

УДК 519.237:519.254:611.1

**ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ ЭНТРОПИЙНО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ
МОНИТОРИНГ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ**^{1,2}Тырсин А.Н., ³Яшин Д.А.¹ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: at2001@yandex.ru;²Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН, Екатеринбург;³ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный медицинский университет» Минздрава РФ, Челябинск, e-mail: yashid.chel@mail.ru

Одной из актуальных и мало изученных проблем в медицине является комплексная оценка здоровья одновременно по нескольким факторам риска. Одним из подходов, направленных на решение этой проблемы, является энтропийно-вероятностное моделирование, представляющее собой синтез риск-анализа и системно-энтропийного анализа многомерных систем. Описана методика энтропийно-вероятностного мониторинга индивидуального состояния здоровья на примере сердечно-сосудистой системы. Индивидуальный энтропийно-вероятностный мониторинг позволяет обнаружить момент существенного изменения функционирования сердечно-сосудистой системы и определить, какие из множества факторов на это повлияли. Он обладает универсальностью и может использоваться в других областях клинической медицины, особенно в тех, где постоянно с использованием информационных технологий фиксируется большое количество параметров функционирования разных систем. Наряду с риск-анализом и системно-энтропийным анализом имеется возможность совместного анализа различных факторов риска с множеством входных показателей, оказывающих влияние на состояние здоровья конкретного человека. Мониторинг осуществляется по ряду показателей, таких как энтропия хаотичности и самоорганизации множеств входных показателей и факторов риска, энтропия взаимосвязи между входными показателями и факторами риска, многомерный риск, оценка вклада каждого фактора риска в общий риск. Методика апробирована на примере сердечно-сосудистой системы. Результаты мониторинга согласуются с данными о фактическом состоянии здоровья.

Ключевые слова: энтропия, риск-анализ, вероятность, сердечно-сосудистая система, мониторинг**INDIVIDUAL ENTROPY-PROBABILISTIC MONITORING
OF FUNCTIONING OF CARDIOVASCULAR SYSTEM**^{1,2}Tyrsin A.N., ³Yashin D.A.¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, e-mail: at2001@yandex.ru;²Science and Engineering Center «Reliability and Resource of Large Systems and Machines», Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg;³South Ural State Medical University, Chelyabinsk, e-mail: yashid.chel@mail.ru

One of the urgent and little-studied problems in medicine is a comprehensive assessment of health simultaneously for several risk factors. One of the approaches aimed at solving this problem is entropy-probabilistic modeling, which is a synthesis of risk analysis and system-entropy analysis of multidimensional systems. The article describes the technique of entropy-probabilistic monitoring of individual health status on the example of the cardiovascular system. Individual entropy-probabilistic monitoring allows you to detect the moment of a significant change in the functioning of the cardiovascular system and determine which of the many factors influenced it. It has versatility and can be used in other areas of clinical medicine, especially in those where a large number of parameters of the functioning of different systems are constantly recorded using information technology. Along with risk analysis and system-entropy analysis, it is possible to jointly analyze various risk factors with a variety of input indicators that affect the health of a particular person. Monitoring is carried out according to a number of indicators, such as the entropy of randomness and self-organization of sets of input indicators and risk factors, the entropy of the relationship between input indicators and risk factors, multidimensional risk, and assessment of the contribution of each risk factor to the overall risk. The technique was tested on the example of the cardiovascular system. The results of monitoring are consistent with data on the actual state of health.

Keywords: entropy, risk-analysis, probability, cardiovascular system, monitoring

И.П. Павлов отмечал, что «животный организм представляет крайне сложную систему, состоящую из почти бесконечного ряда частей, связанных как друг с другом, так и в виде единого комплекса с окружаю-

щей природой и находящихся с ней в равновесии» [1, с. 106]. Комплексная оценка здоровья одновременно по нескольким факторам риска является одной из актуальных и недостаточно изученных проблем в меди-

цине. Часто применяемые в таких случаях экспертные оценки нельзя считать в полной мере объективными [2].

Одним из направлений для комплексного оценивания здоровья может быть использование энтропии, являющейся одной из наиболее универсальных характеристик сложных систем [3, 4]. Такие системы обычно обладают неопределенным (стохастическим) характером поведения и состоят из множества сложным образом взаимосвязанных между собой элементов. При этом все компоненты связаны между собой некоторым образом. Важно указать на то, что имеет место неоднозначность выбора элементов в сложной системе [5, 6]. В этой ситуации ее часто представляют в виде случайного вектора (с.в.) $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$, в котором каждая компонента Y_i является одномерной случайной величиной, характеризующей функционирование соответствующего элемента системы [7].

Представляет интерес вопрос использования энтропии для мониторинга систем. В [8] предложено использование энтропийного анализа для мониторинга популяционного здоровья. В его основе векторное представление дифференциальной энтропии (далее – энтропии). Использование системно-энтропийного анализа позволило понять основные системные причины ухудшения популяционного здоровья, а для формирования рекомендаций по улучшению здоровья также необходима количественная оценка вклада в его ухудшение каждого из факторов риска [9]. Отметим, что энтропийно-вероятностный (ЭВ) подход, объединяющий системно-энтропийный и риск-анализ, предложен и апробирован для исследования популяций [10]. Поэтому представляет интерес рассмотреть возможности ЭВ моделирования для мониторинга индивидуального состояния здоровья.

Цель исследования – разработать методику энтропийно-вероятностного мониторинга индивидуального состояния здоровья на примере сердечно-сосудистой системы.

Материалы и методы исследования

Имеем два множества (случайных вектора): $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3)$ – множество входных показателей, $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3)$ – множество факторов риска (выходных показателей) (см. табл. 1). Выбор выходных показателей объясняется следующими причинами. Во-первых, они являются обобщенными показателями как состояния человеческого здоровья и качества работы сердечно-сосудистой системы в частности [11, 12]. Во-вторых, эти показатели доступны для измерения. В-третьих, ставилась цель показать

возможности предлагаемой методики в целом. Для более глубокого исследования состояния здоровья понадобится большее число наблюдаемых показателей и наблюдение в медицинском учреждении, что в настоящее время осложнено из-за ковидных ограничений. Выбор входных показателей \mathbf{X} обусловлен наличием метеозависимости, проявляющейся в избыточном реагировании человека на изменения условий окружающей среды [13].

Таблица 1

Анализируемые показатели

Обозначение	Показатель
X_1	Атмосферное давление, мм рт. ст.
X_2	Влажность воздуха, %
X_3	Суточное время, % от 24 ч
Y_1	Систолическое артериальное давление (САД), мм рт. ст.
Y_2	Диастолическое артериальное давление (ДАД), мм рт. ст.
Y_3	Частота сердечных сокращений (ЧСС), уд/мин

Системно-энтропийный анализ включает в себя следующее. Общая энтропия непрерывного с.в. $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_m)$ определяется по формуле [8]

$$H(\mathbf{Z}) = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Z_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i + 0,5 \cdot \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Z_k/Z_1 Z_2 \dots Z_{k-1}}^2), \quad (1)$$

где

$$H(\mathbf{Z})_V = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Z_i} + \sum_{i=1}^m \kappa_i,$$

$H(\mathbf{Z})_R = 0,5 \cdot \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Z_k/Z_1 Z_2 \dots Z_{k-1}}^2)$ – энтропия хаотичности (энтропия с.в. с взаимно независимыми компонентами) и энтропия самоорганизации (показывает взаимодействие между подсистемами – чем меньше коэффициент, тем больше корреляционная взаимосвязь между компонентами системы, тем меньше общая энтропия; при наличии функциональной связи между хотя бы двумя компонентами $H(\mathbf{Z})_R = -\infty$, при взаимной независимости всех компонент $H(\mathbf{Z})_R = 0$) σ_{Z_i} – стандартное отклонение; $\kappa_i = H(Z_i/\sigma_{Z_i})$ – энтропийный показатель типа закона распределения случайной величины Z_i ; $R_{Z_k/Z_1 Z_2 \dots Z_{k-1}}^2$ – индексы детерминации регрессионных зависимостей. Разделим энтропию хаотичности на две составляющие

$$H(\mathbf{Z})_V = H(\mathbf{Z})_\sigma + H(\mathbf{Z})_\kappa, \quad (2)$$

где $H(\mathbf{Z})_\sigma = \sum_{i=1}^m \ln \sigma_{Z_i}$ – «хаотичности энтропия рассеяния» (характеризует вклад в энтропию хаотичности степени рассеяния всех элементов системы \mathbf{Z}), $H(\mathbf{Z})_\kappa = \sum_{i=1}^m \kappa_i$ – «хаотичности энтропия распределения» (определяет вклад в энтропию хаотичности форм распределения компонент многомерной с.в. \mathbf{Z}), $H(\mathbf{Y})_{\text{comp}} = H(\mathbf{Y})_R + H(\mathbf{Y})_\sigma$ – «энтропия сравнения» (если $H(\mathbf{Y})_\kappa$ неизменна, то $H(\mathbf{Y})_{\text{comp}}$ облегчает восприятие изменения энтропии).

Анализ распределений компонент случайных векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} подтвердил вывод [7] о близости распределений к нормальному закону. Поэтому вместо (1) и (2) имеем

$$H(\mathbf{X})_\sigma = \sum_{i=1}^3 \ln \sigma_{X_i},$$

$$H(\mathbf{X})_\kappa = 1,5 \cdot \ln(2\pi e) = 4,257,$$

$$H(\mathbf{X})_R = 0,5 \cdot \ln |R_X|, \quad (3)$$

$$H(\mathbf{Y})_\sigma = \sum_{i=1}^3 \ln \sigma_{Y_i},$$

$$H(\mathbf{Y})_\kappa = 1,5 \cdot \ln(2\pi e) = 4,257,$$

$$H(\mathbf{Y})_R = 0,5 \cdot \ln |R_Y|. \quad (4)$$

Отметим, что между энтропией самоорганизации и теснотой корреляционной связи между компонентами с.в. \mathbf{X} и \mathbf{Y} существует взаимно однозначная функциональная связь.

Энтропия взаимосвязи $H(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y})$ между векторами \mathbf{X} и \mathbf{Y} позволит количественно оценивать влияние метеорологических факторов на состояние сердечно-сосудистой системы. Она изменяется от 0 (соответствует независимости между \mathbf{X} и \mathbf{Y}) до $+\infty$ (в случае, когда хотя бы один из показателей Y_j функционально связан с хотя бы одним показателем X_i). Для гауссовых случайных векторов [10]

$$H(\mathbf{X} \cap \mathbf{Y}) = -\frac{1}{2} \ln \frac{|R_{X \cup Y}|}{|R_X| \cdot |R_Y|}. \quad (5)$$

Вероятность неблагоприятного исхода $P(D)$ (вероятность перехода испытуемого в «риск-зону» по факторам риска Y_1, Y_2, Y_3 относительно пороговых уровней) как [9]

$$P(D) = P(\mathbf{Y} \in D),$$

$$D = \left\{ \mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m) : \sum_{j=1}^m \frac{(y_j - \theta_j)^2}{b_j^2} \geq 1 \right\}. \quad (6)$$

Абсолютное и относительное изменение риска за счет добавления фактора Y_k равно

$$\Delta P(Y_k) = P(\mathbf{Y} \in D) - P(\mathbf{Y}_k^- \in D),$$

$$\delta P(Y_k) = \Delta P(Y_k) / P(\mathbf{Y}_k^- \in D), \quad (7)$$

где $\mathbf{Y}_k^- = (Y_1, \dots, Y_{k-1}, Y_{k+1}, \dots, Y_m)$.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве исходных данных использовались ежедневные показания двух человек (испытуемый 1 – мужчина 47 лет; испытуемый 2 – мужчина 60 лет), давших согласие на участие в экспериментах. Поскольку мы рассматриваем не популяционный, а индивидуальный мониторинг, то число испытуемых несущественно (у каждого испытуемого могут быть свои индивидуальные особенности в зависимости от возраста и т.п., а значит, и разные исследуемые показатели). С учетом того, что ставилась задача описания методики в целом, такого числа испытуемых достаточно. Измерения артериального давления и пульса проводили в соответствии с клиническими рекомендациями [14] с помощью тонометра Sanitas SBC 23: погрешность измерения давления ± 3 мм рт. ст.; погрешность измерения пульса $\pm 5\%$. Погодные условия фиксировались с сайта <https://www.gismeteo.ru/>. Результаты наблюдений и состояние здоровья испытуемых контролировались квалифицированным врачом-терапевтом. Количество наблюдений для испытуемых составило 87 и 285 измерений (в среднем более 50 измерений в месяц), достаточно для имеющейся погрешности тонометра. Анализ проводился с помощью программы [15].

ЭВ мониторинг показателей сердечно-сосудистой системы для испытуемого 1.

В табл. 2 представлены средние уровни САД, ДАД, ЧСС, энтропийные коэффициенты, показатели риск-анализа в различное время дня (утро, день, вечер) и в период до и после 21.02.22. Проведение анализа до и после 21.02.22 обусловлено тем, что по данным анамнеза после 21.02.22 произошло существенное изменение в состоянии здоровья испытуемого 1 вследствие стресса. У испытуемого 1 не было медицинских оснований учитывать влияние на сердечно-сосудистую систему климатических условий, поэтому энтропийный анализ взаимосвязи между входными показателями \mathbf{X} и факторами риска \mathbf{Y} не проводился.

Таблица 2

Результаты ЭВ мониторинга показателей сердечно-сосудистой системы испытуемого 1 в различные временные периоды

Показатель	31.01 – 20.03.22	31.01 – 21.02.22	22.02 – 20.03.22	Утро	День	Вечер
n	84	47	37	39	21	24
Y_1 $M \pm m$ (σ)	153,1 \pm 0,9 (8,28)	149,95\pm0,97 (6,65)	157,0\pm1,4* (8,52)	153,8 \pm 1,2 (7,53)	152,05 \pm 1,89 (8,64)	152,8 \pm 1,9 (9,3)
Y_2 $M \pm m$ (σ)	94,1 \pm 0,76 (6,96)	92,1\pm0,76 (5,21)	96,6\pm1,32** (8,04)	97,2\pm0,91 (5,7)	90,7\pm1,48* (6,78)	92,0\pm1,43^^ (6,99)
Y_3 $M \pm m$ (σ)	72,7 \pm 0,81 (7,45)	71,4 \pm 0,87 (5,97)	74,2 \pm 1,46 (8,85)	72,8 \pm 1,41 (8,81)	73,2 \pm 1,43 (6,55)	71,9 \pm 1,19 (5,85)
$H(Y)_R$	-0,35	-0,23	-0,44	-0,31	-0,63	-0,45
$H(Y)_\sigma$	6,04	5,30	6,37	5,896	5,88	5,88
$H(Y)_K$	4,26	4,26	4,26	4,26	4,26	4,26
$H(Y)_V$	10,30	9,56	10,62	10,15	10,13	10,13
$H(Y)$	9,95	9,32	10,18	9,85	9,5	9,68
$H(Y)_{\text{comp}}$	5,7	5,07	5,92	5,59	5,24	5,425
$P(D)$	0,397	0,171	0,631*	0,503	0,275	0,305
$\delta P(Y_1)$, %	24,5	25,0	20,2	13,2	48,7	58,1
$\delta P(Y_2)$, %	22,05	23,5	13,9	37,7	6,8	11,5
$\delta P(Y_3)$, %	68,4	136,0	55,6	62,5	82,4	49,7

Примечание. M – средняя (арифметическая) величина; m – средняя ошибка средней величины; σ – стандартное отклонение; n – количество значений САД, ДАД, ЧСС; ** – $p < 0,01$ при сравнении представленной группы с предыдущей по временному периоду (анализ проводился для САД, ДАД, ЧСС, $P(D)$); * – $p < 0,001$; ^^ – $p < 0,01$ при сравнении между группами «Утро» / «Вечер» для САД, ДАД, ЧСС; n – количество измерений

Уровни для риск-анализа определим так: оптимальный – среднее арифметическое из всех измерений, пороговые уровни (верхний/нижний) – $\pm\sigma$ (σ – стандартное отклонение), критические уровни (верхний/нижний) – $\pm 2\sigma$. Использование уровней для риск-анализа на основании клинических рекомендаций (например, оптимальный уровень артериального давления 120/80 мм рт. ст., верхние пороговые и критические уровни, соответствующие 1 и 3 степеням артериальной гипертензии и т.д.) в данном случае неудобно, так как из-за высоких значений артериального давления у испытуемого вероятность $P(D)$, например, за весь период будет равна 0,998, что затрудняет проведение анализа.

Анализ по средним величинам показывает, что утром выше средний уровень ДАД в сравнении с дневным (на 7,2%) и вечерним (на 5,6%) временем при неизменных САД и ЧСС. При этом риск-анализ фиксирует существенное снижение $P(D)$ с 50,3% до 27,5%. Изменение энтропии аналогично – $H(Y)_{\text{comp}}$ уменьшилась с 5,59 до 5,24 при существенном снижении энтропии самоорганизации

(с -0,31 до -0,63), что свидетельствует об усилении внутренних взаимосвязей и стабилизации функционирования сердечно-сосудистой системы в дневное время. Более существенное изменение показателей риск-анализа в сравнении с анализом по отдельным подсистемам позволяет выявить более «тонкие» изменения, особенно при недостатке данных (малом числе наблюдений).

После 21.02.22 достоверно увеличились уровни САД (на 4,7%), ДАД (на 4,9%). При этом $H(Y)_{\text{comp}}$ возросла с 5,07 до 5,92 (на 16,7%) с уменьшением $H(Y)_R$ с -0,23 до -0,44 (стабилизация на более «негативном» уровне). Риск возрос еще больше: $P(D)$ увеличилась с 17,1% до 63,1% ($p < 0,001$). Дату 21.02.22, после которой произошло существенное ухудшение показателей сердечно-сосудистой системы, мы знали из данных анамнеза.

Применим далее ЭВ мониторинг для периодов с равным количеством измерений ($n = 30$) и «перекрытием» смежных групп, т.е. группы с номерами измерений 1–30, 16–45, 31–60, 46–75, 61–84. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты ЭВ мониторинга показателей сердечно-сосудистой системы испытуемого 1 для периодов с равным количеством измерений

Показатель	Период 1	Период 2	Период 3	Период 4	Период 5
Интервал	31.01–13.02.22	08.02–20.02.22	14.02–02.03.22	21.02–15.03.22	03.03–20.03.22
n	1–30	16–45	31–60	46–75	61–84
Y_1 $M \pm m$ (σ)	148,25±1,29 (7,05)	150,4±1,33 (7,3)	152,5±1,31 (7,16)	155,5±1,59 (8,72)	159,9±1,3*** (6,37)
Y_2 $M \pm m$ (σ)	91,1±1,04 (5,68)	91,75±0,79 (4,35)	94,05±1,22 (6,71)	96,1±1,59 (8,73)	97,9±1,44 (7,08)
Y_3 $M \pm m$ (σ)	71,9±1,23 (6,74)	72,0±1,15 (6,28)	74,3±1,35 (7,39)	74,75±1,6 (8,78)	71,5±1,69 (8,28)
$H(Y)_R$	-0,28	-0,21	-0,23	-0,5	-0,58
$H(Y)_\sigma$	5,55	5,24	5,82	6,45	5,86
$H(Y)_x$	4,26	4,26	4,26	4,26	4,26
$H(Y)_v$	9,8	9,5	10,08	10,71	10,12
$H(Y)$	9,52	9,29	9,85	10,21	9,54
$H(Y)_{comp}$	5,27	5,04	5,59	5,95	5,28
$P(D)$	0,204	0,198	0,395	0,61	0,599

Примечание. M – средняя (арифметическая) величина; m – средняя ошибка средней величины; σ – стандартное отклонение; n – номера измерений САД, ДАД, ЧСС; *** – $p < 0,05$ при сравнении представленной группы с предыдущей (анализ проводился для САД, ДАД, ЧСС).

При однофакторном анализе (по одному показателю в отдельности) обнаружено только достоверное увеличение САД на 2,8% в группе № 5 относительно периода № 4. Определить момент, когда произошло резкое изменение в системе при анализе по одному показателю в отдельности не представляется возможным. При динамическом энтропийно-вероятностном анализе в периоде 3 зафиксирован рост $H(Y)$ на 10,9% с 5,04 до 5,59. Показатели риск-анализа фиксируют еще более выраженные изменения при переходе из периода № 2 в № 3 – рост $P(D)$ с 19,8% до 39,5%. Уменьшение $H(Y)_R$ с -0,23 в периоде № 3 до -0,5 в периоде № 4 при одновременном росте остальных энтропийных коэффициентов и риска $P(D)$ показывает стабилизацию системы на более «негативном» уровне. Таким образом, метод ЭВ мониторинга в отличие от однофакторного анализа позволяет выявить момент, когда в системе произошел качественный сдвиг (резкое ухудшение) – это середина интервала 14.02–02.03.22, что совпадает, в том числе с данными анамнеза (22.02.2022) (табл. 2).

ЭВ мониторинг показателей сердечно-сосудистой системы для испытуемого 2.

У испытуемого 2 были основания учитывать влияние климатических условий на факторы риска. Поэтому показатели X фиксировались и проводился энтропийный

анализ взаимосвязи между входными показателями X и факторами риска Y . Ввиду ограниченности объема статьи не будем приводить таблицы, аналогичные табл. 2, 3, а представим результаты мониторинга состояния его здоровья в графическом виде (рис. 1–3). Весь диапазон был разбит на 8 интервалов: $k = 1$ (01.11.21 – 20.11.21), $k = 2$ (21.11.21 – 10.12.21), $k = 3$ (11.12.21 – 31.12.21), $k = 4$ (01.01.22 – 20.01.22), $k = 5$ (21.01.22 – 10.02.22), $k = 6$ (11.02.22 – 28.02.22), $k = 7$ (01.03.22 – 20.03.22), $k = 8$ (21.03.22 – 10.04.22). Следует отметить, что испытуемому 2 в начале февраля была сделана операция, не связанная с сердечно-сосудистой системой.

Из рис. 1, а, видно, что энтропии хаотичности, как входных показателей, так и факторов риска, ведут себя достаточно стабильно. Энтропия самоорганизации (рис. 1, б) входных показателей близка к нулю (соответствует их независимости), однако в начале года было некоторое уменьшение, вызванное случайным появлением корреляции между влажностью воздуха и суточным временем фиксации данных (эту корреляцию можно считать нонсенс-корреляцией, обусловленной фактором случайности). Энтропия самоорганизации вначале растет до конца января, а затем начинает стабильно уменьшаться (все три фактора риска становятся взаимно более коррелированными), что мо-

жет быть охарактеризовано как их более согласованное поведение. А одновременное снижение риска (рис. 2, а) позволяет говорить об улучшении функционирования сердечно-сосудистой системы. Влияние САД и ДАД на вероятность $P(D)$ с февраля стало стабильно уменьшаться (рис. 2, б). Скачок роста $\Delta P(Y_k)$ из-за ЧСС вызван увеличением физической нагрузки и к концу анализируемого периода он существенно уменьшился.

Как видно из рис. 3, энтропия взаимосвязи между атмосферным давлением, влажностью воздуха и суточным временем и факторами риска в декабре – январе увеличилась, а с середины февраля стала монотонно уменьшаться (факторы риска в меньшей степени стали зависеть от климатических условий), что также можно характеризовать как улучшение работы сердечно-сосудистой системы.

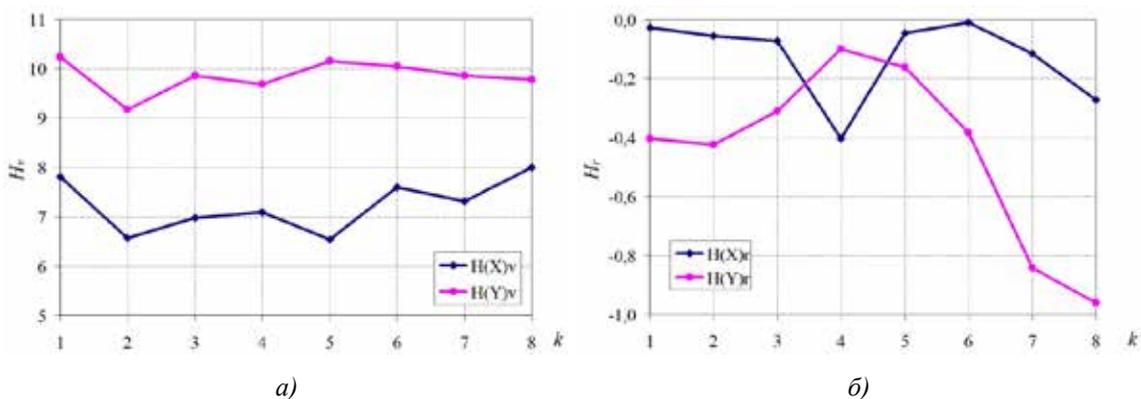


Рис. 1. Значения энтропий для множеств показателей X и Y :
а) энтропии хаотичности $H(X)_v$ и $H(Y)_v$; б) энтропии самоорганизации $H(X)_r$ и $H(Y)_r$

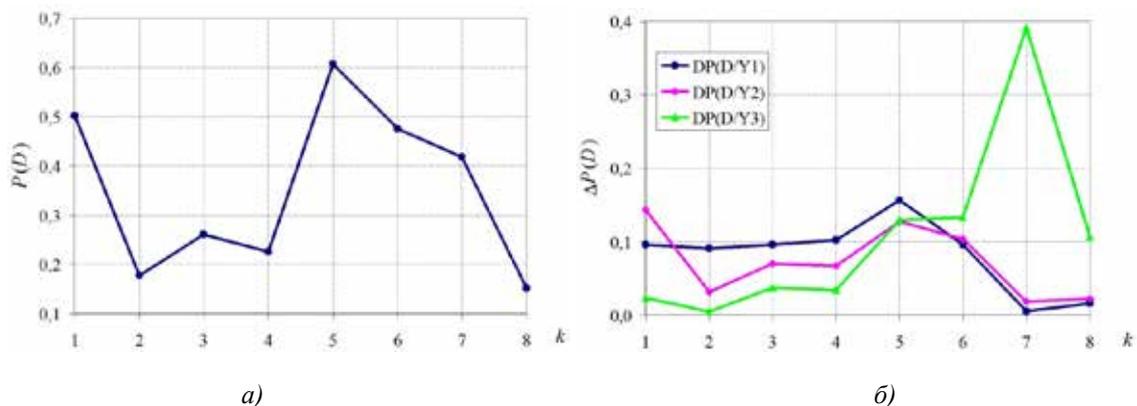


Рис. 2. Риск-анализ сердечно-сосудистой системы по показателям Y : а) значения риска $P(D)$; б) абсолютные изменения риска $\Delta P(Y_k)$ за счет каждого из факторов риска Y_k

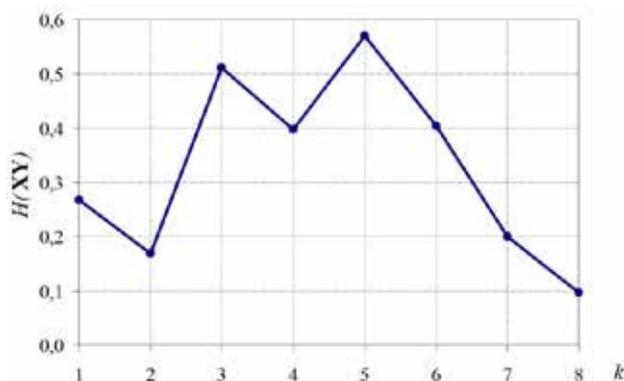


Рис. 3. Значения энтропии взаимосвязи $H(X \cap Y)$

Заключение

1. Индивидуальный энтропийно-вероятностный мониторинг позволяет обнаружить момент существенного изменения функционирования сердечно-сосудистой системы и определить, какие из множества факторов на это повлияли (через анализ энтропии взаимосвязи). Полагаем, что индивидуальный энтропийно-вероятностный мониторинг обладает универсальностью и может использоваться в других областях клинической медицины, особенно в тех, где постоянно с использованием информационных технологий фиксируется большое количество параметров функционирования разных систем, например в функциональной диагностике, в реанимационной практике и др.

2. Наряду с риск-анализом и системно-энтропийным анализом имеется возможность совместного анализа различных исследуемых показателей с множеством входных показателей, оказывающих влияние на состояние здоровья конкретного человека.

3. Методика апробирована на примере сердечно-сосудистой системы. Результаты энтропийно-вероятностного мониторинга согласуются с данными о фактическом состоянии здоровья испытуемых.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-51-00001).

Список литературы

1. Нобелевская речь физиолога Ивана Петровича Павлова (12 декабря 1904, Стокгольм) // Развитие личности. 2014. № 4. С. 101–114.
2. Цинкер М.Ю., Кирьяков Д.А., Камалтдинов М.Р. Применение комплексного индекса нарушения здоровья населения для оценки популяционного здоровья в Пермском крае // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 3 (6). С. 1988–1992.
3. Цветков О.В. Энтропийный анализ данных в физике, биологии и технике. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 202 с.
4. Deutscher G. The Entropy Crisis. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008.
5. Клейнер Г.Б. Системная экономика и системно-ориентированное моделирование // Экономика и математические методы. 2013. Т. 49. № 4. С. 71–93.
6. Кориков А.М., Павлов С.Н. Теория систем и системный анализ. М.: ИНФРА-М, 2017. 288 с.
7. Насонова Н.В. Автоматизированная система комплексного мониторинга факторов риска хронических неинфекционных заболеваний // Медицинская информатика. 2007. № 1 (13). С. 56–67.
8. Тырсин А.Н., Калев О.Ф., Яшин Д.А., Лебедева О.В. Оценка состояния здоровья популяции на основе энтропийного моделирования // Математическая биология и биоинформатика. 2015. Т. 10. Вып. 1. С. 206–219. DOI: 10.17537/2015.10.206.
9. Тырсин А.Н., Калев О.Ф., Яшин Д.А., Сурина А.А. Модель риска многомерной стохастической системы как инструментальный исследования состояния здоровья популяции // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 17. № 4. С. 948–957. DOI: 10.25987/VSTU.2018.17.4.017.
10. Tyrsin A.N., Yashin D.A., Surina A.A. Entropy-probabilistic modeling as a tool for forming key competencies of a doctor. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1691. DOI: 10.1088/1742-6596/1691/1/012162.
11. Профилактика хронических неинфекционных заболеваний: Рекомендации / Председатели рабочей группы по подготовке текста рекомендаций – Бойцов С.А., Чучалин А.Г. М.: Государственный научно-исследовательский центр профилактической медицины, 2013. 40 с.
12. Ардашев А.В., Лоскутов А.Ю. Практические аспекты современных методов анализа variability сердечного ритма. М.: Медпрактика-М, 2011. 126 с.
13. Воронин Н.М. Основы медицинской и биологической климатологии. М.: Медицина, 1981. 351 с.
14. Артериальная гипертензия у взрослых: Клинические рекомендации, разработчик «Российское кардиологическое общество», 2020. 136 с.
15. Тырсин А.Н., Сурина А.А., Геворгян Г.Г. Программный комплекс для риск-анализа гауссовской стохастической системы // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № 2018612937. Правообладатель Тырсин А.Н. Заявл. 09.01.2018; опубл. 01.03.2018, реестр программ для ЭВМ.