

УДК 616. 12-073. 97

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАН-
НОГО ХАОСА В СТРУКТУРЕ ВАРИА-
БЕЛЬНОСТИ РИТМА СЕРДЦА ПЛОДА

Гудков Георгий Владимирович
к.м.н., доцент

Кубанский медицинский институт,
Краевой Перинатальный центр
г.Краснодар, Россия

В статье показано, что корреляционная размерность может служить чувствительным тестом нарушения нормального режима функционирования многоуровневой динамической системы регуляции фетального ритма сердца. Её практическое использование позволит более эффективно прогнозировать жизнеспособность плода.

Ключевые слова: корреляционная размерность, вариабельность сердечного ритма плода.

UDC 616. 12-073. 97

DIAGNOSTIC POSSIBILITIES OF DEFINITION THE DETERMINED CHAOS IN STRUCTURE OF THE FETUS HEART RATE VARIABILITY

Gudkov Georgiy Vladimirovich
k.m.n., docent

Kuban Medical Institute,
Kraevoy Perinatalniy Centre
Krasnodar, Russia

In article it is shown, that correlation dimension can serve as the sensitive test of infringement of a normal functioning of multi-level dynamic system of regulation fetus heart rate variability. Its practical use will allow to predict viability of a fetus more effectively.

Keywords: correlation dimension, fetus heart rate variability

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА В СТРУКТУРЕ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ РИТМА СЕРДЦА ПЛОДА

Г.В. Гудков

*Кубанский медицинский институт, Краевой Перинатальный центр
г.Краснодар, Россия*

Введение

Неинвазивные функциональные методы пренатальной диагностики заслуживают самого пристального внимания для осуществления эффективного родовспоможения. Среди них, наиболее распространенным методом оценки функционального состояния плода является анализ частоты его сердечных сокращений - кардиотокография (КТГ). К настоящему времени накопились данные, указывающие на практические ограничения традиционных подходов анализа variability сердечного ритма (ВСР), не позволяющие во всех случаях обеспечить надежную оценку функционального состояния плода [1, 2, 3].

Дальнейший прогресс в интерпретации КТГ принципиально ограничен в силу линейности традиционных методов анализа данных. Линейные модели (параметрическая статистика, корреляционные и/или спектральные), по своей сути, "уничтожают" ту уникальную внутреннюю сложность, которая присуща нелинейному динамическому процессу управления сердечным ритмом [4, 5].

Традиционные методы анализа ВСР не вполне соответствуют объекту исследования, поскольку в сердечном ритме представлен результат деятельности большого числа регуляторных механизмов, которые по своей природе нелинейны. Это означает, что для исследуемого объекта не выполняется принцип суперпозиции (в обобщенной формулировке: реакция на сумму воздействий не равна сумме реакций на каждое воздействие по отдельности) [6].

В последнее время активно развивается теория динамических систем и фрактальных множеств, и, в частности, приложения методов этой нелинейной теории к анализу процессов с хаотической организацией, к которым относится ВСР матери и плода [1, 7, 8]. Актуальность их применения объясняется тем, что они позволяют распознавать очень сложные паттерны нелинейных колебаний функционального состояния организма, которые отражаются в динамике ВСР. При этом динамический хаос, возможно, выполняет роль генератора, обеспечивающего быструю адаптацию организма к меняющимся условиям [9, 10, 11, 12].

В этой связи, ранее скрытая, недоступная для выявления другими методами информация обещает быть клинически значимой, так как отражает интимные механизмы функционирования динамической системы, результатом которых является наблюдаемая в эксперименте ВСР плода. С этих позиций для анализа ВСР были применены методы теории нелинейной динамики, в частности метод определения корреляционной размерности.

Целью работы являлось исследование детерминированного хаоса в структуре ВСР плода для прогнозирования его адаптации к внутриутробной гипоксии.

Методы исследования

С целью разработки методов диагностики функционального состояния плода было обследовано 520 беременных, начиная со сроков гестации 29-30 недель, среди которых 120 - составили группу контроля, а остальные соответственно основную (ретроспективную) группу - 400. Средний возраст беременных контрольной группы составил $25,7 \pm 3,18$ лет, основной - $26,5 \pm 4,76$ лет, из них старше 30 лет было 24 (6,0%) женщины.

Контрольная группа была сформирована из здоровых беременных, проходящих антенатальный скрининг в 3-м триместре. У этих беременных перед родами состояние доношенного плода ($39,8 \pm 1,03$ недель) расценивалось как нормоксическое, дети родились с оценкой по шкале Апгар не менее 8/10 баллов и

массой тела $3242,5 \pm 96,2$ г., также отмечалось благоприятное течение раннего неонатального периода.

Беременные основной группы поступали на госпитализацию в отделение патологии беременности в сроках гестации 29-30 недель. Возраст беременных варьировал в пределах 19-34 лет ($26,1 \pm 5,34$ лет). У всех беременных, по результатам комплексного обследования, была выявлена хроническая внутриутробная гипоксия плода разной степени выраженности, в зависимости от тяжести которой, а также исхода беременности (при ретроспективном анализе) они были подразделены на соответствующие подгруппы:

1-я подгруппа основной группы включала 200 беременных с субкомпенсированным состоянием плода, позволяющим пролонгировать беременность до доношенного срока и родивших детей с признаками дезадаптации в виде тремора конечностей, замедленной прибавки массы тела, акроцианоза и др.

2-я подгруппа основной группы включала 150 беременных также с субкомпенсированным состоянием плода на момент госпитализации, которое по мере прогрессирования беременности (более 2-х недель) осложнилось декомпенсацией его адаптационных резервов по типу угрожающего или критического состояний, что требовало экстренного родоразрешения с рождением детей в состоянии средней тяжести;

3-я подгруппа основной группы состояла из 50 беременных, исходно поступивших с декомпенсированным функциональным состоянием плода по типу угрожающего, либо критического, что требовало экстренного решения вопроса о целесообразности дальнейшего пролонгирования беременности и родивших детей в тяжелом состоянии, либо они погибли анте-, интранатально или в первые 7 суток жизни.

Из исследования были исключены беременные с тяжелой декомпенсированной экстрагенитальной патологией, прерыванием беременности у которых была угроза жизни или здоровью матери, пациентки с маркерами наследственной или хромосомной патологией у плода, беременные с патологией плаценты (отслойка) и/или пуповины (обвитие, узел), а также те, у которых дезадаптация

плода была связана с патологическим течением родового акта. Основная и контрольная группы были статистически однородны по возрасту, весу, сроку гестации и акушерско-гинекологическому анамнезу.

Среди осложнений в течении настоящей беременности в основной группе наиболее часто встречался гестоз разной степени тяжести, причем его манифестация до средне-тяжелых форм отмечалась у 98 (24,5%) беременных. Другие осложнения были представлены ранним токсикозом (20,0%), угрозой прерывания беременности (19,5%), АБО или Rh сенсбилизацией (11,5%), анемией беременных (12,3%), урогенитальной инфекцией (6,8%), пиелонефритом (7,0%).

В основной группе у 220 (55,0%) женщин роды произошли в срок, у 161 (40,3%) - в 33-36 недель, и у 19 (4,8%) - в 32-33 недели. Самостоятельно родили 158 (39,4%) женщин, с помощью кесарева сечения - 242 (60,5%). Среди показаний к оперативному родоразрешению в 220 (55,0%) случаях они были связаны с состояниями плода (прогрессирующая внутриутробная гипоксия плода), в 137 (34,3%) - с состояниями матери (нарастание тяжести гестоза при неподготовленности родовых путей) и в 115 (28,8%) - с сочетанными показаниями как со стороны матери, так и плода. Данная патология встречалась как изолированно, так и в сочетании с другими показаниями, такими как слабость родовой деятельности, рубец на матке, узкий таз, экстрагенитальная патология, задержка развития плода, неправильное положение плода.

В основной группе оценка состояния новорожденных в первые минуты жизни по шкале Апгар у 51 (12,8%) женщин составила 8-10 баллов, у 260 (65,0%) - 7 баллов, у 80 (20,0%) - 5-6 баллов и у 9 (2,3%) - 4 балла и менее. Два плода погибли антенатально, 1 - интранатально, 1 - на 5-е сутки после рождения. У 42 (10,5%) новорожденных установлена гипотрофия, в том числе I степени у 20 (5,0%), II-III степени у 22 (5,5%). У 39 (9,8%) новорожденного была диагностирована внутриутробная пневмония, из них у двух - в сочетании с омфалитом и гнойным трахеобронхитом. Масса детей при рождении колебалась от 953 до 4060 г. и составила в среднем по основной группе 2486 ± 719 г.

Регистрация сердечного ритма плода осуществлялась при помощи фетального кардиомонитора «Corometrics-120» в положении беременной лежа на спине (или на боку) трансабдоминально, с максимальной продолжительностью записи до 90 минут (не менее 60 минут). Мониторная запись фетального ритма сердца в виде временного ряда междударных интервалов обрабатывалась на персональном компьютере с использованием программного пакета "Matlab 6.5" и алгоритмов программы "TISEAN" [13] с дополнениями А.А. Меклер [14]. Для выявления и устранения артефактов вычислялось среднее (M) из 10 последовательных RR-интервалов (~ 4 с). Отбраковывались междударные интервалы величиной более $1,5 M$ и менее $0,5 M$, вместо которых подставлялось среднее значение M . Анализу подвергались только те записи, в которых количество артефактов было менее 5%. Анализу подвергались кардиоритмограммы соответствующие периоду активности плода.

Главная идея применения методов анализа динамических систем с хаотической организацией опирается на теорему Такенса [15], согласно которой по динамике одного временного ряда (в данном случае ряд RR-интервалов) можно судить об эволюции всей динамической системы управления сердечным ритмом. Специфической чертой этих методов является интерпретация временных сигналов как многомерных геометрических объектов. Для этого, в многомерном фазовом пространстве реконструируют псевдоаттрактор, который, как полагают, обладает такими же метрическими характеристиками, как и истинный аттрактор - низкоразмерное компактное подмножество в фазовом пространстве, обладающее свойством притягивать близкие к нему траектории. Реконструкция хаотического аттрактора предусматривает его "вложение" в фазовое пространство, размерность (m) которого такова, что в него можно погрузить аттрактор динамической системы без его самопересечений [16].

Если имеется исходный временной ряд $x(t_i)$, состоящий из последовательности измеренных междударных интервалов, то данную последовательность можно отобразить в m -мерное пространство так, чтобы каждое значение данного временного ряда $x(t_i)$ отображалось в точку этого пространства с координа-

тами $X_i = \{x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m - 1)\tau)\}$, где τ - шаг задержки (равен интервалу корреляции).

Согласно теореме Такенса, можно подобрать такие глубину погружения m и лаг τ , что полученное в результате описанного преобразования множество точек будет топологически эквивалентно истинному аттрактору исследуемой динамической системы. Данное m -мерное пространство называется пространством вложения или лаговым пространством; множество точек, моделирующее исходный аттрактор - псевдоаттрактором или восстановленным аттрактором.

Одной из важнейших хаотических инвариант является корреляционная размерность D_2 , метод вычисления которой не предполагает условий стационарности и периодичности ритма сердца [2, 4]. Для этого возьмём некоторую точку x_i , принадлежащую аттрактору, восстановленному в m -мерном лаговом пространстве, и сосчитаем, сколько точек этого аттрактора отстоят от неё на расстояние, не превышающее некоторую величину ε . Повторим эту процедуру для следующей точки и т.д. В результате можно оценить, так называемый, корреляционный интеграл $C_m(\varepsilon)$ - вероятность того, что пара точек на восстановленном аттракторе в m -мерном пространстве находится в пределах расстояния ε друг друга:

$$C_m(\varepsilon) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{N^2} \cdot \sum_{i,j=1, i \neq j}^n \Theta(\varepsilon - \|X_i - X_j\|) \right]$$

где Θ - функция Хевисайда (равна 1 если $x > 0$ и 0 в остальных случаях); её аргументом является разность размера покрытия ε и евклидова расстояния (нормы) между векторами X_i и X_j пары произвольных точек аттрактора; N - число пар точек, для которых вычисляются векторные разности.

При этом для малых значений ε имеет место зависимость:

$$C_m(\varepsilon) \approx \varepsilon^{D_2}, \text{ откуда } D_2 \approx \frac{\log C_m(\varepsilon)}{\log \varepsilon},$$

где D_2 - корреляционная размерность восстановленного аттрактора. Размерность восстановленного аттрактора можно определить геометрически как наклон линейного участка графика зависимости $\log C(\varepsilon)$ от $\log \tau$. Корреляционная

размерность D_2 вычисляется как средний наклон указанного выше графика, то

$$\text{есть } D(m) \sim \frac{\log C_m(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \quad [10, 12].$$

При увеличении размерности вложения корреляционная размерность увеличивается. Однако, для детерминированной системы, сколь бы хаотичной ни казалась она "невооруженному глазу", вычисленная корреляционная размерность перестает возрастать после достижения некоторой размерности вложения. Если наблюдается насыщение на некотором уровне D , то эту величину принимают в качестве оценки корреляционной размерности аттрактора $D = D_2$ динамической системы, породившей наблюдаемый сигнал. Для случайных данных такого насыщения не наблюдается и корреляционная размерность растет монотонно (рис. 1).

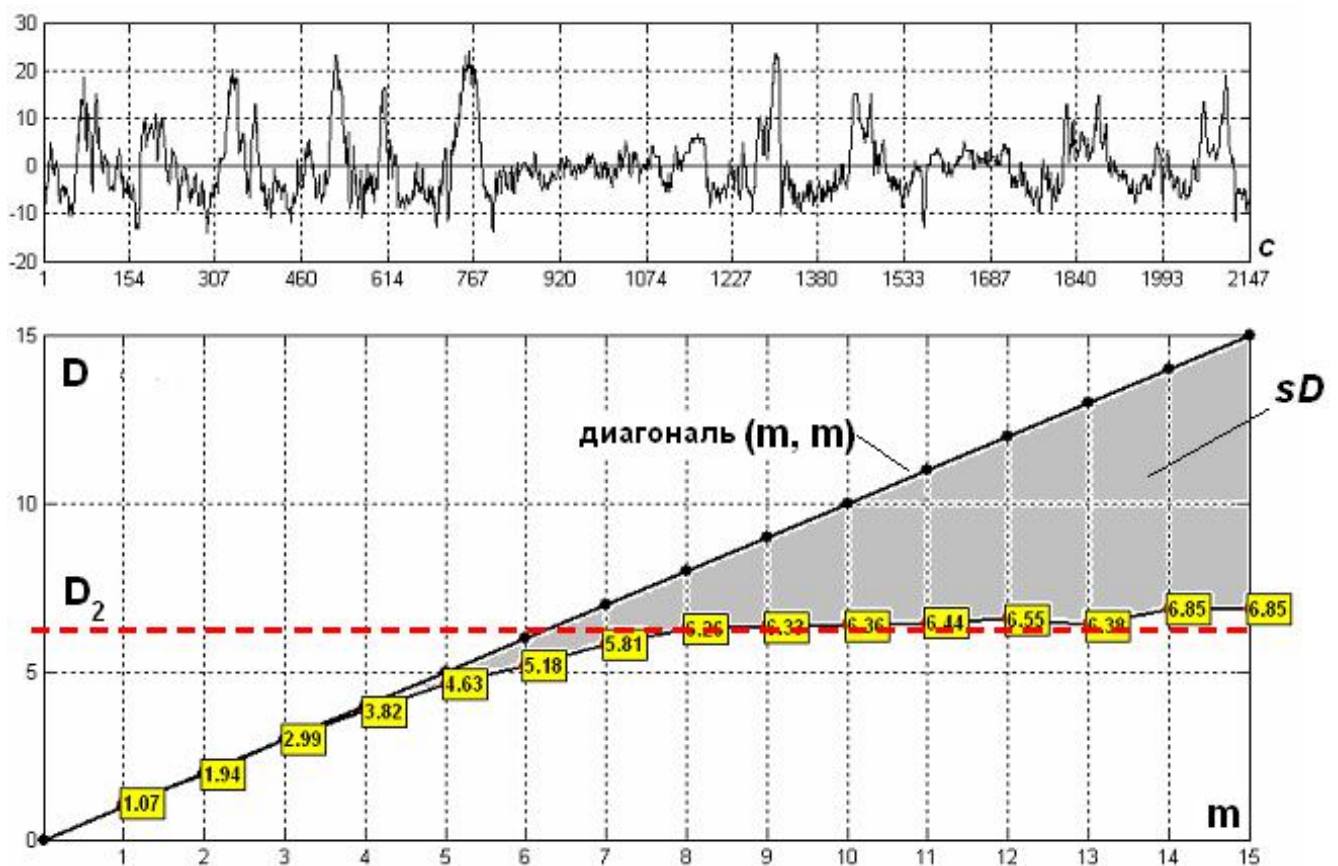


Рисунок 1 - Пример оценки размерности аттрактора (корреляционной размерности - D_2). В области, где кривые корреляционных сумм аппроксимируются прямыми, их наклон с ростом m имеет тенденцию к насыщению, тогда как для шумового сигнала зависимость не имеет тенденции к насыщению.

На использование показателя корреляционной размерности накладывається существенное ограничение. Согласно работе [17], для расчета D_2 методом псевдофазового пространства вложения, объем временного ряда должен быть $\geq 10^{2+0,4D}$, где D - фрактальная размерность аттрактора. Наличие шума в сердечном ритме приводит к возрастанию фрактальной размерности аттрактора и, следовательно, объема временного ряда, который требуется для точной оценки корреляционной размерности. Как правило, хаотические детерминированные системы маломерны, поэтому для анализируемых выборок (длина реализации $N \sim 4000$ значений) $D_2 > 7$ подразумевает, по существу, случайные данные.

Поскольку различные функциональные состояния плода могут приводить к различным отклонениям графика значений корреляционной размерности $D(m)$ от диагонали (m, m) , то по рекомендациям В.А. Машина [18] для количественной оценки уровня стохастического процесса в динамике сердечного ритма мы использовали показатель средней суммы квадратов отклонения графика значений $D(m)$ от диагонали (m, m) :

$$sD = \frac{\sum [D(m) - m]^2}{N},$$

где N - максимальная размерность вложения, используемая для оценки D_2 (рис.1).

Основные статистические показатели обработаны при помощи пакета прикладных программ Statistica 6.0. Сравнение средних значений проводилось с помощью f -критерия Стьюдента. Нулевую гипотезу отвергали при $p > 0,05$.

Результаты

В зависимости от величины получаемого значения корреляционной размерности D_2 все кардиоритмограммы плода подразделялись на два вида, отражающих степень присутствия детерминированного хаоса во временной структуре сердечного ритма: ритмы с хаотической динамикой средней размерности ($D_2 \leq 6$); ритмы с хаотической динамикой высокой размерности ($D_2 > 6$), т.е. при данной длине записи ритма, по существу это случайные данные.

Для выявления особенностей формирования хаотической динамики и фрактальной структуры сердечного ритма плода при нормально прогрессирующей беременности в контрольной группе кардиоритмографию проводили регулярно, начиная с 29-30 недель и до срока родоразрешения в 38-40 недель (рис.2).

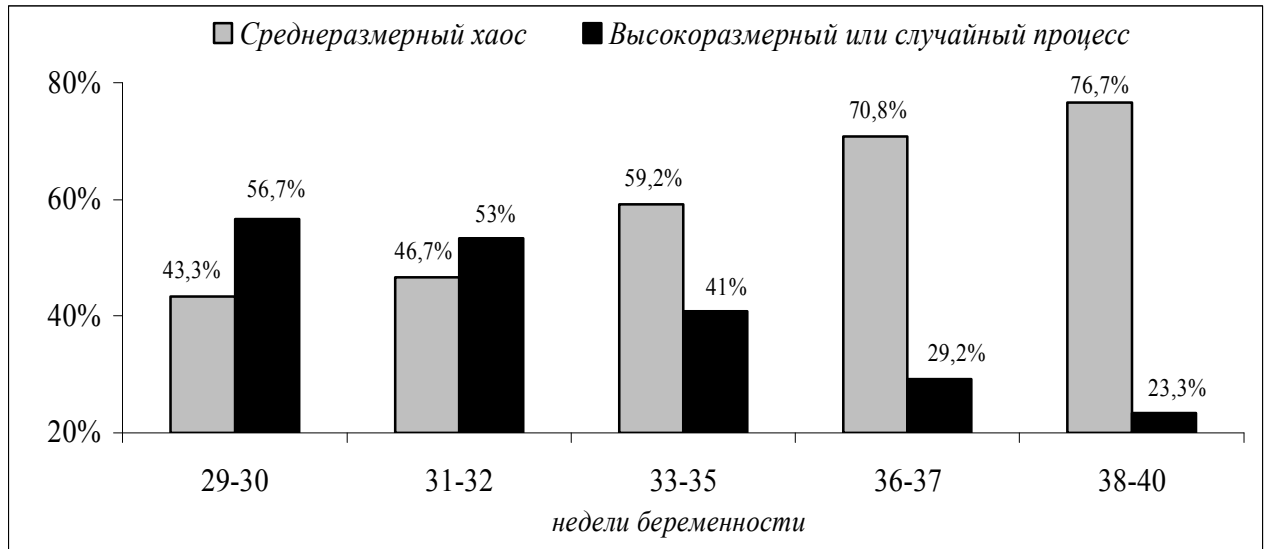


Рисунок 2 - Число пациенток контрольной группы с различными вариантами хаотической динамики ВСР плода в различные сроки гестации.

По мере нормально прогрессирующей беременности доля наблюдений, при которых регистрировался среднеразмерный хаос возрастала с 52 (43,3%) в сроках гестации 29-30 недель до 92 (76,7%) в доношенном сроке (38-40 недель). Одновременно наблюдалась отчетливая противоположная тенденция снижения числа наблюдений, в которых в структуре ВСР плода регистрировался высоко-размерным хаос или случайный процесс - с 68 (56,7%) в сроках гестации 28-30 недель до 28 (23,3%) в доношенном сроке.

Количественная оценка уровня стохастического процесса в динамике сердечного ритма плода оценивалось по величине показателю sD (рис.3). Как и следовало ожидать, исходя из предыдущих результатов, при нормально прогрессирующей беременности сердечный ритм плода демонстрирует все более

выраженную хаотическую динамику. Так, показатель sD имел отчетливую тенденцию к росту с $10,2 \pm 1,75$ в 28-30 недель гестации до $15,8 \pm 1,84$ в 38-40 недель.

Во внешнем виде временного ряда междарных интервалов выявленная закономерность проявлялась постепенным преобразованием динамической организации RR-интервалов от слабо коррелированной последовательности - в сторону типичной сильно коррелированной броуновской последовательности. Данный факт свидетельствовал о существенной перестройке механизмов управления сердечным ритмом плода по мере его созревания.

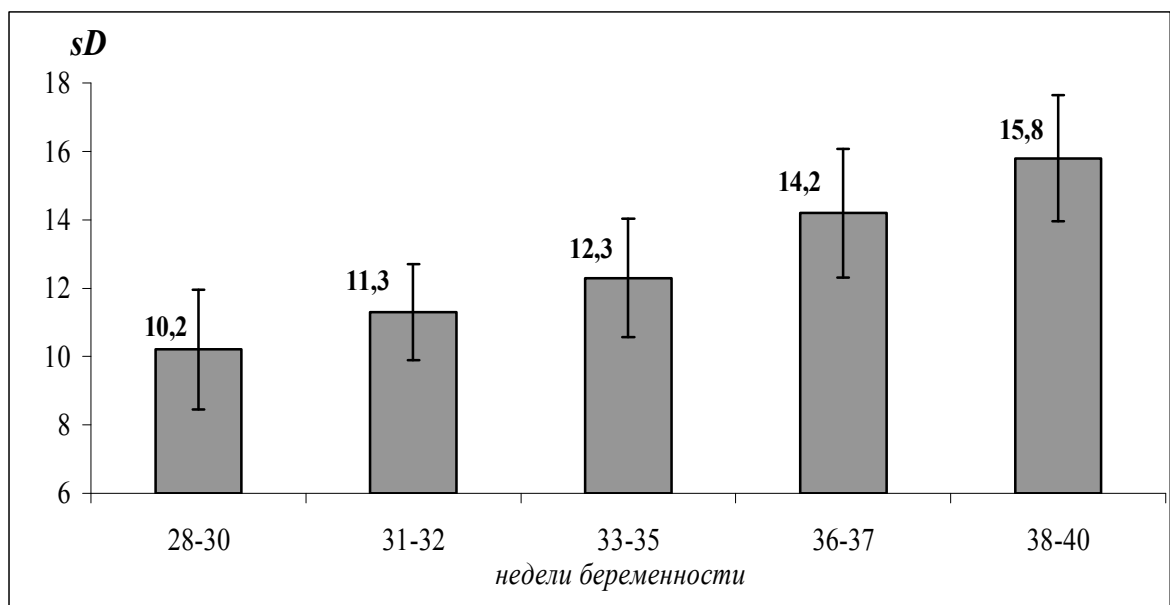


Рисунок 3 - Динамика показателей sD при физиологически протекающей беременности (контрольная группа).

Исследование размерности динамической системы регуляции сердечного ритма плода в подгруппах основной группы не выявило характерных для нормы тенденций в изменении корреляционной размерности по срокам гестации. В сроках гестации после 35 недель доля пациенток основной группы с различным характером хаотической динамики ВСП плода представлена на рис.4.

Как можно видеть, более чем в половине наблюдений 1-й подгруппы ВСП плода демонстрировала среднеразмерный хаос - 112 (56,0%), в то время как во 2-й и 3-й подгруппах число таких пациенток значительно снижалось - 41

(27,3%) и 4 (8,0%) соответственно. Противоположной тенденцией в подгруппах было увеличение числа пациенток с динамикой ВСП плода по типу высокоразмерного хаоса или чисто случайного процесса. Так, если в 1-й подгруппе доля таких кардиоритмов составляла 88 (44,0%), то во 2-й и 3-й подгруппах она возросла до 109 (72,7%) и 46 (92,0) соответственно.

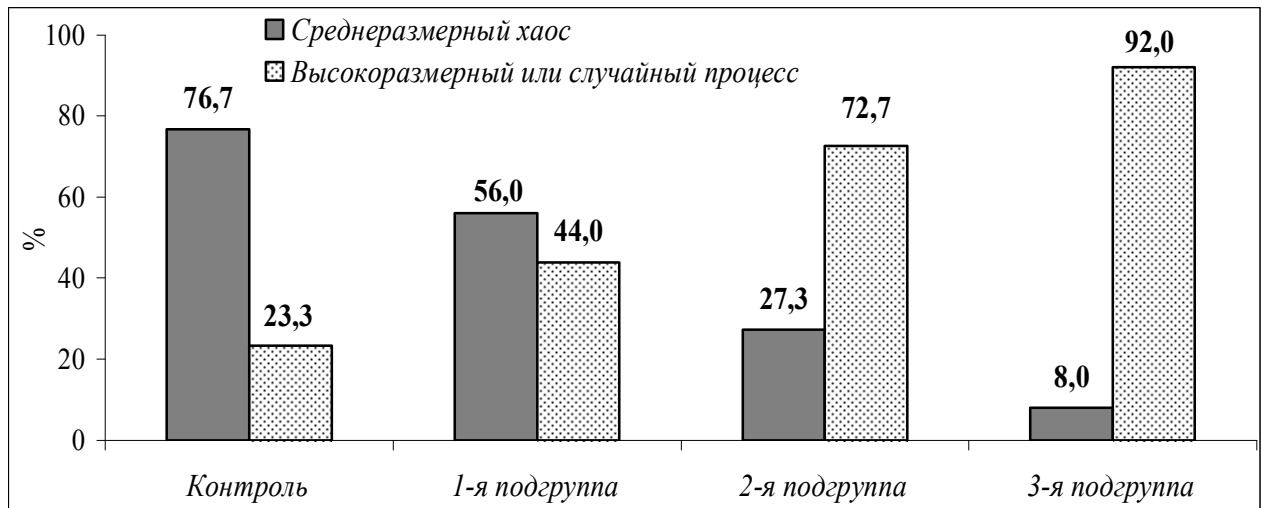


Рисунок 4 - Количество наблюдений с различными вариантами хаотической динамики ВСП плода в обследованных группах.

Количественное представление меры хаоса в обследованных группах, выраженное величиной показателя sD , представлено на рис.5. Относительно контроля в подгруппах основной группы отмечалось усиление зашумленности, что отражалось в достоверном снижении sD с $12,4 \pm 2,28$ до $6,32 \pm 1,56$ соответственно против $15,8 \pm 2,28$ в контроле.

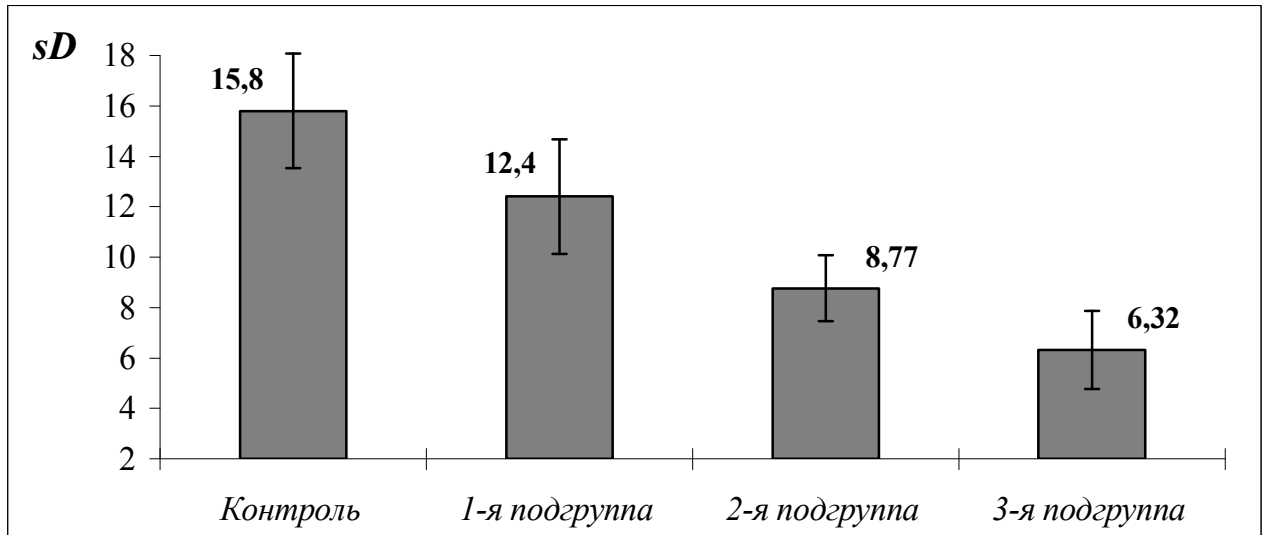


Рисунок 5 - Значения показателя sD сердечного ритма плода в обследованных группах.

Следует отметить, что практически у всех беременных 3-й подгруппы (92%) хаотическая динамика сердечного ритма плода характеризовалась $D_2 \geq 6$, что позволяло рассматривать его либо уже как чисто случайный процесс, лишенный детерминированной составляющей, либо это свидетельствовало о присутствии сложных детерминированных режимов высокой размерности, которые не удавалось выявлять в силу фундаментальных ограничений на значения D_2 , связанных с конечной длиной анализируемого временного ряда.

Таким образом, полученные результаты показывают, что редукция детерминированного хаоса и преобладание случайной динамики в структуре вариабельности ритма сердца плода может быть достоверным предиктором его внутриутробного страдания. Наоборот, при нормоксическом состоянии плода характер ВСП плода демонстрировал поведение по типу маломерной динамики с минимальными значениями корреляционной размерности.

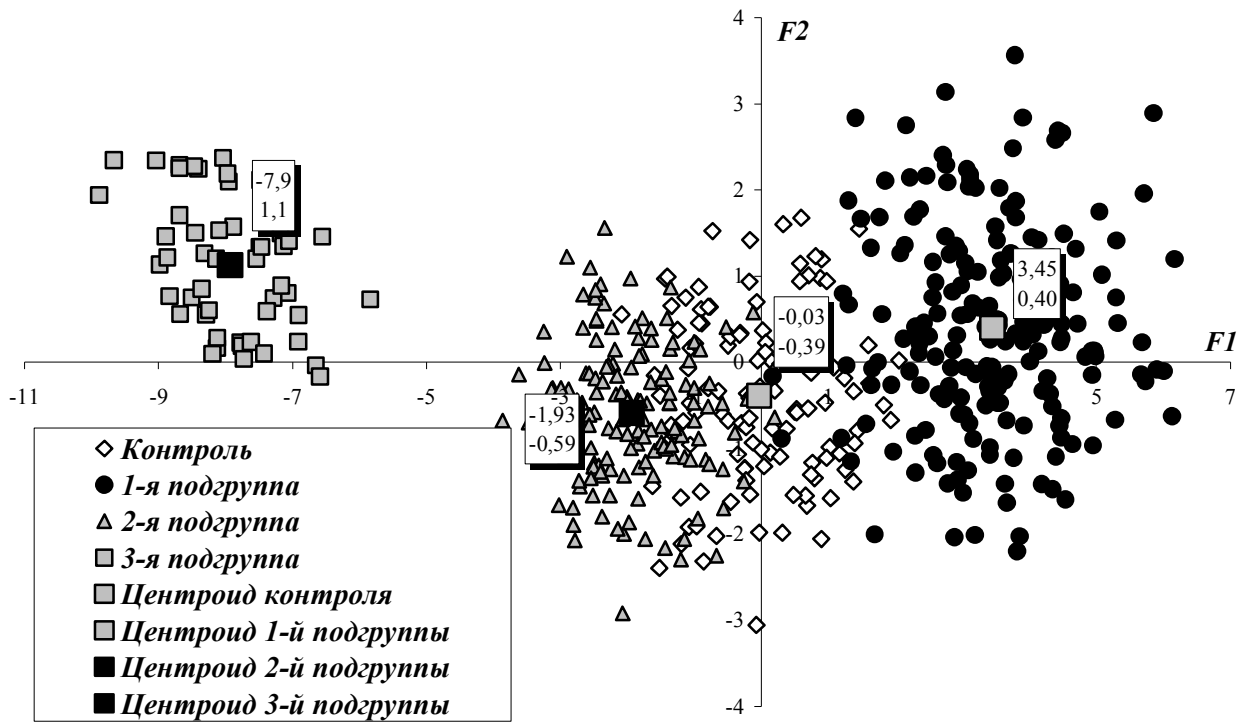


Рисунок 6 - Индивидуальные значения дискриминантных функций $F1$ и $F2$ в контроле и подгруппах основной группы, а также соответствующие им координаты центроидов.

Для построения модели дискриминативной статистики в качестве независимой переменной было использовано значение показателя sD , а группирующей переменной были клинические группы. В результате дискриминативного анализа были получены две дискриминантные функции ($F1$ и $F2$), в координатах которых всю совокупность наблюдений классифицировалась таким образом, что точки соответствующие контролю и первым двум подгруппам значительно пересекались в смежных областях и только для 3-й подгруппы большинство наблюдений отчетливо группировались в изолированное "облако" (рис.6).

По результатам дискриминативного анализа диагностическая точность определения фрактальных размерностей аттрактора сердечного ритма плода при классификации по клиническим группам в среднем характеризовалась чувствительность - 76%, специфичность - 91% и безошибочность - 87% (таб.1).

Таблица 1 - Классификационная матрица результатов дискриминативного анализа, а также показатели чувствительности, специфичности и пр.

Результаты классификации по решающим правилам	Группы объектов обучающих выборок				
	Контроль	1-я подгруппа	2-я подгруппа	3-я подгруппа	Всего
Отнесены к контролю	81	32	3	0	116
Отнесены к 1-й подгруппе	28	146	25	2	201
Отнесены ко 2-й подгруппе	11	21	114	4	150
Отнесены к 3-й подгруппе	0	1	8	44	53
Всего	120	200	150	50	520
Чувствительность	68%	73%	76%	88%	
Специфичность	91%	83%	90%	98%	
Ложноположительные	33%	27%	24%	12%	
Ложноотрицательные	9%	17%	10%	2%	
Безошибочность	86%	79%	86%	97%	

Обсуждение

Появление фрактальности в структуре ВСР плода является неотъемлемым атрибутом при формировании нормальной динамики сердечного ритма в антенатальном периоде. Многие из управляемых биологических процессов совершают колебания по типу, так называемого, $1/f$ -шума, спектр мощности которого имеет степенной закон изменения [11]. Этот закон порождает масштабную инвариантность или фрактальность биологического процесса управления сердечным ритмом и является отражением в результирующем выходе системы вкладов многочисленных подсистем, функционирующих в различных временных масштабах. Например, осцилляции сердечного ритма с периодом 4 секунды отражают обусловленную вагусом респираторную активность, а с периодом 10 секунд - баррорефлекторную регуляцию активности синусового узла. Гуморальные системы (например, ренин-ангиотензиновая) дают вход с еще более

длительным временным масштабом, а циклы связанные со сном и бодрствованием, циркадными ритмами имеют постоянную времени, исчисляемую часами.

Таким образом, окончательный вид ВСР представляет собой суперпозицию многочисленных, относительно самостоятельных входов, каждый со своим характерным временным масштабом. Как следствие такой суперпозиции, регистрируемые типы variability сердечного ритма плода содержат периодические, квазипериодические и хаотические колебания.

Большой теоретический и практический интерес представляют исследования, позволяющие по виду результирующих сложных флуктуаций сердечного ритма дать ответ о характере режимов функционирования всей динамической системы управления сердечным ритмом в целом с позиции современных представлений о детерминированном хаосе, так как роль традиционных линейных подходов в исследовании подобных закономерностей сильно ограничена [6].

Использование аппарата нелинейной динамики позволяет сформулировать новые интегральные параметры, характеризующие эффективность управления сердечным ритмом и адаптации к внешним воздействиям, дать оценку функционального состояния. Основное достоинство данного метода, в отличие от статистического и спектрального анализов, состоит в том, что показатели нелинейной динамики несут в себе всю информацию о процессе управления сердечным ритмом. Это обстоятельство, в свою очередь, позволяет проводить более качественную и достоверную диагностику.

Основной задачей настоящего исследования являлась попытка ответить на вопрос является ли наблюдаемая сложная временная динамика кардиоинтервалов плода следствием функционирования некоторой детерминированной мультимасштабной динамической системы или носит чисто стохастический, случайный характер? Если это динамическая система, то, что можно было сказать о таких важных ее свойствах, как число независимых переменных, определяющих состояние системы, корреляционная размерность аттрактора и пр.? Эти параметры являются адекватными количественными критериям динамической природы наблюдаемой реализации ВСР плода. Особенно актуальным представ-

лялось определение их информативности в контексте возможных предикторов внутриутробного страдания плода.

Кардиоритмограммы здоровых плодов (контроль) в сроках гестации 28-30 недель условно можно было назвать зашумленными хаотическими рядами, так как в этот период они имели максимально высокую корреляционную размерность (наименьшую величину sD). После 35 недель гестации ВСР плодов контрольной группы во всех случаях характеризовалась относительно маломерной динамикой.

В подгруппах основной группы, по мере углубления внутриутробной гипоксии плода, происходило разрушение фрактальной природы ВСР с доминированием в ней чисто случайной, шумоподобной составляющей, которая подавляла хаотический компонент (если таковой имелся) и увеличивала размерность системы. Одной из вероятной причин этого могло быть нарушение баланса между различными "входами" динамической системы регуляции ритма сердца, при котором разрушение фрактальности протекает либо по сценарию полной десинхронизации функционирования подсистем и формированием ВСР по типу шумоподобного процесса (например, белый шум), либо происходит селективное ослабление или доминирование определенного масштаба - крайняя степень синхронизации "входов", проявляющаяся маломерной и сильно детерминированной динамикой (например, синусоидальные и волнообразные ритмы).

Таким образом, в обоих случаях внутриутробная гипоксия плода сопровождалась разрушением характерной фрактальной структуры ВСР с подавлением детерминированного хаоса (выход системы из хаоса) и преобладанием в ней случайной (не хаотической!) составляющей.

Полученные результаты согласуются с данными M.F. Shlesinger [9] о том, что формирование фрактальной ВСР по типу $1/f$ -шума в биологических системах возможно только при определенных условиях взаимодействия многочисленных подсистем влияющих на ритм сердца ("входов"), как то, их число, амплитуда влияния, постоянная времени. Другими словами, в такой мультимас-

штабной динамической системе регуляции ритма сердца вероятность случайного подбора параметров "входов" таким образом, чтобы обеспечить фрактальность результирующего процесса (ВСР) минимальна. Структурированность "входов" является неотъемлемым атрибутом рождения фрактальной динамики на интегрированном "выходе" динамической системы. В условиях патологии тонкое взаимодействие "входов" нарушается, что непосредственно сказывается на фрактальных свойствах наблюдаемой ВСР плода.

В настоящем исследовании было показано, что современные методы нелинейной динамики могут служить чувствительными критериями подобных отклонений от нормального режима функционирования сложной динамической системы регуляции фетального ритма сердца, а их практическое использование позволит более эффективно прогнозировать жизнеспособность плода.

Литература

1. Абуладзе Г.В., Папиташвили А.М. Спектральные свойства variability частоты сердечного ритма плода. Норма и клиническое применение // Ультразвуковая и функциональная диагностика.-2003.-№2.-С.128-137.
2. Thacker S.B., Stroup D.F. Continuous electronic heart rate monitoring for fetal assessment during labor // *Cochrane Database Syst. Rev.* 2000. № 2. CD000063.
3. Mires G., Williams F., Howie P. Randomized controlled trial of Cardiotocography versus Doppler auscultation of fetal heart at admission in labour in low risk obstetric population // *BMJ.* 2001. V. 322. P.1457-1462.
4. Shono H., Shono M., Iwasaka T., Sugimori H. Analysis of heart rate variability of an anencephalic fetus using a new method to determine a fractal dimension of non-stationary time-serial data // *Front. Med. Biol. Eng.* 2001. V. 10. № 4. P.337-344.
5. Yum M.K., Park E.Y., Kim C.R., Hwang J.H. Alterations in irregular and fractal heart rate behavior in growth restricted fetuses // *Eur. J. Obstet. Gynecol. Reprod. Biol.* 2001. V. 94. № 1. P.51-58.
6. Kuusela T.A., Jartti T.T., Tahvanainen K.U.O., Kaila T.J. Nonlinear methods of biosignal analysis in assessing terbutaline-induced heart rate and blood pressure changes // *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 282: H773-H781, 2002.
7. Kantz H., Schreiber T. *Nonlinear time series analysis.* Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 168-171.
8. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. *Современные проблемы нелинейной динамики.* - М.: Эдиториал УРСС, 2000. - 336с.
9. Shlesinger M.F., West B.J. *Random Fluctuations and Pattern Growth: Experiments and Models,* edited by H. E. Stanley and N. Ostrowsky (Kluwer Academic, Boston, 1988). A mathematical analysis of a general model can be found in M. O. Vlad, *Int. J. Mod. Phys. B* 6, 417 (1992).
10. Voss A., Kurths J., Kleiner H.J., Witt A., Wessel N., Sapanin P., Osterziel K.J., Schurath R., Dietz R. The application of methods on non-linear dynamics for the improved and predictive recognition of patients threatened by sudden cardiac death. *Cardiovasc Res* 31: 419-433, 1996.
11. Skinner J.E., Nester B.A., Dalsey W.C. Nonlinear dynamics of heart rate variability during experimental hemorrhage in ketamine-anesthetized rats // *Am. J. Physiol. Heart Circ Physiol* 279: H1669-H1678, 2000.
12. Кузнецов С.П. *Динамический хаос (курс лекций).*-М.: Издательство Физ.-мат. лит., 2001.-296 с.
13. Hegger R. et al. Practical Implementation of Nonlinear Time Series Methods. In: *The TISEAN package,* CHAOS 9, 413, 1999.
14. Меклер А.А. Применение аппарата нелинейного анализа динамических систем для обработки сигналов ЭЭГ.//*Вестник новых медицинских технологий* - 2007 - Т. XIV, №1 - С. 73
15. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. In: *Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics,* edited by D.A.Rand L.S.Young. Heidelberg: Springer-Verlag, 366-381 (1981).
16. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of strange attractors. *Phys Rev Lett* 31: 346-349, 1983.
17. Nerenberg M.A., Essex C. Correlation dimension and systematic geometric effects // *Phys. Rev. A.* 1990. V. 42. № 12. P. 7065-7074.
18. Машин В.А. Связь тангенса угла наклона линии регрессии графа сердечного ритма с периодической и нелинейной динамикой ритма сердца на коротких стационарных отрезках.// *Биофизика* - 2006. - Т 51. - вып. 3. - С. 534-538.