

На рис. 6. Показана квадратная камера с расположенным входом  $G$  и выходом  $S$  в противоположных углах. Очевидно, что для данной камеры вероятность благоприятного прохода:  $^+p_3 = 1,0$  – камера весьма проходима.

Приведём пример практически непроходимой камеры – вход в середине первой стороны и выход находятся в середине противоположной стороны. Так выполняются рыболовные снасти-ловушки, только горловины проходов смещены вовнутрь ловушки.

Исследование поведения «мышь» в лабиринте, позволяет продемонстрировать её «природные» возможности. В этом авторы убедились, используя достаточно простые модели, способные к движению с разворотами при встрече с препятствиями и движению вдоль стенки, повторяя её конфигурацию.

### Литература

1. Матвеев М.Г., Свиридов А.С., Алейникова Н.А. Модели и методы искусственного интеллекта. Применение в экономике. – М.: Финансы и статистика, 2008, 448 с.
2. Винер Н. Кибернетика. – М.: Советское радио, 1968, – 328 с.
3. Конфорович А.Г. Математика лабиринта. – Киев: Рад. шк., 1987, – 136 с.
4. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Иностранная литература, 1963, – 830 с.
5. Нефёдов Е.И., Суботина Т.И., Яшин А.А. Современная биоинформатика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005, – 272 с.

### ВЫЯВЛЕНИЕ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ МИОКАРДА ПО ЭКГ МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ

*И.А. Лыков, Г.П. Быстрай, А.М. Найдич*

(Екатеринбург, Уральский федеральный университет, gennadyi.bystrai@usu.ru)

### MYOCARDIUM PATHOLOGICAL CHANGES DETECTION FROM ECG BY NONLINEAR DYNAMICS METHODS

*I.A. Lykov, G.P. Bystrai, A.M. Naydich*

Для сердечной мышцы развит принципиально новый подход в выявлении патологий, основанный на методах нелинейной динамики и теории фракталов. Его суть сводится к анализу основных хаотических характеристик и вычислению основных хаотических параметров сердечной мышцы. Представлены типичные результаты выборки по 12 пациентам (6 в условной норме и 6 с патологией). Для анализа использовались ЭКГ, снятые с трёх отведений по схеме Эйнтховена.

**Псевдофазовый портрет** строится по дорожкам электрокардиограмм и определяет зависимость каждого последующего значения временного ряда от предыдущего [1-3]:  $x_{k+\Delta} = f(x_k)$ , где  $\Delta$  – временная задержка. Его размывание происходит, когда нелинейная система забывает начальные условия по прошествии времени  $t_f$ . При этом фазовая траектория заполнит фазовое пространство, ее ограничивающее.

**Фазовый портрет** определяет взаимосвязь самого показателя со скоростью его изменения. Циклическое поведение фазовой траектории свидетельствует о наличии притягивающего множества (аттрактора) [1,3]. Характерным свойством нелинейной системы также может быть фазовый объём (пространство, занимаемое фазовой траекторией системы), который может сжиматься с течением времени, расширяться или оставаться неизменным. Сжимающийся фазовый объём свидетельствует об устойчивости системы (траектория движения стремится к предельному циклу), расширяющийся указывает на неустойчивость.

Обнаружено, что псевдофазовый портрет для нормы сконцентрирован в малой окрестности аттрактора и близок по форме к линии (биссектрисе, рис. 1а). При патологии псевдофазовый портрет размывается. Следовательно, в норме сердце является строго детерминированной устойчивой динамической системой, в которой наблюдается присутствие хаоса, в отличие от патологий (рис. 1в,з), при которых появляется неустойчивость и возникает случайность в процессах возбуждения сердечной мышцы, что приводит к нерегулярности и снижению эффективности сердечных сокращений, а также к общему нарушению всех процессов, протекающих в сердце.

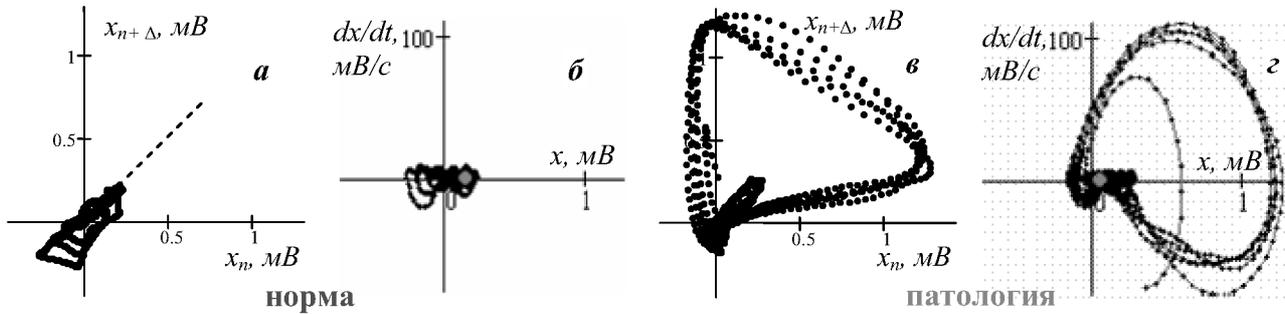


Рис. 1. Типичные псевдофазовые и фазовые портреты при работе сердца в норме (а,б) и при патологических нарушениях (в,з) соответственно;  $\Delta=0.017c$ .

Характерной особенностью фазового портрета для траектории возбуждения сердца и в норме и при патологии является наличие странного аттрактора, имеющего сложную структуру и являющегося признаком нелинейности работы миокарда. Наличие странного аттрактора говорит о присутствии хаоса в системе, следовательно, о применимости методов нелинейной динамики к миокарду. Характерным признаком нормы является меньшая по сравнению с патологией амплитуда скорости изменения кардиосигнала (рис. 1б), кроме того, фазовый портрет в норме сконцентрирован в малой окрестности аттрактора.

**Показатели Ляпунова и эволюция фазового объёма** характеризуют степень экспоненциального разбегания двух изначально близких траекторий [1,3]. Хаос в детерминированных системах подразумевает чувствительную зависимость от начальных условий: две траектории, близкие друг к другу в фазовом пространстве в некоторый начальный момент времени, экспоненциально расходятся за незначительное время, поэтому изначально близкие величины потенциалов ЭКГ начнут экспоненциально расходиться с течением времени. Если  $\delta_0$  – мера начального расстояния между двумя исходными кривыми ЭКГ  $E(t)$  двух различных сердечных сокращений с временной задержкой  $\tau$ , то расстояние между ними:  $\delta(t) = |E(t) - E(t + \tau)|$ . В то же время  $\delta(t) = \delta_0 \exp(\lambda_p t)$ , где  $\lambda_p$  – положительный показатель Ляпунова. Наряду с периодическим увеличением расстояния между траекториями в устойчивой системе происходит и его сжатие, для характеристики которого используется отрицательный показатель Ляпунова  $\lambda_n$ .

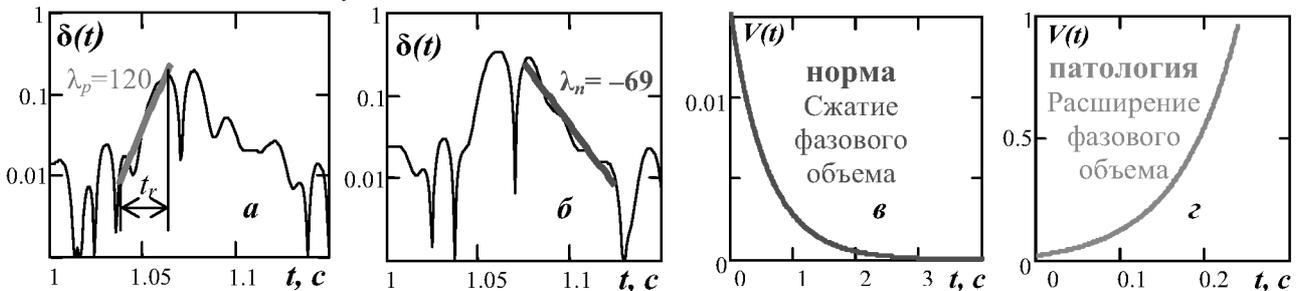


Рис. 2. Пример определения положительного (а) и отрицательного (б) показателей Ляпунова для ЭКГ; приведены типичные эволюции фазового объёма в норме (в) и при патологии (з).

Отрицательный показатель Ляпунова в норме по абсолютной величине гораздо больше положительного:  $|\lambda_n| > |\lambda_p|$ . Установлено, что патология в работе миокарда соответствуют значениям  $\lambda_p > 50\text{с}^{-1}$ . В норме сердце, как возбуждаемая система демонстрирует меньшую чувствительность к начальным условиям и большую устойчивость, чем при наличии патологии, когда возрастает хаос и уменьшается устойчивость (рис. 2а,б).

В консервативных системах фазовый объём со временем не меняется. В системах с хаосом  $\tau_0 = (\lambda_p + \lambda_0 + \lambda_n)^{-1}$  и происходит сжатие фазового объёма до некоторого предельного значения, тогда эволюция фазового объёма:  $V(t) = \mu_0 \cdot \exp(t/\tau_0)$ , где  $\mu_0$  – начальный фазовый объём. В норме  $\tau_0 < 0$  и фазовый объём сжимается (рис. 2в).

**Время забывания начальных условий** – это время, за которое миокард полностью забывает начальные условия, и расстояние между траекториями выходит на насыщение [3]. Установлено, что его значение для потенциалов возбуждения сердца в норме больше, чем при различных нарушениях. Это говорит о наличии гораздо большей памяти в системе возбуждения здорового сердца. Наличие такой памяти системы приводит к гораздо более устойчивому её поведению.

**Спектры пульсаций.** В нормально функционирующем миокарде наблюдается наличие ярко выраженного спектра Гейзенберга в высокочастотной области ( $S(f) \sim 1/f^{-7}$ ), который отвечает за рассеяние механической энергии и переход её в тепло [1,3]. При анализе патологии наблюдается более пологий спектр, говорящий о нарушении функции рассеяния механической энергии и возможности перегрева сердечной мышцы, что снижает её выносливость при недостатке кислорода и, вероятно, может инициировать инфаркты.

**Показатель Хёрста** вычисляется методом наименьших квадратов по всему временному ряду [2,3]. Данный метод был усовершенствован авторами для анализа и прогнозирования поведения рядов произвольной формы, в том числе статистически нефрактальных и периодических, исходя из предположения, что  $H$  зависит от  $\tau$  [3]. Персистентное поведение сердечной мышцы в норме сохраняется на всём исследуемом интервале  $10^{-4} \leq \tau \leq 10^1$  (рис. 3а). При аритмии происходит общая потеря тенденции в динамике работы миокарда по прошествии некоторого времени  $t_s < 1\text{с}$  (рис. 3б), что свидетельствует о нерегулярности процессов возбуждения клеток сердечной мышцы.

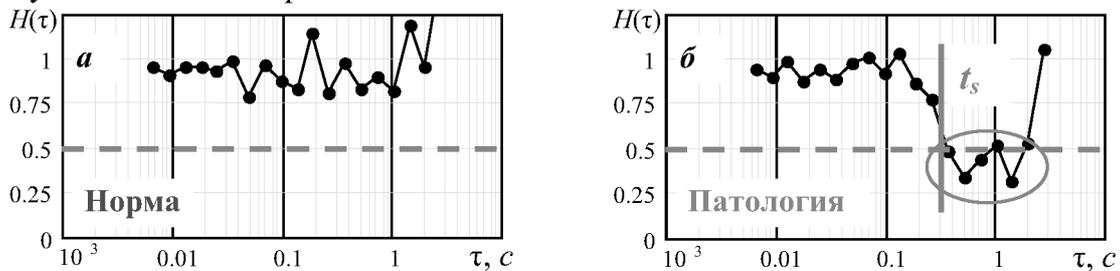


Рис. 3. Типичное поведение показателя Хёрста для нормы (а) и патологии (б), позволяющее определить время выхода на случайный процесс  $t_s$  (случайное поведение при  $H \approx 0,5$ ) (для патологических больных порядка 1с, б).

**Обобщённые размерности Реньи** являются важным показателем однородности аттрактора фазовых траекторий работы сердечной мышцы, как открытой неравновесной и нелинейной. Особенно важными для анализа работы сердца являются первые три размерности: геометрическая  $D_0$  (отражает структурную сложность сердца), информационная  $D_1$  (сложность информационных каналов проводящей системы миокарда) и корреляционная  $D_2$  (динамическую неоднородность сокращений клеток сердца). Наблюдается общая тенденция к однородности аттракторов фазовых траекторий работы сердечной мышцы в норме. В норме  $D_0$  выше, чем при патологических состояниях, и обычно равна  $D_1$ , что свидетельствует о высокой структурной неоднородности сердца при патологиях, при этом все кардиомиоциты работают согласованно, синхронно, что приводит к уменьшению значения  $D_2$  в норме.

Таким образом, нелинейные свойства сердца позволяют при малых сигналах добиваться максимального результата при сокращении, а хаос приводит к устойчивости системы в связи с повышением степеней свободы. Чем глубже понимание механизмов, которые связаны с нелинейным сокращением сердца, тем быстрее будут выявлены признаки патологий, поэтому такие исследования являются исключительно актуальными. Они имеют существенное значение для развития представлений о более сложном поведении нелинейных биологических объектов, включая миокард, что важно для разработки методов диагностики и лечения.

Для определения значений основных показателей применены новые математические модели, алгоритмы расчета и процедуры вычисления, разработанные авторами и объединённые в виде программного продукта [6].

### **Литература**

1. Быстрой Г.П., Охотников С.А. Математическое и численное моделирование самоорганизующегося саркомера с хаотической динамикой параметра порядка // Биофизика. Т.55. №3. 2010. С.467-480.
2. Лыков И.А., Быстрой Г.П., Найдич А.М., Охотников С.А. Анализ живых систем по длинным временным рядам методами нелинейной динамики // Материалы конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в медицине». 15-22 октября 2010 г. Франция, Париж. Современные наукоёмкие технологии. №9, 2010, С. 202-203.
3. Быстрой Г.П. Термодинамика необратимых процессов в открытых системах // М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2011. – 264 с.
4. Лыков И.А., Найдич А.М., Быстрой Г.П., Охотников С.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011619008 «Нелинейный и статистический анализ сигналов ЭКГ». Роспатент. Зарегистрировано 18 ноября 2011г.