

УДК 616.12-053+616.24-008.44

**ОЦЕНКА РЕСПИРАТОРНОЙ СИНУСОВОЙ АРИТМИИ  
ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА ГРАФИКА ПУАНКАРЕ\***

**EVALUATION OF RESPIRATORY SINUS ARRHYTHMIA  
THROUGH ANALYSIS OF POINCARÉ PLOT**

**Д. А. Димитриев<sup>1</sup>, Е. В. Саперова<sup>1</sup>, О. С. Индейкина<sup>1</sup>, А. Д. Димитриев<sup>2</sup>**

**D. A. Dimitriev<sup>1</sup>, E. V. Saperova<sup>1</sup>, O. S. Indeykina<sup>1</sup>, A. D. Dimitriev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный педагогический университет им. И. Я. Яковлева», г. Чебоксары*

<sup>2</sup>*Чебоксарский кооперативный институт (филиал) АНОО ВО «Российский университет кооперации», г. Чебоксары*

**Аннотация.** Данная работа посвящена оценке респираторной синусовой аритмии посредством анализа графика Пуанкаре при спокойном дыхании и дыхании с заданной частотой. Результаты позволяют предположить, что изменение нелинейных параметров variability сердечного ритма, полученных на основе анализа графика Пуанкаре, может дать ценную информацию о состоянии кардиореспираторной системы при дыхании с различной частотой. Полученные в ходе исследования данные могут быть использованы для оценки функционального состояния организма при различном ритме дыхания.

**Abstract.** This work is devoted to the evaluation of respiratory sinus arrhythmia through the analysis of Poincaré plot during quiet breathing and breathing with a given frequency. The results suggest that the change of nonlinear parameters of heart rate variability derived by the analysis of Poincaré plot can provide valuable information on the state of the cardiorespiratory system during breathing with different frequency. The data received can be useful for evaluation of functional state of body at different respiratory rhythms.

**Ключевые слова:** *респираторная синусовая аритмия, график Пуанкаре, частота дыхания, variability сердечного ритма.*

**Keywords:** *respiratory sinus arrhythmia, Poincaré plot, respiratory rate, heart rate variability.*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № 1404

**Актуальность исследуемой проблемы.** Респираторная синусовая аритмия (РСА) как проявление физиологического взаимодействия между дыханием и кровообращением представляет собой вариабельность сердечного ритма, синхронизированную с респираторными процессами [4]. В результате анализа одновременных записей электрокардиограммы, дыхательного объема и парциального давления кислорода в воздухе дыхательных путей был выявлен характерный паттерн RR: при вдохе происходит уменьшение продолжительности кардиоинтервалов, а при выдохе – увеличение их продолжительности [18].

К настоящему времени накоплен большой объем данных, свидетельствующих о том, что вариабельность сердечного ритма (ВСР) и респираторная синусовая аритмия как ее часть являются важными индикаторами функционального состояния организма человека [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]. Эта проблематика изучается в рамках двух основных направлений. Во-первых, РСА рассматривается в качестве предиктора и прогностической переменной. J. F. Thayer и R. D. Lane (2009) особое значение придают значимости РСА в контексте модели нейровисцеральной интеграции. Эта модель подчеркивает важность высших отделов головного мозга, таких как медиальная префронтальная кора, которая вовлечена в когнитивные и эмоциональные процессы и оказывает нисходящее регуляторное влияние на активность вегетативной нервной системы [15]. Во-вторых, респираторная синусовая аритмия рассматривается как появление гибкости физиологической системы, ее способности адаптироваться к изменениям в окружающей среде [14].

Наиболее продуктивным способом исследования респираторной синусовой аритмии как синхронизации дыхательного и кардиоваскулярного циклов является дыхание с навязанной частотой [17]. С другой стороны, природа сложных межсистемных взаимодействий нелинейна и требует для своего изучения использования нелинейных методов, таких как график Пуанкаре [10]. Здесь необходимо отметить, что имеющиеся в литературе научные данные о характере изменения графика Пуанкаре (скатерограммы, графика Лоренца) при дыхании с навязанной частотой скудны и отличаются неполнотой [12], [13]: в них отсутствуют данные о необратимости временного ряда и внутренней динамике точек, формирующих облако на скатерограмме.

В связи с этим целью работы явилось изучение особенностей нелинейных показателей вариабельности сердечного ритма, полученных на основе анализа графика Пуанкаре, при свободном дыхании и дыхании с заданной частотой.

**Материал и методика исследований.** В исследованиях приняли участие 49 здоровых студентов, обучающихся в Чувашском государственном педагогическом университете им. И. Я. Яковлева.

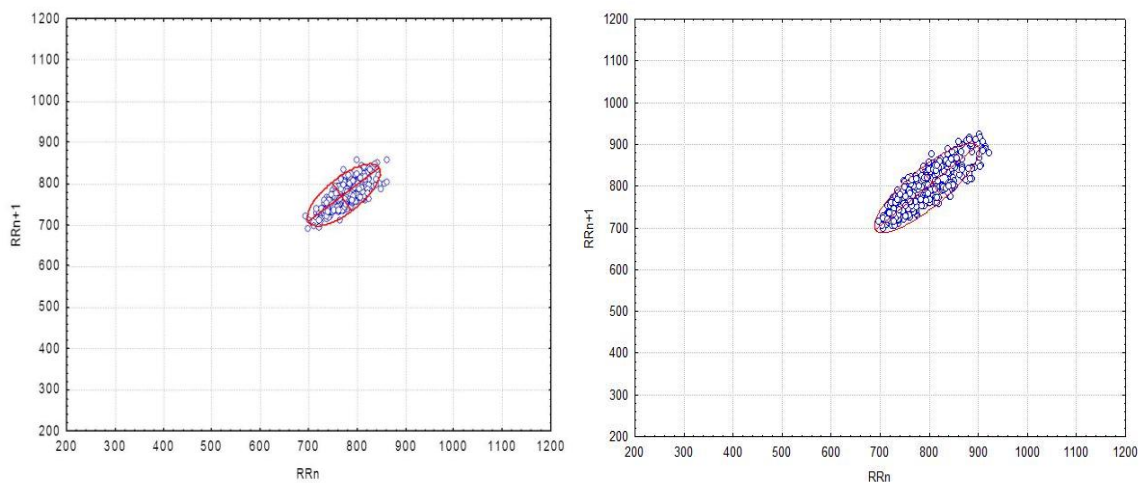
Изучение респираторной синусовой аритмии проходило с использованием метода дыхания с заданной частотой. За несколько дней до основного исследования был проведен предварительный тренинг с целью подготовки индивидуума. Частота дыхательных движений задавалась голосом, записанным в виде MP3 файла. Частота дыхания контролировалась с помощью датчика дыхания для аппаратно-программного комплекса «Поли-Спектр-8Е» (ООО «Нейрософт», г. Иваново). Дыхание с заданным ритмом осуществлялось на частотах 0.108, 0.1, 0.092, 0.083, 0.075 Гц (что соответствовало 6,5, 6, 5,5, 5, 4,5 дых/мин). Продолжительность дыхания на каждой частоте составляла 5 минут, что связано с требованиями к проведению записей кардиоритмограммы [11]. В ходе предварительного тренинга выяснилось, что не все испытуемые способны дышать со всеми заданными частотами: в ходе тренировки и последующего исследования 20 чело-

век смогли дышать на всех частотах, 1 человек – на пяти частотах, 12 человек смогли дышать с заданной частотой в диапазоне от 6,5 до 5,5 дых/мин, один человек – 6,5 и 6 дых/мин, 15 человек – лишь на частоте 6 дых/мин.

Запись кардиоритмограммы (как при свободном дыхании, так и при дыхании с заданной частотой) осуществлялась с помощью программно-аппаратного комплекса «Поли-Спектр-8Е». Испытуемый находился в состоянии покоя лежа не менее 5 минут до начала регистрации кардиоинтервалов. Исследование и анализ показателей variability сердечного ритма проводились в соответствии с рекомендациями Европейской Ассоциации Кардиологии и Северо-Американской Ассоциации Электрофизиологии и Кардиоритмологии [1], [11]. При этом анализировались RR-интервалы только лишь синусового ритма (так называемый «нормальный к нормальному», или NN-интервал), все остальные интервалы были исключены. С целью выявления артефактов и интервалов, связанных с активностью предсердных и желудочковых эктопических водителей ритма, был применен метод визуализации ритмограммы посредством графика Пуанкаре (скатерограммы) [2]. Кроме того, были определены показатели графика Пуанкаре: SD1 – «ширина» облака, SD2 – «длина» облака, SS – общая площадь, SD1/SD2 – отношение «ширины» облака к его «длине», GI – индекс асимметрии облака, КKM – комплексная корреляционная мера. Статистическая обработка данных проводилась с использованием статистического пакета профессиональной статистики «Statistica 7.0 for Windows».

**Результаты исследований и их обсуждение.** Нами был проведен сравнительный анализ нелинейных показателей variability сердечного ритма, полученных на основе анализа графика Пуанкаре при свободном дыхании и дыхании с заданной частотой. На рис. 1 представлены примеры скатерограмм при свободном ритме дыхания и при дыхании с частотой 6,5 дых/мин.

Графики Пуанкаре, приведенные на рис. 1, наглядно демонстрируют, что изменение частоты дыхания сопровождается изменением формы облака – оно не просто становится крупнее, но увеличивается его длина, то есть повышается дисперсия точек относительно перпендикуляра к линии идентичности. Характер изменения показателей графика Пуанкаре при переходе с одной частоты дыхания на другую представлен в табл. 1.



Свободное дыхание

Дыхание с частотой 6,5 дых/мин

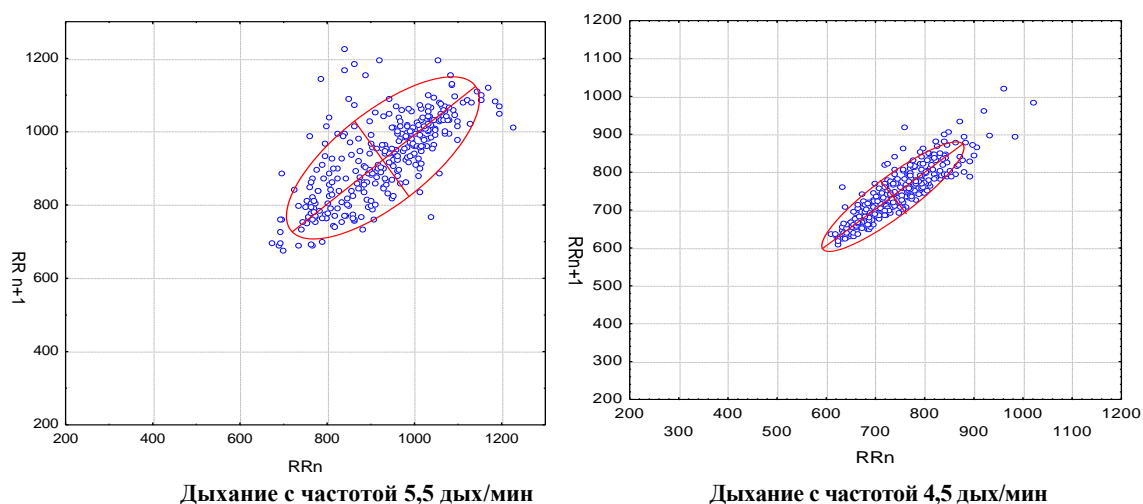


Рис. 1. Примеры скатерограмм при свободном дыхании и дыхании с навязанной частотой

Таблица 1

Средние уровни показателей графика Пуанкаре при различном режиме дыхания

	Покой	6,5	6	5,5	5	4,5
<b>SD1, мс</b>	36,74±5,19	38,8±4,46	43,77±4,33	41,39±4,27	42,87±5,99	47,85±7,58
<b>SD2, мс</b>	74,46±5,78	118,24±9,27	124,12±8,49	122,1±8,8	128,05±13,32	133,32±13,5
<b>SS, мс<sup>2</sup></b>	11358,34± 3244,96	17892,31± 3469,68	20925,3± 3392,61	19474,03±3 154,37	21822,74± 5251,77	25702,35 ±6621,35
<b>GI</b>	0,44±0,02	0,38±0,02	0,35±0,02	0,33±0,02	0,37±0,03	0,35±0,03
<b>ККМ</b>	0,21±0,01	0,11±0,01	0,12±0,01	0,12±0,01	0,12±0,01	0,13±0,01
<b>SD1/SD2</b>	0,46±0,03	0,31±0,01	0,33±0,01	0,32±0,01	0,31±0,02	0,33±0,02

Из приведенных в таблице 1 данных следует, что дыхание с навязанной частотой вызывает повышение уровня дисперсии точек относительно линии идентичности (SD1), хотя эти изменения были статистически недостоверными (ANOVA  $\chi^2=6,28$ ;  $p>0,05$ ). Гораздо более выраженной была динамика изменения величины дисперсии относительно перпендикуляра к линии идентичности (SD2) – статистический анализ выявил достоверное увеличение этого показателя при дыхании с навязанной частотой по сравнению со свободным дыханием (ANOVA  $\chi^2=30,76$ ;  $p<0,001$ ). При этом отмечалось существенное различие между свободным дыханием и дыханием на любой из навязанных частот, а различия между представленными искусственными режимами дыхания обнаружено не было. На графиках, приведенных на рис. 1, хорошо видно увеличение размеров облака на графике Пуанкаре при переходе на навязанный режим дыхания. Это визуальное наблюдение подтверждается данными статистического анализа (ANOVA  $\chi^2=19,12$ ;  $p<0,01$ ).

Величина коэффициента Гузика GI существенно снижается в результате дыхания на искусственных частотах (ANOVA  $\chi^2=18,31$ ;  $p<0,01$ ). Отличительной особенностью данной динамики является достоверное различие между дыханием со свободной частотой и дыханием с частотой 5,5 дых/мин и 6 дых/мин.

Повышение размеров облака Пуанкаре при дыхании с навязанной частотой существенно снижает значение комплексной корреляционной меры ККМ (ANOVA  $\chi^2=38,61$ ;  $p<0,001$ ). Гораздо более выраженное увеличение SD2 по сравнению с SD1 при дыхании с

навязанной частотой привело к снижению показателя  $SD1/SD2$  (ANOVA  $\chi^2=36,83$ ;  $p<0,001$ ), хотя расхождение между различными режимами с навязанным дыханием было недостоверным ( $p>0,05$ ).

Таким образом, на основе приведенных выше данных можно прийти к выводу, что переход к навязанному ритму дыхания сопровождается существенным изменением параметров графика Пуанкаре, а величина навязанного ритма не оказывает на них никакого влияния. Мы глубже изучили этот вопрос, опираясь на концепцию кардиореспираторного резонанса [16]. Согласно этой концепции, существуют два контура регуляции ритма сердца – барорефлекторный и дыхательный, каждый из которых имеет собственный период циклических изменений продолжительности интервалов RR – период цикла барорефлекторной биологической обратной связи и период дыхания соответственно. При совпадении продолжительности этих циклов наблюдается кардиореспираторный резонанс, который проявляется в виде резкого увеличения амплитуды дыхательной синусовой аритмии. Частота дыхания, на которой происходит резонанс, является индивидуальной и зависит от ряда факторов, в том числе от длины тела [16]. Мы определили частоту кардиореспираторного резонанса согласно методике Е. Г. Ващилло [16]. Распределение значений этого показателя представлено на рис. 2. Анализ распределения индивидуальных значений частоты резонанса свидетельствует о том, что наиболее часто резонанс отмечался при дыхании с частотой 6 дых/мин: резонанс на этой частоте отмечается у 40 % испытуемых. У 17,14 % обследуемых резонанс отмечался при дыхании с частотой 6,5 дых/мин, у 22,86 % студентов резонанс возникал при дыхании с частотой 5 дых/мин. Резонанс в виде резкого увеличения амплитуды колебаний на дыхательной частоте у 14,29 % студентов возникал при дыхании с частотой 5 дых/мин. У некоторых студентов (5,71 %) резонанс возникал при дыхании с очень низкой частотой – 4,5 дых/мин.

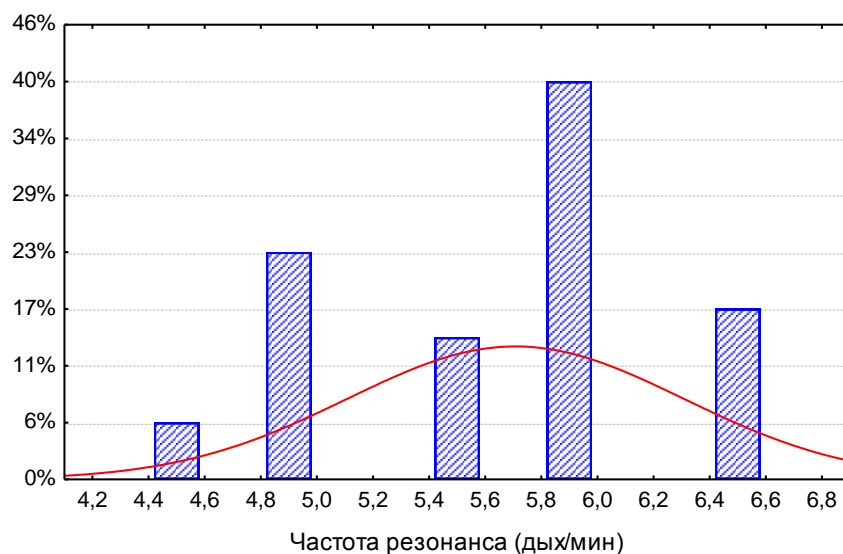


Рис. 2. Распределение индивидуальных значений частоты дыхания, на которой отмечается резонанс

Для резонансной частоты характерны максимальные значения  $SD1$  ( $46,99\pm 4,69$  мс),  $SD2$  ( $134\pm 9,48$  мс),  $SS$  ( $24077,67\pm 4013,36$  мс<sup>2</sup>), минимальные значения  $KKM$  ( $0,12\pm 0,01$ ). Значения  $GI$  ( $0,36\pm 0,02$ ) и  $SD1/SD2$  ( $0,33\pm 0,01$ ) не столь существенно отличались от нере-

зональных режимов дыхания с навязанной частотой. При этом дыхание на частоте резонанса статистически достоверно отличалось от свободного дыхания, но не отличалось от других режимов дыхания с навязанной частотой по всем исследуемым параметрам, из чего мы можем сделать вывод о том, что использование показателей графика Пуанкаре для описания и дискриминации данного функционального состояния представляется бесполезным.

**Резюме.** Полученные нами результаты исследования свидетельствуют о том, что респираторная синусовая аритмия является выраженным физиологическим феноменом. Изменение частоты дыхания влечет за собой существенные изменения в характере вариабельности сердечного ритма, что проявляется в виде изменения скатерограммы. Кроме того, нами был обнаружен феномен кардиореспираторного резонанса на различных частотах дыхания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Березный, Е. А. Практическая кардиоритмография / Е. А. Березный, А. М. Рубин, Г. А. Утехина. – СПб. : НПП «Нео», 2005. – 140 с.
2. Димитриев, Д. А. Применение метода анализа вариабельности сердечного ритма с использованием графика Пуанкаре для оценки функционального состояния вегетативной нервной системы в период эмоционального стресса / Д. А. Димитриев, Е. В. Саперова, Ю. Д. Карпенко, А. Н. Зотова // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. – 2012. – № 4 (76). – С. 64–68.
3. Кушкова, Н. Е. Взаимосвязь параметров внешнего дыхания, кровообращения и вариабельности сердечного ритма у студентов : автореф. дис. ... канд. мед. наук : 03.00.13 / Н. Е. Кушкова. – Архангельск, 2007. – 20 с.
4. Лышова, О. В. Внешнее дыхание и ритм сердца (атлас динамических реопневмограмм и электрокардиограмм) / О. В. Лышова, В. М. Проворотов. – СПб. : ИНКАРТ, 2006. – 271 с.
5. Мухаметжанова, С. Е. Вариабельность сердечного ритма как показатель вегетативного регулирования гемодинамики у горнорабочих / С. Е. Мухаметжанова // Гигиена труда и медицинская экология. – 2006. – Т. 12. – № 3. – С. 51–57.
6. Попов, В. В. Вариабельность сердечного ритма: возможности применения в физиологии и клинической медицине / В. В. Попов, Л. Н. Фрицше // Укр. мед. часопис. – 2006. – № 2. – С. 24–31.
7. Статуева, Л. М. Динамика вариабельности сердечного ритма студентов и школьников Арзамаса в процессе учебной нагрузки / Л. М. Статуева, С. А. Сабурцев, В. Н. Крылов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2007. – № 4. – С. 82–87.
8. Устюжанинова, Н. В. Функциональное состояние внешнего дыхания здоровых студентов / Н. В. Устюжанинова, Г. С. Шишкин, Н. Д. Уманцева // Бюллетень Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. – 2004. – № 1. – С. 134–137.
9. Чернов, А. Н. Вариабельность ритма сердца и реакции ауторегуляции у детей 5–6 лет при достижении цели, приближающейся с различными скоростями / А. Н. Чернов, Т. Г. Кузнецова // Вестник Тверского государственного университета. Сер. : Биология и экология. – 2009. – № 12. – С. 35–41.
10. Brennan, M. Do existing measures of Poincare plot geometry reflect nonlinear features of heart rate variability? / M. Brennan, M. Palaniswami, P. Kamen // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 2001. – Vol. 48. – P. 1342–1347.
11. Camm, A. J. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use / A. J. Camm, M. Malik, J. T. Bigger et al. // Circulation. – 1996. – Vol. 93. – P. 1043–1065.
12. Guzik, P. Correlations between the Poincare plot and conventional heart rate variability parameters assessed during paced breathing / P. Guzik, J. Piskorski, T. Krauze, R. Schneider, K. H. Wesseling et al. // The Journal of Physiological Sciences. – 2007. – Vol. 57. – № 1. – P. 63–71.
13. Kox, M. Influence of different breathing patterns on heart rate variability indices and reproducibility during experimental endotoxaemia in human subjects / M. Kox, J. C. Pompe, J. G. van der Hoeven, C. W. Hoedemaekers, P. Pickkers // Clinical Science. – 2011. – Vol. 121. – № 5. – P. 215–222.
14. Porges, S. W. The polyvagal perspective / S. W. Porges // Biol Psychol. – 2007. – Vol. 74. – № 2. – P. 116–143.
15. Thayer, J. F. Claude Bernard and the heart–brain connection: further elaboration of a model of neurovisceral integration / J. F. Thayer, R. D. Lane // Neurosci. Biobehav. Rev. – 2009. – Vol. 33. – P. 81–88.
16. Vaschillo, E. G. Characteristics of resonance in heart rate variability stimulated by biofeedback / E. G. Vaschillo, B. Vaschillo, P. M. Lehrer // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. – 2006. – Vol. 31. – № 2. – P. 129–142.
17. West, B. J. Fractal physiology and chaos in medicine / B. J. West. – World Scientific. – 2013. – Vol. 16. – 320 p.
18. Yasuma, F. Respiratory sinus arrhythmia: why does the heartbeat synchro-nize with respiratory rhythm? / F. Yasuma, J. Hayano // Chest. – 2004. – Vol. 125. – № 2. – P. 683–690.