

УДК 613.6:551.58

<http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-4-54-61>

© Успенский В.М., 2021 г.

## ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ВНУТРЕННИХ ОРГАНОВ НА ЛЮБОМ ЭТАПЕ ИХ РАЗВИТИЯ

*В. М. Успенский*

Филиал Военно-медицинской академии имени С. М. Кирова, Москва, Россия

Приведены итоги многолетних исследований информационных свойств электрокардиоимпульсов, установлены их свойства, характерные для сигналов импульсной природы, предложены способы информационного анализа электрокардиосигналов с целью диагностики заболеваний внутренних органов на любой стадии развития, защищенные патентами Российской Федерации. Изложены основные этапы технологии информационного анализа электрокардиосигналов с целью диагностики заболеваний внутренних органов. Дано обоснование диагностики этих заболеваний на любом этапе их развития. Получены данные, согласно которым целенаправленные лечебно-профилактические мероприятия на начальной стадии развития заболеваний позволяют обеспечить эффективную профилактику их финальной стадии опасной своими осложнениями для жизни человека.

**Ключевые слова:** морская медицина, информационная функция сердца, электрокардиосигналы, информационный анализ, диагностика заболеваний

Контакт: *Успенский Вячеслав Максимилианович, medddik@mm.st*

© Uspenskiy V.M., 2021

## INNOVATIVE TECHNOLOGY OF INFORMATION ANALYSIS OF ELECTROCARDIOSIGNALS FOR THE PURPOSE OF DIAGNOSTICS OF DISEASES OF INTERNAL ORGANS AT ANY STAGE OF THEIR DEVELOPMENT

*Viacheslav M. Uspenskiy*

Branch of the Kirov Military Medical Academy, Moscow, Russia

Given the results of years of research information on the properties of electrocardiosignals, set their properties, characteristic of the impulse nature, the proposed methods of information analysis of electrocardiosignals to diagnose diseases of internal organs at any stage of development, protected by patents of the Russian Federation. The main stages of the technology of information analysis of electrocardiosignals for the purpose of diagnostics of diseases of internal organs are described. The rationale for the diagnosis of these diseases at any stage of their development is given. Data were obtained according to which targeted therapeutic and preventive measures at the initial stage of disease development can provide effective prevention of their final stage, which is dangerous for human life due to its complications.

**Key words:** marine medicine, heart information function, electrocardiosignals, information analysis, diagnostics of diseases

Contact: *Uspenskiy Vyacheslav Maximilianovich, medddik@mm.st*

**Конфликт интересов:** автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Успенский В.М. Инновационная технология информационного анализа электрокардиосигналов с целью диагностики заболеваний внутренних органов на любом этапе их развития // *Морская медицина*. 2021. Т. 7, № 4. С. 54–61, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-4-54-61>.

**Conflict of interest:** the author have declared no conflict of interest.

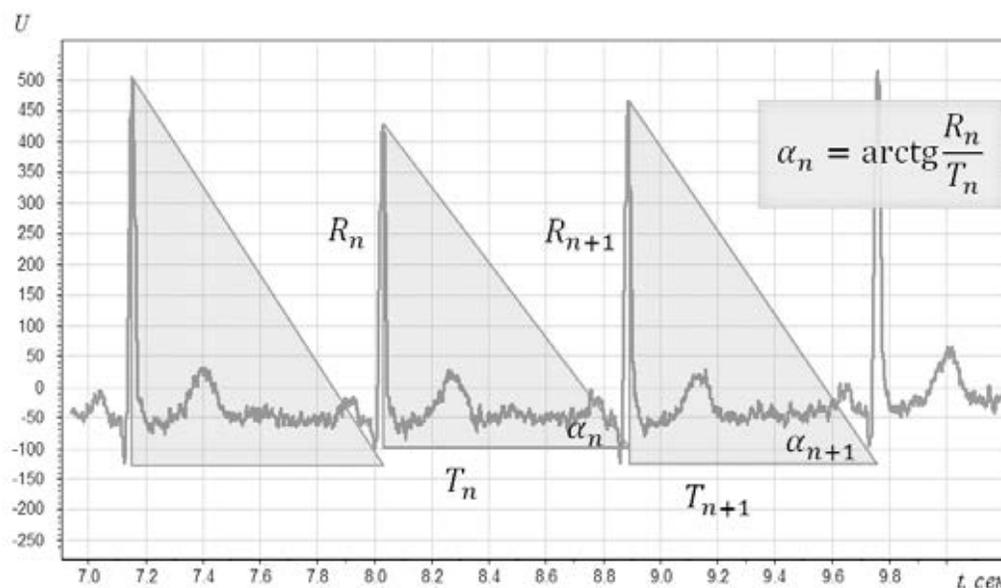
**For citation:** Uspenskiy V.M. Innovative technology of information analysis of electrocardiosignals for the purpose of diagnostics of diseases of internal organs at any stage of their development // *Marine Medicine*. 2021. Vol. 7, No. 4. P. 54–61, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-4-54-61>.

**Введение.** Из физиологии сердца известно, что сердце в процессе сокращений генерирует импульсы электрической, магнитной и гидродинамической природы (пульсовую волну). Китайская медицина более 2000 лет использует пульсовую волну в качестве источника важной информации о состоянии организма и его отдельных органов. Пульсовая диагностика и в настоящее время занимает важное место в китайской медицине [1, с. 511].

Накопленный опыт изучения variability сердечного ритма, подробно изложенный в *Science of the heart* [2, с. 112], свидетельствует, что электрокардиоимпульсы могут быть носителями информации также о состоянии системы регуляции сердца и основных функций организма в норме, при различных

имеющихся заболеваний: сахарного диабета [5, с. 371], ишемической болезни сердца [6, с. 52–53]. Ригидный ритм сердца является более надежным предиктором внезапной смерти не только при ишемической болезни сердца [6, с. 52–53], но и от других причин [7, с. 899–908; 8, с. 878–883]. Исследование variability сердечного ритма оказалось полезным при контроле здоровья спортсменов [9, с. 143] и людей в период стресса [10, с. 221].

Подробно исследуя свойства других параметров кардиоимпульсов (рис. 1), мы обнаружили вероятностно variability динамику не только интервалов времени между кардиоимпульсами, но и других параметров измерения электрокардиоимпульсов: их амплитуды и «фазовых углов» (рис. 2).

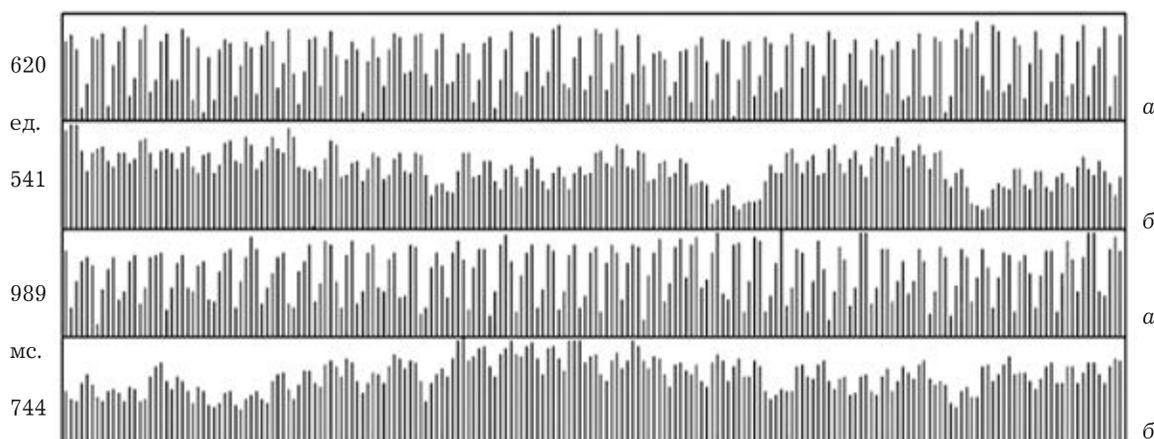


**Рис. 1.** Параметры измерения последовательных кардиоциклов: амплитуды  $R_n$ ,  $R_{n+1}$ , интервалы  $T_n$ ,  $T_{n+1}$  и «фазовые углы»  $\alpha_n$ ,  $\alpha_{n+1}$ , отражающие фазовое отклонение каждого последующего электрокардиоимпульса по отношению к предыдущему

**Fig. 1.** Parameters for measuring successive cardiocycles: amplitudes  $R_n$ ,  $R_{n+1}$ , intervals  $T_n$ ,  $T_{n+1}$  and «phase angles»  $\alpha_n$ ,  $\alpha_{n+1}$  reflecting the phase deviation of each subsequent electrocardioimpulse relative to the previous one

психоэмоциональных состояниях и заболеваниях. Высокая изменчивость сердечного ритма свидетельствует об эффективной адаптации человека к различным стрессовым ситуациям, о его психической устойчивости и поведенческой целесообразности [3, с. 643–652; 4, с. 183–214]. Напротив, низкая variability сердечного ритма сочетается со снижением адаптивных способностей, с повышением риска психических расстройств, неадекватности поведения, нарушения сна, с неблагоприятным течением

Вероятностно-variabelный характер динамики амплитуды желудочкового комплекса *QRS*, интервалов времени между ними (variabelности сердечного ритма) и фазовых отклонений относительно друг друга («фазовые углы») — является свойством сигналов импульсной природы в технических информационных системах связи. Вероятностная variability параметров импульсов возникает в результате закладки в них информации с помощью модуляции (изменения) по определенному правилу



**Рис. 2.** Амплитудо- и интервалограммы здорового человека: *a* — амплитудограмма; *б* — интервалограмма  
**Fig. 2.** Amplitude and interval diagrams of a healthy person: *a* — amplitude diagram; *б* — interval diagram

параметров стандартных импульсов, что дало нам основание рассматривать кардиоимпульсы в качестве сигналов, а сердце — органа, обладающего информационной функцией.

Исследования в этом направлении, начатые в 1988 г. на базе Военно-медицинской академии (Санкт-Петербург), к 2008 г. завершились обоснованием информационной функции сердца [11, с. 4–13; 12, с. 116; 13, с. 383–386], созданием на ее основе технологии информационного анализа электрокардосигналов и диагностической системы «Скринфакс», позволяющей осуществлять индикацию заболеваний внутренних органов человека на любом этапе их развития. Итоги апробации технологии изложены в монографии [14, с. 252].

Решающую роль в проведенной работе сыграло биофизическое обоснование технических требований к электрокардиографу, позволяющему регистрировать электрокардиограмму, в которой электрокардиоимпульсы проявляют все признаки сигналов импульсной природы. Исследование биофизических свойств кардиоимпульсов, регистрируемых обычными широко распространенными электрокардиографами, выявило ряд недостатков принципиального значения.

Во-первых, недостаточную помехозащищенность на протяжении всего тракта движения электроимпульса от электрода до электрокардиографа (кардиоблока), недостаточную помехозащищенность самого электрокардиографа.

Во-вторых, узкая полоса входного сигнала в пределах, как правило, от 0,5 до 120 Гц «обрезала» вариабельность амплитуды электрокардиоимпульсов и создавала ложное впечатление об ее отсутствии. Расширение частотного

диапазона входного сигнала от 0,1 до 500–1000 Гц составило важное техническое требование к электрокардиографу, предназначенному для информационного анализа электрокардосигналов [15].

В-третьих, низкий уровень частоты квантования (не более 1000 Гц), который не обеспечивал необходимой чувствительности при измерении амплитуды электрокардиоимпульсов и интервалов времени между ними.

С учетом изложенного сформулированы основные технические требования стандарта электрокардиографа (кардиоблока) съема электрокардиограммы, приемлемые для информационного анализа электрокардосигналов, которые изложены в монографии [14, с. 252].

**Технология информационного анализа электрокардосигналов.** В технических средствах связи, как утверждает С. Голдман [16, с. 446], несмотря на случайный характер динамики основных параметров сигналов, ближайшие сигналы, в первую очередь, предшествующий и последующий могут обладать семантической связью. В информационных системах живых организмов в любом информационном сообщении, представленном случайным процессом, по нашему мнению, также должны присутствовать семантические связи между ближайшими сигналами. Данное допущение принято в качестве базового постулата информационного анализа кардосигналов, согласно которому, сообщения, закладываемые в поток кардосигналов, должны обладать семантическими связями между ближайшими сигналами.

Информационный анализ электрокардосигналов основан на идее дискретизации (кодирования) сигнала. Кардосигнал преобразуется

в кодограмму, представляющую собой последовательность символов. Каждый символ кодирует тип взаимосвязи между двумя соседними кардиоциклами. Кодограмма близка по своей сути к тексту на естественном языке, в котором цепочки буквенных символов образуют слова, обладающие определенной семантикой. Для построения алгоритмов диагностики к полученным кодограммам применены методы анализа символьных последовательностей и методы статистического (машинного) обучения аналогичные тем, которые широко используются в вычислительной лингвистике для классификации текстов на естественном языке, а также в биоинформатике для классификации нуклеотидных и аминокислотных последовательностей.

Параметры измерения определяются известными в теории и практике связи видами модуляции [17, с. 320; 18, с. 704; 19, с. 400]. Применительно к электрокардиосигналам (рис. 1) они соответствуют: амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) — динамика амплитуды  $R_n$  желудочкового комплекса  $QRS$  кардиоциклов; интервало-импульсной модуляции (ИИМ) или частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) — динамика интервалов времени  $T_n$  между  $tR_n$  и  $tR_{n+1}$  желудочковых комплексов  $QRS$  и фазово-импульсной модуляции (ФИМ) — динамика «фазового угла» арктангенса  $\alpha_n = \arctg$  отношения амплитуды  $R_n$  к интервалу времени  $T_n(R_n/T_n)$ .

Абсолютные показатели основных параметров электрокардиоимпульсов необходимы только для определения их динамики путем сравнения в последовательном режиме зарегистрированных электрокардиосигналов. В способах информационного анализа электрокардиосигналов, защищенных патентами Российской Федерации (Успенский В.М.: RU 2159574 С1, 27.11.2000; RU 2163088 С1, 20.02.2001; RU 221658 С1, 10.09.2003; RU 2407431 С1, 27.12.2010), нами предложено кодирование как процесс преобразования качественной динамики (больше-меньше) основных параметров электрокардиосигналов в дискретную последовательность символов, итогом которого является семантический текст, называемый кодограммой.

Для осуществления кодирования предложен алфавит символов определенной мерности и семантики. Символ кодирования представляет собой отдельный дискретный буквенный или цифровой символ элементарной исходной

единицы информации, который может быть одно-, двух-, трех- и более мерным. Размерность символа определяет число кодируемых параметров кардиосигналов:  $R_n$  — амплитуда желудочковых комплексов  $QRS$ ,  $T_n$  — интервал времени между  $tR_n$  и  $tR_{n+1}$  ( $T_n = tR_{n+1} - tR_n$ ) и  $\alpha_n = \arctg(R_n/T_n)$  — фазовый угол. Одномерные символы отражают динамику только одного параметра. Двумерные символы предусматривают варианты динамики сочетаний двух параметров — амплитуды комплекса  $QRS$  и интервала времени  $T_n$  между ними или амплитуды комплекса  $QRS$  и фазового угла. Трехмерные символы — варианты сочетания динамики всех трех параметров: амплитуды комплекса  $QRS$ , интервала времени  $T_n$  между ними и фазового угла.

Набор символов составляет алфавит символов кодирования, количество которых определяется тем числом, которое необходимо для достижения полноты преобразования всех возможных вариантов пространственно-временной динамики основных параметров кардиосигналов (таблица).

Итогом кодирования является первичная (исходная) кодограмма, которую следует рассматривать в качестве кодового эквивалента информации, закладываемой в электрокардиосигналы. В качестве примера на рис. 3 представлена первичная кодограмма при кодировании с помощью трехмерных символов в соответствии с таблицей.

Для прочтения кодограммы, если использовать лингвистический принцип прочтения текста, необходимо определить в ней слова, совокупность которых составляет семантику заложенной информации в электрокардиосигналы. Слова должны состоять из нескольких символов кодирования. С этой целью необходимо структурирование первичной кодограммы на двух-, трех-, четырех- и более членные комбинации символов.

Структурирование первичной кодограммы осуществляется процедурой формирования  $n$ -членных: двух-, трех-, четырех- и более членных комбинаций символов в окне, которое затем последовательно перемещается на один символ от начала до конца первичной кодограммы (рис. 3). Последующий подсчет полученных комбинаций символов и распределение их, согласно с частотой встречаемости в первичной кодограмме, позволяет получить структурированную (вторичную) кодограмму (рис. 4).

Таблица

Варианты соотношения динамики амплитуды  $R_n$ , интервала времени  $T_n$ , arctg угла  $\alpha_n$  и их символы

Table

Variants of the ratio of the dynamics of the amplitude  $R_n$ , time interval  $T_n$ , arctg angle  $\alpha_n$  and their symbol

Параметры комплекса QRS	СИМВОЛЫ					
	A	B	C	D	E	F
$R_n$	+*	-*	+	-	+	-
$T_n$	+	-	-	+	+	+
arctg $\alpha_n$	+	-	+	-	-	+

\* Увеличение (+) или уменьшение (-) параметра комплекса QRS последующего электрокардиосигнала по отношению к аналогичному параметру предыдущего электрокардиосигнала.

\* Increase (+) or decrease (-) the parameter of the QRS complex of the subsequent electrocardiosignal in relation to the analogous parameter of the previous electrocardiosignal.

Пациент: П-ва В.И.



Рис. 3. Первичная кодограмма. Символы кодирования трехмерные: динамика амплитуды  $R_n$ , интервала времени между  $T_n$ , и arctg угла  $\alpha_n$

Fig. 3. Primary codogram. Encoding symbols are three-dimensional: dynamics of the amplitude  $R_n$ , the time interval between  $T_n$ , and arctg of the angle  $\alpha_n$

Структурирование первичной кодограммы на комбинации символов не следует рассматривать механическим процессом. Ключом к информационному анализу исходной (первичной) кодограммы является допущение, сделанное нами на основе работы С. Голдман [16], со-

гласно которому в биологических системах в любом информационном потоке существуют семантические связи между ближайшими сигналами. Такое свойство открывает возможность выявления наиболее устойчивых и часто повторяющихся комбинаций символов, кото-

Пациент: П-ва В.И.

1. FFA - 42	17. EFF - 10	33. CEC - 6	49. EAC - 3
2. FAA - 33	18. DAA - 10	34. ADB - 5	50. DDA - 3
3. AFF - 32	19. ECF - 9	35. FFE - 5	51. CAC - 3
4. AAF - 30	20. FFC - 9	36. EBF - 5	52. EDF - 3
5. ADF - 18	21. FEA - 9	37. CFD - 5	53. EFB - 3
6. FCA - 18	22. DFC - 8	38. AFB - 4	54. DBA - 3
7. ACF - 17	23. ABF - 8	39. AAE - 4	55. FCC - 2
8. AAD - 15	24. AAB - 8	40. CFC - 4	56. AFC - 2
9. CFF - 14	25. FCE - 8	41. CAE - 4	57. EAA - 2
10. AEF - 13	26. AEB - 7	42. DAC - 4	58. CED - 2
11. FDA - 13	27. DFD - 7	43. DBF - 4	59. CAA - 2
12. FAE - 12	28. ACD - 6	44. BFC - 4	60. BCA - 2
13. FAC - 12	29. CDF - 6	45. CFB - 4	61. BBA - 2
14. FBA - 11	30. DFA - 6	46. AED - 3	62. DFF - 2
15. BFA - 11	31. CAF - 6	47. FFF - 3	63. BDA - 2
16. BAA - 11	32. CAD - 6	48. FBC - 3	64. DAE - 2

Рис. 4. Структурированная на трехчленные комбинации символов кодограмма, полученная: а — путем перемещения окна трехчленных комбинаций символов последовательно на один символ от начала до конца первичной кодограммы (см. рис. 3); б — подсчета одинаковых комбинаций символов и распределение их с учетом частоты встречаемости (комбинации символов, встречавшиеся менее двух раз не учтены)

Fig. 4. Structured on the three combinations of symbols catagramma obtained: a — by moving the window of the three combinations of symbols sequentially one character from beginning to end primary codogram (fig. 3); б — counting of the same symbol combinations and their distribution with respect to frequency of occurrence (combination of symbols occurring less than twice are not included)

рые могут соответствовать значимой специфической семантике сообщения, заложенного в электрокардиосигналы.

Многолетняя практика кодирования электрокардиосигналов и поиск устойчивых комбинаций символов подтвердили обоснованность нашего допущения о семантических связях между ближайшими символами кодирования. Устойчивыми оказались двух- и трехчленные комбинации символов. Напротив, повторяемость четырех- и более членных комбинаций прогрессивно падает по мере увеличения в них  $n$ -членности символов. Наиболее приемлемыми для информационного анализа оказались трехчленные комбинации, количество возможных вариантов которых составляет 216.

Сравнение структурированных кодограмм людей с учетом их физиологических состояний, наличия тех или иных заболеваний открывает возможность получения специфичных эталонных кодограмм (кодовых портретов, кодов), представляющих собой совокупности  $n$ -членных комбинаций символов со 100%-ной встречаемостью в однородной группе обследованных.

Эталонная кодограмма в каждой группе обследованных определяется на основе сравнительного анализа вторичных структурированных кодограмм всех людей, входящих в референтную группу и в соответствии с результатами стандартизации электрокардиосигналов. Для получения специфичных эталонных кодограмм отдельных заболеваний из набора кодовых комбинаций 100%-ной встречаемости при этих заболеваниях исключаются кодовые комбинации, входящие в эталонную кодограмму здоровых людей. При этом практика сравнительных исследований различных способов кодирования с использованием символов разной мерности свидетельствует, что наиболее целесообразным и эффективным способом кодирования является кодирование с использованием трехмерных символов (см. таблицу).

Получение эталонных кодограмм предусматривает формирование референтных групп здоровых людей и больных с определенными заболеваниями, верифицированными на основе всестороннего предварительного обследования с использованием современных клинических и лабораторно-инструментальных методов исследования. Тщательная верификация нормы и заболеваний — необходимое условие для получения высокоспецифичных эталонных кодограмм.

Основные этапы информационного анализа электрокардиосигналов с целью диагностики заболевания изложены в работах [12, с. 116; 13, С. 383–386; 14, с. 252]. В совокупности они составляют измерительно-диагностическую модель технологии информационного анализа электрокардиосигналов, которая включает следующие этапы.

1-й этап: измерение амплитуд ( $R_n$ ) желудочковых комплексов  $QRS$  электрокардиограммы с точностью до 5 мкВ, интервалов времени ( $T_n$ ) между комплексами  $QRS$  с точностью до 0,01 мс и «фазовых углов»  $\alpha_n = \arctg(R_n/T_n)$ .

2-й этап: сравнение данного набора параметров каждого последующего сигнала с аналогичными параметрами предыдущего, последовательное кодирование возможных вариантов сравнения символами А, В, С, D, Е, F в массиве 600 кардиоциклов и получение первичной кодограммы (см. рис. 3).

3-й этап: получение вторичной структурированной кодограммы методом последовательного перемещения на один символ окна, включающего, например, три символа кодирования от начала до конца первичной кодограммы на трехчленные комбинации с последующим подсчетом одинаковых комбинаций символов и ранжированием их с учетом частоты встречаемости (см. рис. 4).

4-й этап: выделение во вторичных кодограммах референтных групп здоровых людей и больных с отдельными заболеваниями комбинаций символов 100%-ной встречаемости и получение на их основе эталонных (референтных) «кодовых образов» нормы и отдельных заболеваний.

5-й этап: сравнение вторичной кодограммы обследуемого с референтными кодовыми эталонами нормы и заболеваний открывает возможность их диагностики при наличии в составе структурированной кодограммы всех комбинаций символов, входящих в специфический эталон нормы или диагностируемого заболевания.

Группа математиков Вычислительного центра им. А. А. Дородницына РАН и Московского физико-технического института (государственный университет) под руководством доктора физико-математических наук К. В. Воронцова в 2013–2014 г. осуществили математическую экспертизу технологии информационного анализа электрокардиосигналов. В результате проведенной работы получено статистическое

обоснование самой возможности диагностики многих заболеваний внутренних органов по электрокардиограмме, подтвержден высокий уровень чувствительности и специфичности диагностических эталонов диагностируемых заболеваний [14, с. 252].

Длительное более 15 лет использование диагностических систем, основанных на технологии информационного анализа электрокардиосигналов, дало дополнительные факты существования информационной функции сердца и утвердило в обоснованности нового метода диагностики заболеваний внутренних органов [14, с. 252].

Во-первых, электрокардиоимпульсы, а также импульсы магнитной и гидродинамической природы, генерируемые одновременно с электрокардиоимпульсами, обладают свойствами сигналов и несут во внутреннюю среду организма программу нормы, различных заболеваний и состояний. Закладка информации в кардиоимпульсы осуществляется механизмом амплитудной, частотной и фазовой модуляции соответствующих параметров во время их генерации синусным узлом.

Во-вторых, «кодовые образы», полученные на финальной стадии при наличии специфического патоморфологического субстрата заболеваний и используемые в качестве диагностических эталонов, оказались высоко специфичными (более 90%). При этом они позволяют осуществлять диагностику на любом этапе развития в том числе на этапе, когда симптомы заболевания отсутствуют. В частности, длительное многолетнее наблюдение 53 пациентов с кодовыми эталонами заболеваний, но без соответствующего им специфического патологического субстрата (так называемый «ложноположительный» результат диагностики) при отказе с их стороны в связи с недоверием к методике от осуществления мер профилактики и пред-

упредительного лечения в сроки от 2 до 8 лет подтвердило формирование финальной стадии этих заболеваний. Напротив, целенаправленная специфическая первичная профилактика и предупредительное лечение 256 аналогичных пациентов на протяжении 10 лет в подавляющем большинстве случаев (217 — 84,7%) эффективно блокировали развитие финальной стадии диагностированных заболеваний. Приведенные факты свидетельствуют о том, что диагностический кодовый эталон болезни, по-видимому, является кодовым образом всей программы заболевания. Его выявление в кодограмме пациента позволяет осуществить специфическую диагностику заболевания на начальном этапе развития, т. е. до стадии возникновения специфического патоморфологического субстрата.

**Заключение.** Современная медицина диагностирует заболевания внутренних органов, как правило, на финальном этапе их развития, когда возможны смертельные осложнения. На основе теории информационной функции сердца и технологии информационного анализа электрокардиосигналов впервые в мировой практике предлагается диагностика наиболее распространенных среди населения и опасных для жизни человека заболеваний внутренних органов в любой стадии развития, в том числе на этапе появления программы заболевания без признаков реализации. Диагностика заболеваний внутренних органов на ранних этапах их развития впервые создает реальные условия для проведения индивидуальной первичной специфической профилактики и предупредительного лечения с целью предотвращения развития финальной стадии. Теория информационной функции сердца и технология информационного анализа электрокардиосигналов могут составить теоретическую и методическую основу первичной профилактики (профилактической медицины) заболеваний внутренних органов.

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Нгуен Ван Нги. *Традиционная китайская медицина. Патогенез заболеваний. Диагностика. Терапия*. М.: Тейхарт-плаз, 2000. 511 с. [Nguyen Van Ngi. *Traditional Chinese medicine. The pathogenesis of the diseases. Diagnostics. Therapy*. Moscow: Publishing house Tehart-Plaz, 2000, 511 p. (In Russ.)].
2. *Science of the heart*. Vol. 2. Exploring the Role of the Heart in Human Performance / Authored by Rollin McCraty, Ph.D. Director of Research, HeartMath Research Center, 2015. 112 p.
3. Berntson G.G. et al. Cardiac autonomic balance versus cardiac regulatory capacity // *Psychophysiology*. 2008. Vol. 45, No. 4. P. 643–652.
4. Beauchaine T. Vagal tone, development, and Gray's motivational theory: toward an integrated model of autonomic nervous system functioning in psychopathology // *Dev. Psychopathol.* 2001. Vol. 13, No. 2. P. 183–214.

5. Ewing D.J. Practical bedside investigation of diabetic autonomic failure // *Autonomic Failure. A Textbook of Clinical Disorders of the Autonomic Nervous System* / R. Bannister (ed.). Oxford: Oxford Univ. Press, 1984. 371 p.
6. Wolf M.M. et al. Sinus arrhythmia in acute myocardial infarction // *Medical Journal of Australia*. 1978. No. 2. P. 52–53.
7. Dekker J.M. et al. Heart rate variability from short electrocardiographic recordings predicts mortality from all causes in middle-aged and elderly men. The Zutphen Study // *Amer. J. Epidemiol.* 1997. Vol. 145, No. 10. P. 899–908.
8. Tsuji H. et al. Reduced heart rate variability and mortality risk in an elderly cohort. The Framingham Heart Study // *Circulation*. 1994. Vol. 90, No. 2. P. 878–883.
9. Баевский Р.М., Мотылянская Р.Е. *Ритм сердца у спортсменов*. М.: Физкультура и спорт, 1986. 143 с. [Baevsky R.M., Motylyanskaya R.E. *Heart rhythm in athletes*. Moscow: Physical culture and sport, 1986, 143 p. (In Russ.)].
10. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. *Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе*. М.: Наука, 1984. 221 с. [Baevsky R.M., Kirillov O.I., Kletskin S.Z. *Mathematical analysis of changes in heart rate under stress*. Moscow: Publishing house Nauka, 1984, 221 с. (In Russ.)].
11. Успенский В.М. Информационная функция сердца // *Клиническая медицина*. 2008. Т. 86, № 5. С. 4–13. [Uspenskiy V.M. information function of the heart. *Clinical medicine*, 2008, Vol. 86, No. 5, pp. 4–13 (In Russ.)].
12. Успенский В.М. *Информационная функция сердца. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов методом информационного анализа электрокардиосигналов*. М.: Экономика и информатика, 2008. 116 с. [Uspenskiy V.M. *Information function of the heart. Theory and practice of diagnostics of internal organs diseases by the method of information analysis of electrocardiosignals*. Moscow: Publishing house Economics and Informatics, 2008, 116 p. (In Russ.)].
13. Uspenskiy V.M. Information Function of the Heart. A Measurement Model // *Measurement*. 2011. 8<sup>th</sup> International Conference. Smolenice, Slovakia, April 27–30, 2011. P. 383–386.
14. Успенский В.М. *Информационная функция сердца. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов методом информационного анализа электрокардиосигналов*. М.: Планета, 2016. 252 с. [Uspenskiy V.M. *Information function of the heart. Theory and practice of diagnostics of diseases of internal organs by the method of information analysis of electrocardiosignals*. Moscow: Publishing house Planeta, 2016, 252 p. (In Russ.)].
15. Uspenskiy V.M. Information Function of the Heart. Biophysical substantiation of technical requirements for electrocardioblock registration and measurement of electrocardiosignals parameters acceptable for information analysis to diagnose internal diseases // *Joint International IMEKO TC1+TC7+TC13 Symposium*. August 31–September 2, 2011, Jena, Germany.
16. *Stanford Goldman. Information Theory* / пер. с англ. М.: ИЛ, 1957. 446 с.
17. Дмитриев В.И. *Прикладная теория информации*. М.: Высшая школа, 1989. 320 с. [Dmitriev V.I. *Applied information theory*. Moscow: Publishing house Higher school, 1989, 320 p. (In Russ.)].
18. Денисенко А.Н. *Сигналы. Теоретическая радиотехника*. Справочное пособие. М.: Горячая линия — Телеком, 2005. 704 с. [Denisenko A.N. *Signals. Theoretical radio engineering*. Reference guide. Moscow: Publishing house Hotline — Telecom, 2005, 704 p. (In Russ.)].
19. Тихонов В.И., Шахтарин Б.И., Сизых В.В. *Случайные процессы. Примеры и задачи*. Т. 5. Оценка сигналов, их параметров и спектров. Основы теории информации. 2-е изд. М.: Горячая линия — Телеком. 2019. 400 с. [Tikhonov V.I., Shakhtarin B.I., Szykh V.V. *Random Processes. Examples and tasks*. Vol. 5. Estimation of signals, their parameters and spectra. Fundamentals of information theory. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: Publishing house Hotline-Telecom, 2019, 400 p. (In Russ.)].

Поступила в редакцию/Received by the Editor: 11.10.2021 г.

#### Сведения об авторе:

Успенский Вячеслав Максимович — доктор медицинских наук, профессор кафедры терапии неотложных состояний филиала федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 107392, Москва, Малая Черкизовская ул., д. 7; действительный член Российской академии космонавтики имени К.Э.Циолковского и Международной академии наук информации, информационных процессов и технологий; Москва; e-mail: medddik@mm.st.