

## **Нестационарность и длительность временного ряда сердечного ритма при диагностике функциональных состояний.**

**В. А. Машин**

**(Биофизика, 2007, Т. 52, № 2, с. 344–354)**

*Нововоронежский учебно-тренировочный центр подготовки специалистов для АЭС, г. Нововоронеж*

*E-mail: [utc@yml.ru](mailto:utc@yml.ru)*

**Резюме** Проанализировано влияние нестационарности временных рядов кардиоинтервалов на диагностику функциональных состояний с помощью трехфакторной модели вариабельности сердечного ритма. Сердечный ритм регистрировался в положении лежа, перед началом выполнения ответственной деятельности и после ее выполнения. Для всех трех условий получена высокая устойчивость диагностирования функциональных состояний к действию фактора нестационарности. Были выделены показатели вариабельности сердечного ритма, для которых можно пренебречь влиянием нестационарности. Было исследовано влияние временного ряда сердечного ритма на диагностику функциональных состояний. Полученные статистические данные позволяют заключить, что диагностику функциональных состояний на основе трехфакторной модели вариабельности сердечного ритма можно использовать на коротких выборках в диапазоне  $256 \div 32$  R-R интервала, с предварительной нормализацией факторных показателей для соответствующей длины временного ряда. Влияние длительности сегментов кардиоинтервалов на показатели вариабельности сердечного ритма было изучено для различных функциональных состояний. Были определены показатели, устойчивые к изменению длительности временного ряда, и необходимые условия для регистрации сердечного ритма.

*Ключевые слова:* стационарность, длительность ряда кардиоинтервалов, вариабельность ритма сердца, функциональные состояния.

## **Nonstationarity and Duration of the Cardiac Interval Time Series in Assessing the Functional State of Operator Personnel.**

**V.A.Mashin**

**(Biophysics, 2007, Vol. 52, No. 2, p. 241–247)**

*Novovoronezh Nuclear Power Station Personnel Training Center, Novovoronezh, Voronezh oblast, 396072, Russia*

*E-mail: [utc@yml.ru](mailto:utc@yml.ru)*

**Abstract** The influence of nonstationarity in the time series of cardiac intervals on the assessment of the functional state (FS) of operator personnel was analyzed with a three-factor model of heart rhythm variability (HRV). ECG recordings were made in supine position at rest and in the sedentary position before and after important operator testing. In all three cases, the FS assessments were not influenced by nonstationarity of the input data. The effect of nonstationarity was also negligible for some particular HRV indices. Reliable assessments could be obtained from relatively short samples (256 down to 32 RR intervals) with prior norming of the factor indices for the corresponding segment length. The influence of the time series duration on the HRV indices was examined in various FSs; stable indices and proper recording conditions were determined.

*Key words:* stationarity of series, R-R segment duration, functional states, heart rate variability.

Математический аппарат спектрального анализа разработан с учетом предположения, что временной ряд стационарен, то есть порождающий его механизм не меняется во времени, а соответствующий процесс достигает статистического равновесия [10]. На практике это выражается в оценке моментов первого и второго порядков: математическое ожидание и дисперсия ряда

должны быть постоянны во времени [23]. Данное предположение накладывает требование контроля стационарности при расчете спектральных характеристик variability сердечного ритма, что нашло отражение в различных методических рекомендациях [1,17]. На важность контроля эффектов нестационарности указывают ряд работ по variability сердечного ритма [11,14,21,22]. Для выполнения указанного требования исследования коротких записей (от 2-х до 5-ти минут) строят таким образом, чтобы обеспечить условия стационарности процесса: регистрация производится в состоянии покоя, в процессе однообразной физической деятельности, при достижении устойчивого функционального состояния. В совершенно другой ситуации находится исследователь, когда он пытается проанализировать динамику сердечных сокращений в процессе выполнения сложной и ответственной психической деятельности, когда непосредственным действиям предшествуют периоды тревожности, эмоционального возбуждения, напряжения, которые могут наблюдаться как в процессе, так и после окончания выполнения. В этом случае динамика ритма сердца может быть далека от стационарной.

Как отмечают ряд авторов, нарушение стационарности может породить смещение оценок вагусного контроля ритма сердца при выполнении анализа variability сердечного ритма [14,21]. Однако строгое следование требованию стационарности может привести к преувеличению подобного рода оценок, когда спектральный анализ выполняется на стационарных временных сегментах, выделенных из нестационарного временного ряда. Такие оценки, как считают ряд исследователей, могут быть даже более смещенными, чем спектральные оценки, полученные из исходного нестационарного временного ряда [22]. В работе [13] было специально исследовано влияние нестационарности на некоторые показатели вагусного контроля ритма сердца: MSD (средняя абсолютная разность между последовательными R-R интервалами), RSA (синусовая дыхательная аритмия), HF (мощность спектра ритма сердца в высокочастотном диапазоне). Регистрация ритма сердца была выполнена как в покое (сидя и лежа), так и при выполнении функциональных проб (сжатие кистью динамометра, контролируемое дыхание, холодной прессорный тест, видеоигра с денежным поощрением). Данные, полученные от 21 здоровой женщины, позволили авторам сделать вывод, что зафиксированная в условиях эксперимента нестационарность временного ряда играет незначительную роль при расчете использованных в исследовании показателей вагусного контроля ритма сердца. Слабый эффект нестационарности на значения спектрального показателя HF подтверждается также и другими работами [14,15].

Противоречивость взглядов на проблему стационарности подтолкнул нас проанализировать влияние фактора нестационарности на диагностику функциональных состояний. Дополнительно был исследован эффект нестационарности на широкий спектр показателей variability сердечного ритма. Диагностика функциональных состояний выполнялась с помощью предложенной нами трехфакторной модели variability сердечного ритма [8]. Первый фактор данной модели отражает общий уровень variability сердечного ритма (оценивается показателем SDNN – стандартным отклонением R-R интервалов между комплексами QRS

нормальных синусовых кардиоциклов N-N, без артефактов и экстрасистол). Второй фактор характеризует баланс между высокочастотными и низкочастотными колебаниями ритма сердца (оценивается показателем  $b_1$  - тангенсом угла наклона линии регрессии графа ритма сердца). Третий фактор тесно связан с интегральным уровнем функционирования сердечно-сосудистой системы (оценивается показателем  $M_{NN}$  - средним значением нормальных R-R интервалов). Использование нормированных (методом процентилей [2]) показателей трехфакторной модели позволяет описать 8 классов функциональных состояний [8]: ФС1 - "Норма", ФС2 - "Напряжение по ЧСС" (значительное снижение  $M_{NN}$ ), ФС3 - "Эмоциональное возбуждение" (рост  $b_1$ ), ФС4 - "Эмоциональное возбуждение с напряжением по ЧСС" (рост  $b_1$  и ЧСС), ФС5 - "Общее напряжение" (рост  $b_1$  и ЧСС, снижение SDNN), ФС6 - "Напряжение с дизрегуляцией по ЧСС" (на фоне роста  $b_1$  и снижения SDNN показатель ЧСС остается в норме), ФС7 - "Напряжение с дизрегуляцией по парасимпатике" (на фоне повышения ЧСС и снижения SDNN показатель  $b_1$  сохраняется в норме), ФС8 - "Напряжение с дизрегуляцией по парасимпатике и ЧСС" (на фоне снижения SDNN показатели  $b_1$  и ЧСС остаются в норме).

Как правило, в методических рекомендациях стандартная длительность кратковременных записей составляет 5 минут [1,17]. Но в реальности особенности исследовательской программы (скоротечность вызываемых функциональных состояний) или ограничения регистрирующих приборов (продолжительности записи физиологического сигнала) требуют от исследователя анализировать более короткие сегменты ЭКГ [12]. В работе [19] представлены результаты сравнения 9 показателей variability сердечного ритма, рассчитанные по записям ЭКГ длительностью от 10 сек до 10 минут (базовыми оценками служили значения показателей, полученные на 5 минутных сегментах). В анализе были использованы 54 длительные записи ЭКГ (21.4 - 24.2 часа) с нормальным синусовым ритмом (30 мужчин, возраст 28.5-76 лет, и 24 женщины, возраст 58-73 лет) из базы данных PhysioNet [20]. Для каждой длительности сегмента для анализа были отобраны 1000 выборок. Оценивались следующие показатели: SDNN, RMSSD - среднеквадратичная разность между последовательными R-R интервалами, LF - мощность спектра ритма сердца в низкочастотном диапазоне, HF, отношение LF/HF и общая мощность спектра (TP). Согласно полученным результатам, варьирование длительности записи приводит к значительному изменению значений рассчитываемых показателей. Наименьшую чувствительность к длительности записи продемонстрировали показатели HF и RMSSD (высокочастотные фильтры). Но необходимо отметить, что авторы не оценивали статистическую значимость полученных данных, все выводы делались лишь на основе визуальной оценки графиков результатов.

Учитывая важность использования коротких записей ЭКГ в реальных экспериментальных программах, на втором этапе нашего исследования мы изучили возможность диагностики функциональных состояний с помощью трехфакторной модели variability сердечного ритма на временных рядах короче 256 R-R интервалов. Также мы исследовали эффект длительности временного ряда на показатели variability сердечного ритма.

## Методика

В эксперименте приняли участие 239 кандидатов на оперативные должности АЭС, которые проходили профессиональный отбор в лаборатории психофизиологического обеспечения Нововоронежского учебно-тренировочного центра подготовки специалистов для АЭС (ЛПФО НВУТЦ). У всех кандидатов отсутствовали нарушения здоровья (мужчины, средний возраст 28.21 лет, стандартное отклонение 6.18 лет).

Для записи QRS-комплексов нормальных синусовых кардиоциклов ЭКГ и последующего выделения из них R-R интервалов (в миллисекундах) использовались 3-х канальные программно-аппаратурные комплексы "RITMON-1" и «Варикард-1.51» (частота дискретизации 500 Гц). Хранение, редактирование R-R интервалов (коррекция артефактов, экстрасистол на ритмограмме) и расчет показателей variability сердечного ритма выполнялись с применением компьютерной программы "MABP.DBbase-HRV", разработанной в ЛПФО НВУТЦ (Delphi-5, Access-2000). Перед расчетом показателей variability сердечного ритма из временного ряда удалялся линейный тренд, рассчитанный с помощью метода наименьших квадратов [9].

Для анализа variability сердечного ритма методами временной области рассчитывались следующие показатели:  $M_{NN}$  – среднее значение нормальных R-R интервалов (мсек);  $SDNN$  – стандартное отклонение нормальных R-R интервалов (мсек);  $CV$  – коэффициент вариации ( $100 \times SDNN / M_{NN}$ );  $MxDMn$  – вариационный размах;  $AMo$  – амплитуда моды и  $Mo$  – мода (рассчитываются по гистограмме с шагом 50 мс);  $ИН$  (индекс напряжения по Баевскому) =  $100 \times AMo / (2 \times Mo \times MxDMn)$ ;  $RMSSD$  – квадратный корень из суммы квадратов разности величин последовательных пар нормальных R-R интервалов (мсек);  $pNN50$  – процент количества различающихся более чем на 50 мс пар последовательных интервалов N-N от общего количества пар в выборке. Заметим, что согласно исследованиям [16,18], между показателями  $MSD$  и  $RMSSD$  имеется высокая положительная корреляционная связь, приблизительно 0.9. Из показателей графа сердечного ритма [6] в анализ были включены: число узлов ( $ND$ ) и число ребер графа ( $NRib$ );  $b_1$  – тангенс угла наклона линии регрессии графа (независимая переменная – исходный массив нормальных интервалов  $R-R_n$ , зависимая переменная – массив  $R-R_{n+1}$ ).

Методами частотной области рассчитывались спектральные показатели variability сердечного ритма (быстрое преобразование Фурье со спектральным окном Хэмминга): мощность спектральной плотности (в  $мсек^2$ ) в высокочастотном (HF, 0.15-0.4 Гц), низкочастотном (LF, 0.04-0.15 Гц) и очень низкочастотном (VLF,  $\leq 0.04$  Гц) диапазонах. Дополнительно анализировались следующие нормированные спектральные показатели:  $HF/TP$  ( $TP$  – общая мощность спектра),  $HF_n = HF / (HF + LF)$  и  $LF_n = LF / (HF + LF)$ , а также индекс  $LF/HF$ . Не трудно заметить, что  $LF_n$  можно выразить через  $HF_n$  следующим образом:  $1 - HF_n$ . Поэтому в последующем мы использовали только  $HF_n$  индекс.

Для выполнения спектрального анализа необходимо, чтобы измерения переменной производились через равные промежутки времени [10]. Поскольку для временного ряда кардиоинтервалов это требование не выполняется, методические рекомендации содержат указания на преобразование его в эквидистантный ряд [1,17]. Для этих целей задается частота квантования (например, 250 мс) и выбирается модель интерполяции значений (линейная или нелинейная). В одной из своих работ [7] мы специально провели сравнительный анализ исходного ряда кардиоинтервалов и эквидистантного (частота квантования 250 мс, линейная интерполяция значений) и обнаружили, что для исходного ряда характерна зависимость частот спектра от среднего значения продолжительности R-R интервалов в выборке ( $M_{NN}$ ). При  $M_{NN} = 1000$  мс (1 сек) частоты спектра исходного ряда (границы диапазонов спектральной мощности, спектральные пики) совпадают с частотами эквидистантного ряда. При  $M_{NN} > 1000$  мс значения частот начинают смещаться вправо (частота возрастает), при  $M_{NN} < 1000$  мс – влево (частота уменьшается). Как показал анализ, для коррекции частоты границ диапазонов спектральной мощности нам достаточно умножить ее на текущее значение  $M_{NN}$  по выборке. Таким образом, мы можем оценить реальные частотные показатели variability сердечного ритма не влияя процедурой интерполяции на распределение дисперсии временного ряда. Для выполнения спектральных расчетов по исходным выборкам кардиоинтервалов границы частотных диапазонов корректировались по следующей формуле:  $FD_{cor} = FD \times M_{NN}$ , где  $FD$  – исходная граница частотного диапазона,  $FD_{cor}$  – скорректированная [7].

Программа регистрации ЭКГ обследуемых включала в себя 3 стадии (условия). На первой стадии регистрация ЭКГ производилась в положении лежа (покой, длительность 10 минут). Вторая стадия представляла собой ситуацию ожидания (антиципации) обследуемыми начала ответственных тестовых испытаний (положение "сидя в кресле", длительность 10 минут). На третьей стадии ЭКГ регистрировалась в процессе восстановительного периода после выполнения тестовых испытаний (положение "сидя в кресле", длительность 10 минут). Инструкция требовала от обследуемых сидеть (лежать) спокойно, не делая посторонних движений. Все обследования проводились в первой половине дня. Функциональные состояния обследуемых рассчитывались для каждой стадии регистрации ЭКГ. Для диагностики функциональных состояний на основе трехфакторной модели variability сердечного ритма основные показатели факторной структуры нормировались по данным референтной группы (848 здоровых мужчин, средний возраст - 29.84 лет, стандартное отклонение - 6.54 лет). Нормирование производится по 9 диапазонам. Границы диапазонов (0.1, 2.3, 15.9, 30.9, 69.1, 84.1, 97.7 и 99.9%) соответствуют следующим значениям стандартного отклонения нормального распределения [3]: -3, -2, -1, -0.5, +0.5, +1, +2, +3.

Статистический анализ результатов был выполнен с помощью программы "Statistica for Windows 6.0". Для статистического анализа эффектов нестационарности на каждой стадии регистрации ЭКГ использовались средние значения показателей variability сердечного ритма

для 239 обследуемых, рассчитанные по "скользящим" выборкам объемом 256 и шагом 10 R-R интервалов. Для оценки "скользящих" выборок на стационарность применялся непараметрический серийный критерий Вальда-Вольфовица [5], который сконструирован для проверки всех видов различий распределений (включая различия средних положений и функции распределения) [4]. Для анализа влияния длительности временного ряда кардиоинтервалов дополнительно для каждой стадии регистрации ЭКГ были рассчитаны показатели вариабельности сердечного ритма по "скользящим" выборкам длительностью 128, 64, 32 и 16 (с шагом 10) R-R интервалов (базовая выборка – 256 R-R интервалов). Из коротких сегментов удалялся линейный тренд, затем они "клонировались" до размера базовой выборки.

### Результаты исследования и их обсуждение.

В табл. 1 представлена частота диагностирования функциональных состояний, когда для расчета показателей факторной модели вариабельности сердечного ритма используются только стационарные выборки, либо все. Для оценки согласия между частотами на каждой стадии регистрации ЭКГ вычислялся критерий Пирсона ( $\chi^2$ ). Предварительно были объединены данные по ячейкам с частотой менее 5 [9] (для стадий "Лежа" и "Перед тестом" - ФС2 и ФС7, для стадии "После теста" – ФС2, ФС7 и ФС8). Полученные величины критерия Пирсона для всех трех стадий (соответственно,  $\chi(1)^2=0.262$ ,  $p_1<1.0$ ;  $\chi(2)^2=0.506$ ,  $p_2<1.0$ ;  $\chi(3)^2=0.981$ ,  $p_3<0.964$ ) позволяют принять гипотезу, что нестационарность сердечного ритма в выборках объемом 256 R-R интервалов не влияет статистически значимо на частоту диагностирования функциональных состояний. Отметим характерное преобладание функционального состояние "Норма" (ФС1) при регистрации ЭКГ на стадии "Лежа" и рост частоты различных форм эмоционального возбуждение (ФС3 и ФС4) и общего напряжения (ФС5) на стадиях "Перед тестом" и "После теста".

ФС	Лежа		Перед тестом		После теста	
	St	NSt	St	NSt	St	NSt
1	91	90	24	24	23	22
2	3	3	3	3	2	2
3	49	51	105	105	115	119
4	11	11	59	58	50	49
5	25	25	29	30	32	33
6	22	23	8	8	15	12
7	5	5	1	1	0	0
8	33	31	10	10	2	2

**Таблица 1.** Частота диагностирования функциональных состояний (ФС) на различных стадиях исследования при соблюдении критерия стационарности (St) и без (NSt).

BCP	Лежа		Перед тестом		После теста	
	St	NSt	St	NSt	St	NSt
<b>M<sub>NN</sub></b>	849.1 (118.6)	849.0 (118.6)	771.6 (109.9)	771.4 (109.8)	777.5 (114.4)	777.5 (114.2)
<b>SDNN</b>	45.44 (16.25)	45.56** (16.34)	53.93 (20.58)	54.11** (20.69)	54.55 (19.99)	54.69** (20.09)
<b>b<sub>1</sub></b>	0.675 (0.152)	0.676** (0.151)	0.811 (0.098)	0.812** (0.097)	0.819 (0.087)	0.821** (0.086)
<b>VLF</b>	730.5 (658.7)	746.3** (696.6)	1560.6 (1573.3)	1587.8** (1604.5)	1561.0 (1597.0)	1583.6** (1625.5)
<b>LF</b>	826.5 (706.9)	825.6 (706.5)	1199.3 (891.9)	1198.0 (892.8)	1256.4 (929.0)	1254.2 (927.2)
<b>HF</b>	718.8 (749.4)	718.0 (747.8)	521.8 (552.4)	520.0 (548.6)	514.3 (551.4)	513.6 (550.6)
<b>HF<sub>TP</sub></b>	0.301 (0.149)	0.300** (0.149)	0.168 (0.942)	0.167** (0.933)	0.161 (0.890)	0.160** (0.887)
<b>LF/HF</b>	1.899 (1.701)	1.895 (1.690)	3.436 (2.344)	3.434 (2.341)	3.699 (2.530)	3.692 (2.522)
<b>HF<sub>n</sub></b>	0.435 (0.177)	0.435 (0.176)	0.291 (0.138)	0.291 (0.138)	0.276 (0.130)	0.276 (0.130)
<b>CV</b>	5.325 (1.702)	5.341** (1.713)	6.940 (2.278)	6.966** (2.299)	6.960 (2.124)	6.977** (2.133)
<b>MxDMn</b>	265.5 (94.64)	265.9 (94.93)	287.9 (97.72)	288.3** (98.31)	291.4 (95.84)	291.6 (96.06)
<b>AMo</b>	45.31 (11.97)	45.21** (11.91)	40.70 (12.52)	40.59** (12.50)	40.74 (11.53)	40.65** (11.53)
<b>Mo</b>	849.1 (121.7)	849.0 (121.8)	775.3 (117.2)	775.2 (117.2)	783.3 (122.6)	783.4 (122.5)
<b>ИИ</b>	136.6 (109.3)	136.0* (108.3)	125.5 (112.6)	125.2** (112.5)	119.8 (97.41)	119.6* (97.52)
<b>RMSSD</b>	36.23 (17.80)	36.22 (17.80)	31.73 (15.26)	31.71 (15.24)	31.66 (15.16)	31.64 (15.14)
<b>pNN50</b>	15.81 (15.48)	15.80 (15.47)	11.97 (12.52)	11.94 (12.46)	11.49 (11.52)	11.48 (11.50)
<b>ND</b>	131.3 (41.36)	131.5** (41.38)	136.7 (42.14)	136.8** (42.20)	136.6 (39.90)	136.7 (39.90)
<b>NRib</b>	212.7 (35.11)	212.8 (35.14)	209.7 (37.77)	209.8 (37.71)	209.7 (36.23)	209.8 (36.23)

**Таблица 2.** Средние и стандартные отклонения показателей variability сердечного ритма (BCP) на различных стадиях исследования при соблюдении критерия стационарности (St) и без (NSt).

В табл. 2 приведены средние и стандартные отклонения показателей variability сердечного ритма на различных стадиях регистрации ЭКГ с учетом фактора нестационарности. Поскольку распределение показателей не отвечало требованию нормальности, мы воспользовались непараметрическим T-критерием Вилкоксона (связанные выборки) для оценки выраженности

изменений показателей при включение в расчеты нестационарных временных рядов. Согласно Т-критерию Вилкоксона не были получены статистически значимые различия по фактору нестационарности для следующих показателей:  $M_{NN}$  и  $M_0$  (значения центральной тенденции), HF, RMSSD и pNN50 (высокочастотные фильтры), LF (низкочастотный фильтр), LF/HF и  $HF_n$  (индексы, производные от LF и HF) и NRib (положительно связан с высокочастотными показателями). Для всех трех стадий исследования значения данных показателей статистически не различались. Что касается высокочастотных показателей variability сердечного ритма (HF, RMSSD, pNN50), то эти данные согласуются с результатами исследования влияния нестационарности на такие оценки вагусного контроля, как MSD и HF [13]. Дополнительно мы обнаружили, что для всех трех стадий регистрации ЭКГ ("Лежа", "Перед тестом", "После теста") отсутствовал эффект фактора нестационарности на значения LF (низкочастотный показатель). Соответственно, такие производные индексы как LF/HF и  $HF_n$  оказались также устойчивы к нестационарности временного ряда. Согласно статистическому анализу, фактор нестационарности значимо влияет на изменение значений показателей, которые отражают очень низкочастотные характеристики спектра мощности ритма сердца (VLF,  $b_1$ ), что в свою очередь приводит к смещению значений общей variability сердечного ритма (SDNN) и связанных с ней показателей (CV,  $MxDM_n$ ,  $AM_0$ , ИИ, ND). Важно отметить, что все смещения в значениях показателей, отражающих очень низкочастотные характеристики спектра мощности ритма сердца ( $b_1$ , SDNN), не выходили за пределы нормированных границ, что позволило получить очень устойчивую диагностику функциональных состояний на всех трех стадиях регистрации ЭКГ, независимую от нестационарности выборок.

На втором этапе нашего исследования мы проанализировали влияние длительности временного ряда сердечного ритма на диагностику функциональных состояний. Предварительно, используя "скользящие" выборки короткой длины (128, 64, 32 и 16 R-R интервалов), основные показатели факторной структуры нормировались по данным референтной группы, и для каждой длительности временного ряда производилась диагностика функциональных состояний (без учета стационарности процесса). В табл. 3 приведена частота диагностирования функциональных состояний на различных стадиях исследования для коротких сегментов временного ряда сердечного ритма. Для оценки согласия между частотами коротких сегментов с базовой выборкой (256 R-R интервалов, табл. 1, нестационарные выборки) для каждой стадии регистрации сердечного ритма вычислялись критерии Пирсона ( $\chi^2$ ). Предварительно были объединены данные по ячейкам с частотой менее 5 (для стадии "Лежа" - ФС2 и ФС7, для стадии "Перед тестом" - ФС2, ФС6, ФС7 и ФС8, для стадии "После теста" – ФС2, ФС7 и ФС8). Полученные величины критерия Пирсона для всех трех стадий позволяют принять гипотезу, что только длительность временного ряда 16 R-R интервалов статистически значимо влияет на диагностику функциональных состояний в положении лежа и перед тестом. Для стадии "Лежа" были получены следующие значения критерия Пирсона:

$\chi(128)^2=2.127$ ,  $p_{128}<0.908$ ;  $\chi(64)^2=0.530$ ,  $p_{64}<0.997$ ;  $\chi(32)^2=9.808$ ,  $p_{32}<0.133$ ;  $\chi(16)^2=32.137$ ,  $p_{16}<0.0001$ . Сравнение частот для стадии "Перед тестом" по критерию Пирсона:  $\chi(128)^2=2.251$ ,  $p_{128}<0.690$ ;  $\chi(64)^2=2.477$ ,  $p_{64}<0.649$ ;  $\chi(32)^2=6.644$ ,  $p_{32}<0.156$ ;  $\chi(16)^2=10.017$ ,  $p_{16}<0.040$ . И, наконец, для стадии "После теста":  $\chi(128)^2=1.848$ ,  $p_{128}<0.870$ ;  $\chi(64)^2=2.548$ ,  $p_{64}<0.769$ ;  $\chi(32)^2=4.702$ ,  $p_{32}<0.453$ ;  $\chi(16)^2=7.928$ ,  $p_{16}<0.160$ . Общий вывод заключает в том, что диагностику функциональных состояний на основе трехфакторной модели вариабельности сердечного ритма можно использовать на коротких выборках в диапазоне 256÷32 R-R интервала, с предварительной нормализацией факторных показателей для соответствующей длины временного ряда.

ФС	Лежа				Перед тестом				После теста			
	128	64	32	16	128	64	32	16	128	64	32	16
1	86	87	81	75	25	25	29	34	19	22	25	22
2	3	4	4	3	3	3	3	2	3	3	2	3
3	56	54	67	82	99	95	90	88	114	111	109	106
4	13	11	12	15	55	59	55	55	52	56	53	45
5	26	26	28	26	38	37	41	42	34	34	39	45
6	20	21	23	20	11	12	12	13	14	10	8	12
7	3	4	1	2	0	0	1	1	0	0	0	1
8	32	32	23	16	8	8	8	4	3	3	3	5

**Таблица 3.** Частота диагностирования функциональных состояний (ФС) на различных стадиях исследования при различной длительности временного ряда: 128, 64, 32 и 16 R-R интервалов.

Дополнительно мы проанализировали эффект длительности временного ряда на показатели вариабельности сердечного ритма. Для этого мы использовали данные по всем трем стадиям регистрации ЭКГ, сгруппировав их по четырем основным диагностированным функциональным состояниям: "Норма" (N=136), "Эмоциональное возбуждение" (N=275), "Эмоциональное возбуждение с напряжением по ЧСС" (N=118), "Общее напряжение" (N=88). В табл. 4 представлены средние и стандартные отклонения показателей вариабельности сердечного ритма для функционального состояния "Норма" при различной длительности сегментов кардиоинтервалов. Сравнив, с помощью непараметрического Т-критерия Вилкоксона (связанные выборки), короткие сегменты с базовой выборкой, мы установили, что наиболее устойчивыми к длине временного ряда (после  $M_{NN}$ ) при функциональном состоянии "Норма" являются

высокочастотные показатели variability сердечного ритма: HF, RMSDD и pNN50. За исключением самой короткой выборки (16 R-R интервалов), для данных показателей отсутствует статистически значимые различия между базовой выборкой и более короткими временными рядами. Тем самым статистически подтверждаются предположения, которые были высказаны в работе [19] по поводу показателей HF и RMSSD. Для показателя LF подобная устойчивость была получена для выборок объемом в 128 и 64 R-R интервала, что нашло свое отражение в устойчивости для этих временных рядов таких индексов, как LF/HF и HF<sub>n</sub>.

<b>BCP</b>	<b>256 R-R</b>	<b>128 R-R</b>	<b>64 R-R</b>	<b>32 R-R</b>	<b>16 R-R</b>
<b>M<sub>NN</sub></b>	931.86 (97.84)	931.69** (98.30)	931.76** (98.60)	931.95** (98.78)	932.07** (98.89)
<b>SDNN</b>	59.72 (16.82)	57.27 (16.33)	53.79 (15.47)	49.57 (14.19)	44.94 (13.06)
<b>b<sub>1</sub></b>	0.576 (0.133)	0.532 (0.137)	0.465 (0.141)	0.374 (0.147)	0.256 (0.150)
<b>VLF</b>	1199.93 (1010.54)	936.92 (837.39)	568.34 (515.32)	271.97 (227.48)	-
<b>LF</b>	1218.65 (850.90)	1218.59** (835.04)	1211.06** (840.29)	1087.29 (755.97)	997.86 (717.37)
<b>HF</b>	1335.23 (922.69)	1340.78** (927.46)	1347.21** (928.81)	1343.64** (917.28)	1278.29 (862.05)
<b>HF<sub>TP</sub></b>	37.06 (13.52)	40.62 (13.26)	46.32 (13.20)	54.04 (12.73)	62.64 (11.89)
<b>LF/HF</b>	1.123 (0.718)	1.132** (0.721)	1.133** (0.717)	1.055 (0.672)	1.090** (0.791)
<b>HF<sub>n</sub></b>	0.519 (0.148)	0.519** (0.145)	0.522** (0.142)	0.548 (0.137)	0.563 (0.135)
<b>CV</b>	6.442 (1.814)	6.184 (1.774)	5.811 (1.687)	5.357 (1.553)	4.856 (1.425)
<b>MxDMn</b>	343.85 (94.49)	298.13 (83.86)	250.71 (74.26)	203.06 (60.33)	159.36 (47.21)
<b>AMo</b>	35.54 (7.50)	37.18 (7.58)	39.57 (7.47)	42.58 (7.37)	45.95 (7.14)
<b>Mo</b>	935.49 (103.53)	933.99** (104.27)	933.26** (104.38)	932.37** (104.52)	930.00 (103.25)
<b>ИИ</b>	63.91 (28.46)	79.92 (35.59)	105.26 (46.52)	145.65 (63.45)	209.37 (94.64)
<b>RMSSD</b>	53.66 (16.44)	53.60** (16.45)	53.53** (16.42)	53.16* (16.23)	52.37 (15.75)
<b>pNN50</b>	31.81 (13.23)	31.76** (13.17)	31.90** (13.10)	32.00** (13.06)	32.09 (13.09)
<b>ND</b>	170.69 (26.13)	100.94 (10.11)	55.83 (3.38)	29.65 (1.11)	15.35 (0.39)
<b>NRib</b>	239.97 (9.24)	123.46 (3.56)	62.47 (1.36)	31.46 (0.56)	15.79 (0.25)

**Таблица 4.** Средние и стандартные отклонения показателей variability сердечного ритма (BCP) при различной длине временного ряда для функционального состояния "Норма".

Для остальных проанализированных функциональных состояний смещение значений показателей variability сердечного ритма при уменьшении длительности сегмента статистически значимо возрастает. Отметим лишь устойчивость низкочастотного показателя LF при различных формах эмоционального возбуждения для длительности временного ряда 128 и 64 R-R интервала, и показателя  $M_{NN}$  при "Общем напряжении" для всех коротких сегментов. Учитывая полученные данные можно сделать вывод, что  $M_{NN}$  и высокочастотные показатели ритма сердца (HF, RMSDD, pNN50) устойчивы к коротким временным сегментам в диапазоне 256÷32 R-R интервала, когда здоровые обследуемые находятся в состоянии лежа или сидя, не испытывают напряжения или эмоционального возбуждения и контролируют свои спонтанные движения. Показатели LF, LF/HF и  $HF_n$  в этих условиях проявляет устойчивость к коротким временным сегментам в диапазоне 256÷64 R-R интервала.

### Заключение

На первом этапе исследования было проанализировано влияние нестационарности временных рядов ритма сердца на диагностику функциональных состояний с помощью трехфакторной модели variability сердечного ритма при различных условиях (стадиях) регистрации ЭКГ: "Лежа", "Перед тестом" и "После теста". Для всех трех стадий получена высокая устойчивость диагностирования функциональных состояний к действию фактора нестационарности. Было установлено также, что влиянием нестационарности можно пренебречь при расчете таких показателей как  $M_{NN}$  и  $M_0$  (значения центральной тенденции), HF, RMSDD и pNN50 (высокочастотные фильтры), LF (низкочастотный фильтр), LF/HF и  $HF_n$  (производные индексы от показателей LF и HF) и NRib (положительно связан с высокочастотными показателями). В тоже время было обнаружено, что фактор нестационарности значимо влияет на показатели, связанные с очень низкочастотными характеристиками спектра мощности ритма сердца: VLF и  $b_1$ . Это в свою очередь приводит к смещению значений общей variability ритма сердца (SDNN) и связанных с ней показателей (CV,  $M_xDM_n$ ,  $AM_0$ , ИИ, ND). Поэтому для корректного сравнения данных двух исследований, в которых анализируются очень низкочастотные характеристики и связанные с ними показатели variability сердечного ритма, необходимо контролировать не только выборку обследуемых и условия регистрации ритма сердца, но и эффект нестационарности временных рядов.

На втором этапе исследования было проанализировано влияние длительности временного ряда сердечного ритма на диагностику функциональных состояний. Полученные статистические данные позволяют заключить, что диагностику функциональных состояний на основе трехфакторной модели variability сердечного ритма можно использовать на коротких выборках в диапазоне 256÷32 R-R интервала, с предварительной нормализацией факторных показателей для соответствующей длины временного ряда. Влияние длительности сегментов кардиоинтервалов на показатели variability сердечного ритма было изучено для четырех

основных функциональных состояний: "Норма", "Эмоциональное возбуждение", "Эмоциональное возбуждение с напряжением по ЧСС" и "Общее напряжение". Статистический анализ позволил установить, что при функциональном состоянии "Норма" значения среднего кардиоинтервала по выборке ( $M_{NN}$ ) и высокочастотных показателей variability сердечного ритма (HF, RMSDD,  $pNN50$ ) были устойчивы к изменению длительности сегмента в диапазоне  $256 \div 32$  R-R интервала, а показателей LF, LF/HF и  $HF_n$  в диапазоне  $256 \div 64$ . Для других функциональных состояний такая независимость показателей variability сердечного ритма был получена для "Эмоционального возбуждения" (LF, диапазон  $256 \div 64$ ) и "Общего напряжения" ( $M_{NN}$ , диапазон  $256 \div 16$ ). Результаты анализа позволяют сделать вывод, что  $M_{NN}$  и высокочастотные показатели ритма сердца (HF, RMSDD,  $pNN50$ ) устойчивы к коротким временным сегментам в диапазоне  $256 \div 32$  R-R интервала, когда здоровые обследуемые находятся в состоянии лежа или сидя, не испытывают напряжения или эмоционального возбуждения (функциональное состояние "Норма") и контролируют свои спонтанные движения. Показатели LF, LF/HF и  $HF_n$  в этих условиях проявляет устойчивость к коротким временным сегментам в диапазоне  $256 \div 64$  R-R интервала. При диагностике функциональных состояний "Эмоциональное возбуждение", "Эмоциональное возбуждения с напряжением по ЧСС" и "Общее напряжение" уменьшение длительности исходного временного ряда может приводить к значимому смещению показателей variability сердечного ритма.

Дальнейшие исследования влияния нестационарности и длительности временных рядов кардиоинтервалов может быть направлено на расширение экспериментальной базы: условий регистрации ЭКГ (например, в процессе деятельности), контингента обследуемых (например, с тревожными нарушениями), анализируемых функциональных состояний.

### Список литературы

- [1] Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В. Гаврилушкин А.П., Довгалевский П.Я., Кукушкин Ю.А., Миронова Т.Ф., Прилуцкий Д.А., Семенов Ю.Н., Федоров В.Ф., Флейшман А.Н., Медведев М.М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации). Вестник аритмологии. 24 : 65-87. 2001.
- [2] Власов В.В. Эффективность диагностических исследований. М.: Медицина. 1988.
- [3] Гласс Дж., Стэнли Дж. Статистические методы в педагогике и психологии. М.: Прогресс. 1976.
- [4] Гублер Е.В., Генкин А.А. Применение непараметрических критериев статистики в медикобиологических исследованиях. Л.: Медицина. 1973.
- [5] Зырянов Б.А., Власов С.Н., Костромин Э.В. Методы и алгоритмы обработки случайных и детерминированных периодических процессов. Свердловск: Уральский университет. 1990.
- [6] Машин В.А. Анализ variability сердечного ритма с помощью метода графа. Физиология человека. 28(4) : 63-73. 2002.

- [7] Машин В.А. Зависимость показателей variability сердечного ритма от средней величины R-R интервалов. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 88(7) : 851-855. 2002.
- [8] Машин В.А., Машина М.Н. Классификация функциональных состояний и диагностика психоэмоциональной устойчивости на основе факторной структуры показателей variability сердечного ритма. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 90(12) : 1508-1521. 2004.
- [9] Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т.1. Под ред. Ллойда Э., Ледермана У., Айвазяна С.А., Тюрина Ю.Н. М.: Финансы и статистика. 1989.
- [10] Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т.2 Под ред. Ллойда Э., Ледермана У., Айвазяна С.А., Тюрина Ю.Н. М.: Финансы и статистика. 1990.
- [11] Berntson G.G., Bigger, J.T., Eckberg, D.L., Grossman, P., Kaufmann, P.G., Malik, M., Nagaraja, H.N., Porges S.W., Saul J.P., Stone P.H., Van Der Molen M.W. Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*. 34(6) : 623–648. 1997.
- [12] Dekker M.J., Schouten E.G., Klootwijk P., Pool J., Swenne C.A., Kromhout D. Heart rate variability from short electrocardiographic recordings predicts mortality from all causes in middle-aged and elderly men. *American J. Epidemiology*. 145(10) : 899–908. 1997.
- [13] Friedman B.H., Allen M.T., Christie I.C., Santucci A.K. Validity concerns of common heart-rate variability indices. *IEEE Eng Med Biol Mag*. 21(4) : 35-40. 2002.
- [14] Grossman P. Breathing rhythms of the heart in a world of no steady state: A comment on Weber, Molenaar and van der Molen. *Psychophysiology*. 29(1) : 66-72. 1992.
- [15] Grossman P. Respiratory and cardiac rhythms as windows to central and autonomic biobehavioral regulation: Selection of window frames, keeping the panes clean and viewing the neural topography. *Biol. Psychol.* 34(2-3) : 131-161. 1992.
- [16] Hayano J., Sakakibara Y., Yamada A., Yamada M., Mukai S., Fujinami T., Yokoyama K., Watanabe Y., Takata K. Accuracy of assessment of cardiac vagal tone by heart rate variability in normal subjects. *Amer. J. Cardiol.* 67(2) : 199-204. 1991.
- [17] Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation*. 93(5) : 1043-1065. 1996.
- [18] Kleiger R.E., Stein P.K., Bosner M.S., Rottman J.N. Time domain measurement of heart rate variability. In: M. Malik, A.J. Camm (Eds.) *Heart Rate Variability*. Armonk, NY: Futura. 33-45. 1995.
- [19] McNames J., Thong T., Goldstein B. Reliability and Accuracy of Heart Rate Variability Metrics Versus ECG Segment Duration. *Proceedings of the 2003 IEEE EMBS Conference, Cancun, Mexico, Sept 17-21*. 212-215. 2003.
- [20] Moody G.B., Mark R.G., Goldberger A.L. PhysioNet: A web-based resource for the study of physiologic signals. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. 20(3) : 70–75. 2001.

- [21] Porges S.W., Bohrer R.E. The analysis of periodic processes in psychophysiological research. In: Cacioppo J.T., Tassinari L.G. (eds.) Principles of psychophysiology: physical, social, and inferential elements. New York: Cambridge. 708-753. 1990.
- [22] Weber E.J.M., Molenaar P.C.M., van der Molen M.W. A nonstationarity test for the spectral analysis of physiological time series with an application to respiratory sinus arrhythmia. *Psychophysiology*. 29(1) : 55-65. 1992
- [23] Wei W.S. Time series analysis: univariate and multivariate methods. Redwood, CA: Addison-Wesley. 1990.