

## Автоматизация диагностики возрастных изменений параметров сердечно-сосудистой системы

### Аннотация

Разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать динамику возрастных изменений параметров сердечно-сосудистой системы человека на Севере РФ. На примере одной координаты ( $x_1$  – кардиоинтервалы) представлен метод расчета параметров квазиаттракторов в двумерном фазовом пространстве, где  $x_2 = dx_1 / dt$  – скорость изменения кардиоинтервалов с возрастом. Для трех возрастных групп женщин-ханты демонстрируются результаты исследования алгоритма (и всего автоматизированного комплекса) для описания возрастных изменений параметров квазиаттракторов при нормальном физиологическом старении.

### Введение

Актуальными задачами медицины являются исследования и диагностика заболеваний *сердечно-сосудистой системы* (ССС). В результате проведенных Всемирной организацией здравоохранения исследований были получены данные, позволяющие говорить о причинах преждевременной смерти жителей нашей планеты от патологии ССС. В динамике заболеваемости и смертности можно отметить три главные тенденции увеличения количества заболеваний ССС: среди лиц молодого возраста, среди жителей сельских местностей и среди населения, проживающего на Севере РФ. При изучении продолжительности жизни населения Севера РФ особую роль отводят состоянию ССС, так как жители северных регионов имеют более ранний возраст выхода на пенсию (например женщины – с 50 лет). Пролонгацию жизни и работоспособного периода целесообразно проводить для представительниц женского пола, так как у них больше продолжительность жизни в целом.

Традиционно считается, что проведя разовые измерения любых диагностических параметров организма человека  $x_i$ , можно сделать вывод о его биологическом возрасте. Это возможно, если сохраняется статистическая функция распределения  $f(x)$  для любого из параметров  $x_i$  на любом временном интервале измерения  $\Delta T$ . В настоящее время широко используют два подхода к описанию и анализу таких систем: во-первых, *детерминистский*, в основе которого лежат причинно-следственные связи, т. е. каждое значение  $x_i$  задает значение функции  $f(x_i)$ , которая это значение описывает; во-вторых, *стохастический*, который характеризуется значениями функции распределения  $f(x_i)$  системы.

Использование таких подходов предусматривает статистическую устойчивость  $x_i$ , что для параметров ССС не выполняется [1]-[7]. В рамках *детерминистско-стохастического* подхода параметры организма человека всегда усреднены, но эти усреднения уникальны (выборки  $x_i$  не повторяются), что характерно и для ССС человека на Севере РФ [1]-[4], [6]-[8]. Все это сейчас требует разработки новых подходов и методов количественного анализа параметров ССС [6]-[11].

### Материалы и методы исследования

Любые диагностические признаки человека, находящегося в одном гомеостатическом состоянии, непрерывно изменяются [3], [8], [11]. В рамках нового подхода для каждого значения кардиоритма:  $x_1 = x_1(t)$  – величина кардиоинтервала,  $x_2 = x_2(t) = dx_1 / dt$  – скорость изменения  $x_1(t)$  – мы определяем величины вариационных размахов  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$  и находим площадь *квазиаттрактора* (КА)  $S = \Delta x_1 \times \Delta x_2$ , внутри которого хаотически и непрерывно движется вектор состояния ССС  $x(t) = (x_1, x_2)^T$  [8]-[11]. При этом статистические характеристики, такие как функция  $f(x)$  плотности распределения случайной величины  $x_i$  и значения автокорреляционной функции  $A(t)$ , также хаотически изменяются внутри этого КА [3], [4], [12].

Объектом исследования рассматриваемой работы является возрастная эволюция параметров ССС организма человека

на примере *кардиоинтервалов* (КИ). В рамках данного исследования была разработана и запатентована программа для ЭВМ, позволяющая рассчитать динамику возрастных изменений параметров ССС при нормальном и патологическом старении организма [1].

Для определения возрастной эволюции параметров функциональных систем организма человека при нормальном и патологическом старении был разработан алгоритм, реализованный в программе (*рис. 1*).

В основу алгоритма возрастной эволюции параметров ССС организма человека положены данные для анализа ССС в виде файлов КИ –  $x_1(t)$  с помощью пульсоксиметра «ЭЛОКС-01М», регистрирующего пульсовую волну с одного из пальцев испытываемого в положении сидя в течение пятиминутного интервала времени (блок «Измерительная аппаратура»). В качестве основного параметра использовались значения межпульсовых интервалов сердечных сокращений [КИ =  $x_1(t)$ ]. Межпульсовые интервалы ССС являются функцией времени и описывают работу сердца.

В качестве интерфейса, обеспечивающего связь между измерительной аппаратурой и программой, позволяющей рассчитать динамику возрастных изменений параметров ССС при нормальном и патологическом старении организма, выступает специальная программа «ЭЛОГРАФ 3.0». Она позволяет на экране монитора увидеть сигналы ритма сердца и основные параметры ССС в виде графиков и гистограмм.

Далее данные КИ в виде временных рядов, предварительно прошедших этап очистки сигнала от шума, попадают в программу ЭВМ. Производится расчет значений параметров КА: площади  $S$  (для КА), объема  $V$  и центра КА, характеризующих гомеостаз ССС организма человека. Параметры КА были рассчитаны для трех возрастных групп представительниц коренного населения Севера РФ женщин-ханты, по 38 человек в каждой группе. Если параметры КА изменяются, то регистрируется процесс возрастной эволюции гомеостаза. Причем изменение гомеостаза должно быть целенаправленным, т. е. телеологичным. Это явление характерно для нормального старения организма человека. Результаты расчетов параметров КА представляются в виде таблиц и графиков.

### Полученные результаты и их обсуждение

В *табл. 1* приводятся рассчитанные с помощью программы ЭВМ значения площадей КА для трех возрастных групп и четвертый результат – для 102-летней жительницы Югры (как значение асимптоты). Это пример нормального физиологического старения, которое описывается процессами с отрицательной обратной связью (по типу торможения).

Как видно из *табл. 1*, для представительниц первой возрастной группы со средним возрастом  $\bar{t}_1 = 27$  лет общий КА имеет площадь  $S_1 = 220339$  у. е., что почти в 2 раза больше значения площади КА для второй возрастной группы ( $\bar{t}_2 = 43$  года;  $S_2 = 111508$  у. е.) и в 4 раза больше значения площади КА для третьей возрастной группы ( $\bar{t}_3 = 58$  лет;  $S_3 = 57410$  у. е.). Значение площади КА самой пожилой представительницы коренных народов в возрасте 102 лет ( $S_4 = 5400$  у. е.), демонстрирует предельное значение  $S_4$  для возраста, являю-

щегося асимптотой. Таким образом, с возрастом значения КА уменьшаются.

Таблица 1

**Результаты расчетов параметров квазиаттракторов по данным межимпульсных интервалов сердечно-сосудистой системы**

Средний возраст группы, лет	Значение площади КА $S_i$ , у. е.	Отношение площадей КА
27	$S_1 = 220339$	$S_1 / S_2 = 1,98$
43	$S_2 = 111508$	$S_2 / S_3 = 1,94$
58	$S_3 = 57410$	$S_1 / S_3 = 3,84$
102	$S_4 = 5400$	–

Одновременно ЭВМ выполняет автоматически моделирование возрастной динамики КА для хантов Югры. Состояние гомеостаза (как нами было установлено) организма хорошо описывается моделью Ферхюльста-Пирла (1), которая использовалась как ядро программы для ЭВМ. Из исходных данных определяются параметры модели ( $a$ ,  $b$ ) в уравнении Ферхюльста-Пирла (1):

$$y = dS(t) / dt = [a - b \cdot S(t)] \cdot S(t), \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент удельной скорости роста площади КА  $S(t)$  в фазовом пространстве состояний;  $t$  – время (возраст);  $b$  – значение коэффициента обратной связи (при максимально возможной продолжительности возраста жизни  $S_{max} = a / b$ ). В нашем случае  $S_{max} = 5400$  у. е. при  $t = 102$  года;  $S_0$  – значение площади КА в начальный момент времени  $t = min$ ;  $S(t)$  – значение площади КА в определенный момент времени  $t$ .

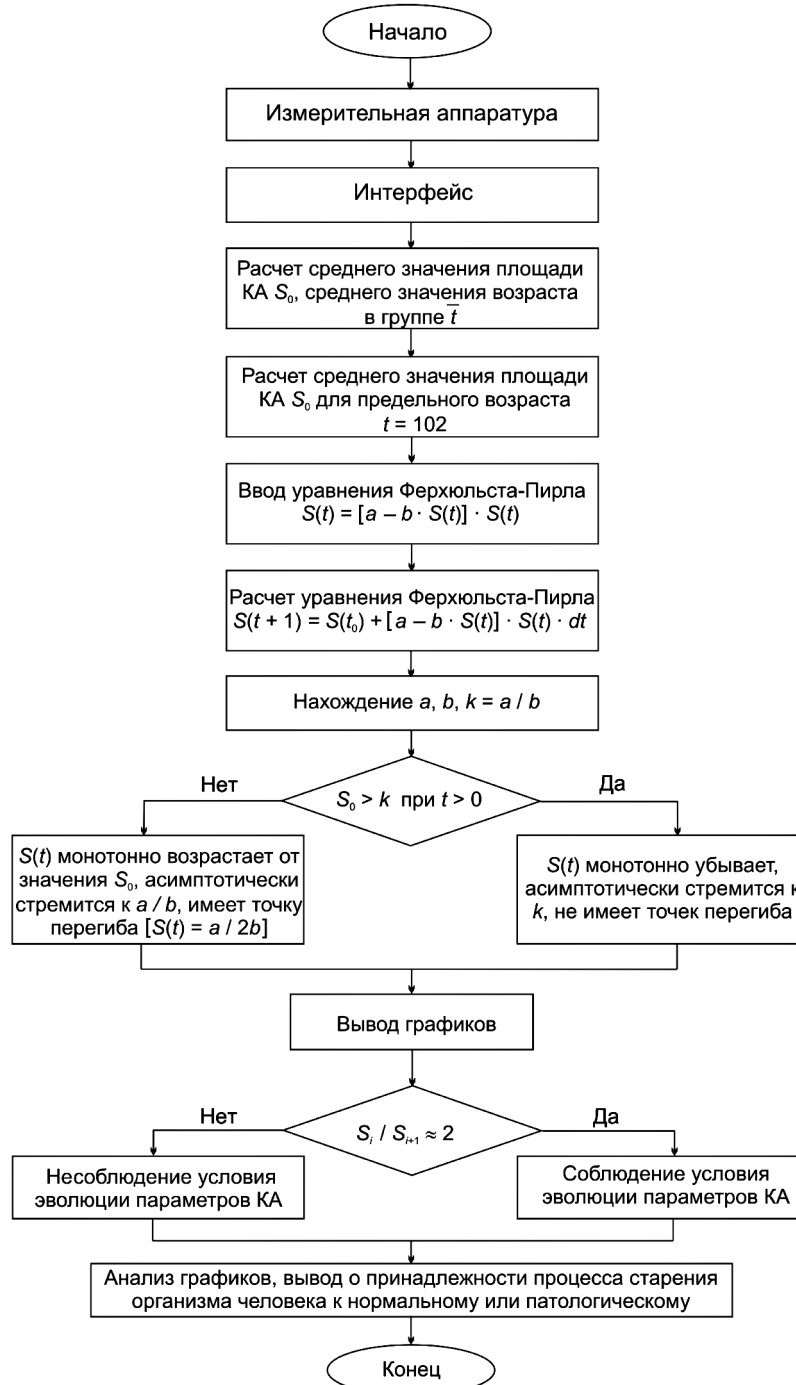


Рис. 1. Алгоритм анализа возрастной эволюции параметров функциональных систем организма человека

Используя метод наименьших квадратов из уравнения (1), находим модельные значения коэффициентов:  $a = 0,0000284$ ;  $b = 0,0000526$ . В модели (1) используется значение асимптоты  $S_{max}$  для данных долгожительницы в возрасте 102 лет ( $S_{max} = 5400$  у. е.).

По полученным параметрам уравнения (1) построены модельная и экспериментальные кривые, график которых выводится на экран (рис. 2).

Сплошной линией на рис. 2 изображены модельные данные, штрих-пунктирной – экспериментальные, горизонтальная штрихованная линия – это асимптота для данных долгожительницы в возрасте 102 лет:  $S_{max} = a / b = 5400$  у. е. Как видно из рис. 2, значения площади КА с возрастом существенно уменьшается ( $S_1 = 220339$  у. е.,  $S_2 = 111508$  у. е.,  $S_3 = 57410$  у. е.). В качестве асимптоты нами было взято значение КА для 102-летней представительницы коренного народа ( $S_4 = 5400$  у. е.). Рис. 2 дает качественную характеристику эволюции параметров КИ при нормальном физиологическом старении [1], [2]. Используя уравнение (1), программа ЭВМ строит график зависимости скорости изменения  $y = y(t) = dS(t) / dt$  площади КА  $S(t)$  от времени  $t$  (возраста групп).

Значение скорости изменения площади КА есть величина отрицательная и убывающая по модулю. В ходе исследования уравнения (1) было выявлено, что в динамике  $S(t)$  при  $t \rightarrow \infty$  функция  $S$  монотонно убывает, асимптотически стремится к величине  $S_{min} = 5400$  у. е. и не имеет перегибов. В этом случае мы говорим о нормальном процессе старения среди женщин-ханты. Программа ЭВМ также определяет соотношение между КА, которое представлено в виде последнего столбца табл. 1 (в зависимости от количества возрастных групп).

Таким образом, при использовании данной программы мы получили реальную модель скорости эволюции параметров кардиоритмов на примере данных ССС коренных аборигенов Севера РФ (ханты), которая может выступать в качестве эталона изменения кардиоритма с возрастом при нормальном старении организма человека.

## Выводы

1. Выборки параметров КИ (и других  $x_i$ , описывающих ССС) не имеют статистической устойчивости, поэтому целе-

сообразно использовать расчет параметров КА для ССС. Разработанный алгоритм позволяет рассчитывать возрастную динамику КА для ССС.

2. При нормальном физиологическом старении мы имеем убывающую функцию площади  $S$  квазиаттрактора от возраста, которая описывается уравнением Ферхюльста-Пирла. При патологии форма  $S(t)$  может иметь вид параболы [8].

**Результаты исследований опубликованы при финансовой поддержке ТулГУ в рамках научного проекта № 2017-81ПУБЛ.**

## Список литературы:

1. Григоренко В.В., Лысенкова С.А., Микушина В.С. Программа оценки состояния параметров сердечно-сосудистой системы / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619094 от 15.08.2017 г.
2. Еськов В.М., Филатова О.Е., Еськов В.В., Гавриленко Т.В. Эволюция понятия гомеостаза: детерминизм, стохастика, хаос-самоорганизация // Биофизика. 2017. Т. 62. № 5. С. 984-997.
3. Зилов В.Г., Хадарцев А.А., Еськов В.В., Еськов В.М. Экспериментальные исследования статистической устойчивости выборок кардиоинтервалов // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2017. № 8. С. 136-139.
4. Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Vochmina J.V. Biosystem kinematics as evolution: Stationary modes and movement speed of complex systems: Complexity // Moscow University Physics Bulletin. 2015. Vol. 70. № 2. PP. 140-152.
5. Eskov V.M., Gavrilenko T.V., Vokhmina Y.V., Zimin M.I., Filatov M.A. Measurement of Chaotic Dynamics for Two Types of Tapping as Voluntary Movements // Measurement Techniques. 2014. Vol. 57. № 6. PP. 720-724.
6. Zilov V.G., Eskov V.M., Khadartsev A.A., Eskov V.V. Experimental Verification of the Bernstein Effect «Repetition without Repetition» // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2017. Vol. 163. № 1. PP. 1-5.
7. Eskov V.M., Eskov V.V., Vochmina Y.V., Gorbunov D.V., Ilyashenko L.K. Shannon entropy in the research on stationary regimes and the evolution of complexity // Moscow University Physics Bulletin. 2017. Vol. 72. № 3. PP. 309-317.

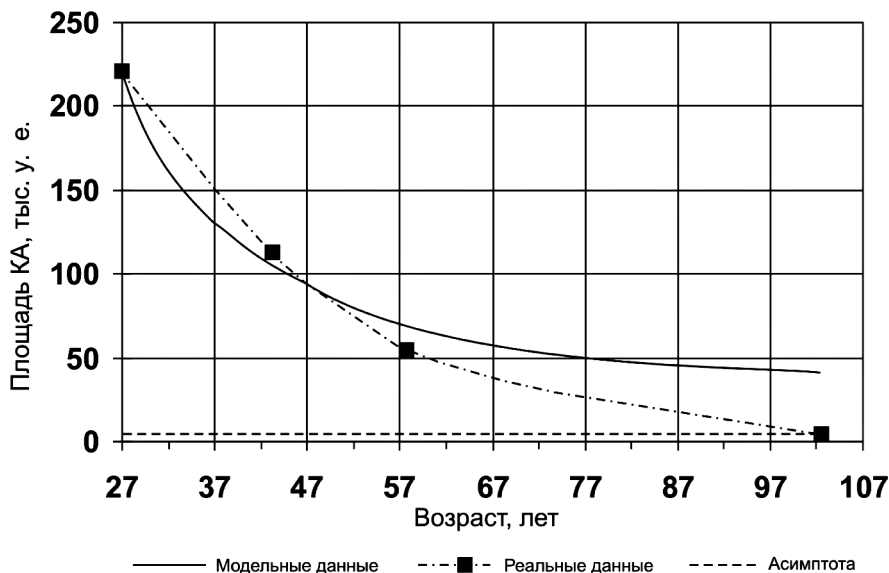


Рис. 2. Динамика возрастных изменений площадей квазиаттракторов  $S(t)$  кардиоинтервалов сердечно-сосудистой системы женщин-ханты

8. *Eskov V.M., Khadartsev A.A., Eskov V.V., Vokhmina J.V.* Chaotic dynamics of cardio intervals in three age groups of indigenous and nonindigenous populations of Ugra // *Advances in Gerontology*. 2016. Vol. 6. № 3. PP. 191-197.
9. *Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Vochmina Y.V.* Formalization of the effect of «repetition without repetition» discovered by N.A. Bernshtein // *Biophysics*. 2017. Vol. 62. № 1. PP. 143-150.
10. *Eskov V.M., Gudkov A.B., Bazhenova A.E., Kozupitsa G.S.* The tremor parameters of female with different physical training in the Russian North // *Human Ecology*. 2017. № 3. PP. 38-42.
11. *Eskov V.M., Bazhenova A.E., Vochmina U.V., Filatov M.A., Piyashenko L.K.* N.A. Bernstein hypothesis in the description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // *Russian Journal of Biomechanics*. 2017. Vol. 21. № 1. PP. 14-23.
12. *Betelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A., Gavrilenko T.V.* Stochastic volatility in the dynamics of complex homeostatic systems // *Doklady Mathematics*. 2017. Vol. 95. № 1. PP. 92-94.

*Борис Иванович Леонов,  
д-р техн. наук, президент,  
АНО «Академия медико-технических наук»,  
г. Москва,*

*Виолетта Вячеславовна Григоренко,  
аспирант,  
Валерий Матвеевич Еськов,  
д-р физ.-мат. наук,  
БУ ВО «Сургутский  
государственный университет»,  
г. Сургут,  
Александр Агубечирович Хадарцев,  
д-р мед. наук,  
директор медицинского института,  
ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет»,  
г. Тула,  
Любовь Кирыловна Иляшенко,  
канд. педагогич. наук, зав. кафедрой,  
кафедра естественно-научных  
и гуманитарных дисциплин,  
филиал ФГБОУ ВО «Тюменский  
индустриальный университет» в г. Сургуте,  
г. Сургут,  
e-mail: ahadar@yandex.ru*

*А.О. Устинов, А.Р. Дабагов*

## Параметры реконструкции изображений в технологии двухэнергетической рентгенографии

### Аннотация

В статье показано влияние на качество медицинского рентгеновского изображения параметров реконструкции двухэнергетической рентгенографии.

### Введение

Медицинская рентгенография продолжает удерживать лидирующее положение среди методов визуализации и позволяет решать многие задачи клинической диагностики. Благодаря технологии цифровых плоскопанельных рентгеновских приемников, дозовую нагрузку на пациента можно существенно снизить по сравнению с классической аналоговой рентгенографией. Технология двухэнергетической рентгенографии дает широкие возможности получения новой диагностической информации [1].

Следует внимательно относиться к выбору параметров реконструкции. Они могут как улучшить, так и ухудшить качество изображения. Задача данной статьи – дать понимание механизмов реконструкции, стоящих за технологией двухэнергетической рентгенографии, и выработать рекомендации для врача-рентгенолога по использованию данной технологии.

### Материалы и методы

На текущий момент на рынке РФ присутствуют несколько производителей аппаратов с указанной технологией. Это «Телекорд-МТ-Плюс» (АО «МТЛ», РФ), «FDR AcSelerate» («Fujifilm Medical Systems», Япония), «SonialVision Safire» («Shimadzu», Япония), «VolumeRAD» («GE», США) [2]-[5]. Все приведенные в данной статье снимки получены на аппарате «Телекорд-МТ-Плюс».

Технология двухэнергетической рентгенографии предназначена преимущественно для диагностики патологий органов грудной клетки (ОГК), так как диагностика этих патологий

осложнена наложением проекций легочной и костной тканей. Использование различных энергетических диапазонов позволяет осуществить разделение тканей с различными коэффициентами ослабления и получить их отдельные изображения.

Экспоненциальный закон ослабления излучения позволяет составить систему уравнений для низкой (LE) и высокой (HE) энергий:

$$I^{HE} = I_0^{HE} \exp(-\mu_{soft}^{HE} t_{soft} - \mu_{bone}^{HE} t_{bone}); \quad (1)$$

$$I^{LE} = I_0^{LE} \exp(-\mu_{soft}^{LE} t_{soft} - \mu_{bone}^{LE} t_{bone}), \quad (2)$$

где  $I$  и  $I_0$  – интенсивность после и до прохождения объекта соответственно;  $\mu$  – коэффициент ослабления;  $t$  – толщина объекта. Компонента релеевского рассеяния мала, поэтому результирующий коэффициент ослабления можно выразить как [6]

$$\mu(E) = \mu(E)_c + \mu(E)_p = \rho_e f_{kn}(E) + \rho_e C_p Z^3 / E^3, \quad (3)$$

где  $\rho_e$  – плотность электронов атома материала;  $E$  – энергия фотона;  $Z$  – атомный номер материала;  $C_p = 9,8 \cdot 10^{-24}$ ;  $f_{kn}$  – функция Клейна-Нишины. Усредненные атомные номера для мягкой (комбинация атомов C, N, O, H) и костной (Ca) тканей составляют 7 и 20 соответственно.

В медицинской рентгеновской технике для рутинных исследований используют анодное напряжение от 40 до 150 кВ. Для технологии двухэнергетической рентгенографии выбирают диапазоны 50...70 и 120...140 кВ. Это позволяет разнести спектр излучения для низкой и высокой энергий для уменьшения уровня артефактов реконструкции. Для подавления низ-