

УДК 57.032+ 612.172.2
DOI: 10.26456/vtbio354

ИНДЕКСЫ РЕГУЛЯРНОСТИ И НЕРЕГУЛЯРНОСТИ РАСШИРЕННОГО КВАНТОВОГО ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА МГНОВЕННОГО СЕРДЕЧНОГО РИТМА КАК МАРКЕРЫ СОСТОЯНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

Е.К. Парамонова¹, В.П. Цветков², С.А. Михеев², И.В. Цветков²

¹Тверская областная клиническая больница, Тверь

²Тверской государственный университет, Тверь

В работе введены индексы регулярности I_r и нерегулярности $I_{анг}$ расширенного квантового фазового пространства МСР S_{eq} и дано обоснование перспективности их использования как маркеров состояния сердечно-сосудистой системы. Исследование проводилось на базе 30 пациентов, обследованных в отделении функциональной диагностики Тверской областной клинической больницы (ТвОКБ). По данным холтеровского мониторирования (ХМ) этих пациентов вычислены значения их индексов I_r и $I_{анг}$. Они представлены в виде $I_r I_{анг}$ -диаграмм для состояний сна, бодрствования и полного интервала ХМ. Проведено их сравнение с результатами обследования контрольной группы, состоящей из 34 студентов Тверского государственного университета, с диагнозами норма. Проведено разбиение S_{eq} на области регулярности $S_{eq,r}^+$ и нерегулярности $S_{eq,ng}^+$, $S_{eq,ng}^-$. Эти пространства наглядно представлены с помощью цветной 3D-визуализации для двух пациентов ТвОКБ и одного участника контрольной группы для состояний сна, бодрствования и полного интервала ХМ. Показано соответствие значений индексов I_r и $I_{анг}$, приведенных на $I_r I_{анг}$ -диаграмме и их диагнозами. Такое же сравнение проведено для контрольной группы. Исследование $I_r I_{анг}$ -диаграмм указывает на их простоту и наглядность, а также перспективность использования в кардиодиагностике.

Ключевые слова: *расширенное квантовое фазовое пространство, холтеровское мониторирование, кардиоритмы, индексы регулярности, индексы нерегулярности.*

Введение. Наиболее полную информацию о состоянии сердечно-сосудистой системы человека дает анализ массива кардиоинтервалов (*RR*-интервалов) суточного холтеровского мониторирования (ХМ) (Baevskiy, 1979).

Важнейшей задачей анализа большого массива *RR*-интервалов ХМ является введение главных параметров, наиболее адекватно отражающих свойства этого массива. Одним из способов решения этой задачи является построение расширенного квантового фазового пространства S_{eq} мгновенного сердечного ритма (МСР) (Кудинов и др., 2018) и поиск на его основе этих главных параметров.

Пространство S_{eq} дает мощное средство для изучения недетерминированных хаотических систем (Кудинов и др., 2018; Mikheev et al., 2018, 2021; Paramonova et al., 2021). В частности, оно позволяет визуализировать данные ХМ, представив цифровую информацию в удобном для наблюдения и анализа виде.

В данной работе предлагается в качестве маркеров состояния сердечно-сосудистой системы использовать индексы регулярности I_r и нерегулярности I_{nr}^+, I_{nr}^- пространства S_{eq} , адекватно отражающие свойства массива кардиоинтервалов.

Для 30 пациентов, обследованных на базе отделения функциональной диагностики Тверской областной клинической больницы (ТвОКБ), по данным ХМ вычисляются значения их индексов регулярности и нерегулярности. Аналогичное обследование проведено для участников контрольной группы из 34 студентов Тверского государственного университета с диагнозами норма.

Пространство S_{eq} и индексы регулярности I_r и нерегулярности I_{nr}^+, I_{nr}^-

В работах Ivanov et al. (2016) и Tsvetkov et al. (2018) построены фазовые пространства МСР S , которые представляют собой множество состояний МСР в пространстве R^2 , определяемые его частотой $y(t)$ и скоростью изменения частоты $v(t)$. Функция $y(t)$ является кусочно-линейной аппроксимацией множества значений $y_i = 60/T_{RRi}$ ($i=1,2,\dots,n$ - номер *RR*-интервала, T_{RRi} - его величина в секундах), а функция $v(t)$ - разностная производная $y(t)$. Функции $y(t)$ и $v(t)$ измеряются в единицах мин^{-1} и $\text{мин}^{-1}\text{сек}^{-1}$, соответственно. Поделив $y(t)$ на мин^{-1} , а $v(t)$ на $\text{мин}^{-1}\text{сек}^{-1}$, мы получаем безразмерные значения этих функций.

Под квантованием S понимают процесс деления его на элементарные ячейки конечной величиной h . Параметр h называют или постоянной, или шагом квантования. Квантование ФП МСР проведем согласно алгоритму [2]:

$$y_i = h[y(t)h^{-1}], v_i = h[v(t)h^{-1}], i = 1, 2, \dots, N(h, t), \text{ где } [h] -$$

оператор округления до ближайшего целого числа. Значения y_i, v_i - кратны постоянной квантования h . Кратности значений y_i, v_i определяют значения чисел заполнения n_i элементарных ячеек пространства S_{eq} .

Множество значений $\{n_i, y_i, v_i\}$ образует расширенное квантовое

фазовое пространство S_{eq} . При построении S_{eq} конкретных пациентов мы для определенности положим $h=1$.

Как показано в (Кудинов и др., 2018; Mikheev et al., 2018; Paramonova et al., 2021) в области регулярности МСР выполняется условие $|v| < 15$. Состояния пространства S_{eq} в области регулярности обозначим $S_{eq,r}$, в областях нерегулярности с ускорением ритма $v_i > 15$ обозначим $S_{eq,nr}^+$, а замедления ритма $v_i < -15$ - $S_{eq,nr}^-$. При этом число состояний МСР в областях $S_{eq,r}$, $S_{eq,nr}^+$, $S_{eq,nr}^-$, обозначим соответственно N_r , N_{nr}^+ , N_{nr}^- .

Индексы регулярности I_r и нерегулярности I_{nr}^+ , I_{nr}^- введем согласно соотношениям: $I_r = 100N_r/N$, $I_{nr}^+ = 100N_{nr}^+/N$, $I_{nr}^- = 100N_{nr}^-/N$. Они характеризуют относительное распределение состояний МСР в S_{eq} в областях регулярности и нерегулярности и каждый из индексов может принимать значения от 0 до 100.

Введем комбинацию параметров $I_{anr} = I_{nr}^+ - I_{nr}^-$, характеризующую относительную разность числа состояний S_{eq} вне области регулярности $|v| > 15$ с ускорением ритма $v > 0$ и замедлением ритма $v < 0$ МСР.

Поскольку $I_r + I_{nr}^+ + I_{nr}^- = 100$, то $I_{nr}^+ = 1/2(100 - I_r + I_{anr})$, $I_{nr}^- = 1/2(100 - I_r - I_{anr})$. Отсюда следует, что достаточно найти I_r и I_{anr} , а остальные индексы I_{nr}^+ , I_{nr}^- выражаются через них.

3D-визуализация областей регулярности и нерегулярности S_{eq} и возможность оценки индексов I_r , I_{nr}^+ , I_{nr}^- на ее основе

Наглядно разбиение S_{eq} на области регулярности $S_{eq,r}$ и нерегулярности $S_{eq,nr}^+$, $S_{eq,nr}^-$ представим с помощью цветной 3D-визуализации. Регулярные состояния $S_{eq,r}$ отображаются зеленым цветом, нерегулярные состояния с ускорением ритма $S_{eq,nr}^+$ - красным, а нерегулярные состояния с замедлением ритма $S_{eq,nr}^-$ - синим.

На рис. 1-18 представлены 3D-гистограммы S_{eq} и их проекции на плоскость vn для состояний сна, бодрствования и полного интервала ХМ, построенные с использованием комплекса программ в системе Maple для двух пациентов кардиологического профиля и одного студента из контрольной группы. Для удобства в дальнейшем будем использовать номера пациентов $p=1,2,\dots,30$, а контрольной группы $p=31,32,\dots,64$.

Построенные нами 3D-гистограммы S_{eq} и их проекции на плоскость vn дают наглядное представление о трех областях $S_{eq,r}$, $S_{eq,nr}^+$, $S_{eq,nr}^-$ для пациентов $p=3, 32, 8$, выбранных из 63 лиц, рассмотренных в работе.

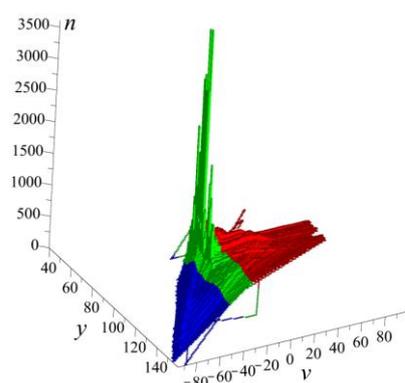


Рис. 1. 3D-гистограмма S_{eq} в состоянии сна; $p=3$.

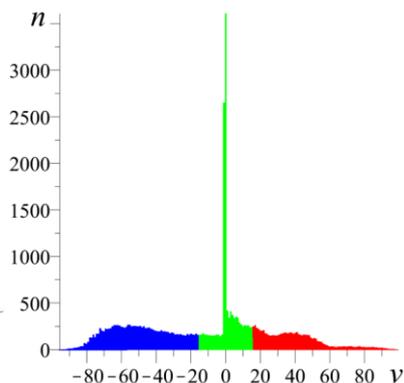


Рис. 2. Проекция 3D-гистограммы S_{eq} на плоскость vn в состоянии сна; $p=3$

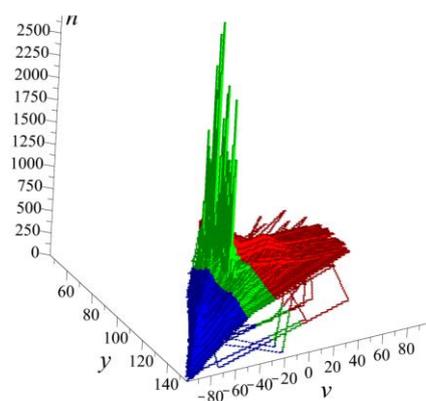


Рис. 3. 3D-гистограмма S_{eq} в состоянии бодрствования; $p=3$

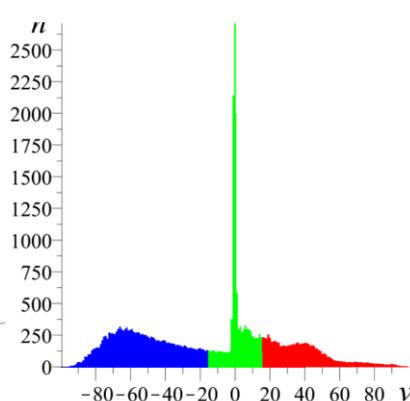


Рис. 4. Проекция 3D-гистограммы S_{eq} на плоскость vn в состоянии бодрствования; $p=3$

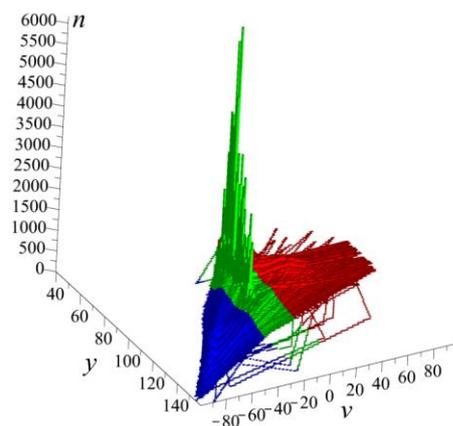


Рис. 5. 3D-гистограмма S_{eq} для полного интервала XM; $p=3$

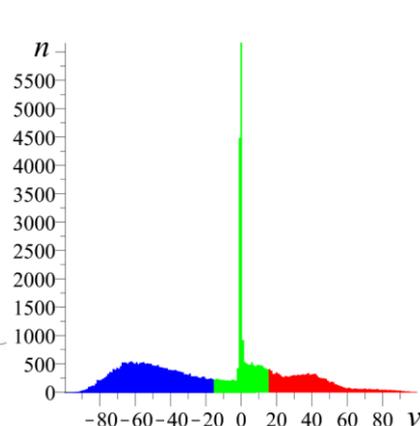


Рис. 6. Проекция 3D-гистограммы S_{eq} на плоскость vn для полного интервала XM; $p=3$

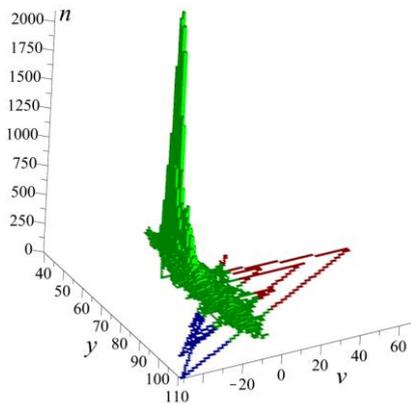


Рис. 7. 3D-гистограмма S_{eq} в состоянии сна; $p=32$.

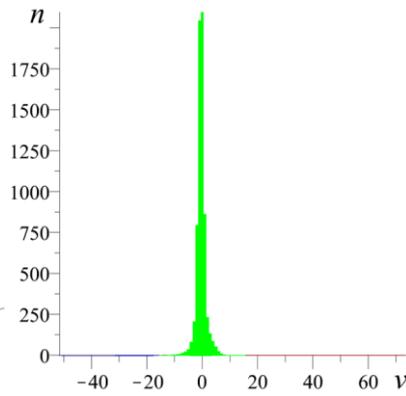


Рис. 8. Проекция 3D-гистограммы S_{eq} на плоскость vn в состоянии сна; $p=32$

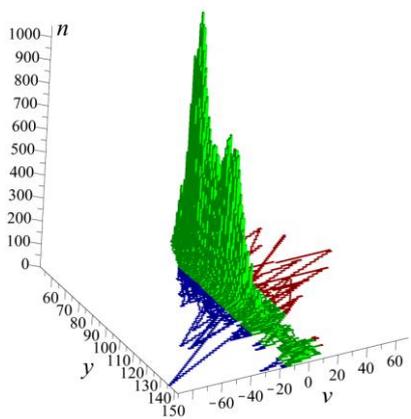


Рис. 9. 3D-гистограмма S_{eq} в состоянии бодрствования; $p=32$

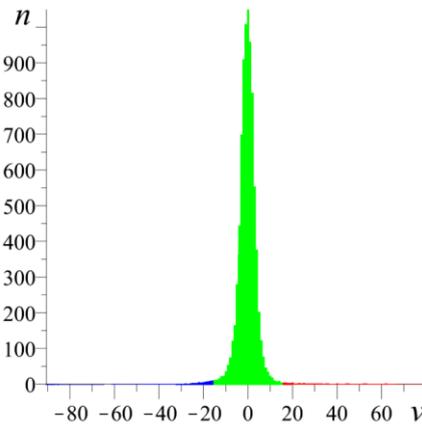


Рис. 10. Проекция 3D-гистограммы S_{eq} на плоскость vn в состоянии бодрствования; $p=32$

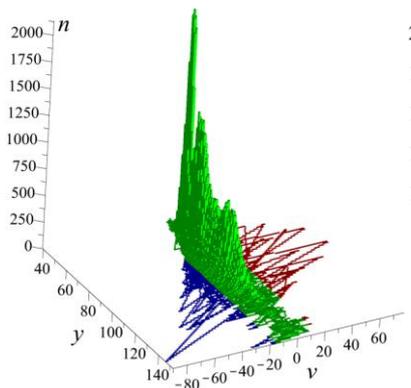


Рис. 11. 3D-гистограмма S_{eq} для полного интервала ХМ; $p=32$

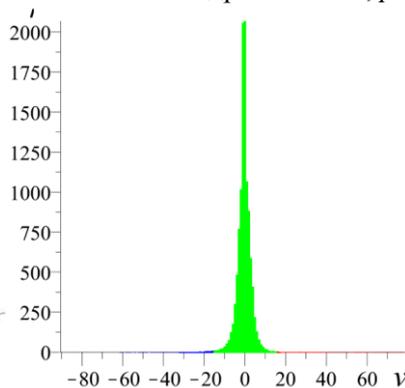


Рис. 12. Проекция 3D-гистограммы S_{eq} на плоскость vn для полного интервала ХМ; $p=32$

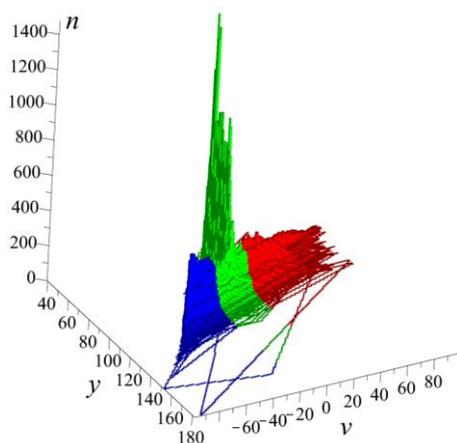


Рис. 13. 3D-гистограмма S_{eq} в состоянии сна; $p=7$

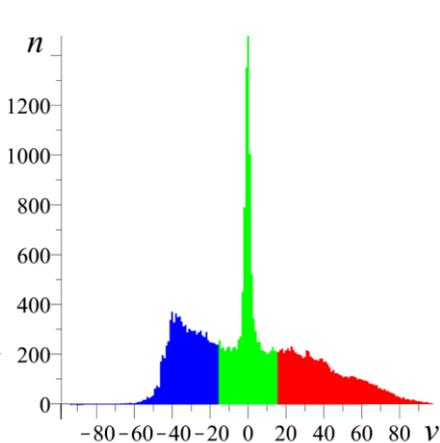


Рис. 10. Проекция 3D-гистограммы S_{eq} на плоскость vn в состоянии сна; $p=7$

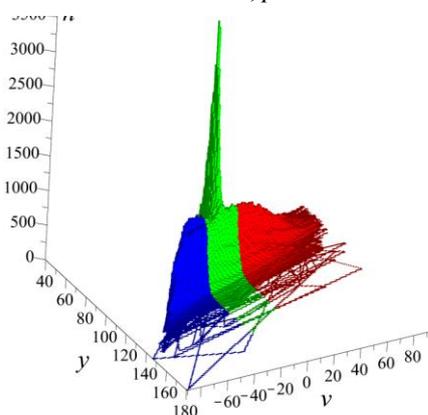


Рис. 15. 3D-гистограмма S_{eq} в состоянии бодрствования; $p=7$

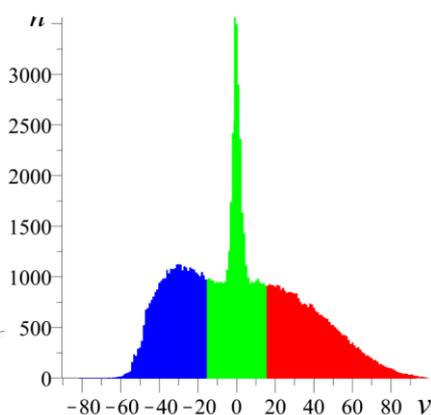


Рис. 16. Проекция 3D-гистограммы S_{eq} на плоскость vn в состоянии бодрствования; $p=7$

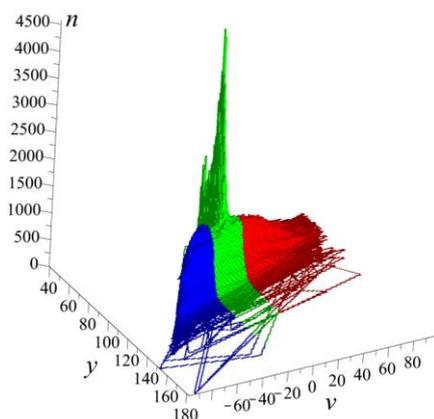


Рис. 17. 3D-гистограмма S_{eq} для полного интервала XM; $p=7$

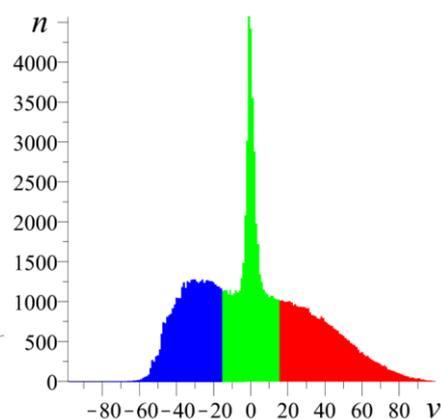


Рис. 18. Проекция 3D-гистограммы S_{eq} на плоскость vn для полного интервала XM; $p=7$

Соотношение объемов цветовых зон 3D-гистограмм S_{eq} дает наглядное представление о соотношении числа состояний из этих зон в случаях сна, бодрствования и полного интервала ХМ. Так, согласно рис. 1-6 для различных состояний пациента $p=3$ объем зоны зеленого цвета примерно в два раза меньше чем красного и синего. Это дает значения $I_r \approx 100/3$.

Случай пациента $p=32$ оказывается наиболее простым для оценки I_r . Для всех трех состояний объем зон красного и синего цвета на 3D-гистограмме S_{eq} оказался малым по сравнению с объемом зоны зеленого цвета. В результате получаем оценку $I_r \approx 100$.

Для пациента $p=7$ в случае полного интервала ХМ имеет место соотношение объем зоны зеленого цвета и суммарного объема зон красного и синего цветов в соотношении примерно 1:1. Тогда имеет место оценка для полного интервала ХМ: $I_r \approx 50$. При этом для случая сна и бодрствования соотношения объемов зоны зеленого цвета и суммарного объема красного и синего цветов оказывается несколько другим, а именно 1.1:1 и 0.9:1.2, соответственно. Из этого соотношения следуют оценки: для случая сна $I_r \approx 52$, а для случая бодрствования $I_r \approx 43$.

Проведенные нами визуальные оценки индексов хорошо согласуются с точными значениями индексов регулярности, приведенные нами в следующем разделе на $I_r I_{anr}$ -диаграмме (рис. 19) для пациентов ТвОКБ и диаграмме (рис. 20) для контрольной группы.

$I_r I_{anr}$ -диаграмма для состояний сна, бодрствования и полного интервала ХМ пациентов

Значения индексов I_r и I_{anr} вычисляем по формулам (2) и данным суточного ХМ для группы пациентов отделения функциональной диагностики ТвОКБ, полученных с использованием комплекса суточного мониторирования ЭКГ "Миокард-Холтер 2" г. Саров. Для обработки и анализа этих данных нами разработан и реализован комплекс программ в системе Maple.

Отдельно нами рассмотрены случаи состояний сна и бодрствования пациентов. При интерпретации результатов ХМ в кардиологической практике принято разделять полное время ХМ на два периода: сна и бодрствования. В этих состояниях доминирующие влияния оказывают различные физиологические факторы. Так в состоянии бодрствования доминирует влияние симпатической нервной системы, а в состоянии сна – парасимпатической. Очевидно, структуры Проекция 3D-гистограмм $S_{eq,r}$, $S_{eq,nr}^+$, $S_{eq,nr}^-$ на плоскость vn в этих состояниях должны существенно отличаться. Непрерывное совместное влияние симпатической и парасимпатической нервных систем обуславливает степень variabilityности МСР.

Вычисленные нами значения параметров I_r и I_{anr} позволяют построить $I_r I_{anr}$ -диаграмму, которая представляет собой множество точек в R^2 с прямоугольными декартовыми координатами I_{anr} , I_r .

$I_r I_{anr}$ -диаграмма приведена в виде Рис. 19, Рис. 20, на которых состояния сна отмечены точками синего цвета, состояния бодрствования – точками зеленого цвета, а точками красного цвета состояния соответствующие полному интервалу ХМ.

На Рис. 19 и далее номера $p=1_{1-3}$ и $p=2_{1-3}$ соответствуют двум пациентам с разными датами прохождения ХМ.

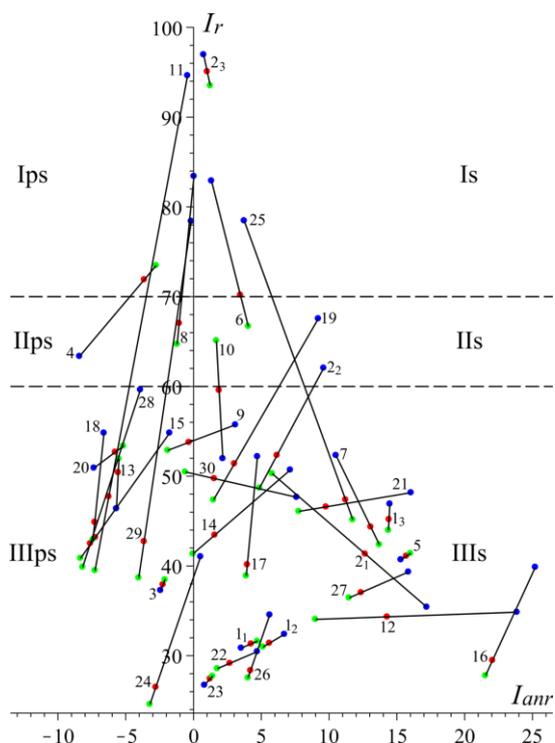


Рис. 19. $I_r I_{anr}$ -диаграмма для пациентов ТвОКБ

Для удобства анализа точки на $I_r I_{anr}$ -диаграмме, соответствующие одному пациенту, мы соединили отрезками прямой.

Положение точек пациентов на $I_r I_{anr}$ -диаграмме несет уникальную информацию о состоянии суточного массива кардиоинтервалов по данным ХМ.

Величина и знак I_{anr} определяет степень доминирования влияния симпатической или парасимпатической нервной системы на кардиоритмы индивидуума.

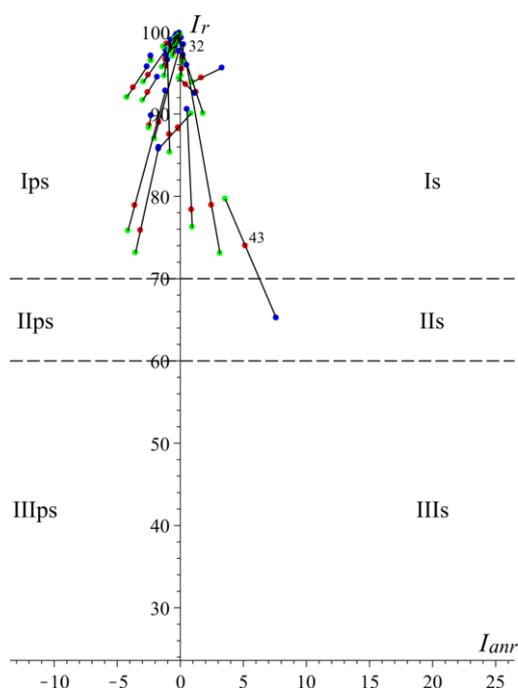


Рис. 20. $I_r I_{anr}$ -диаграмма для контрольной группы

Проведенные на Рис. 19 горизонтальные линии $I_r=60$ и $I_r=70$ разделяют диаграмму регулярности S_{eq} на 6 зон: $I_{s,ps}$, $II_{s,ps}$, $III_{s,ps}$. Значок "s" соответствует значениям $I_{anr}>0$, а значок "ps" – значениям $I_{anr}<0$. Знак параметра I_{anr} определяет преобладание влияния симпатической или парасимпатической нервных систем, соответственно.

Состояния исследованных пациентов заполняют на $I_r I_{anr}$ -диаграмме рис. 19 область треугольной формы с вершинами в точках с координатами: $(100,0)$, $(-12,27)$, $(25,27)$. Причем заполнение носит неравномерный характер. Можно заметить четыре области сгущения состояний пациентов, которые говорят о близости их состояний.

Пациенты ТвОКБ и все участники контрольной группы, индексы регулярности I_r которых в состояниях сна и бодрствования расположены в зонах $I_{s,ps}$, не страдают заболеваниями кардиального профиля и, следовательно, имеют высокую степень стабильности кардиоритмов. Для большинства участников контрольной группы в состоянии сна значения индекса I_{anr} невелики и принадлежат интервалу $|I_{anr}|<3$, что указывает на адекватную степень вегетативной регуляции.

Зоны $III_{s,ps}$ соответствуют пациентам, имеющим различные сердечно-сосудистые заболевания. Зоны $II_{s,ps}$ соответствуют пациентам, диагнозы которых находятся на границе между нормой и

кардиопатологией. Эти достаточно узкие зоны имеют место в интервале значений $60 < I_r < 70$.

Кратко опишем структуру выделенных нами зон на $I_r I_{anr}$ -диаграмме.

Отметим, что для пациентов $p=6, 8$ состояния сна относятся к зонам $I_{s,ps}$, а состояния бодрствования - к зонам $II_{s,ps}$. Для пациентов $p=4, 43$ состояния сна относятся к зонам $II_{s,ps}$, а состояния бодрствования - к зонам $I_{s,ps}$. Это означает, что у пациентов $p=6, 8$ и $p=4, 43$ оказываются существенно различные механизмы влияния на регулярность ритма в состояниях сна и бодрствования. Определенный интерес представляют пациенты $p=11, 25, 29$, которые в состоянии сна находятся в зонах $I_{s,ps}$ и имеют значения индексов I_r порядка 80, а в состоянии бодрствования находятся в зонах $III_{s,ps}$ со значениями индекса I_r порядка 40. Для этих пациентов уместен диагноз "дневной тип аритмии".

В зонах $III_{s,ps}$ можно выделить три компактных области состояний пациентов с различными кардиологическими нозологиями: дилатационная кардиомиопатия, желудочковая аритмия, пациенты с имплантированным кардиостимулятором, пациент с трансплантированным сердцем.

Почти все пациенты ТвОКБ с сердечно-сосудистыми заболеваниями попадают в зоны $III_{s,ps}$ $I_r I_{anr}$ -диаграммы со значениями индекса $I_r < 60$ и имеют невысокую степень стабильности кардиоинтервалов. При этом в большинстве случаев значения индекса I_{anr} достаточно велики, $|I_{anr}| > 3$. Это указывает на доминирующую степень влияния симпатической или парасимпатической нервной системы на кардиоритмы в состоянии сна этих пациентов.

Для большинства исследованных пациентов ТвОКБ значение индекса регулярности в состоянии сна больше чем в состоянии бодрствования на 10-15 единиц, что соответствует большей степени стабильности ритмов в состоянии сна.

Состояния пациентов с имплантированными кардиостимуляторами и трансплантированными сердцами могут входить в разные зоны $I_r I_{anr}$ -диаграммы. Это говорит о сложности кардиоритмов для этих случаев, определяемых конкретными особенностями кардиостимуляторов и биомеханикой вегетативной иннервации трансплантированного сердца.

Разность значений индекса I_r для точек синего (сон) и зеленого (бодрствование) цветов ΔI_r определяют вариативность этого индекса в состояниях сна и бодрствования. Из определения индекса I_r следует, что он определяет степень стабильности кардиоритмов. Чем больше ΔI_r в состояниях сна или бодрствования, тем выше его вариативность в

этих состояниях. Положительный знак ΔI_r будет свидетельствовать о доминировании регулярного МСР в состоянии сна по сравнению с состоянием бодрствования, а отрицательный знак ΔI_r наоборот. Приведем в таблице 1 значения I_r для полного интервала ХМ, ΔI_r и диагнозы исследованных пациентов ТвОКБ, представленных на $I_r I_{arr}$ -диаграмме Рис. 19, а в таблице 2 для участников контрольной группы, представленных на $I_r I_{arr}$ -диаграмме рис. 20.

Таблица 1

Диагнозы и значения индексов регулярности пациентов ТвОКБ

диагноз	дилатационная кардиомиопатия			пациенты с имплантированным кардиостимулятором					
	p	I_r	ΔI_r	p	I_r	ΔI_r	p	I_r	ΔI_r
p	1 ₁	1 ₂	1 ₃	2 ₁	2 ₂	2 ₃	6		
I_r	31	31	45	41	52	95	70		
ΔI_r	-1	1	3	-15	13	3	16		

диагноз	пациент с трансплантированным сердцем	
p	3	4
I_r	38	72
ΔI_r	-1	-10

диагноз	желудочковая аритмия								
p	5	7	8	9	10	11	12	13	14
I_r	41	44	67	54	60	48	34	50	43
ΔI_r	-1	10	19	3	-13	55	1	-6	9

диагноз	желудочковая аритмия								
p	15	16	17	18	19	20	21	22	
I_r	43	29	40	45	51	53	47	29	
ΔI_r	14	12	13	12	20	-2	2	2	

диагноз	желудочковая аритмия								
p	23	24	25	26	27	28	29	30	
I_r	27	26	47	28	37	43	43	50	
ΔI_r	-1	16	33	7	3	20	40	-3	

Согласно $I_r I_{arr}$ -диаграмме рис. 20 вся контрольная группа принадлежит областям $I_{s,ps}$, а из пациентов ТвОКБ этой области принадлежит лишь пациент с номером $p=2_3$. Это можно объяснить адекватной работой искусственного водителя ритма (кардиостимулятора) у данного пациента.

Согласно таблицам 1, 2 и рис. 19-20, в целом имеет место соответствия диагнозов и значений индекса регулярности I_r и вариативности этого индекса в состояниях сна и бодрствования.

Таблица 2

Значения индексов регулярности контрольной группы с диагнозом норма

p	31	32	33	34	35	36	37	38	39
I_r	94	99	79	89	98	79	88	97	95
ΔI_r	-2	0	23	11	0	17	11	4	3

p	40	41	42	43	44	45	46	47	48
I_r	89	93	97	74	99	98	76	99	99
ΔI_r	1	9	2	-14	1	2	13	0	1

p	49	50	51	52	53	54	55	56
I_r	93	99	99	98	98	88	99	93
ΔI_r	3	1	0	-1	1	-4	0	4

p	57	58	59	60	61	62	63	64
I_r	97	78	97	94	96	99	99	95
ΔI_r	1	14	1	2	4	0	0	4

Для пациентов $p=11, 25, 29$, имеющих большие положительные значения параметра ΔI_r , соответственно равные 55, 33 и 40, желудочковая аритмия в состоянии сна отсутствует. А у пациентов $p=2_1, 4$, имеющих большие отрицательные значения параметра ΔI_r , соответственно равные -15 и -10, оказалась более высокая степень регулярности кардиоритмов в состоянии бодрствования.

Заключение. В работе введены индексы регулярности I_r и нерегулярности I_{anr} расширенного квантового фазового пространства МСР S_{eq} и дано обоснование перспективности их использования как маркеров состояния сердечно сосудистой системы.

Исследование проводилось на базе 30 пациентов, обследованных в отделении функциональной диагностики Тверской областной клинической больницы (ТвОКБ). По данным ХМ этих пациентов вычислены значения их индексов I_r и I_{anr} . Они представлены в виде $I_r I_{anr}$ -диаграмм для состояний сна, бодрствования и полного интервала ХМ. Проведено их сравнение с результатами обследования контрольной группы, состоящей из 34 студентов Тверского государственного университета, с диагнозами норма.

Проведено разбиение S_{eq} на области регулярности $S_{eq,r}$ и нерегулярности $S_{eq,nr}^+, S_{eq,nr}^-$. Эти пространства наглядно представлены

с помощью цветной 3D-визуализации для двух пациентов ТвОКБ и одного участника контрольной группы для состояний сна, бодрствования и полного интервала ХМ.

Показано соответствие значений индексов I_r и I_{anr} , приведенных на $I_r I_{anr}$ -диаграмме Рис. 19 и их диагнозами, представленных в таблице 1. Такое же сравнение проведено для контрольной группы.

Исследование $I_r I_{anr}$ -диаграмм указывает на их простоту и наглядность, а также перспективность использования в кардиодиагностике.

Список литературы

- Baevskiy R.M.* 1979. Prognozirovanie sostoyaniy na grani normy i patologii. М.: Meditsina. 205 p.
- Кудинов А.Н., Михеев С.А., Цветков В.П., Цветков И.В.* 2018. Квантование фазового пространства мгновенного сердечного ритма // Математическая биология и биоинформатика: доклады междунар. конф. Т. 7. Пушино: ИМПБ РАН. Статья № e15. DOI: 10.17537/icmbb18.21.
- Mikheev S.A., Tsvetkov V.P., Tsvetkov I.V.* 2018. Visualisation of the quantum phase space of instantaneous heart rhythm // CEUR Workshop Proceedings. V. 2267. P. 359-363.
- Paramonova E.K., Kudinov A.N., Mikheev S.A., Tsvetkov V.P., Tsvetkov I.V.* 2021. Fractal Thermodynamics, Big Data and its 3D Visualization, Proceedings of the 9th International Conference "Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education" (GRID'2021), Dubna, Russia, July 5-9, 2021
- Mikheev S.A., Paramonova E.K., Tsvetkov V.P., Tsvetkov I.V.* 2021. Fractal Thermodynamics of the States of Instantaneous Heart Rhythm // Russian Journal of Mathematical Physics. V. 28. P. 251-256.
- Tsvetkov V.P., Mikheyev S.A., Tsvetkov I.V.* 2018. Fractal phase space and fractal entropy of instantaneous cardiac rhythm // Chaos, Solitons and Fractals. V. 108. P. 71-76. DOI: 10.1016/j.chaos.2018.01.030.
- Ivanov A.P., Kudinov A.N., Mikheev S.A., Tsvetkov V.P., Tsvetkov I.V.* 2016. Phase Space-Based Imaging of Mass Data on Instantaneous Cardiac Rhythm // CEUR Workshop Proceedings. V. 1787. P. 271-274.

**REGULARITY AND IRREGULARITY INDICES OF THE
EXPANDED QUANTUM PHASE SPACE OF THE INSTANT HEART
RATE AS MARKERS OF THE STATE OF THE
CARDIOVASCULAR SYSTEM**

E.K. Paramonova¹, V.P. Tsvetkov², S.A. Mikheev², I.V. Tsvetkov²

¹Tver Regional Clinical Hospital, Tver

²Tver State University, Tver

The paper introduces the regularity indices I_r and irregularity I_{anr} of the extended quantum phase space MCP S_{eq} , and provides a justification for the prospects of using them as markers of the state of the cardiovascular system. The study was conducted on the basis of 30 patients examined in the Department of Functional Diagnostics of the Tver Regional Clinical Hospital (TvOKB). According to the data of Holter monitoring (HM), the values of their indices I_r and I_{anr} were calculated. These values are presented as $I_r I_{anr}$ -diagrams for for different states, such as sleep, wakefulness, and the entire Holter monitoring period. These values were then compared with the results from a control group of 34 healthy students from Tver State University. The control group was divided into two subgroups: those with normal diagnoses and those with irregularities. The S_{eq} was divided into regions of regular and irregular behavior - $S_{eq,r}$ and $S_{q,nr}^+$, $S_{q,nr}^-$ respectively. These spaces are visualized using 3D color imaging for two TvROC patients and one control for the states of sleep, wakefulness, and full HM interval. Correspondence of values of indexes I_r and I_{anr} shown on $I_r I_{anr}$ -diagram and their diagnoses is shown. The same comparison was made for the control group. The study of $I_r I_{anr}$ -diagrams indicates their simplicity and clarity, as well as the potential for use in cardiology diagnostics.

Keywords: *Extended quantum phase space, Holter monitoring, cardioritic, regularity indices, irregularity indices.*

Об авторах:

ПАРАМОНОВА Екатерина Константиновна – кандидат медицинских наук, заведующая отделением функциональной диагностики, ГБУЗ Областная клиническая больница, 170036, г.Тверь, Петербургское шоссе, д. 105, e-mail: paramonova-katya@yandex.ru.

МИХЕЕВ Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей математики и математической физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: mikheev.sa@tversu.ru

ЦВЕТКОВ Виктор Павлович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей математики и математической физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: tsvetkov.vp@tversu.ru.

ЦВЕТКОВ Илья Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры экономики предприятия и менеджмента, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: tsvetkov.iv @tversu.ru.

Парамонова Е.К. Индексы регулярности и нерегулярности расширенного квантового фазового пространства мгновенного сердечного ритма как маркеры состояния сердечно сосудистой системы / Е.К. Парамонова, С.А. Михеев, В.П. Цветков, И.В. Цветков // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. 2024. № 1(73). С. 209-223.

Дата поступления рукописи в редакцию: 10.07.23

Дата подписания рукописи в печать: 01.03.24