

УДК 612.16:517

МЕХАНИЗМЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА. ВЛИЯНИЕ ВЕГЕТАТИВНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ

Койчубеков Б.К., Сорокина М.А., Коршуков И.В.

Карагандинский государственный медицинский университет, Караганда, e-mail: adija@list.ru

Исследовано влияние вегетативной нервной системы на нелинейную динамику сердечного ритма. С этой целью рассмотрены две модели: первая основана на изучении нелинейных показателей у лиц с различным вегетативным балансом, который является важнейшим показателем состояния вегетативной нервной регуляции сердечно-сосудистой системы. Вторая модель – это возрастные особенности нелинейной динамики сердечного ритма. Показано, что наибольшая сложность и «хаотичность» ритма сердца наблюдается у лиц с преобладающим влиянием парасимпатического отдела ВНС. Наоборот, смещение вегетативного баланса в сторону симпатического отдела приводит к упорядочению последовательности кардиоинтервалов. Однако конечный результат не является просто суммой данных воздействий, поскольку интегрированные влияния обеих отделов ВНС имеет форму нелинейных взаимосвязей.

Ключевые слова: сердечный ритм, нелинейная динамика, вегетативный баланс

MECHANISMS OF HEART RATE NONLINEAR DYNAMICS. IMPACT OF VEGETATIVE NERVOUS SYSTEM

Koichubekov B.K., Sorokina M.A., Korshukov I.V.

Karaganda state medical university, Karaganda, e-mail: adija@list.ru

Investigated the influence of autonomic nervous system to the heart rhythm nonlinear dynamics. To this end, considered two models: the first is based on the study of nonlinear parameters in patients with different autonomic balance, which is the most important indicator of the cardiovascular system autonomic regulation. The second model – it is age features of heart rhythm nonlinear dynamics. It is shown that the greatest complexity and «chaotic» of heart rhythm observed in patients with predominant influence of parasympathetic ANS. On the contrary, the shift of autonomic balance toward sympathetic leads to an ordered sequence of cardiointervals, but the end result is not simply the sum of these impacts, since the integrated effect of both ANS parts is in the form of non-linear relationships.

Keywords: heart rate, nonlinear dynamics, vegetative balance

Различное соотношение между двумя отделами вегетативной нервной системы приводит к изменению модулирующего влияния ВНС на синусовый узел, в результате чего в динамике сердечного ритма появляются и исчезают периодические составляющие различной частоты и амплитуды. Нелинейность и реципрокность этих отношений одновременно являются причиной изменений и нерегулярной составляющей кардиоинтервалограммы [8].

На настоящий момент не ясны механизмы генеза хаотических составляющих в колебаниях физиологических процессов. Так, относительно аperiodических изменений сердечного ритма имеется мнение о наличии интра- и экстракардиальных механизмов, хотя большинство исследователей склоняется к мнению, что основным источником нерегулярности является вегетативная нервная система. Однако, недостаточно еще изучено каким образом влияют на сердечный ритм сегментарный и надсегментарный отделы симпатической нервной системы, а также соотношение адрен- и холинергической регуляции при различных функциональных состояниях и на различных этапах развития челове-

ского организма – по мере созревания и деградации нервной системы.

В последнее десятилетие нелинейные процессы рассматриваются с позиций «теории детерминированного хаоса» и для их описания используется математический аппарат нелинейной динамики, который оперирует, в том числе, такими показателями как корреляционная размерность и корреляционная энтропия.

Целью нашего исследования явилось оценка вклада вегетативной нервной системы в нелинейную динамику сердечного ритма. Поскольку в литературе уже дана, с некоторыми оговорками, интерпретация **линейным** показателям [2, 4], то является целесообразным на их основе изучение **нелинейных** характеристик СР.

Материалы и методы исследования

В работе использовались записи кардиоинтервалограмм практически здоровых лиц возрастных групп 5–7 лет ($n = 30$), 8–13 лет ($n = 96$), 14–17 лет ($n = 45$), 18–21 лет ($n = 125$).

Аналоговый сигнал ЭКГ, получаемый с выхода электрокардиографа, преобразовывался в цифровой посредством установленной в компьютере измерительной платы АЦП. Выделение кардиоинтервалограммы и последующий анализ КИГ реализованы

программно. Для исследования линейных показателей variability сердечного ритма была создана программа Puls.KZ (свидетельство о регистрации объекта интеллектуальной собственности № 131, выданное 26.04.2006). Программа позволяет получать статистические, геометрические (вариационные), спектральные, авторегрессионные и энтропийные характеристики variability сердечного ритма [1].

Для оценки нелинейной динамики сердечного ритма рассчитывались:

корреляционная размерность (D_2) – этот показатель позволяет измерить сложность динамики системы. При $D_2 = 1$ система демонстрирует простые периодические колебания (маятник), в случае абсолютно случайной динамики D_2 равна бесконечности.

корреляционная энтропия (K_2) – является количественной характеристикой степени организованности системы. Если энтропия достигает нуля, то система становится полностью предсказуемой. Так будет в случае регулярных процессов. Для истинно случайных процессов энтропия неограниченно велика. Энтропия системы в режиме детерминированного хаоса положительна, но имеет конечное значение.

В настоящей работе для расчета корреляционной размерности и корреляционной энтропии использовался алгоритм, предложенный Grassberger P. и Procaccia I. [3].

Важнейшим фундаментальным свойством хаотических систем является чувствительность к начальным условиям. То есть, две точки с изначально очень близкими координатами при движении по фазовым траекториям экспоненциально разбегаются (малые отличия в «прошлом» приводят к большим отличиям в «будущем»). Скорость, с которой расходятся эти точки, характеризуется **показателем Ляпунова (λ)**. Чем чувствительнее система к начальным условиям, тем он больше. Для коротких временных рядов используются разработки Rosenstein M. и Kantz H. [5, 7], которые предложили очень близкие по алгоритму приближенные методики расчета λ .

Результаты исследования и их обсуждение

Для выяснения механизмов нелинейной динамики сердечного ритма было использовано две модели.

Первая модель основана на изучении нелинейных показателей у лиц с различным вегетативным балансом, который является важнейшим показателем состояния вегетативной нервной регуляции сердечно-сосудистой системы. Этот баланс может быть оценен по спектральной характеристике. Соотношение между мощностью низкочастотных и высокочастотных волн спектральной характеристики кардиоинтервалограммы (LF/HF) представляется индексом вагусно-симпатического взаимодействия, или вегетативного баланса [6].

Среди обследованных нами были выделены три группы по показателю LF/HF . В первую группу вошли лица со значительным преобладанием парасимпатических влияний (ваготоники), во вторую группу –

лица, у которых наблюдается вегетативный баланс в регуляции сердечного ритма (нормотоники), в третьей группе баланс смещен в сторону преобладания симпатической нервной системы (симпатотоники).

Если судить по **линейным** спектральным характеристикам, представленным на рис. 1, то можно констатировать, что усиление симпатических влияний приводит к снижению общей мощности (TP) периодических составляющих кардиоинтервалограммы – минимальное значение отмечается в третьей группе. Также в этой группе наблюдается изменение спектральной характеристики в пользу преобладания мощности низкочастотных составляющих $LF\%$ и $VLFF\%$ (рис. 1, б), что косвенно отражает включение в регуляцию высших эрготропных и трофотропных надсегментарных отделов ВНС. Эти данные свидетельствуют, что сдвиг вегетативного баланса в сторону преимущественной активности симпатического звена приводит к снижению общей variability КИГ, а периодические изменения кардиоритма наблюдаются на длительных интервалах времени, т.е. происходит определенная его стабилизация.

Для того, чтобы охарактеризовать регуляторные процессы в выделенных группах с точки зрения сложности и регулярности динамики СР были рассчитаны **нелинейные** показатели. Средние значения в каждой группе приведены в табл. 1.

Из рис. 2 видно, что при значительном сдвиге вегетативного баланса в сторону активности симпатического отдела (третья группа), корреляционная размерность и энтропия статистически значимо меньше, чем при сохранении баланса (вторая группа).

Это еще раз подтверждает тот факт, что симпатические влияния упрощают динамику сердечного ритма, т.е. он становится более регулярным. Но различия этих показателей между второй и первой группой выявлены не были, при том, что отношение LF/HF в этих группах отличается более, чем в два раза. Т.е. по этим данным сдвиг вегетативного баланса в сторону парасимпатического отдела не приводит к росту «хаотичности» в последовательности R-R-интервалов.

Расчет коэффициента корреляции между линейными и нелинейными показателями также не позволил однозначно ответить на вопрос о возможных механизмах нерегулярной динамике сердечного ритма. По данным, представленным в табл. 2, показатели D_2 и K_2 имеют обратную корреляционную связь с показателем LF/HF .

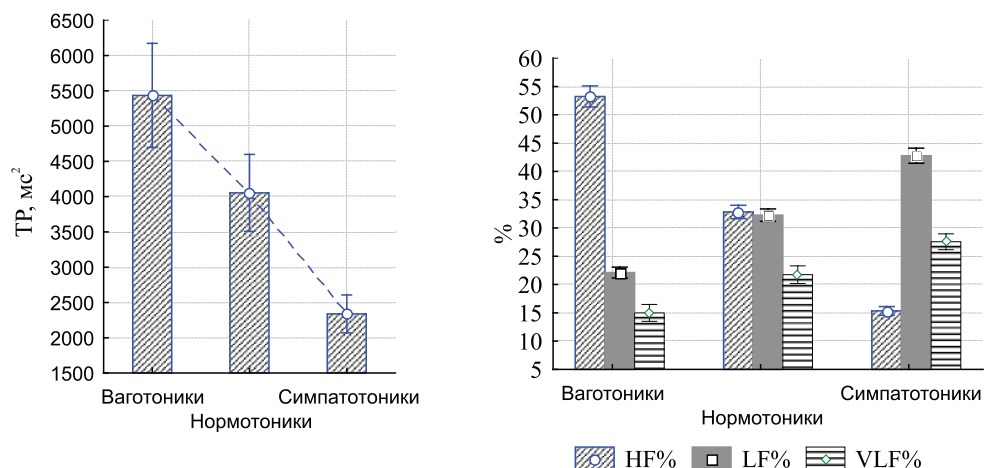


Рис. 1. Спектральная характеристика кардиоинтервалограммы у лиц с различным вегетативным балансом (А-суммарная мощность спектра, Б-спектральные компоненты КИГ)

Таблица 1

Нелинейные показатели сердечного ритма в различных группах

Группа	n	D_2	K_2	λ
		M ± m	M ± m	M ± m
1 группа	30	5,782 ± 0,195	4,556 ± 0,147	0,039 ± 0,002
2 группа	30	5,671 ± 0,202	4,506 ± 0,134	0,040 ± 0,003
3 группа	30	5,063 ± 0,245	4,110 ± 0,156	0,037 ± 0,003

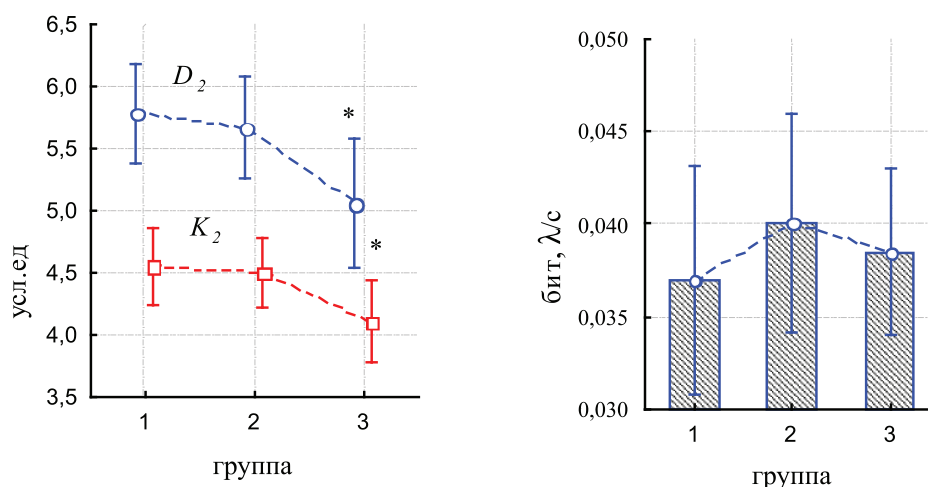


Рис. 2. Нелинейные показатели сердечного ритма в группе ваготоников (1, n = 30), нормотоников (2, n = 30) и симпатотоников (3, n = 30).

Эти результаты можно было ожидать, поскольку отношение LF/HF отражает влияния симпатического отдела ВНС на сердечный ритм, оказывающего упорядоченное воздействие на динамику кардиоритма, соответственно, чем сильнее эти влияния, тем меньше значение корреляционной размерности и энтропии. Однако, согласно нашим данным, прямой связи между этими явлениями нет, т.к. коэффициент корреляции находится на уровне $r \approx -0,6$.

Также выявлено, что старший показатель Ляпунова очень слабо (r на уровне 0,3) коррелирует с линейными показателями системы регуляции сердечного ритма.

Для уточнения этих противоречий была использована **вторая модель** – возрастные особенности нелинейной динамики сердечного ритма. Применение такой модели основано на определенных знаниях о соотношениях между механизмами нервной регуляции и формированием

структуры и функции органов и систем в различные периоды жизни человека. Опираясь на эти знания можно сделать предположения о вовлеченности различ-

ных отделов ВНС в регуляцию сердечного ритма, о механизмах возникновения аperiodических колебаний кардиоинтервалограммы.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между линейными и нелинейными показателями СР

Показатели	ЧСС	SDNN	RMSSD	HRVIndex	TP	HF	LF	VLF	LF/HF
D_2	-0,12	0,25	0,33	0,32	0,13	0,12	0,07	0,09	-0,55
K_2	-0,08	0,22	0,28	0,23	0,14	0,12	0,11	0,06	-0,48
λ	0,13	0,06	0,23	0,07	0,05	0,15	-0,09	-0,11	-0,32

Согласно литературным данным стадия завершения формирования вегетативной нервной системы начинается с годовалого возраста и продолжается до конца 1-го десятилетия жизни. Сразу после рождения наблюдается функциональная незрелость парасимпатического звена ВНС. В возрасте 1–5 лет происходит усиление как симпатических, так и парасимпатических влияний на СР, однако сохраняется относительное превалирование симпатической активности. К 10 годам и старше парасимпатические влияния на СР становятся доминирующими, несмотря на то, что в этот период еще наблюдается некоторое повышение активности симпатического отдела ВНС. Таким образом, в подростковом возрасте и в период наступления половой зрелости организма форми-

руется иной, нежели в детском возрасте, тип регуляции СР, характеризующийся преобладанием парасимпатического звена ВНС на фоне достаточно выраженного тонуса симпатической иннервации сердца.

Если судить по нелинейным характеристикам D_2 и K_2 , то наиболее сложная динамика сердечного ритма наблюдается в младшей и подростковой возрастных группах 8–13 и 14–17 лет (рис. 3). В возрасте 5–7 лет регистрируются наименьшие значения корреляционной размерности и корреляционной энтропии, эти показатели также статистически значимо снижаются при переходе от возрастной группы 14–17 лет к возрастной группе 18–21 год. Аналогичные результаты были получены при анализе показателя Ляпунова.

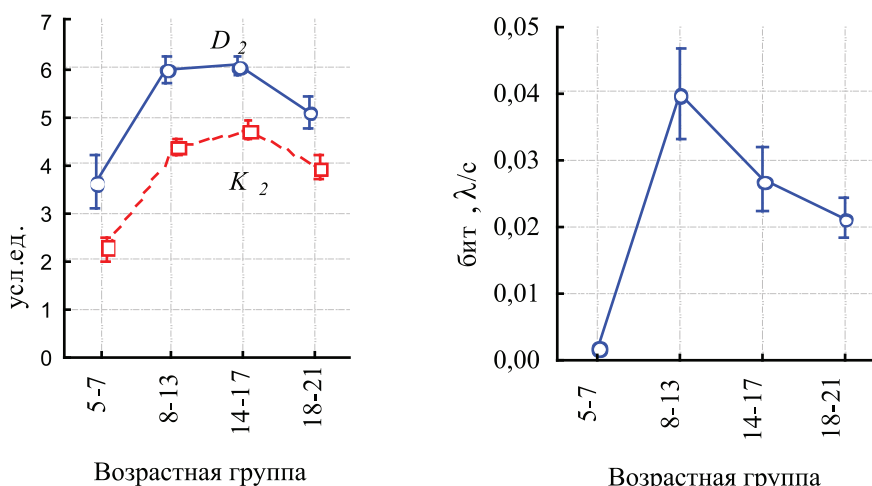


Рис. 3. Нелинейные показатели СР в различных возрастных группах

На основании этих данных можно предположить, что увеличение сложности динамики СР является результатом одновременной активации симпатических и парасимпатических влияний.

Заключение

Согласно полученным результатам вегетативная нервная система вносит существенный вклад в процесс нерегулярных изменений R-R-интервалов. Так, наибольшая

сложность и «хаотичность» ритма сердца наблюдается у лиц с преобладающим влиянием парасимпатического отдела ВНС. Наоборот, смещение вегетативного баланса в сторону симпатического отдела приводит к упорядочению последовательности кардиоинтервалов, т.е. ритм сердца в этом случае более регулярный, динамика его менее сложна и менее «хаотична». Однако конечный результат не является просто суммой данных воздействий, поскольку интегрированные влияния обеих отделов ВНС имеет форму нелинейных взаимосвязей.

То, что «хаотичность» СР результат одновременной активации симпатического и парасимпатического отделов ВНС подтвердилось и при анализе нелинейных показателей в различных возрастных группах. Известно, что к десяти годам после рождения преобладающими становятся холинергические влияния, при сохранении активности адренергических механизмов. Адренергические влияния, воздействуя на различные звенья обмена ацетилхолина, определяют темп становления холинергической регуляции сердца. Такое соотношение симпатических и парасимпатических влияний приводит к изменению ритмики сердца, в том числе отражается на ее нерегулярной составляющей. Согласно полученным данным в детском и подростковом возрасте наблюдает-

ся наиболее сложная динамика сердечного ритма, когда преимущественное влияние на сердечный ритм оказывает парасимпатическая нервная система на фоне повышенного тонуса симпатического отдела ВНС.

Список литературы

1. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) // Вестник аритмологии. – 2001. – № 24. – С. 65–87.
2. Щербатых Ю.В. Что выявляет спектральный анализ variability сердечного ритма? // Прикладные информационные аспекты медицины. – Воронеж, 1999. – Т. 2, № 4. – С. 40–45.
3. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of strange attractors // In: Physical Review Letters. – 1983. – Vol. 50. – P. 346–349.
4. 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. – 1996. – Vol. 93. – P. 1043–1065.
5. Kantz H. A robust method to estimate the maximal Lyapunov exponent of a time series // Physics Letters. – 1995. – Vol. 185. – P. 77–87.
6. Pagani M., Mazzuero G., Ferrari A. Sympatovagal interaction during mental stress. A study using spectral analysis of heart rate variability in healthy control subjects and patients with a prior myocardial infarction // Circulation. – 1991. – Vol. 83, № 4 – P. 43–51.
7. Rosenstein M.T., Collins J.J., De Luca C.J. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets // Physica. – 1993. – Vol. 65. – P. 117–134.
8. Tulppo M.P., Makikallio T.H., Seppanen T. Heart rate dynamics during accentuated sympathovagal interaction // Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. – 1998. – Vol. 274. – P. 810–816.