

УДК 615.471:616.12-008.3

**КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ И ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
ВАРИАбельНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА  
ПРИ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ**

Е.С. Баклыкова, А.С. Бородин, Д.А. Тужилкин

Томский государственный университет

E-mail: katrin.buzy@gmail.com

**Баклыкова Екатерина Сергеевна**, магистр радиопизики, инженер научно-образовательного центра «Физика ионосферы и электромагнитная экология» Томского государственного университета.  
E-mail: katrin.buzy@gmail.com  
Область научных интересов: электромагнитная экология, биофизика.

**Бородин Александр Семенович**, канд. техн. наук, доцент кафедры космической физики и экологии радиофизического факультета Томского государственного университета.

E-mail: bas\_56@mail.ru  
Область научных интересов: электромагнитная экология, биофизика.

**Тужилкин Дмитрий Алексеевич**, магистрант кафедры космической физики и экологии радиофизического факультета Томского государственного университета.  
E-mail: dmitry-88@mail.ru  
Область научных интересов: электромагнитная экология, биофизика.

С целью выявления колебательных и волновых процессов вариаций периода сердечных сокращений проведено исследование основных закономерностей изменчивости RR-интервалов человека при переходе от его спокойного состояния к состоянию, характеризующемуся воздействием динамической физической нагрузки. Особый интерес представляет поведение сердечно-сосудистой системы при максимальной напряженности нагрузки, когда организм человека находится в условиях, приближенных к максимальному стрессу. На однородной выборке волонтеров (26 человек в возрасте 18–24 лет) представлены основные закономерности вариаций периода сердечных сокращений человека во время нагрузок, мощность которых изменяется в диапазоне от 25 до 210 Вт. Получены функции, описывающие изменения RR-интервалов во время стадий напряжения и в стадиях восстановления в зависимости от заданной мощности, а также найдены параметры этих функций.

**Ключевые слова:**

Электрокардиограмма, RR-интервал, вариабельность сердечного ритма, велоэргометрия.

Вариабельность сердечного ритма человека – один из основных предикторов риска для организма человека. Анализ вариабельности сердечного ритма является методом оценки состояния механизмов регуляции физиологических функций в организме человека и рассматривается как индикатор адаптационно-приспособительной деятель-

ности организма в целом [1].

В данной работе проводились эксперименты со ступенчато возрастающей динамической физической нагрузкой. Для проведения эксперимента использовалась велоэргометрия. Велоэргометрия – диагностический метод электрокардиографического исследования для определения индивидуальной толерантности к физической нагрузке [2].

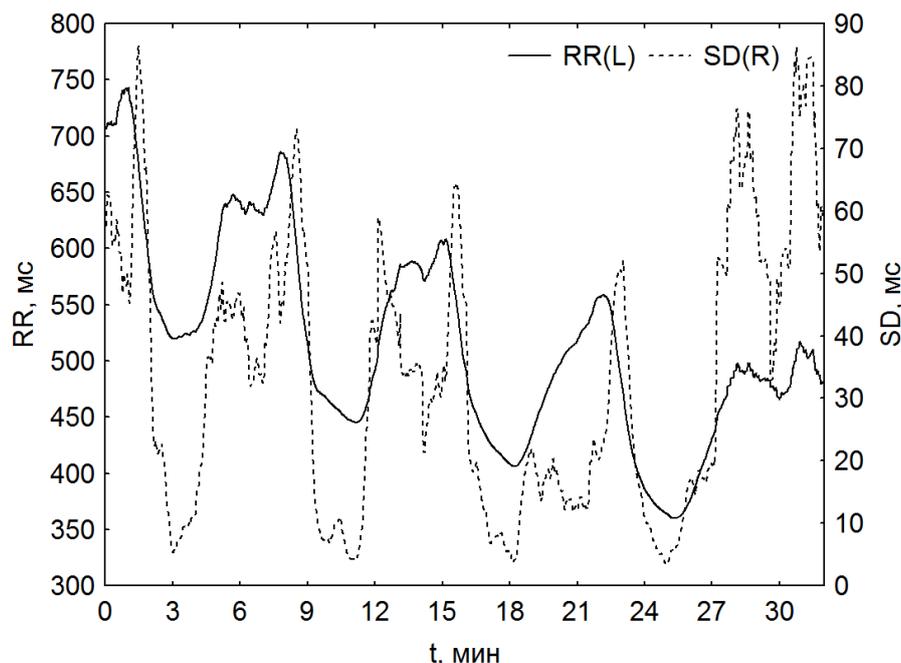
В экспериментах участвовала группа здоровых людей в возрасте от 18 до 24 лет (26 человек). Для каждого человека индивидуально подбиралось значение максимальной мощности нагрузки (всего в эксперименте проходило четыре ступени напряженности). Последняя стадия нагрузки подбиралась таким образом, чтобы частота сердечных сокращений достигала субмаксимального значения.

До начала эксперимента волонтер был оснащен системой холтеровского мониторинга «Валента», при помощи которой возможна непрерывная регистрация электрокардиограммы человека, находящегося в свободной активности, а также выделение RR-интервалов «beat to beat» [3].

На рис. 1 представлена изменчивость трендов средних значений RR-интервалов и стандартного отклонения во время эксперимента одного из волонтеров. Сплошной линией показан ход средних значений RR-интервалов, пунктирной – изменчивость стандартного отклоне-

ния средних значений периода сердечных сокращений. График наглядно иллюстрирует все четыре стадии нагрузок и интервалы восстановления. Можно заметить, что после каждой нагрузки система не достигает уровня средних значений периода сердечных сокращений во время восстановления.

Такая же картина происходит после максимальной нагрузки даже на протяжении двух последовательных трехминутных интервалов отдыха. Рис. 1 также показывает, что диапазон изменчивости стандартного отклонения средних значений периода сердечных сокращений лежит в пределах от 5 до 85 мс.



**Рис. 1.** Изменчивость трендов средних значений RR-интервалов и стандартного отклонения во время эксперимента (типичный случай)

После рассмотрения некоторых особенностей изменчивости сердечного ритма у каждого из волонтеров проводилась стандартизация данных с целью исключения влияния индивидуальных параметров на результаты анализа по выборке в целом. Далее все стандартизованные значения совмещались по соответствующим временным интервалам, чтобы можно было наблюдать общую динамику вариаций  $RR_{st}$ -интервалов. Для этого проведена наиболее подходящая аппроксимация экспоненциальной функцией этих данных на основе метода Ньютона – Гаусса с учетом критерия МНК, используя формулы (1) и (2), по всей выборке в целом:

$$RR = a \exp(b \cdot t) + c; \quad (1)$$

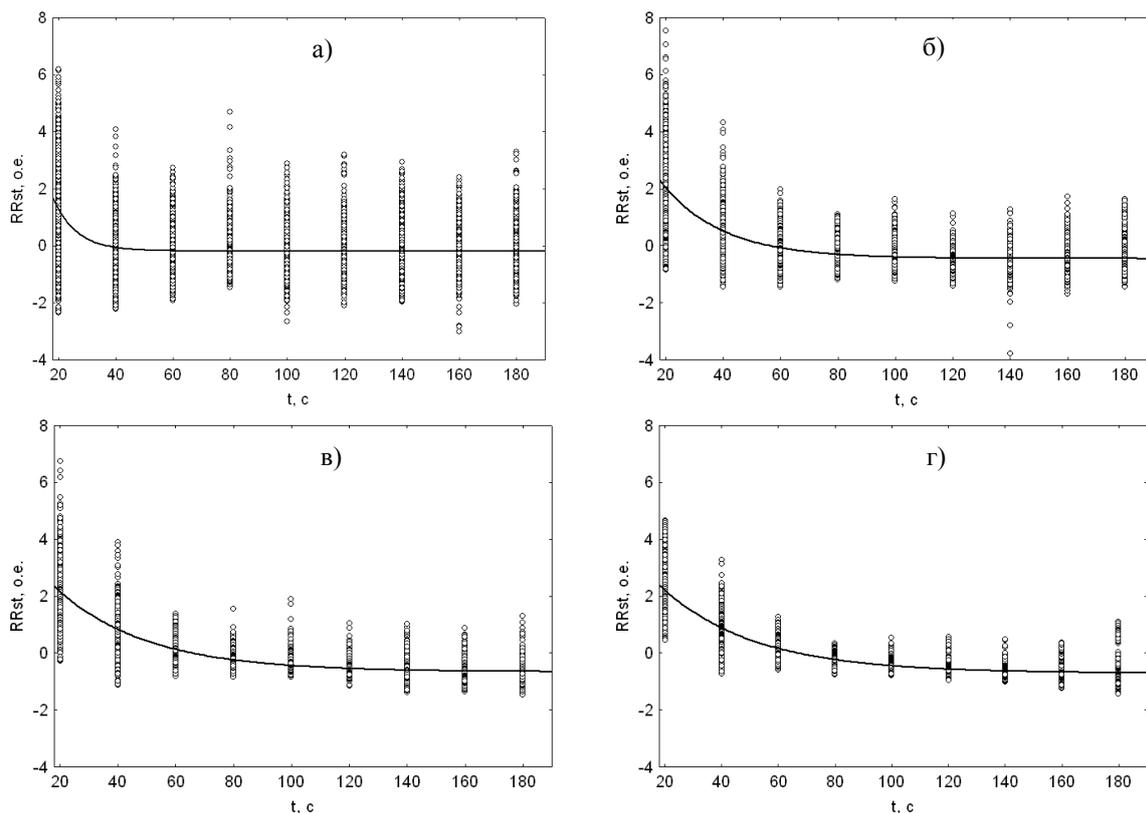
$$RR = a(1 - \exp(b \cdot t)) + c, \quad (2)$$

где  $t$  – время отсчета;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметры.

На рис. 2 приведена полученная зависимость стандартизованных RR-интервалов от времени при различных нагрузках для всей выборки волонтеров.

Аппроксимирующие кривые достаточно точно описывают экспериментальные данные по всей выборке волонтеров. Аналогичная ситуация с высокой коррелированностью экспериментальных и теоретических данных наблюдается и для стадий восстановления.

Подтверждением высокой корреляции между экспериментальными и теоретическими кривыми является табл. 1, в которой представлены параметры полученных зависимостей.



**Рис. 2.** Зависимость стандартизованных RR-интервалов от времени по всей выборки волонтеров при различных нагрузках (а – первая нагрузка; б – вторая нагрузка; в – третья нагрузка; г – четвертая нагрузка) и их экспоненциальная аппроксимация. Точкам соответствуют различные волонтеры

Табл. 1 показывает, что с увеличением уровня напряжения нагрузки коэффициент детерминации R между практическими значениями стандартизованных RR-интервалов и их экспоненциальной аппроксимацией растет. Если при минимальной нагрузке  $R = 0,46$ , то уже к последнему уровню нагрузки  $R = 0,92$ . Аналогична ситуация и для стадий восстановления: с увеличением мощности нагрузки растет и коэффициент детерминации, т. е. существует связь между экспериментальными данными и найденной математической моделью, описывающей эти данные.

**Таблица 1.**

Тип интервала	A, о. е.	Ст. ошибка, о. е.	B, (1/c)	Ст. ошибка, (1/c)	C, о. е.	Ст. ошибка, о. е.	R
1 – нагрузка	16,9483	3,87412	-0,12218	0,01146	-0,18347	0,01069	0,46
1 – отдых	9,39600	2,27866	-0,10735	0,01200	-9,2920	2,28161	0,30
2 – нагрузка	6,39754	0,13464	-0,04702	0,00095	-0,45610	0,00913	0,78
2 – отдых	3,69947	0,08046	-0,02951	0,00081	-3,31590	0,08438	0,60
3 – нагрузка	5,33677	0,05166	-0,03170	0,00041	-0,66783	0,00841	0,89
3 – отдых	3,72043	0,04491	-0,02060	0,00042	-3,11607	0,04972	0,73
4 – нагрузка	5,34421	0,04138	-0,03013	0,00033	-0,71567	0,00754	0,92
4 и 5 – отдых	3,87576	0,02132	-0,01229	0,00014	-3,11453	0,02408	0,85

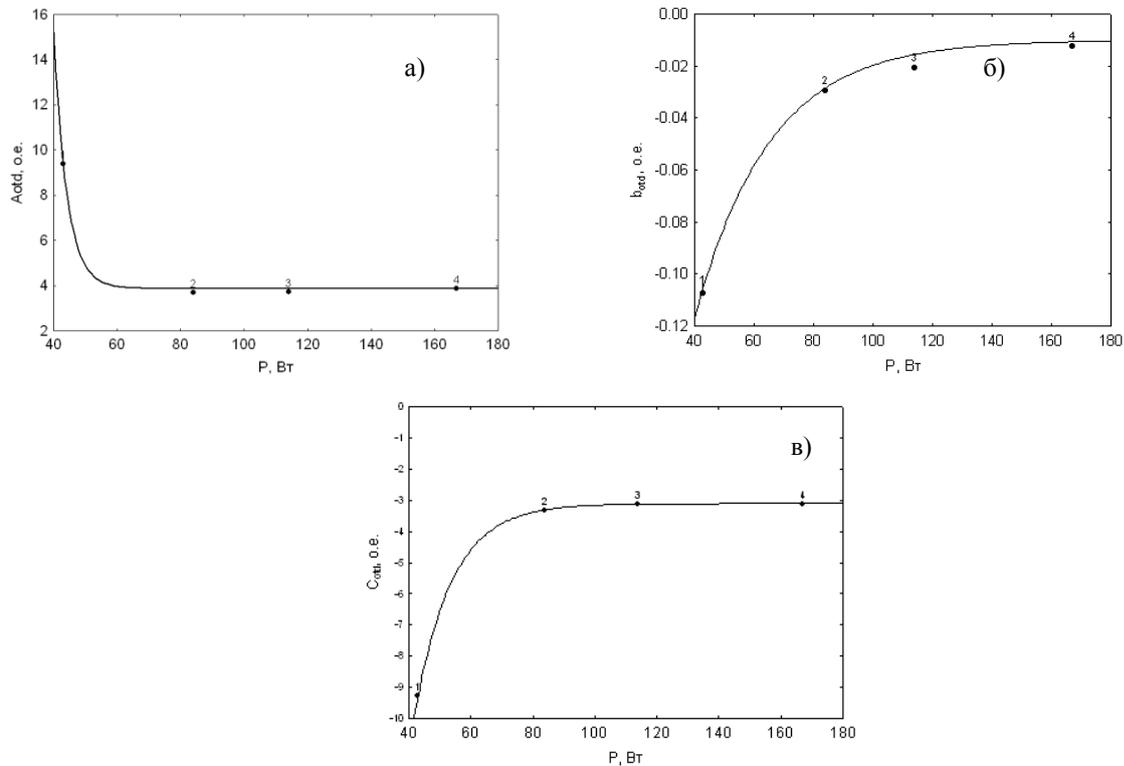
A, B, C – параметры аппроксимации аналогично формуле (1), R – коэффициент детерминации

После анализа данных, приведенных в табл. 1, найдена зависимость этих параметров от мощности заданной нагрузки (рис. 3 и 4). Представлены аппроксимирующие функции параметров изменчивости периода сердечных сокращений для стадий нагрузок и для интервалов восстановления:

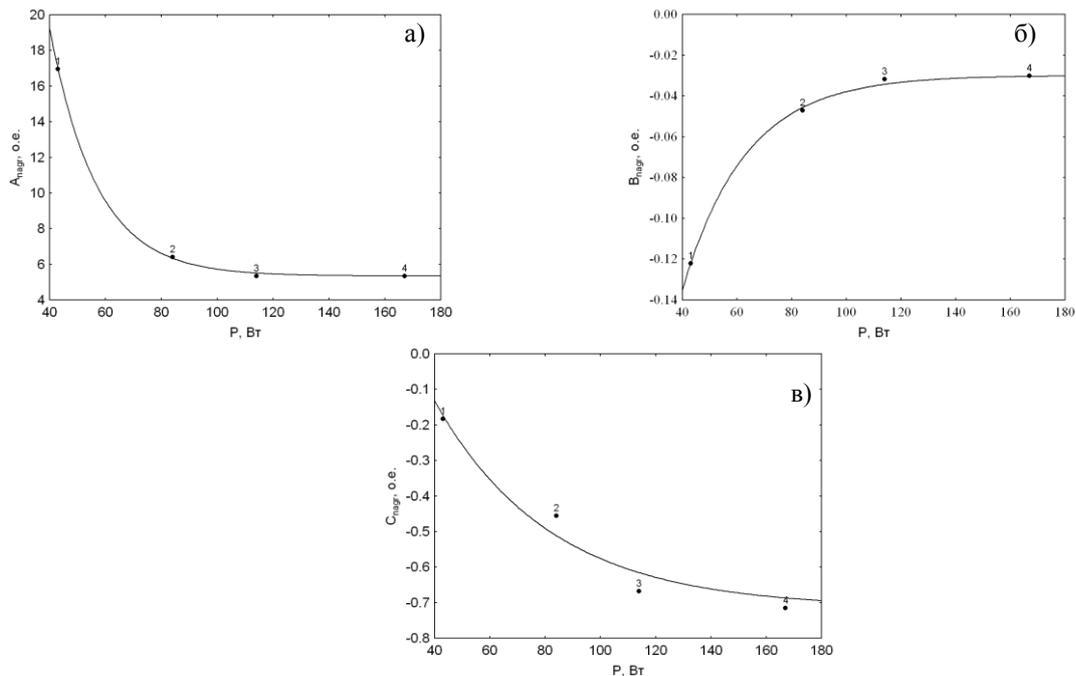
$$RR = a \exp(b \cdot P) + c; \tag{3}$$

$$RR = a(1 - \exp(b \cdot P)) + c, \tag{4}$$

где  $P$  – мощность нагрузки;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметры.



**Рис. 3.** Зависимость параметров стандартизованных RR-интервалов от мощности нагрузок по всей выборке волонтеров во время восстановления ( $a$  – параметр  $a$ ;  $b$  – параметр  $b$ ;  $c$  – параметр  $c$ )



**Рис. 4.** Зависимость параметров стандартизованных RR-интервалов от мощности нагрузок по всей выборке волонтеров во время нагрузок ( $a$  – параметр  $a$ ;  $b$  – параметр  $b$ ;  $c$  – параметр  $c$ )

В табл. 2 показаны параметры зависимостей параметров стандартизованных RR-интервалов от мощности нагрузок по всей выборке волонтеров во время нагрузок и восстановления.

Таблица 2.

Тип интервала	A, о. е.	Ст. ошибка, о. е.	B, (1/Вт)	Ст. ошибка, (1/Вт)	C, о. е.	Ст. ошибка, о. е.	R
A – нагрузки	150,697	19,3314	-0,0596	0,0029	5,3400	0,0010	0,99
B – нагрузки	0,5382	0,1019	-0,0406	0,0047	-0,5666	0,1036	0,99
C – нагрузки	1,3101	0,3455	-0,0169	0,0096	-0,8104	0,1581	0,99
A – отдыха	12468,6	575549,5	-0,1800	1,1000	3,7600	0,1000	0,99
B – отдыха	0,5512	0,1309	-0,0411	0,0059	-0,5643	0,1329	0,99
C – отдыха	217,446	15,6109	-0,0830	0,0017	-220,553	15,6162	0,99

В результате проведенного исследования показано, что изменчивость периода сердечных сокращений (от удара к удару) во время эксперимента с физической нагрузкой строго подчиняется экспоненциальной зависимости как при напряженности, так и при восстановлении. Найденные параметры нагрузки и восстановления состояния сердечно-сосудистой системы по вариабельности RR-интервалов могут быть выражены не только по времени нагрузки, но и по ее мощности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тужилкин Д.А., Бородин А.С. Воздействие физических полей окружающей среды на сердечно-сосудистую систему человека // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8/3. – С. 167–168.
2. Тавровская Т.В. Велоэргометрия. Практическое пособие для врачей. – СПб.: СпецЛит, 2007. – 138 с.
3. Дабровски А., Дабровски Б., Пиотрович Р. Суточное мониторирование ЭКГ. – М.: Медпрактика, 1998. – 204 с.

Поступила 10.11.2014.