

## РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА БИОФИЗИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЧЕЛОВЕКА

М.Е. Рулев<sup>1,✉</sup>, В.М. Ачильдиев<sup>1, 2</sup>, Ю.П. Батырев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

maxxim98@yandex.ru

Изложены основы метода информационного анализа электрокардиосигналов и указаны разработки на его основе. Представлена блок-схема электросейсмокардиоблока, указаны особенности его конструкции и функциональности. Перечислены исследуемые биофизические сигналы и отмечены их свойства. Обоснован выбор параметров для первичной обработки биофизических сигналов и предложена методика их вычисления. Установлено, что во временной области рационально использовать такие параметры кардиоциклов, как амплитуда, период и площадь. Приведены результаты экспериментов, проведенных над группой пациентов, в целях выявления наиболее показательных параметров кардиоциклов. Предложены способы визуализации и оценки вариабельности кардиоциклов на основе фазового портрета по Такенсу. Выявлено, что на фазовой плоскости точки, соответствующие периодам кардиоциклов, аппроксимируются с помощью эллипса. Определено, что наиболее показательными параметрами эллипса, отражающими вариабельность кардиоциклов, являются площадь, малая полуось и периметр.

**Ключевые слова:** электрокардиография, сейсмокардиография, гирокардиография, микромеханические датчики, фазовый портрет

**Ссылка для цитирования:** Рулев М.Е., Ачильдиев В.М., Батырев Ю.П. Регистрация и обработка биофизических сигналов для неинвазивной диагностики заболеваний человека // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 3. С. 137–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-137-146

К 2022 г. отмечается стремительное развитие методов неинвазивной диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы в целом, и внутренних органов в частности. На основе информационного анализа вариабельности сердечного ритма, по данным электрокардиографии высокого разрешения, разработаны и исследуются методы неинвазивной диагностики.

Одним из методов скрининга заболеваний внутренних органов человека является информационный анализ электрокардиограмм (ЭКГ) на основе теории информационной функции сердца В.М. Успенского [1]. Данный метод реализован и апробирован в течение 15 лет в диагностической системе «Скринфакс» [2], выявляющей более 30 заболеваний на любой стадии их развития, в том числе на начальном доклиническом этапе и при скрытом бессимптомном течении, в частности аденому простаты, гастрит, гипертонию и желчнокаменную болезнь, злокачественные новообразования, ишемическую болезнь сердца, сахарный диабет, язву желудка и др.

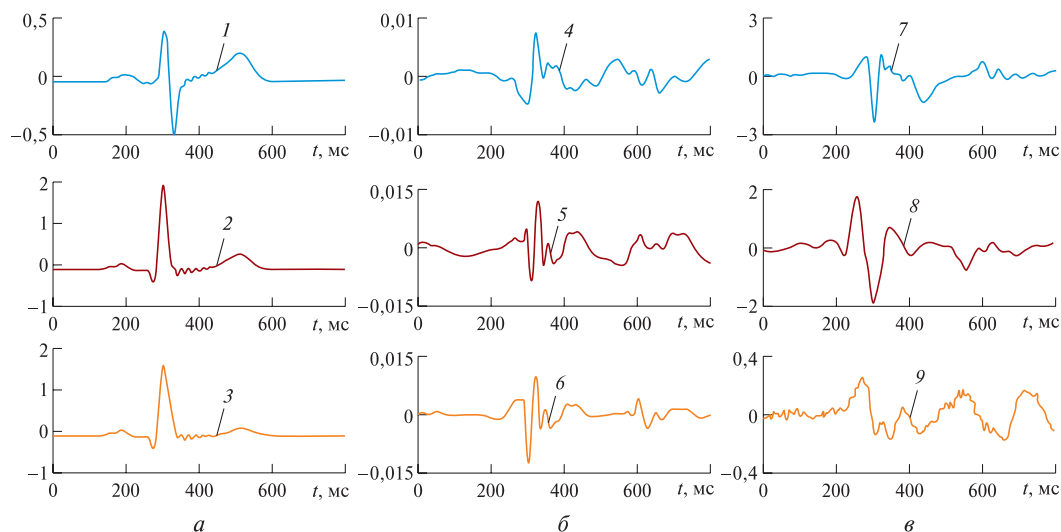
Для расширения списка заболеваний и достоверности диагностики разработан электрокардиоблок (ЭКБ) высокого разрешения [3]. Проведение новых исследований на группах пациентов, усовершенствование программного и аппаратного обеспечения уже позволили расширить до 58 перечень выявляемых заболеваний.

На основе ЭКБ высокого разрешения разработан дистанционный диагностический комплекс (ДДК), включающий в себя удаленный сервер для обработки данных. Он позволит проводить обследования большой группы пациентов одновременно и осуществлять диагностику дистанционно [4].

Наряду с регистрацией электрокардиосигналов с помощью трехосного блока микромеханических акселерометров (ММА) и гироскопов (ММГ) возможна регистрация угловых на гирокардиограмме (ГКГ) и линейных на сейсмокардиограмме (СКГ) колебаний грудной клетки (рис. 1).

Для регистрации СКГ и ГКГ был разработан сейсмокардиоблок [5, 6], содержащий трехосные ММА и ММГ с низкими уровнями внутренних шумов. При сопряжении данного блока с ЭКБ высокого разрешения появляется возможность синхронной регистрации кардиосигналов с частотой 1000 Гц, что необходимо для использования метода информационного анализа кардиосигналов В.М. Успенского [1].

Сейсмо- и гирокардиосигналы содержат колебания, вызванные как сердцебиением, так и работой других внутренних органов, и являются интегральными сигналами в отличие от ЭКГ, поэтому совместная обработка электро-, сейсмо- и гирокардиосигналов позволит осуществлять комплексный анализ, что приведет к еще большему расширению списка диагностируемых заболеваний и повысит достоверность их выставления [7, 8].



**Рис. 1.** Усредненные кардиоциклы электро- (а), сейсмо- (б) и гирокардиограмм (г): 1 — первое отведение ЭКГ; 2 — второе отведение ЭКГ; 3 — третье отведение ЭКГ; 4 — СКГ, регистрируемая вдоль оси  $x$ ; 5 — СКГ, регистрируемая вдоль оси  $y$ ; 6 — СКГ, регистрируемая вдоль оси  $z$ ; 7 — ГКГ, регистрируемая вдоль оси  $x$ ; 8 — ГКГ, регистрируемая вдоль оси  $y$ ; 9 — ГКГ, регистрируемая вдоль оси  $z$

**Fig. 1.** Averaged cardiocycles of electro- (a), seismo- (b) and gyrocardiograms (g): 1 — first ECG limb lead; 2 — the second limb lead of an ECG; 3 — the third limb lead of an ECG; 4 — SCG recorded along the  $x$  axis; 5 — SCG recorded along the  $y$  axis; 6 — SCG recorded along the  $z$  axis; 7 — MCG recorded along the  $x$  axis; 8 — MCG recorded along the  $y$  axis; 9 — MCG recorded along the  $z$  axis

## Цель работы

Цель работы — рассмотрение основных методов цифровой обработки таких биофизических сигналов, как ЭКГ, СКГ и ГКГ, применяемых при неинвазивной диагностике функционального состояния человека.

## Объекты и методы исследования

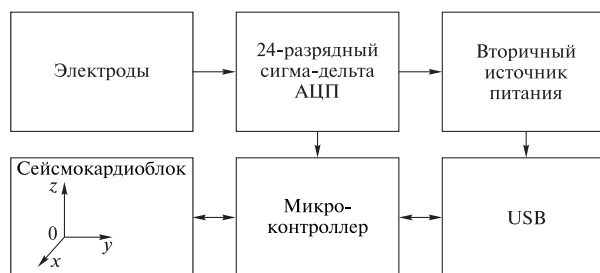
Согласно теории информационной функции сердца В.М. Успенского, амплитуды и интервалы кардиоимпульсов подвергаются амплитудной и частотно-фазовой модуляциям под воздействием сложного комплекса взаимосвязанных процессов в организме. Наблюдаемая динамика кардиоимпульсов носит иррегулярный характер, за которым скрывается структурированная совокупность различных процессов, в том числе патологических. Механизм модуляции — единый для электрических и механических импульсов, генерируемых сердцем [1].

Метод информационного анализа ЭКГ В.М. Успенского включает в себя следующие этапы [9]:

- регистрация ЭКГ высокого разрешения в течение 6...10 мин для получения 600 кардиоциклов;
- предварительная обработка данных: определение пиков ЭКГ, вычисление значений и приращений амплитуды QRS-комплекса —  $R_n$ , интервалов между соседними  $R$ -пиками  $T_n$  и «фазового угла»  $\alpha_n = \arctg(R_n / T_n)$ ;
- дискретизация: кодирование знаков приращений параметров символами А, В, С, D, Е, F;

- векторизация: преобразование кодограммы в вектор частот, используя триграммы;
- постановка диагноза: сравнение полученных результатов с базой заболеваний.

Набор эталонных кодограмм, специфичных для здоровых людей и больных с определенными заболеваниями, составляет базу диагностических эталонов. База данных эталонов, расширяемая за счет накопления новых данных обследований групп пациентов, имеет решающее значение в диагностическом процессе при определении количества заболеваний [1].



**Рис. 2.** Блок-схема электросейсмокардиоблока  
**Fig. 2.** Block diagram of the electroseismocardioblock

Для проведения исследований и регистрации кардиосигналов был использован электросейсмокардиоблок (ЭСКБ) [10, 11] (рис. 2). В состав ЭСКБ входят следующие элементы:

- ЭКБ высокого разрешения, способный регистрировать ЭКГ с частотой от 1 до 4 кГц и разрешением 0,2 мкВ;
- электроды, предназначенные для съема ЭКГ по методу Эйтховена [12, 13];

– микроконтроллер, с помощью которого обеспечивается высокая частота передачи и синхронизация данных;

– сейсмокардиоблок (СКБ) на основе МЭМС гироскопов и акселерометров;

– прецизионные вторичные источники питания и малощумящие операционные усилители.

Регистрация СКГ и ГКГ проводится одновременно по трем проекциям и для СКГ, и для ГКГ с частотой 1 кГц и полосой пропускания до 500 Гц. В микроконтроллере ЭСКБ применяется цифровой режекторный фильтр на частоте 50 Гц для трех отведений ЭКГ в целях снижения сетевой помехи.

Диапазон измерения ММГ составляет  $\pm 245$  °/с (возможно до 2000 °/с); спектральная плотность шума —  $0,011$  (°/с)/√Гц (при полосе пропускания 50 Гц), частота в дискретизации — 750 Гц и коэффициент температурной чувствительности —  $0,04$  (°/с)/°С [15]. Для ММА диапазон измерения составляет  $\pm 2$  г, спектральная плотность шума —  $4 \cdot 10^{-5}$  г/√Гц, полоса пропускания — 700 Гц и чувствительность — 660 мВ/г [16].

Из названия прибора некорректно можно заключить, что он регистрирует только ЭКГ и СКГ. Однако в переводе с греческого, приставка сейсмо- означает «колебание, землетрясение» [17], а поскольку СКГ и ГКГ фиксируют колебания грудной клетки, то название блока — ЭСКБ полностью отражает его функциональность.



Рис. 3. Измерение биофизических кардиосигналов: 1 — первое отведение; 2 — второе отведение; 3 — третье отведение

Fig. 3. Measurement of biophysical cardiac signals: 1 — first limb lead; 2 — the second limb lead; 3 — third limb lead

При регистрации кардиосигналов электроды ЭСКБ с помощью геля плотно прикрепляются к рукам и ногам по методу Эйтховена (отведения 1, 2 и 3, рис. 3). На нижней границе грудной клетки испытуемого с помощью эластичной ленты плотно фиксируется СКБ. Ось  $y$  приборной системы

координат СКБ направлена к голове испытуемого, оси  $x$  и  $y$  находятся в плоскости, образуемой поверхностью грудной клетки и близкой к анатомической фронтальной плоскости, а ось  $z$  направлена перпендикулярно вверх. Измерение кардиосигналов проводится в положении лежа на спине неподвижно в течение 10 мин при равномерном дыхании [14].

Выходные данные прибора с помощью программы сбора данных ЭСКБ записываются в текстовый файл в соответствии с программой, созданной в среде Delphi 2010 [18], которая обеспечивает обмен данными персонального компьютера с ЭСКБ по интерфейсу RS-485 с визуальным контролем полученных значений выходных сигналов. Дальнейшая обработка данных осуществляется с помощью программы, написанной на языке Python 3.7 [19] с использованием библиотек NumPy, SciPy [20], Pandas [21], BioSPPy [22]. Дополнительные исследования проводились в среде MATLAB R2020b [23].

## Результаты и обсуждение

Применение метода В.М. Успенского к сигналам СКГ и ГКГ ставит задачу определения характерных пиков сигналов, аналогичных  $R$  зубцам ЭКГ, а также параметров, аналогичных параметрам  $R_n$ ,  $T_n$ , и  $\alpha_n$ , и их приращений.

Проведенные исследования и испытания на начальной стадии показали, что наиболее выраженные пики имеет проекция СКГ на ось  $Z$  и проекции ГКГ на оси  $X$  и  $Y$  [7]. При этом ЭКГ по второму отведению, как правило, имеет максимальную амплитуду. Сигналы ГКГ и СКГ обладают характерными пиками, хотя и не столь выраженными, как  $R$ -зубцы ЭКГ. В связи с этим возможно расширение области применения информационного анализа электрокардиосигналов на сейсмо- и гирокардиосигналы при использовании комбинации разных кардиосигналов (рис. 4):

- ЭКГ, второе отведение;
- СКГ, проекция на ось  $Z$ ;
- ГКГ, проекция на ось  $Y$ .

Использование предложенной комбинации кардиосигналов с одним отведением ЭКГ позволяет заметно упростить конструкцию ЭСКБ и разместить все датчики в небольшом корпусе, закрепляемом на грудной клетке пациента.

Исследования показали, что знак приращения временных интервалов между пиками  $T_n$  совпадает более чем на 95 % для всех видов кардиосигналов. При этом варибельность амплитуд различных кардиосигналов не совпадает [11].

Параметры  $R_n$ ,  $T_n$ ,  $\alpha_n$  учитывают изменения только одного характерного пика, а не всего кардиосигнала в целом. Параметр  $\alpha_n$  (фазовый угол) чувствителен к малейшим колебаниям входных

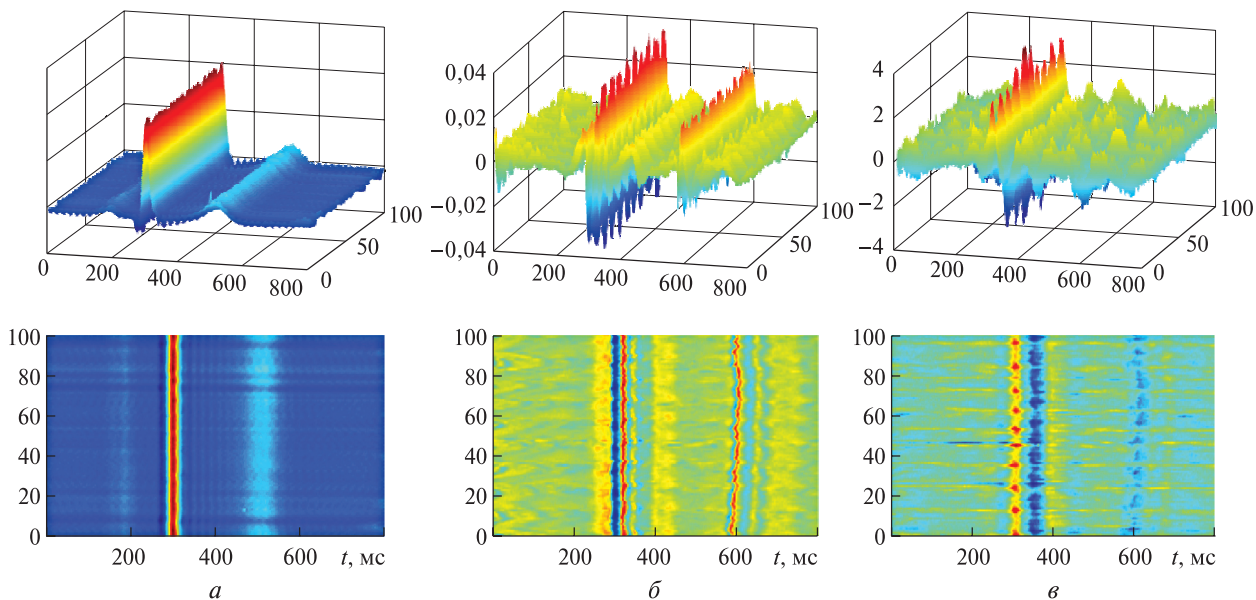


Рис. 4. Биофизические сигналы: *a* — ЭКГ<sub>2</sub>, второе отведение ЭКГ; *б* — СКГ<sub>Z</sub>, проекция СКГ на ось Z; *в* — ГКГ<sub>Y</sub>, проекция ГКГ на ось Y

Fig. 4. Biophysical signals: *a* — ECG<sub>2</sub>, ECG limb lead 2; *б* — SKG<sub>Z</sub>, projection of the SKG<sub>Z</sub> onto the Z axis; *в* — MCG<sub>Y</sub>, projection of the MCG onto the Y axis

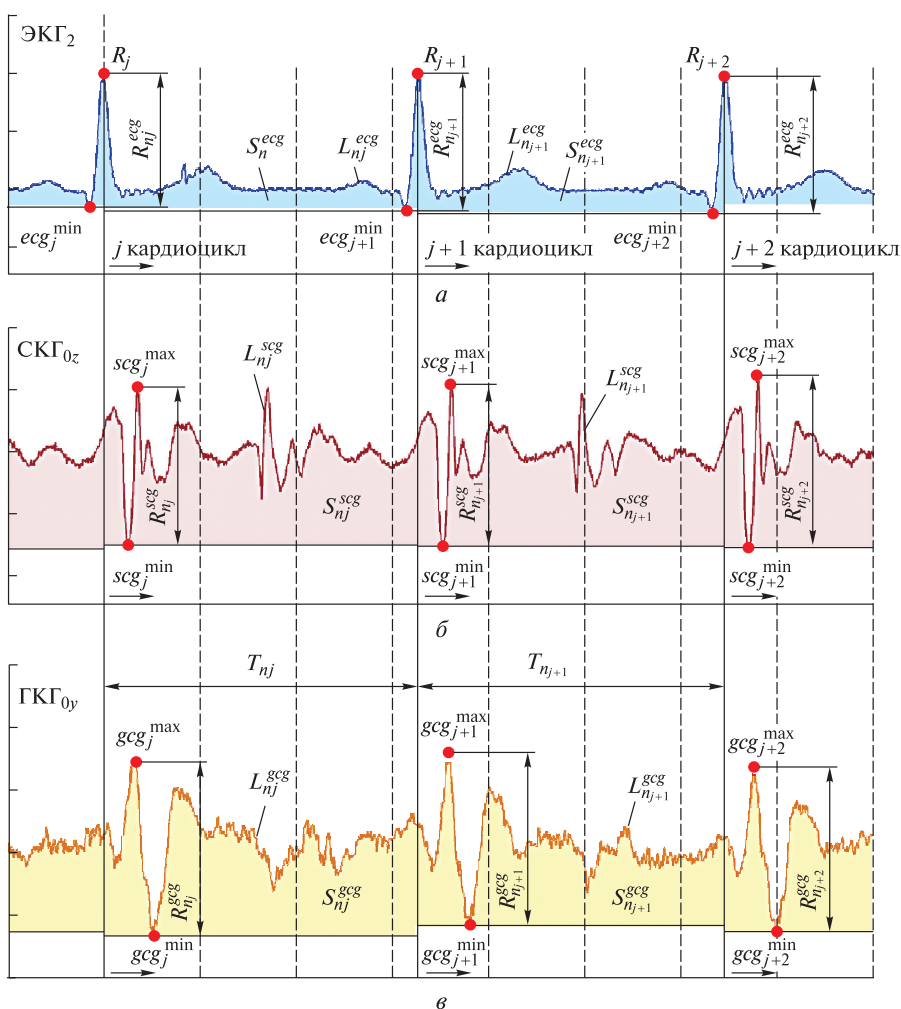
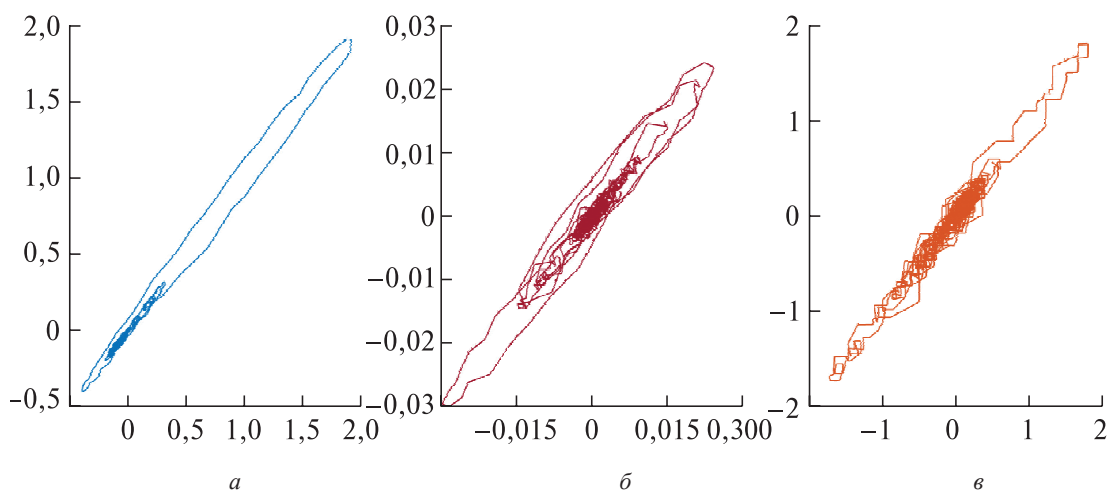


Рис. 5. Параметры  $R_{norm}$ ,  $L_{norm}$ ,  $S_{norm}$  для электро- (*a*), сейсмо- (*б*) и гироскардиограмм (*в*)

Fig. 5. Parameters  $R_{norm}$ ,  $L_{norm}$ ,  $S_{norm}$  for electro- (*a*), seismo- (*б*) and gyrocardiograms (*в*)





**Рис. 6.** Фазовые портреты биофизических сигналов по Такенсу: *a* — ЭКГ<sub>2</sub>; *б* — СКГ<sub>z</sub>; *в* — ГКГ<sub>γ</sub>  
**Fig. 6.** Phase portraits of biophysical signals according to Takens: *a* — ECG<sub>2</sub>; *б* — SKG<sub>z</sub>; *в* — GKY<sub>γ</sub>

данных из-за шумов. В связи с этим было решено провести анализ и оценку таких дополнительных параметров, как длина *j*-го кардиоцикла  $L_n$  и площадь под кривой *j*-го кардиоцикла  $S_n$  [24] (рис. 5).

Для того чтобы провести оценку и сравнение различных параметров кардиосигналов, используемых при информационном анализе, необходимо привести диагностические параметры к безразмерным величинам. Для перехода к относительным единицам использовался коэффициент  $D_R$ , который был определен для каждого типа кардиосигнала на основе данных об амплитуде, полученных по результатам проведенных исследований (группа условно здоровых пациентов в количестве 260 чел.). В результате были получены следующие номинальные диапазоны  $R_n$ :

$$\begin{aligned} D_R^{\text{ЭКГ}} &= 2,5 \text{ мВ}; \\ D_R^{\text{СКГ}} &= 0,075 \text{ г}; \\ D_R^{\text{ГКГ}} &= 5 \text{ }^\circ/\text{с}. \end{aligned}$$

В связи с этим для сигналов ЭКГ, СКГ и ГКГ размах систолического комплекса  $R_{\text{norm}}$ , длина кардиоцикла  $L_{\text{norm}}$  и площадь региона под кривой  $S_{\text{norm}}$  (индекс norm указывает на безразмерность величин) были рассчитаны по формулам:

$$R_{\text{norm}}^j = \frac{x_{\text{max}}^j - x_{\text{min}}^j}{D_R^{\text{ЭКГ}}} = \frac{R_n^j}{D_R^{\text{ЭКГ}}};$$

$$S_{\text{norm}}^j = \sum_{i=1}^{k_j-1} \frac{1}{D_R^{\text{СКГ}}} \left( \frac{x_i + x_{i+1}}{2} - x_{\text{min}}^j \right) T^*;$$

$$L_{\text{norm}}^j = \sum_{i=1}^{k_j-1} \sqrt{\left( \frac{x_{i+1} - x_i}{D_R^{\text{ГКГ}}} \right)^2 + (T^*)^2},$$

где  $k_j$  — количество отсчетов в *j*-м кардиоцикле;

$x_i$  [мВ, г, °/с] — измеренные значения кардиосигналов ЭКГ, СКГ и ГКГ соответственно;  $T^* = 1$  — нормированный временной интервал между отсчетами.

В качестве сравнения для кардиосигналов используется понятие вариабельности (изменчивости) параметров сердечного цикла. Согласно методике В.М. Успенского, одним из этапов диагностики заболеваний является анализ приращений параметров сердечного цикла, причем выбираются наиболее изменчивые, т. е. более показательные. Поэтому в качестве параметра для сравнения вариабельности кардиосигналов используется коэффициент вариации  $CV$  в соответствии с формулой

$$CV(p) = \frac{\sigma(p)}{M(p)} 100\%,$$

где  $p$  — массив параметров, вычисленных для каждого кардиоцикла;

$\sigma(x)$  — среднее квадратическое отклонение параметра  $p$ ;

$M(x)$  — математическое ожидание параметра  $p$ .

Анализ полученных результатов, приведенных в табл. 1, показал, что наибольшими значениями  $CV$  обладают параметры  $R_{\text{norm}}$ ,  $S_{\text{norm}}$  и  $\alpha_{\text{norm}}$ . Параметр  $\alpha_{\text{norm}}$  как результат отношения  $R_{\text{norm}}$  и  $T_{\text{norm}}$  ( $T_{\text{norm}}$  соответствует  $T_n$  и считается безразмерным) является очень малой величиной, чувствительной к малейшим изменениям входных данных. Значения параметра  $L_{\text{norm}}$  близки к значениям  $T_{\text{norm}}$ , что обусловлено используемым численным методом и не представляют интереса для дальнейшего рассмотрения. При этом коэффициенты вариации  $CV$  параметров СКГ и ГКГ заметно больше по сравнению с параметрами ЭКГ. Параметр  $T_{\text{norm}}$  является диагностически значимым — его эффективность подтверждена многолетним опытом

Т а б л и ц а 1

## Значения характерных параметров кардиоциклов испытуемого

## The values of the patient's cardiocycles characteristic parameters

Массив параметров ( $p$ )		$R_{\text{norm}}$	$L_{\text{norm}}$	$S_{\text{norm}}$	$T_{\text{norm}}$	$\alpha_{\text{norm}}$
ЭКГ	$M(x)$	0,9582	689,2916	123,4856	689,2488	$1,3951 \cdot 10^{-3}$
	$\sigma(x)$	0,0171	42,7065	10,4928	42,7064	$0,8374 \cdot 10^{-4}$
	$CV(x), \%$	1,7837	6,1957	8,4972	6,1961	6,0025
СКГ	$M(x)$	0,8180	689,3950	302,6059	689,2488	$1,1943 \cdot 10^{-3}$
	$\sigma(x)$	0,1056	42,7043	30,8504	42,7064	$1,9069 \cdot 10^{-4}$
	$CV(x), \%$	12,9086	6,1945	10,1949	6,1961	15,9666
ГКГ	$M(x)$	0,7876	689,3597	258,1037	689,2488	$1,1424 \cdot 10^{-3}$
	$\sigma(x)$	0,1172	42,7130	57,4169	42,7064	$1,5109 \cdot 10^{-4}$
	$CV(x), \%$	14,8767	6,1960	22,2457	6,1961	13,2253

Т а б л и ц а 2

## Параметры аппроксимирующих эллипсов для пяти испытуемых

## Parameters of approximating ellipses for five patients

Параметр	1	2	3	4	5	$CV, \%$
$\alpha$	44,9986	45,0118	45,0056	45,0341	45,1523	0,1419
$X_0$	848,2819	675,6177	794,9565	901,6471	820,7835	10,3976
$Y_0$	848,3050	675,6478	795,0017	901,7018	820,8536	10,3979
$ \vec{r} $	1199,6681	955,4890	1124,2702	1275,1602	1160,8127	10,3978
$a$	180,3461	32,3848	179,8054	49,2728	34,7142	81,4813
$b$	64,0708	11,2851	75,2973	19,5270	32,5776	68,8998
$k$	0,3553	0,3485	0,4188	0,3354	0,9385	53,9760
$P$	811,8193	145,2997	835,2831	226,3276	211,4211	77,5898
$S$	$3,6276 \cdot 10^4$	$1,1474 \cdot 10^3$	$4,2505 \cdot 10^4$	$3,0207 \cdot 10^3$	$3,5505 \cdot 10^3$	117,3742
$\chi^{\text{max}}$	983,6128	699,8598	932,7696	939,1080	854,4402	12,6892
$\chi^{\text{min}}$	712,9858	651,3738	657,1435	864,2013	787,1381	12,3556
$\gamma^{\text{max}}$	983,6311	699,8979	932,8340	939,1952	854,5202	12,6886
$\gamma^{\text{min}}$	713,0141	651,3962	657,1700	864,2227	787,1926	12,3556

использования в различных методах информационного анализа ЭКГ [25].

На основании полученных результатов предлагается использовать модификацию метода Успенского для набора сигналов ЭКГ<sub>2</sub>, СКГ<sub>Z</sub> и ГКГ<sub>Y</sub> по параметрам  $R_{\text{norm}}$ ,  $T_{\text{norm}}$  и  $S_{\text{norm}}$  [26]. Однако такая модификация потребует создания новой базы диагностических эталонов с последующим продолжительным периодом апробации.

Альтернативным вариантом первичной обработки кардиосигналов может стать анализ параметров кардиоциклов по фазовым портретам по Такенсу [24, 27, 28]. Ниже изображены фазовые портреты по Такенсу для одного кардиоцикла (рис. 6). В этом случае для информационного анализа можно использовать следующие параметры: площадь контура, угол наклона оси, периметр контура и др. Преимуществом метода является одинаковая размерность величин в координатной плоскости, недостатком — сложность вычислений, поскольку контуры кардиоциклов являются

довольно запутанными с геометрической точки зрения.

Еще одним методом обработки кардиосигналов, схожим с методом фазового портрета по Такенсу, является отображение функциональной зависимости  $(m+1)$ -периода от  $m$ -периода кардиоциклов на фазовой плоскости так, как показано на рис. 7. Плоскость, на которой строят фазовые портреты, также является безразмерной, поскольку по осям абсцисс и ординат откладываются временные интервалы кардиоциклов, которые просто переводятся в отсчеты.

Как видно из рис. 7, внешне форма фазовых портретов (граница расположения точек) кардиосигналов напоминает эллипс, следовательно, на основании данных о периодах можно вычислить и построить аппроксимирующий эллипс, а затем исследовать вариабельность таких его характеристик, как угол наклона эллипса  $\alpha^\circ$ , координаты центра эллипса  $X_0$  и  $Y_0$ , длина радиус-вектора  $|\vec{r}|$ , большая полуось  $a$ , малая полуось  $b$ , эллиптич-

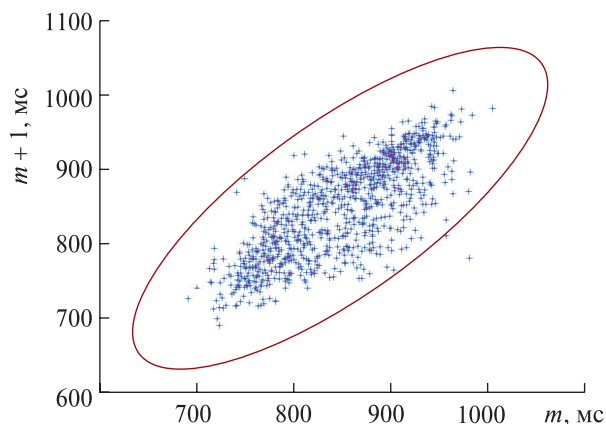


Рис. 7. Зависимость 600 периодов кардициклов и соответствующий аппроксимирующий эллипс

Fig. 7. Dependence of 600 periods of cardiocycles and the corresponding approximating ellipse

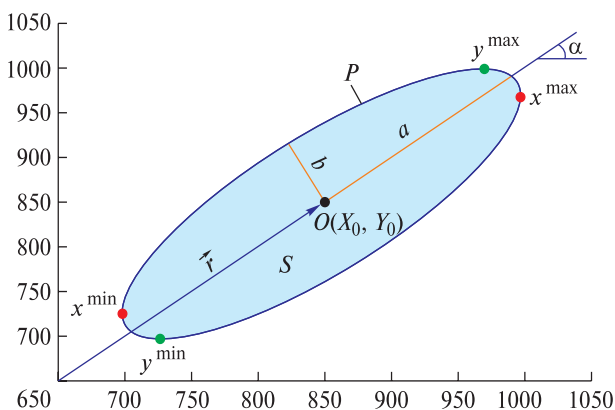


Рис. 8. Идентифицируемые параметры эллипса

Fig. 8. Identifiable parameters of the ellipse

ность  $k$ , периметр эллипса  $P$ , площадь эллипса  $S$ , максимальное и минимальное значения по оси абсцисс  $X^{\max}$  и  $X^{\min}$ , максимальное и минимальное значения по оси ординат  $Y^{\max}$  и  $Y^{\min}$  (рис. 8).

К проведению исследований была привлечена многочисленная группа пациентов (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что наиболее вариabельными параметрами оказались площадь эллипса  $S$ , большая полуось  $a$ , а также периметр  $P$ , при этом площадь эллипса имеет максимальную вариabельность. Исходя из этого можно утверждать, что использование этих трех параметров (по аналогии с  $R_{\text{norm}}$ ,  $T_{\text{norm}}$  и  $S_{\text{norm}}$ ) позволит проводить неинвазивную диагностику заболеваний на основе фазового портрета.

## Выводы

Таким образом, установлено, что использование сигналов СКГ и ГКГ наряду с ЭКГ позволяет увеличить перечень заболеваний и достоверность метода скрининга заболеваний внутренних органов В.М. Успенского. Выполненная оценка параметров для информационного анализа


кардиосигналов по методу Успенского на основе коэффициента вариации показала наибольшую вариabельность параметров СКГ и ГКГ по сравнению с ЭКГ. При первичной обработке электро-, сейсмо- и гирокардиосигналов во временной области рекомендуется использовать следующий набор параметров: площадь кардиоцикла, временной интервал между пиками и размах амплитуды систолического комплекса. Предложенный способ первичной обработки кардиосигналов на основе периодов кардиоциклов в фазовой плоскости показал, что вариabельность кардиосигналов возможно оценить путем построения аппроксимирующего эллипса и определения следующих его параметров: малой полуоси, периметра и площади. С высокой степенью уверенности можно утверждать, что полученные материалы дают возможность увеличить точность диагностики и расширить список диагностируемых заболеваний.

## Список литературы

- [1] Успенский В.М. Информационная функция сердца. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов методом информационного анализа электрокардиосигналов / под ред. В.Б. Симоненко. М.: Планета, 2016. 272 с.
- [2] Успенский В.М., Кравченко Ю.Г., Павловский К.Н., Авербах Ю.И. Устройство экспресс-диагностики заболеваний внутренних органов и онкопатологии. Пат. № 2159574 РФ, заявитель и патентообладатель В.М. Успенский, 2000. Бюл. № 33.
- [3] Грузевич Ю.К., Успенский В.М. Ачильдиев В.М. Электрoкардиоблоки высокого разрешения для скрининг-индикации заболеваний внутренних органов человека // Информационные и телекоммуникационные технологии, 2019. № 40. С. 39–46.
- [4] Ачильдиев В.М., Балдин А.В., Бедро Н.А., Грузевич Ю.К., Жук Д.М., Комарова М.Н., Грызлова Л.В., Роднова И.А., Солдатенков В.А., Успенский В.А., Шаббаев И.Г. Дистанционный комплекс для анализа электрокардиосигналов. Пат. № 2698980 РФ, заявители и патентообладатели ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», ООО «АРК Системс», 2019. Бюл. № 25.
- [5] Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Ачильдиев В.М., Бедро Н.А., Евсеева Ю.Н., Басараб М.А., Коннова Н.С. Сейсмокардиоблок и способ измерения сейсмокардиоцикла. Пат. № 2679296 РФ, заявитель и патентообладатель ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», 2019. Бюл. № 4.
- [6] Ачильдиев В.М., Басараб М.А., Бедро Н.А., Солдатенков В.А., Евсеева Ю.Н., Грузевич Ю.К., Коннова Н.С., Левкович А.Д. Сейсмокардиоблок на основе микромеханических датчиков // Сб. тр. Юбилейной XXV Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 28–30 мая 2018 г. Санкт-Петербург: Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2018. С. 185–194.
- [7] Ачильдиев В.М., Бедро Н.А., Грузевич Ю.К., Евсеева Ю.Н., Комарова М.Н., Рулев М.Е., Солдатенков В.А., Успенский В.М. Гирокардиография как способ неинвазивной диагностики заболеваний. Сб. докл. Междунар. форума «Микроэлектроника-2020» // Наноиндустрия, 2020. № S96–2. С. 381–388.

- [8] Юзбашев З.Ю., Майскова Е.А. Методы исследования сердца, основанные на регистрации низкочастотных колебаний прекардиальной зоны, их диагностические возможности и перспективы // *Scientific Review — Medical Sciences*, 2017. № 5. С. 74–94.
- [9] Успенский В.М. Способ диагностики заболеваний внутренних органов. Пат. № 2407431 РФ, заявитель и патентообладатель В.М. Успенский, 2010. Бюл. № 36.
- [10] Солдатенков В.А., Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Левкович А.Д., Бедро Н.А., Комарова М.Н., Евсеева Ю.Н., Басараб М.А., Коннова Н.С., Успенский В.М. Электросейсмокардиоблок для неинвазивной диагностики заболеваний человека // Сб. тр. XXVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2019 г. Санкт-Петербург: Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2019 г. С. 233–236.
- [11] Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Солдатенков В.А., Бедро Н.А., Евсеева Ю.Н., Комарова М.Н., Рулев М.Е., Успенский В.М. Электросейсмогирокардиоблок для скрининга заболеваний человека. Сб. докл. Междунар. форума «Микроэлектроника-2020» // *Наноиндустрия*, 2020. № S5–2. Т. 13. С. 583–593.
- [12] Мурашко В.В., Струтынский А.В. Электrokардиография. М.: Медицина, 1991. 288 с.
- [13] Электрическая ось сердца (ЭОС): суть, норма положения и нарушения. URL: <http://sosudinfo.ru/serdce/eos-elektricheskaya-os-serdca> (дата обращения 18.01.2022).
- [14] Ачильдиев В.М., Евсеева Ю.Н., Бедро Н.А., Солдатенков В.А., Грузевич Ю.К., Комарова М.Н., Левкович А.Д., Успенский В.М. Цифровая обработка и анализ электросейсмокардиосигналов. Сб. докл. Междунар. форума «Микроэлектроника-2020» // *Наноиндустрия*, 2020. № S96–2. С. 374–380.
- [15] MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l3gd20h.pdf> (дата обращения 20.01.2022).
- [16] KXR94-7050 Specifications. URL: [https://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXR94-7050 Specifications Rev 3.pdf](https://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXR94-7050%20Specifications%20Rev%203.pdf) (дата обращения 21.01.2022).
- [17] Кузнецов С.А. Большой толковый словарь русского языка. СПб.: Норинт, 1998. 1536 с.
- [18] Delphi – Embarcadero Website. URL: <https://www.embarcadero.com/ru/products/delphi> (дата обращения 25.01.2022).
- [19] Python Official Website. URL: <https://www.python.org/about> (дата обращения 25.01.2022).
- [20] NumPy and SciPy Documentation. URL: <https://docs.scipy.org/doc> (дата обращения 25.01.2022).
- [21] Pandas Documentation. URL: <https://pandas.pydata.org/about> (дата обращения 25.01.2022).
- [22] BioSPPY 0.6.1 documentation. URL: <https://biosppy.readthedocs.io/en/stable/biosppy.signals.html#biosppy-signals-ecg> (дата обращения 25.01.2022).
- [23] MATLAB – MathWorks – MATLAB & Simulink Website. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения 25.01.2022).
- [24] Achildiev V., Bedro N., Komarova M., Rulev M., Evseeva Y., Uspenkiy V., Gruzevich Y. Gyrocardiography unit for non-invasive human diseases diagnosis // 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2020. Pp. 1–7. DOI: 10.23919/ICINS43215.2020.9133891.
- [25] Вариабельность сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования. URL: <https://www.incart.ru/assets/pdf/hrv-standards.pdf> (дата обращения 27.01.2022).
- [26] Рулев М.Е. Синтез параметров гирокардиоблока // Всерос. студ. конф. «Студенческая научная весна». М.: Издательский дом «Научная библиотека», 2020. С. 368–369.
- [27] Барышева Е.Н., Никишов В.Н. Модели оценки финансовых показателей с учетом их стохастичности и хаотичности // Вестник Самарского государственного университета, 2012. № 4. С. 115–126.
- [28] Takens F. Detecting strange attractors in turbulence // *Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics*. Ed. D.A. Rand, L.S. Young. Heidelberg: Springer-Verlag, 1981, pp. 366–381.

## Сведения об авторах

**Рулев Максим Евгеньевич**  — инженер I категории, ОАО «НПО Геофизика-НВ», аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [maxxim98@yandex.ru](mailto:maxxim98@yandex.ru)

**Ачильдиев Владимир Михайлович** — канд. техн. наук, гл. конструктор МНЭМС, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», [glmneems@gmail.com](mailto:glmneems@gmail.com)

**Батырев Юрий Павлович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [batyrev@bmstu.ru](mailto:batyrev@bmstu.ru)

Поступила в редакцию 25.02.2022.

Одобрено после рецензирования 03.03.2022.

Принята к публикации 27.04.2022.



## BIOPHYSICAL SIGNALS REGISTRATION AND PROCESSING FOR NON-INVASIVE DIAGNOSIS OF HUMAN DISEASES

M.E. Rulev<sup>1</sup>✉, V.M. Achildiev<sup>1,2</sup>, Yu.P. Batyrev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific Production Unity «GEOPHIZIKA-NV», 23, bld. 2, Matrosskaya Tishina st., 107076, Moscow, Russia

<sup>2</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

maxxim98@yandex.ru

The basics of the electrocardiosignals informational analysis are outlined and the developments based on it are indicated. A block diagram of the electroseismic cardio unit is presented, the features of its design and functionality are indicated. The studied biophysical signals are listed and their properties are noted. The choice of parameters for the primary processing of biophysical signals is substantiated and a method for their calculation is proposed. It has been established that in the time domain it is rational to use such parameters of cardiocycles as amplitude, period and area. The results of experiments conducted on a group of patients are presented in order to identify the most revealing parameters of cardiocycles. Methods for visualization and evaluation of cardiocycle variability based on the Takens phase are proposed. It was found that on the phase plane the points corresponding to the periods of cardiocycles are approximated using an ellipse. It was determined that the most indicative parameters of the ellipse, reflecting the variability of cardiocycles, are the area, semi-minor axis and perimeter.

**Keywords:** electrocardiography, seismocardiography, gyrocardiography, MEMS sensors, phase portrait

**Suggested citation:** Rulev M.E., Achildiev V.M., Batyrev Yu.P. *Registratsiya i obrabotka biofizicheskikh signalov dlya neinvazivnoy diagnostiki zabolevaniy cheloveka* [Biophysical signals registration and processing for non-invasive diagnosis of human diseases]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 137–146.

DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-137-146

### References

- [1] Uspenskiy V.M. *Informatsionnaya funktsiya serdtsa. Teoriya i praktika diagnostiki zabolevaniy vnutrennikh organov metodom informatsionnogo analiza elektrokardiosignalov* [Information function of the heart. Theory and practice of diagnosis of diseases of internal organs by the method of information analysis of electrocardiograms]. Moscow: Planeta, 2016, 296 p.
- [2] Uspenskiy V.M., Kravchenko YU.G., Pavlovskiy K.N., Averbakh YU.I. *Ustroystvo ekspress-diagnosticski zabolevaniy vnutrennikh organov i onkopatologii* [Device for rapid diagnosis of diseases of internal organs and oncopathology]. Pat. 2159574 of the Russian Federation, applicant and patent holder of Uspenskiy V.M., 2000, byul. no. 35.
- [3] Gruzevich Yu.K., Uspenskiy V.M. Achil'diyev V.M. *Elektrokardiobloki vysokogo razresheniya dlya skrining-indikatsii zabolevaniy vnutrennikh organov cheloveka* [High-resolution electrocardiography units for screening and indication of diseases of human internal organs]. *Informatsionnyye i telekommunikatsionnyye tekhnologii* [Information and telecommunication technologies], 2019, no. 40, pp. 39–46.
- [4] Achil'diyev V.M., Baldin A.V., Bedro N.A., Gruzevich YU.K., Zhuk D.M., Komarova M.N., Gryzlova L.V., Rodnova I.A., Soldatenkov V.A., Uspenskiy V.A., Shabayev I.G. *Distantsionnyy kompleks dlya analiza elektrokardiosignalov* [Remote complex for analyzing electrocardiosignal]. Pat. 2698980 of the Russian Federation, applicant and patent holder of SPU «GEOPHIZIKA-NV», LLC «ARK Sistems», 2019, byul. no. 25.
- [5] Soldatenkov V.A., Gruzevich YU.K., Achil'diyev V.M., Bedro N.A., Yevseyeva YU.N., Basarab M.A., Konnova N.S. *Seismokardioblok i sposob izmereniya seismokardiotsikla* [Seismic cardioblock and method of measurement of seismic cardiocycle]. Pat. 2679296 of the Russian Federation, applicant and patent holder of SPU «GEOPHIZIKA-NV», LLC «ARK Sistems», 2019, byul. no. 4.
- [6] Achil'diyev V.M., Basarab M.A., Bedro N.A., Soldatenkov V.A., Yevseyeva YU.N., Gruzevich YU.K., Konnova N.S., Levkovich A.D. *Seismokardioblok na osnove mikromekhanicheskikh datchikov* [Cardioseismometer unit based on micromechanical sensors]. 25-th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems (ICINS), 2018, pp. 185–194.
- [7] Achil'diyev V.M., Bedro N.A., Gruzevich YU.K., Yevseyeva YU.N., Komarova M.N., Rulev M.E., Soldatenkov V.A., Uspenskiy V.M. *Girokardiografiya kak sposob neinvazivnoy diagnostiki zabolevaniy* [Gyrocardiography as a method of noninvasive diagnosis of diseases]. Moscow: «TEKHNOFERA», Nanoindustry, 2020, no. 96–2, pp. 381–388.
- [8] Yuzbashev Z.YU., Mayskova E.A. *Metody issledovaniya serdtsa, osnovannyye na registratsii nizkochastotnykh kolebaniy prekardial'noy zony, ikh diagnosticheskiye vozmozhnosti i perspektivy* [Examination methods of the heart based on the registration of low-frequency vibrations of the precordial zone and their diagnostic potentials and perspectives]. *Scientific Review – Medical Sciences*, 2017, no. 5, pp. 74–94.
- [9] Uspenskiy V.M. *Sposob diagnostiki zabolevaniy vnutrennikh organov* [Method of diagnosis of diseases of internal organs]. Pat. 2407431 of the Russian Federation, applicant and patent holder of Uspenskiy V.M., 2010, byul. no. 36.
- [10] Soldatenkov V.A., Achil'diyev V.M., Gruzevich YU.K., Levkovich A.D., Bedro N.A., Komarova M.N., Yevseyeva YU.N., Basarab M.A., Konnova N.S., Uspenskiy V.M. *Elektroseismokardioblok dlya neinvazivnoy diagnostiki zabolevaniy cheloveka* [Electroseismocardiography system for non-invasive human diseases diagnosis]. 26-th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems (ICINS), 2019, pp. 233–236.
- [11] Achil'diyev V.M., Gruzevich YU.K., Soldatenkov V.A., Bedro N.A., Yevseyeva YU.N., Komarova M.N., Rulev M.E., Uspenskiy V.M. *Elektroseismogirokardioblok dlya skrininga zabolevaniy cheloveka* [Electroseismogyrocardiography system for human diseases screening]. Nanoindustry, 2020, no. S5–2, v. 13, pp. 583–593.
- [12] Murashko V.V., Strutynskiy A.V. *Elektrokardiografiya* [Electrocardiography]. Moscow: Medicine, 1991, 288 p.

- [13] *Elektricheskaya os' serdtsa: sut', norma polozheniya i narusheniya* [Electrical axis of the heart: the essence, the norm of position and violations]. Available at: <http://sosudinfo.ru/serdce/eos-elektricheskaya-os-serdca> (accessed 18.01.2022).
- [14] Achil'diyev V.M., Yevseyeva YU.N., Bedro N.A., Soldatenkov V.A., Gruzevich YU.K., Komarova M.N., Levkovich A.D., Uspenskiy V.M. *Tsifrovaya obrabotka i analiz elektroseysmokardiosignalov* [Digital processing and analysis of electroseismocardiograms]. *Nanoindustry*, 2020, no. 96–2, pp. 374–380.
- [15] MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope. Available at: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l3gd20h.pdf> (accessed 20.01.2022).
- [16] KXR94-7050 Specifications. Available at: [https://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXR94-7050 Specifications Rev 3.pdf](https://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXR94-7050%20Specifications%20Rev%203.pdf) (accessed 21.01.2022).
- [17] Kuznetsov S.A. *Bol'shoy tolkovyy slovar' russkogo yazyka* [The Large Explanatory Dictionary of the Russian Language]. St. Petersburg: *Norint*, 1998, 1536 p.
- [18] Delphi – Embarcadero Website. Available at: <https://www.embarcadero.com/ru/products/delphi> (accessed 25.01.2022).
- [19] Python Official Website. Available at: <https://www.python.org/about> (accessed 25.01.2022).
- [20] NumPy and SciPy Documentation. Available at: <https://docs.scipy.org/doc> (accessed 25.01.2022).
- [21] Pandas Documentation. Available at: <https://pandas.pydata.org/about> (accessed 25.01.2022).
- [22] BioSPPy 0.6.1 documentation. Available at: <https://biosppy.readthedocs.io/en/stable/biosppy.signals.html#biosppy-signals-ecg> (accessed 25.01.2022).
- [23] MATLAB – MathWorks – MATLAB & Simulink Website. Available at: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed 25.01.2022).
- [24] Achil'diev V., Bedro N., Komarova M., Rulev M., Evseeva Y., Uspenkiy V., Gruzevich Y. Gyrocardiography unit for non-invasive human diseases diagnosis. 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2020, pp. 1–7. DOI: 10.23919/ICINS43215.2020.9133891
- [25] *Variabel'nost' serdechnogo ritma. Standarty izmereniya, fiziologicheskoy interpretatsii i klinicheskogo ispol'zovaniya* [Heart rate variability. Standards for measurement, physiological interpretation and clinical use]. Available at: <https://www.incart.ru/assets/pdf/hrv-standards.pdf> (accessed 27.01.2022).
- [26] Rulev M.E. *Sintez parametrov girokardiobloka* [Synthesis of gyrocardiography unit parameters]. All-Russian Student Conference «Student Scientific Spring». Moscow: Publishing House «Scientific Library», 2020, pp. 368–369.
- [27] Barysheva E.N., Nikishov V.N. *Modeli otsenki finansovykh pokazateley s uchetom ikh stokhastichnosti i khaotichnosti* [Models of an estimation of financial parameters in view of their stochasticity and chaotic condition]. *Vestnik of Samara State University*, 2012, no. 4, pp. 115–126.
- [28] Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics*. Ed. D.A. Rand, L.S. Young. Heidelberg: Springer-Verlag, 1981, pp. 366–381.

## Authors' information

**Rulev Maksim Evgenyevich**✉ — Engineer 1-st category of the «Scientific Production Unity Geophizika-NV» Stock Company, pg. of the BMSTU (Mytishchi branch), maxxim98@yandex.ru

**Achil'diev Vladimir Mikhaylovich** — Cand. Sci. (Tech.), Chief designer of MNEMS of the «Scientific Production Unity GEOPHIZIKA-NV» Stock Company, glmnems@gmail.com

**Batyrev Yuriy Pavlovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), batyrev@bmstu.ru

Received 25.02.2022.

Approved after review 03.03.2022.

Accepted for publication 27.04.2022.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
 The authors declare that there is no conflict of interest