

НЕСТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

ЛОЛЛИНИ В.А.*, НАУМЕНКО А.А.**

*Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет, г. Витебск, Республика Беларусь

**Витебский государственный технологический университет, г. Витебск, Республика Беларусь

Вестник ВГМУ. – 2017. – Том 16, №1. – С. 44-49.

NON-STATISTICAL APPROACHES TO THE ANALYSIS OF CARDIAC RHYTHM

LOLLINI V.A.*, NAUMENKO A.A.**

*Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, Vitebsk, Republic of Belarus

**Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Republic of Belarus

Vestnik VGMU. 2017;16(1):44-49.

Резюме.

Используемые в настоящее время статистические методы анализа сердечного ритма не в полной мере учитывают влияние и значение «случайных» явлений, нарушения ритма, таких как экстрасистолия. Между тем, немногочисленные желудочковые экстрасистолы могут быть предиктором серьезной сердечной патологии. Поэтому, на наш взгляд, есть достаточные основания привлечь иные подходы к изучению адекватности функционирования сердечно-сосудистой системы и, в частности, параметров сердечного ритма. Анализ устойчивости динамических систем, как показали приводимые исследования, может соответствовать задачам исследования угрожающих нарушений ритма. Подобный анализ может быть проведен с использованием временных рядов значений любого параметра системы, обладающего достаточным уровнем полноты отображения интересующих нас свойств этой системы. Поэтому предлагаемый подход вполне универсален.

Проведенные исследования показывают, что оценка устойчивости сердечно-сосудистой системы путем анализа состояния в фазовом пространстве позволяет видеть особенности динамики, делающие видимыми различия в важных интегральных свойствах системы, которые недоступны при статистическом подходе.

Ключевые слова: аритмия, экстрасистолия, математическая обработка ритма, анализ устойчивости динамических систем.

Abstract.

Currently used methods of statistical analysis of cardiac rhythm do not fully take into account the influence and importance of «random» events, arrhythmias, such as extrasystole. Meanwhile, not numerous ventricular extrasystoles may be a predictor of serious heart diseases. Therefore, in our opinion, there are reasonable grounds to involve different approaches to the study of the adequacy of the cardiovascular system functioning and, in particular, the parameters of the heart rate. The analysis of the dynamic systems stability, as the cited studies have shown, may be consistent with the objectives of the research of threatening arrhythmias. Such analysis may be performed using the time series parameter values of any system having a sufficient level of reflection completeness of this system properties being of interest to us. Therefore, the proposed approach is quite universal.

The conducted studies show that the assessment of the stability of the cardiovascular system by means of the analysis of the phase space state allows to see the dynamics features that make visible differences in the major integral properties of the system that are inaccessible with the statistical approach.

Key words: arrhythmia, extrasystole, mathematical treatment of rhythm, stability analysis of dynamic systems.

Сердечно-сосудистая система (ССС) с ее многоуровневой функцией саморегуляции является сложнейшей динамической системой. Попытки ее математического описания предпринимались давно, но без достаточного успеха. Среди применяемых методов сравнительно широкое применение получил статистический, связанный с применением теории вероятностей и математической статистики. Изучение нарушений работы сердца, основанных на данных ЭКГ, проводятся уже несколько десятилетий. Однако в клинических и диагностических исследованиях используются достаточно простые методы линейной статистики. Информационная ценность этих методов и их специфичность невысоки. Парадокс этого факта состоит в том, что человеческий организм не является средой, которая генерирует случайные события или случайные процессы. Относительные же успехи статистического подхода к изучению ССС объясняются тем, что названный подход приводит к усредненным наиболее вероятным значениям наблюдаемых характеристик, имеющим уже неслучайный характер. Именно они и принимаются во внимание при исследовании. То, что при этом нивелируется весь массив мгновенных значений наблюдаемой характеристики, по которым определяются ее усредненные значения, во внимание не принимается [1]. Между тем, информативность такого массива несомненна, так как каждый его элемент является отображением текущего и отнюдь не случайного состояния ССС. Основная задача анализа R-R интервалов предполагает изучение вопроса о параметрах системы, создавшей этот ряд, размерности, энтропии и др. Размерность же является оценкой фрактальной размерности и частным случаем обобщенной вероятностной размерности аттрактора систем [2]. Поэтому, на наш взгляд, есть достаточные основания привлечь иные подходы к изучению этой системы и, в частности, сердечного ритма. В основе большинства методов, связанных с обработкой временных рядов, лежит использование многомерного представления временно-го ряда.

В последние десятилетия разработаны новые методы, обогатившие современную нелинейную теорию динамических систем (ДС), крупным достижением которой является открытие превалирования неустойчивостей.

Именно анализ устойчивости ДС представляется ключевым при ее диагностике, прогнозировании состояний, управлении ею, целесообразности трансформаций ее структуры, а также в решении множества других задач. Превалирование неустойчивостей означает, что возникшие малые изменения параметров системы с течением времени могут самопроизвольно усиливаться [3], приводя систему к потере устойчивости, т.е. к внезапному переходу в другой режим. Потенциальные предпосылки такого эффекта связаны с существованием притягивающего множества установившихся режимов движения системы в фазовом пространстве. Такие режимы получили название аттракторов (от англ. attract - притягивать) [3, 4]. Существование аттракторов систем и процессов было установлено в самом начале 60-х годов 20-го века. Позднее были выявлены аттракторы трех типов: состояние равновесия, состояние периодического движения и так называемый странный аттрактор, который вскоре стали связывать с проблемой хаотического движения. При переходе системы в состояние, называемое странным аттрактором, параметры системы начинают претерпевать сложные непериодические изменения, в то время как их усредненные значения могут оказаться устойчивыми и практически не зависящими от начальных условий. Построенная в начале 70-х годов XX века теория катастроф [3] позволила понять, что корректный ответ на вопрос об устойчивости системы возможен лишь тогда, когда установлен факт существования и тип аттрактора. В связи с этим поиск методов его обнаружения и распознавания типа быстро стал задачей, имеющей первостепенное значение для оценки поведения сложных систем, к которым, естественно, относится и ССС.

Исследованиями последних лет в области теории устойчивости установлено, что свойства аттракторов у реальных систем нередко отличаются от свойств любого из трех указанных выше «стандартных» типов. Это заметно усложняет задачу анализа устойчивости систем. И все же взгляд на поведение систем с привлечением понятия «аттрактор» расширяет представления о возможных ее реакциях на изменения определяющих параметров.

Главной характеристикой аттрактора является размерность. Под размерностью аттрактора понимается размерность того фазо-

вого пространства, в котором он существует. Оценка размерности аттрактора имеет важное, а порой и принципиальное значение. Пусть, например, набор параметров X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 описывает некоторую систему. Предположим, что удалось установить размерность аттрактора, оказавшуюся равной 3. На основании этого можно заключить, что лишь 3 из 5 параметров определяют качества системы с позиций устойчивости. Если же в фазовом пространстве пяти параметров системы аттрактор обнаружить не удалось, а по другим критериям система проявляет устойчивость, то есть основания предположить, что исходный набор из пяти параметров системы не является полным и существуют, кроме этих, еще и другие параметры, отражающие способность системы к устойчивому поведению в условиях, в которых она оказывается при функционировании. Отсюда следует, что анализ системы на устойчивость может раскрыть не лежащие на поверхности явления особенности связей ее параметров, а также выяснить, сколько из них «отвечают» за устойчивость системы и при каких сочетаниях их значений система обнаруживает это важное качество. Это имеет особое значение при оценке устойчивости сердечного ритма и прогнозе развития жизненно опасных аритмий.

Во многих случаях анализ аттракторов системы можно осуществлять по фазовому портрету, для построения которого разработаны безмодельные способы идентификации аттракторов [3].

Слежение за системой есть не что иное, как наблюдение за некоторой совокупностью ее характеристик. Однако оно может проводиться путем регистрации во времени и лишь одной из них. На первый взгляд существуют основания для сомнений в достаточном уровне информативности временной последовательности значений единственного параметра, т.к. сложные системы – многопараметрические. Тем не менее, если выбрать параметр, являющийся функцией комплекса характеристик, отображающих динамику системы, то оценка ее по одномерной временной последовательности значений такого параметра уже не выглядит чрезмерно упрощенной. Более того, с организационной и технической сторон наблюдение за одним параметром предпочтительнее. Естественно, при «одномерном»

взгляде на систему чрезвычайно важен выбор наблюдаемого параметра. Применительно к ССС человека это может быть величина RR интервала, содержащего интегральную информацию всех характеристик сердечного ритма. Кроме того, как показано в работе [3], информативность одномерного временного ряда определяется не только тем, в какой мере в значениях выбранного параметра отражается действие факторов, определяющих динамику системы, но еще и тем, как распорядиться элементами этого ряда.

Опишем представленный в [3] способ обнаружения аттрактора и оценки его размерности по последовательности значений единственного параметра ССС – величины RR интервала.

Пусть $RR_0(t)$ - полученная тем или иным путем временная последовательность из N значений кардиоинтервалов. Образует из $RR_0(t)$ M равновеликих наборов $RR[u]$ ($u=0,1,2,\dots, [M-1]$), каждый из которых состоит из n выбранных подряд ее элементов. При этом любой набор, начиная со второго, формируется после сдвига вдоль последовательности $RR_0(t)$ относительно предыдущего набора всякий раз на постоянную величину S , принимаемую не меньшей интервала корреляции в исходной последовательности $RR_0(t)$. По завершении M сдвигов имеем ряд наборов $RR_0, RR_1, \dots, RR_{M-1}$. Элементы каждого набора будем рассматривать как координаты фазовой точки, определяющие ее положение в n -мерном фазовом пространстве. Совокупность таких точек образует фазовый портрет, на котором становится видимым притягивающее множество состояний системы, т.е. аттрактор, если он существует в построенном фазовом пространстве выбранной размерности. При этом аттрактор обнаруживается в виде одной или нескольких областей сгущений фазовых точек на фоне прилегающих зон. Так как размерность фазового пространства, в котором может существовать аттрактор, неизвестна заранее, то строятся фазовые пространства последовательно возрастающей размерности, и каждое из них просматривается с целью его поиска. Ввиду понятных трудностей просмотра многомерных пространств разработан косвенный метод обнаружения и оценки размерности аттрактора. Следуя [3], опишем его алгоритм.

Введем функцию $C(r)$, используя соотношение:

$$C(r) = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{(M-1)} \Theta(r - |RR_i - RR_j|) \quad (1),$$

где:

RR_i – одна из M точек n -мерного фазового пространства;

X_j представляет массив из остальных $(M-1)$ точек;

Θ функция Хевисайда: $\Theta(x)=0$ при $x < 0$ и $\Theta(x)=1$ при $x > 0$.

Введенная указанным способом функция $C(r)$ позволяет сосчитать число точек в фазовом пространстве, отстоящих от точки RR_i на расстояние, не превышающее некоторую величину r . Отклонение $C(r)$ от 0 служит мерой влияния точки RR_i на другие точки RR_j . Это дает основания рассматривать $C(r)$ в качестве корреляционной функции аттрактора. В [2] показано, что при относительно малых r функция $C(r)$ удовлетворяет соотношению:

$$\ln C(r) = d \ln r \quad (2),$$

где d – размерность аттрактора, которая вводится как формальная функция от размерности фазового пространства n , в котором аттрактор рассматривается.

Таким образом, алгоритм поиска аттрактора и оценки его размерности сводится к построению графика функции $d=f(n)$, выступающего как наглядный и чувствительный критерий обнаружения аттрактора при любой его размерности.

Информация о наличии и размерности аттрактора у исследуемой системы имеет большое значение для понимания ее динамики. Так, в частности, если размерность аттрактора - величина существенно дробная, то система способна к хаотическим колебаниям состояния независимо от того, действуют на нее или нет внешние случайные возмущения. Этот очень сильный результат в области теории катастроф, полученный сравнительно недавно [3], показывает, что хаотическое поведение системы далеко не всегда можно идентифицировать как ответ ее на внешние воздействия. Во многих ситуациях оно обусловлено динамическими свойствами самой системы.

Одной из особенностей аттрактора данного типа является то, что система способна совершить внезапный скачок после длительно-

го периода кажущегося состояния покоя. Это указывает на то, что те воздействия, которые в устойчивом состоянии системы могли бы не оказать заметного влияния, в неустойчивом состоянии системы вызывают в ней усиленный отклик, создающий впечатление интенсивно действующих факторов.

Приведенные соображения в полной мере приложимы к оценке состояния ССС как при диагностике, так и прогнозировании патологических её состояний. Обратим еще раз внимание на то, что фазовый портрет системы делает необходимым держать в поле зрения все мгновенные значения наблюдаемого параметра, иными словами, всю информацию, получаемую при измерении, получая доступ к особенностям динамики системы, невидимыми при взгляде на систему в среднем. Между тем, основная идея статистических методов заключается в замене массивов таких значений усредненными характеристиками, которых даже существенные детали оказываются полностью растворенными.

Покажем на примере, какого рода информация может быть получена при использовании описанного подхода в рамках решения частной задачи обнаружения аттрактора системы, решение которой связано с применением фазовых портретов, построенных по описанной методике.

Рассмотрим фазовые портреты сердечного ритма двух пациентов, построенные по последовательностям значений RR интервалов, соответствующих интервалу времени, равному 24 часам. На рисунке 1 представлен фазовый портрет, который свидетельствует о наличии у ССС этого пациента аттрактора. Он представлен единственной компактной группой точек, что соответствует состоянию «норма» ССС. В соответствии с вышесказанным в формировании портрета участвуют все значения $R-R$, образующие исходную последовательность. Единственное компактное сгущение этих точек указывает на устойчивость сердечного ритма данного пациента.

Совершенно иную картину мы видим на рисунке 2. На нем фазовый портрет содержит несколько областей сгущений точек, что свидетельствует о существенной неустойчивости сердечного ритма в виду потенциально возможных скачкообразных изменений RR . Характер распределения областей сгуще-

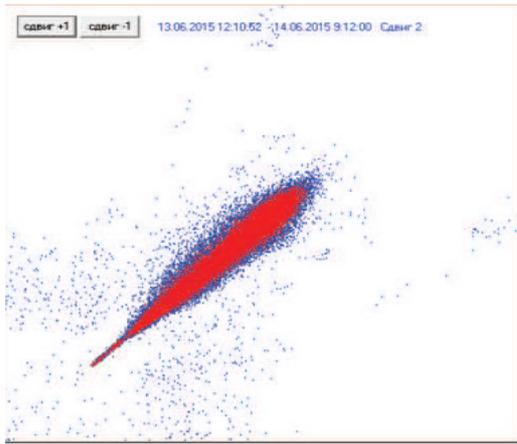


Рисунок 1 – Фазовый портрет
вариабельности сердечного ритма
при нормальном сердечном ритме.

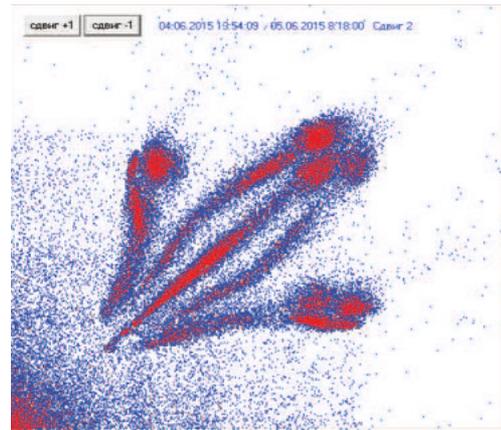


Рисунок 2 – Фазовый портрет
вариабельности сердечного ритма
при нескольких независимых водителях ритма.

ний указывает на крайнюю неравномерность ритма сердца, а в целом – на неустойчивость и явное наличие условий для возникновения угрожающих жизни аритмий. Если на рисунке 1 обращает на себя внимание относительно небольшое число точек вне аттрактора, то, напротив, на рисунке 2 фазовый портрет демонстрирует аномально значимое число таких точек. Подобная картина характерна для систем с несколькими разными, независимыми друг от друга водителями ритма. Такие факты невозможно установить при статистических методах анализа функционирования ССС, связанных с применением усредненных оценок, а значит с отказом от рассмотрения деталей. Между тем почти всегда анализ деталей дает нечто большее, чем можно увидеть в среднем, так как в «мелькании» деталей становится возможной догадка об истинных причинах явления. Представленные примеры демонстрируют это вполне убедительно. В этом и состоит принципиальная ценность предлагаемого подхода к оценке состояния ССС. Кроме того, предлагаемый подход фактически расширяет возможности электрокардиографического метода исследования, который в настоящее время является одним из самых распространенных в клинической практике [5].

Важным преимуществом предлагаемого подхода к анализу ритма является отсутствие необходимости иметь какие-то особые данные или данные, получаемые особыми методами. Подобный анализ может быть проведен с использованием временных рядов значений

любого параметра системы, обладающего достаточным уровнем полноты отображения интересующих нас свойств этой системы. Поэтому предлагаемый подход вполне универсален.

Заключение

Все изложенное выше показывает, что оценка устойчивости ССС путем анализа их состояния в фазовом пространстве позволяет видеть особенности их динамики, делающие видимыми различия в важных интегральных свойствах систем, которые недоступны при статистическом подходе.

Литература

1. Федотов, А. А. Математическое моделирование и анализ погрешностей измерительных преобразователей биомедицинских сигналов / А. А. Федотов, С. А. Акулов. – М. : Физматлит, 2013. – 282 с.
2. Ардашев, А. В. Практические аспекты современных методов анализа вариабельности сердечного ритма / А. В. Ардашев, А. Ю. Лоскутов. – М. : Медпрактика-М, 2010. – 127 с.
3. Николис, Г. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин. – М. : Мир, 1990. – 342 с.
4. Томпсон, Дж. М. Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике / Дж. М. Т. Томпсон. – М. : Мир, 1985. – 254 с.
5. Краснов, Л. А. Мониторирование и анализ ритма сердца. Технические средства электронной и компьютерной диагностики в медицине : учеб. пособие / Л. А. Краснов, В. П. Олейник. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2014. – 84 с.

Поступила 22.09.2016 г.
Принята в печать 13.02.2017 г.

References

1. Fedotov AA, Akulov SA. Mathematical modeling and analysis of errors of measuring converters of biomedical signals. Moscow, RF: Fizmatlit; 2013. 282 p. (In Russ.)
2. Ardashev AV, Loskutov AYu. Practical aspects of modern methods of the analysis of variability of a cordial rhythm. Moscow, RF: Medpraktika-M; 2010. 127 p. (In Russ.)
3. Nikolis G, Prigozhin I. Exploring complexity. Moscow, RF: Mir; 1990. 342 p. (In Russ.)
4. Tompson DzhMT. Instabilities and catastrophes in science and engineering. Moscow, RF: Mir; 1985. 254 p. (In Russ.)
5. Krasnov LA, Oleynik VP. Monitoring and analysis of heart rhythm. Technical means of electronic and computer diagnostics in medicine: ucheb posobie. Kharkov, Ukraine: Nats aerokosm un-t im NE Zhukovskogo Khar'k aviats in-t; 2014. 84 p. (In Russ.)

Submitted 22.09.2016

Accepted 13.02.2017

Сведения об авторах:

Лоллини В.А. – д.м.н., профессор кафедры внутренних болезней №1, Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет;

Науменко А.А. – к.т.н., доцент кафедры стандартизации, Витебский государственный технологический университет.

Information about authors:

Lollini V.A. – Doctor of Medical Sciences, professor of the Chair of Internal Medicine No.1, Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University;

Naumenko A.A. – Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Chair of Standardization, Vitebsk State Technological University.

Адрес для корреспонденции: Республика Беларусь, 210023, г. Витебск, пр. Фрунзе, 27, УО «Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет», кафедра внутренних болезней №1. E-mail: v.a.lol@mail.ru – Лоллини Владимир Альбертович.

Correspondence address: Republic of Belarus, 210023, Vitebsk, 27 Frunze ave., Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, Chair of Internal Medicine No.1. E-mail: v.a.lol@mail.ru – Vladimir A. Lollini.