SDNN, MxdMn, aMo, Si) и спектральных (HF, LF, VLF) показателей ВСР. Как следовало ожидать, наиболее эффективные регуляторные механизмы у спортсменов высшей квалификации. Общая мощность регуляторных влияний в 1,7 раза выше, чем у здоровых лиц, не связанных с регулярными физическими нагрузками. Повышение высокочастотной компоненты HF, отражающей активность парасимпатического контура, может служить маркером кумулятивного эффекта спортивных тренировок (Н. И. Шлык, 2003). Не являются ли сдвиги показателей парасимпатического контура регуляции при спортивных тренировках своеобразным индикатором

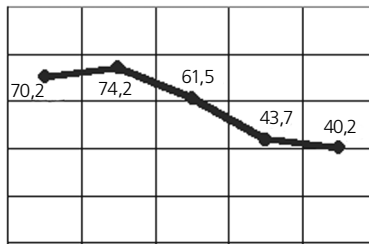
MxdMn, мс



SDNN, мс



aMo, %



LF/HF



**Рис. 5** Динамика параметров ВСП у больных ИБС в послеоперационном периоде после операции АКШ.

накопления «потенциальной энергии организма», которая на состязаниях переходит в кинетическую форму? Естественно, что это предположение нуждается в экспериментальном подтверждении.

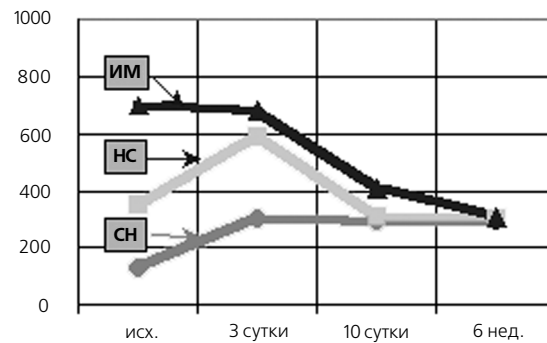
У больных кардиологического профиля степень ухудшения параметров ВСП тесно связана со стадией развития патологического процесса. Наиболее наглядно это проявляется в реакциях ССС на физическую нагрузку. Если у больных со стенокардией напряжения ФК I-II чувствительность вегетативной нервной системы к нагрузке еще сохраняется, то

больных инфарктом миокарда чувствительность практически потеряна, другими словами развивается «вегетативная денервация». В этой ситуации возрастает риск опасных нарушений ритма или других сердечно-сосудистых катастроф.

У больных с острым коронарным синдромом из-за предоперационного стресса, повреждения нервных волокон во время операции и инфузионных средств в интраоперационном периоде развивается депрессия сердечного ритма, что и подтвердили наши исследования. Параметры ВСП на 1-3 сутки после АКШ

на 20-60 % снижаются в сравнении с исходным уровнем. Однако уже на 10-12 сутки, данные параметры возвращаются к исходному уровню. Улучшение коронарного кровотока, вследствие АКШ, приводит к превышению дооперационных значений ВСП. Можно констатировать, что есть тенденция к нормализации симпатовагусного регулирования сердечного ритма. Все случаи послеоперационных осложнений со 100 % чувствительностью сопровождались крайне высокой депрессией ритма и симпатoadреналовой доминантой.

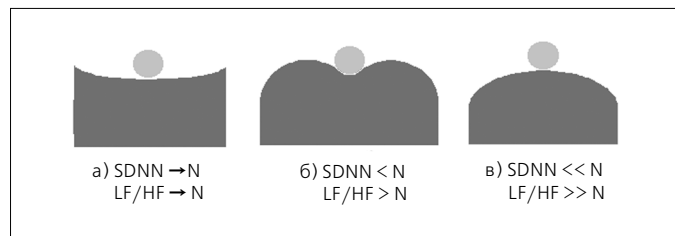
Si, усл. ед.



**Рис. 6.** Динамика стресс-индекса Si у больных ИБС, перенесших операцию АКШ. Обозначения: СН — стенокардия напряжения, НС — нестабильная стенокардия, ИМ — инфаркт миокарда.

Вариационный размах MxdMn, мс	< 50
Среднее квадратичное отклонение SDNN, мс	< 14
Стресс-индекс Si, усл. ед.	→ max

**Табл. 1.** Сочетание параметров ВСП у больных ИБС с осложнениями после операции АКШ.



**Рис. 7.** Геометрическая интерпретация устойчивости: а) устойчивое состояние; б) устойчивое в малом, но неустойчивое в большом; в) неустойчивое состояние, N — условная норма.

С информационной точки зрения можно сказать, что при стремлении SDNN к нулю деятельность сердечно-сосудистой системы детерминирована. И, наоборот, при росте SDNN к максимально возможному уровню система переходит в дезорганизованное состояние. Между этими крайними состояниями порядка и хаоса находится оптимум, при котором энтропия ССС соответствует энтропии внешней среды.

Вариацию сердечного ритма можно также трактовать как непрерывную подстройку параметров к некоторому наиболее оптимальному состоянию. Так исследования В. Ф. Федорова показали, что при широкой вариации сердечного ритма, его мода распределения является робастной переменной, которая при изменении нагрузки меняется скачкообразно [9].

Можно постулировать, что ухудшение регуляторных качеств, выявляемое данными ВСП, снижает устойчивость ССС к воздействию внешних нагрузок, как физических, так и психоэмоциональных. На рис. 7 приведена геометрическая интерпретация устойчивости ССС: а) устойчивое состояние, б) устойчивое в малом, неустойчивое в большом, в) неустойчивое состояние. Индексом N обозначена условная норма. Неблагоприятным сочетанием является доминанта возбуждающих контуров с одновременной депрессией тормозящих. При этом общая устойчивость ССС ухудшается. При высокой депрессии вегетативной регуляции любая значимая нагрузка (физическая, психоэмоциональная) выводит ССС в зону неустойчивости, то есть за пределы адаптационных возможностей. Чем выше вариабельность, тем устойчивей ССС к воздействию внешних нагрузок. При резком снижении вариабельности, то есть при «вегетативной денервации» ухудшается качество регуляторных механизмов и как следствие возрастает риск сердечно-сосудистых катастроф.

Таким образом, поиск объективных критериев устойчивости и адаптации сердечно-сосудистой системы по данным метода ВСП только зарождается. Например, отношение дисперсии интервала QT к дисперсии RR отражает устойчивость процессов реполяризации, которые являются фактором аритмогенеза. Очень перспективны методы нелинейного анализа для коротких записей сердечного ритма, развиваемые харьковской научной школой ВСП [7, 11].

## Литература

1. Амосов Н. М., Лищук В. А., Пацкина С. А., Палец Б. Л., Лиссов И. Л.

Саморегуляция сердца. – Наукова думка, Киев. – 1969. – 170 с.

2. Антомонов Ю. Г. Моделирование биологических систем (справочник). – Наукова думка, Киев. – 1977. – 260 с.
3. Баевский Р. М. Анализ вариабельности сердечного ритма: история и философия, теория и практика // Клиническая информатика и Телемедицина. – Харьков. – 2004. – №1. – С. 54–64.
4. Боткин С. П. Курс клиники внутренних болезней. Том 1. – М.:Медгиз, 1950.
5. Воронков В. Г., Богачева Н. В. Клінічне значення варіабельності серцевого ритму при хронічній серцевій недостатності // Вісник Харківського національного університету ім.Каразіна. – № 581. – Медицина, випуск 5. – 2003. – С. 42–43.
6. Лищук В. А. Математическая теория кровообращения. – М.:Медицина, 1991. – 256 с.
7. Мартыненко А. В. Нелинейные методы анализа вариабельности сердечного ритма//Вісник Харківського національного університету ім. Каразіна. – № 581. – Медицина, випуск 5. – 2003. – С. 67–68.
8. Сидоренко Г. И., Фролов А. В., Котова О. В., Станкевич В. И. Новая функциональная нагрузочная (стохастическая) проба и перспективы ее применения // Кардиология. – № 1. – том 44. – 2004. – С. 14–20.
9. Федоров В. Ф. Соотношение количественных параметров ритма сердца и кровотока в задачах функциональной диагностики //Вісник Харківського національного університету ім.Каразіна. – № 581. – Медицина, випуск 5. – 2003. – С. 88.
10. Энциклопедия кибернетики. В 2-х томах. – Главная редакция УСЭ, Киев. – 1974.
11. Яблучанский Н. И., Кантор Б. Я., Мартыненко А. В. Вариабельность сердечного ритма в современной клинике. – Харьков, 2001.

## Heart rate variability and stability are the most important characteristics of the cardiovascular system

**A. Frolov**  
*Scientific and Practical Centre of «Cardiology», Minsk, Belarus*

### Abstract

The purpose of the work is examining the stability of cardiovascular system of sportsmen, healthy people, ischemic disease and myocardial infarction patients by using heart rate variability data. 137 people have been examined in rest, during their physical activity and after being operated.

The decrease of the heart rate variability parameters SDNN, MxDMn and HF

shows the transition from normality to pathology. The decrease of the sensibility of the hart rate variability depending on physical activity and after having been operated on the coronary artery bypass grafting shows the loss of stability by eyesight. The depression of the heart rate with the sympatoadrenal dominant is the marker of the unfavourable issue after the coronary artery bypass grafting.

The deterioration of the regulator qualities leads to the loss of the cardiovascular system's stability during physical activity. The violation's degree of parameters of the heart rate variability is influenced by the degree of progress of pathologic process.

**Keywords:** heart rate variability (HRV), cardiovascular system, stability.

## Вариабельність і стійкість — важливі властивості серцево-судинної системи

**О. В. Фролов**

*Республіканський науково-практичний центр «Кардіологія», Мінськ, Беларусь*

### Резюме

Мета роботи — вивчення стійкості серцево-судинної системи спортсменів, здорових осіб та страждаючих на ішемічну хворобу сердца за даними варіабельності серцевого ритму. Обстежено 137 осіб в покої, при фізичних навантаженнях і в післяопераційному періоді.

Зменшення параметрів варіабельності серцевого ритму SDNN, MxDMn і HF супроводжує перехід від норми до патології. Зниження чутливості параметрів варіабельності серцевого ритму при навантаженні, а також після операції АКШ наочно відображає втрату стійкості. Депресія ритму з симпатoadреналовою домінантою є маркером несприятливих завершень після АКШ.

Погіршення регуляторних якостей призводить до втрати стійкості серцево-судинної системи при дії зовнішніх навантажень. Ступень порушень параметрів варіабельності серцевого ритму пов'язана зі стадією розвитку патологічного процесу.

**Ключові слова:** варіабельність серцевого ритму, серцево-судинна система, стійкість.

## Переписка

д.б.н., професор  
лауреат Государственной премии  
по науке и технике РБ

**А. В. Фролов**

РНПЦ «Кардиология»

ул. Р. Люксембург, 110

Минск, 220036, РБ

эл. почта: info@cardio.by

www.cardio.by