

Рубрика: неинвазивная аритмология

© П.К. ПРУСОВ, 2018

© АННАЛЫ АРИТМОЛОГИИ, 2018

УДК 612.16:796.071:615.825

DOI: 10.15275/annaritmol.2018.2.5

ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПОСЛЕ НАГРУЗОЧНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПУЛЬСА ЮНЫХ СПОРТСМЕНОВ КАК ИНДИКАТОРЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НАГРУЗКИ

Тип статьи: оригинальная статья

П.К. Прусов

ГАУЗ «Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины» Департамента здравоохранения г. Москвы, филиал № 11, ул. Домодедовская, 11, корп. 2, Москва, 115551, Российская Федерация; ФГБОУ ДПО «Институт повышения квалификации» Федерального медико-биологического агентства России, Волоколамское ш., 91, Москва, 125371, Российская Федерация

Прусов Петр Кириллович, доктор мед. наук, профессор кафедры восстановительной медицины, лечебной физкультуры и спортивной медицины, врач функциональной диагностики,
E-mail: peter.prusov@mail.ru

Цель. Изучить динамику частоты пульса в быструю фазу восстановительного периода в зависимости от интенсивности велоэргометрических нагрузок с использованием экспоненциального уравнения для оценки интенсивности выполненной нагрузки и физической работоспособности.

Материал и методы. У 24 юных спортсменов 13–18 лет с различной направленностью тренировочного процесса изучены показатели восстановления частоты пульса, рассчитанные по экспоненциальному уравнению, в зависимости от интенсивности велоэргометрической нагрузки. Исследование проводилось в первой половине дня. Нагрузочное тестирование выполнялось в положении сидя на велоэргометре Lode, с непрерывной регистрацией показателей спирометрии на системе Cortex Metalyzer. Начальная мощность нагрузки составляла 1,0 Вт/кг с последующим увеличением на 0,5 Вт/кг до отказа от работы. Показатели пульса регистрировали на системе Polar RS800 в течение 3-минутных периодов восстановления после 4-минутной нагрузки. Частота каждого сердечного сокращения выражалась в относительных величинах к частоте пульса окончания предшествующей нагрузки. Для математического описания динамики пульса в периоде восстановления использовалась экспоненциальная модель уравнения типа $Y = a_0 + a_1 \times \exp(a_2 \times t)$, где a_0 , a_1 , a_2 – параметры уравнения, t – время (в минутах) после прекращения нагрузки. Интенсивность нагрузки рассчитывали в процентах относительно достигнутой максимальной мощности и потребления O_2 .

Результаты. Установлена высокая информативность комплекса анализируемых показателей восстановления сердечного ритма, выявляемых по экспоненциальной модели для определения интенсивности выполняемой нагрузки от максимального уровня и аэробной работоспособности. Для этих целей разработаны два линейных многопараметрических уравнения и подготовлены две формулы для расчета показателей аэробной работоспособности. В данных случаях множественные коэффициенты корреляции имели высокий уровень значимости, составляя 0,89 и 0,87 ед. Наибольшее значение для прогнозирования имели показатели остаточной дисперсии, ее отношение к общей дисперсии, параметр a_2 экспоненциального уравнения.

Заключение. Разработанные алгоритмы имеют важное практическое значение, позволяя без использования максимальных тестов (которые часто противопоказаны в рамках исследования) объективно судить о динамике функционального состояния и работоспособности юных спортсменов по результатам тестирования при нагрузках умеренной и невысокой интенсивности. Также оценка восстановления сердечного ритма после физических нагрузок с применением экспоненциального уравнения, может использоваться при динамическом контроле за функциональными возможностями организма в научной и практической деятельности у не занимающихся спортом и в клинических условиях.

Ключевые слова: восстановление сердечного ритма; физическая работоспособность; интенсивность нагрузки; экспоненциальная модель уравнения; остаточная дисперсия.

CHARACTERISTICS OF EXPONENTIAL EQUATION OF HEART RATE RECOVERY IN YOUNG ATHLETES AFTER EXERCISE AS INDICATORS OF PHYSICAL LOADING INTENSITY

P.K. Prusov

Moscow Scientific and Practical Center of Medical Rehabilitation, Restorative and Sports Medicine, Branch No. 11, ulitsa Domodedovskaya, 11-2, Moscow, 115551, Russian Federation; Institute of Advanced Training, Federal Medical and Biological Agency of Russia, Volokolamskoye shosse, 91, Moscow, 125371, Russian Federation

Petr K. Prusov, Dr. Med. Sc., Professor, Functional Diagnostician, E-mail: peter.prusov@mail.ru

Objective. To study the nature of pulse frequency dynamics in the fast phase of the recovery period depending on the intensity of ergometric loads, using an exponential equation to estimate the intensity of load and physical performance.

Material and methods. The indicators of heart rate recovery of 24 young athletes 13–18 years old with different directions of the training process were studied, calculated by the exponential equation, depending on the intensity of bicycle load. The study was conducted in the first half of the day. Exercise testing was performed in the sitting position on a bicycle ergometer (Lode) with continuous registration of indicators of spiroergometry using the Cortex system. The initial power load was 1.0 W/kg, followed by an increase of 0.5 W/kg until refusal. Pulse was recorded on the Polar RS800 system during 3-minute recovery periods after 4-minute loading. The frequency of each heart rate was expressed in relative values to the end of the previous load. For the mathematical descriptions of heart rate dynamics during the recovery period, an exponential model of equation was used: $Y = a_0 + a_1 \times \exp(a_2 \times t)$ was used, where a_0 , a_1 , a_2 are the parameters of the equation, t is the time after loading in minutes. The load intensity was calculated as a percentage achieved of the maximum power and O_2 consumption.

Results. The highly informative value of the analyzed exponential equation indicators was revealed to determine the degree of physical exertion of the body from the maximum level and prediction of aerobic performance. For these purposes, two linear multiparameter equations, and two formulas for the aerobic performance indicators calculation were developed. In these cases, the multiple correlation coefficients had a high level of significance, accounting for 0.85 and 0.92 units. The highest significance level for prediction was shown by residual dispersion, its relation to the total variance, the a_2 parameter of the exponential equation.

Conclusions. The developed algorithms are of great practical importance allowing to judge objectively the dynamics of functional status and performance of young athletes on the results of moderate and low intensity loads without the use of maximum tests (which are often contraindicated for research). Also the assessment of heart rate recovery after physical exertion using an exponential equation may be used for dynamic control of the functional capabilities of the body in scientific and practical activities in people not involved in sports, and in clinical settings.

Keywords: heart rate recovery; physical work capacity; the load intensity; the exponential model of equation; the residual variance.

Введение

В последние полтора-два десятилетия исследованиям по восстановлению сердечного ритма (ВСР) после физических нагрузок придается важное значение как в медицине, так и при организации физического воспитания и спорта. Рядом исследователей [1, 2] установлено, что замедленное восстановление частоты пульса является предиктором смертности у пациентов с риском кардиологических заболеваний. У детей и подростков индикаторы ВСР имеют отрицательную связь с показателями сердечно-сосудистого риска [3, 4] и избыточной массой тела [4], используются как предикторы состояния здоровья и качества жизни после операций по пересадке сердца [5, 6]. При организации физического воспитания и спорта как у взрослых, так и у детей обсуждаемые показатели рекомендуются для оценки эффективности применяемых

тренировочных режимов, регламентации характера физических нагрузок в ходе тренировочного процесса [7, 8].

Применяют различные подходы к исследованию и оценке динамики частоты пульса в восстановительном периоде после физической нагрузки. Проводят расчеты показателей восстановления относительно частоты пульса, зарегистрированного в конце нагрузки (PS_{ex}). Определяют величину снижения частоты пульса (PS) [1, 2] или отношение величины пульса, зарегистрированного в определенное время восстановительного периода, к PS_{ex} (rPS_{ext}) [9, 10]. Некоторые авторы [6, 11] рекомендуют определять ВСР по углу наклона линейной регрессии частоты пульса ко времени восстановления в течение 1-й минуты после прекращения нагрузки.

Исследуют также вариабельность сердечного ритма с целью изучения автономного контроля

сердца в периоде восстановления после физической нагрузки. В данном случае преобладают работы по изучению медленной фазы восстановления, через 5 мин и более, поскольку исследования в быструю фазу или первые минуты восстановительного периода имеют ограничения в связи с нестационарностью динамики частоты пульса в это время. Отдельные авторы используют метод линейной регрессии для расчета коротких фрагментов сердечного ритма в быструю фазу восстановительного периода [12]. Ими доказано, что рассчитываемые по остаточному среднеквадратичному отклонению от линии регрессии величины вариабельности сердечного ритма являются информативными для характеристики реактивации вагуса после физической нагрузки. Вместе с тем на временных отрезках более 30 с линейная модель регрессии недостаточно надежна для описания ВСП. В данном случае рекомендуется экспоненциальная модель уравнения при анализе частоты пульса в восстановительном периоде как в абсолютных [13, 10], так и в относительных величинах по отношению к частоте пульса окончания нагрузки [9, 14]. Однако параметры и статистические показатели экспоненциального уравнения используются крайне редко для оценки функционального состояния и физических возможностей организма в медицине и спорте. Недостаточно изучена зависимость характера восстановления частоты пульса в быструю фазу от интенсивности предшествующей физической нагрузки, а также возможность на основании этих данных прогнозировать физическую работоспособность.

Цель исследования – изучить характер динамики частоты пульса в быструю фазу восстановительного периода в зависимости от интенсивности велоэргометрических нагрузок с использованием экспоненциального уравнения для оценки интенсивности выполненной нагрузки и физической работоспособности.

Материал и методы

Под наблюдением находились 24 юных спортсмена 13–18 лет с различной направленностью тренировочного процесса (биатлон, лыжные гонки, футбол, карате, акробатика, тяжелая атлетика и др.). Юные спортсмены имели I или II спортивный разряд при спортивном стаже 3–6 лет. Средние показатели ($M \pm m$) длины, массы тела и подростковый индекс массы тела составили $175 \pm 7,6$ см, $63,75 \pm 13,4$ кг, $99,12 \pm 12,6$ ед. соответственно. По данным углубленного

медицинского обследования, спортсмены, допущенные до тестирования с физической нагрузкой, не имели острой заболеваемости, противопоказаний к занятиям спортом и нарушений сердечного ритма.

Исследование проводили в первой половине дня. Нагрузочное тестирование выполняли в положении сидя на велоэргометре Lode (Нидерланды), с непрерывной регистрацией показателей спироэргометрии на системе Cortex Metalyzer (Лейпциг, Германия) и продолжительности каждого сердечного цикла на системе Polar RS800 (Кемпеле, Финляндия) в периоде физической нагрузки и восстановления. Восстановление частоты пульса оценивали в течение 3 мин после каждой ступени нагрузки, проводимой в течение 4 мин. Начальная мощность нагрузки составляла 1 Вт/кг с последующим увеличением на 0,5 Вт/кг до отказа от работы.

Максимальное потребление O_2 (VO_{2max} , мл/кг/мин) определяли по наибольшей величине за 30 с на последней ступени нагрузки. Использовали следующие критерии достижения VO_{2max} :

- 1) невозможность поддержания частоты педалирования больше 50 об/мин;
- 2) дыхательный коэффициент 1,0 и более;
- 3) невозможность продолжения работы из-за утомления;
- 4) максимальная частота сердечных сокращений при завершении теста 95% и более от прогнозируемой величины с учетом возраста ($208 - 0,7 \times \text{возраст}$) [15].

Если были установлены три критерия из указанных, то обследуемых включали в анализ. Максимальную работоспособность (PWC_{max} , Вт/кг) определяли по мощности нагрузки, достигнутой на последней ступени нагрузки. Если обследуемый не отработал полностью 4 мин на определенной ступени нагрузки, то PWC_{max} определяли как:

$$N_p + 0,5 \times t_n / 4,$$

где N_p – мощность нагрузки полностью завершённой ступени, t_n – время, проработанное на незавершённой ступени нагрузки (мин).

Для математического описания динамики пульса в периоде восстановления использовали экспоненциальную модель уравнения типа:

$$Y = a_0 + a_1 \times \exp(a_2 \times t) \quad [10],$$

где a_0 , a_1 , a_2 – параметры уравнения, t – время после прекращения нагрузки (мин).

Предварительно динамику PS в 3-минутные периоды восстановления рассчитывали

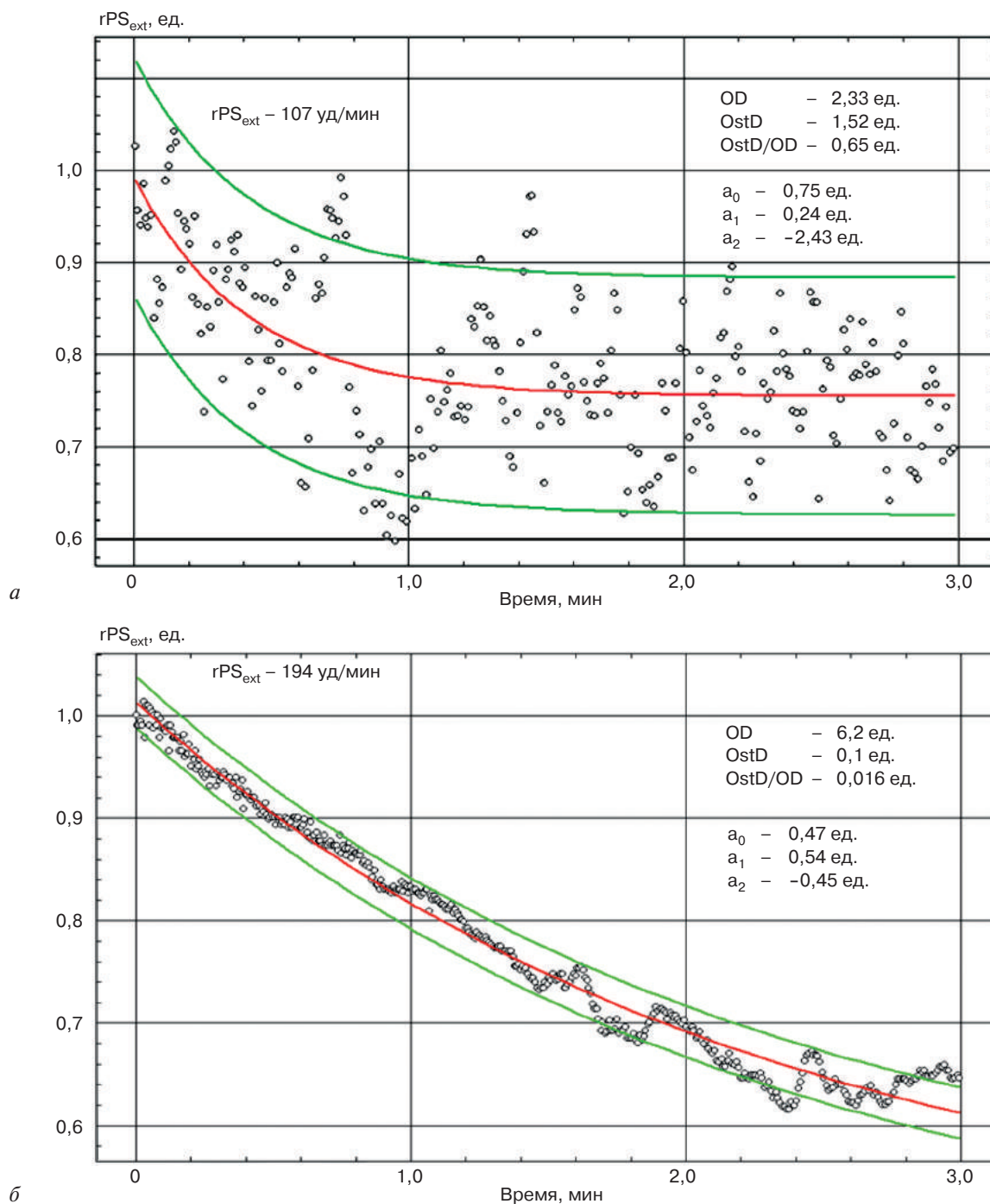


Рис. 1. Результаты анализа по экспоненциальной регрессии восстановления частоты пульса у биатлониста П.: *a* – мощность нагрузки 1,0 Вт/кг; *б* – мощность нагрузки 4,5 Вт/кг (максимальная нагрузка).

PS_{ex} – частота пульса окончания нагрузки; rPS_{ext} – относительная величина пульса с учетом PS_{ex} ; OD – общая дисперсия, OstD – остаточная дисперсия; a_0 , a_1 , a_2 – параметры уравнения

в относительных единицах (rPS_{ext}) к величине пульса окончания нагрузки (PS_{ex}), который определяли по средней величине PS за 10 с в конце каждой ступени нагрузки. Наряду с расчетом параметров уравнения a_0 , a_1 и a_2 анализировали величины статистических показателей экспоненциального уравнения: общей (OD) и остаточной (OstD) дисперсий, их отношения

(OstD/OD). Также по экспоненциальному уравнению определяли относительные показатели восстановления пульса через 0,5, 1 и 3 мин ($rPS_{0.5}$, rPS_1 , rPS_3). Пример расчета представлен на рисунке 1. Всего проанализировано 139 матриц, включавших показатели времени восстановления и частоты пульса, и только в 3 случаях при мощности нагрузки 1 или 1,5 Вт/кг экспоненци-

Таблица 1

Показатели частоты пульса юных спортсменов в конце нагрузки и в восстановительном периоде с учетом интенсивности выполненной нагрузки ($M \pm m$)

Параметр	Интенсивность нагрузки, %VO ₂ max						
	40 (n=20)	50 (n=20)	60 (n=20)	70 (n=20)	80 (n=20)	90 (n=20)	100 (n=20)
PS _{сх} , уд/мин	120,7±3,0	133,4±2,8	148,9±3,2	164,8±2,7	174,8±2,6	186,5±1,8	194,3±2,1
гPS0.5, ед.	0,78±0,02	0,77±0,01	0,78±0,01	0,81±0,01	0,83±0,01	0,87±0,01	0,89±0,01
гPS1, ед.	0,74±0,02	0,70±0,01	0,70±0,02	0,72±0,01	0,74±0,01	0,78±0,01	0,80±0,01
гPS3, ед.	0,72±0,02	0,67±0,01	0,65±0,02	0,65±0,01	0,64±0,01	0,64±0,01	0,63±0,01
гPS0.5/3, ед.	1,10±0,01	1,15±0,02	1,22±0,02	1,24±0,02	1,31±0,02	1,34±0,02	1,42±0,02

Примечание. PS_{сх} – пульс окончания нагрузки; гPS0.5, гPS1 и гPS3 – отношение частоты пульса через 0,5, 1 и 3 мин восстановления к частоте пульса окончания нагрузки; гPS0.5/3 – отношение гPS0.5 к гPS3

альная модель уравнения оказалась неадекватной. У 1 спортсмена из-за экстрасистол в восстановительном периоде анализ не проводили.

Интенсивность выполняемой работы на каждой ступени рассчитывали в процентах к максимальной мощности нагрузки (%PWCmax) или потреблению O₂ (%VO₂max). Анализ зависимости показателей ВСР от интенсивности нагрузки проводили по общей матрице, а также по выделенным фрагментам данных, сформированным с шагом через 10±5%, учитывая величины %VO₂max.

Статистический анализ

Обработку материалов, статистический анализ и математическое моделирование проводили с использованием программы STADIA [16]. Проверку гипотезы о нормальности распределения переменных осуществляли с помощью критериев Колмогорова и ω^2 . Данные представлены в виде среднего и стандартного отклонения $M \pm SD$. Коэффициенты корреляции рассчитывали по методике Пирсона с установлением критического уровня значимости при $p < 0,05$. Для математического моделирования использовали пошаговую регрессию в рамках линейной многопараметрической модели. Применяли метод последовательного включения переменных. Процесс прекращали, когда ни одна из оставшихся переменных не обеспечивала заданное минимальное значение статистики Фишера ($p < 0,05$). До включения в исследование все участники подписали письменное согласие.

Результаты

Средняя величина достигнутой максимальной мощности нагрузки составила 3,4 Вт/кг с диапазоном колебаний от 1,75 до 4,5 Вт/кг.

Соответственно, средняя величина VO₂max составила 51,83 с диапазоном колебания от 33 до 65 мл/кг. Показатели частоты пульса, зафиксированные при окончании нагрузок разной интенсивности и в восстановительном периоде, представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

При нагрузке 40% от VO₂max частота пульса составила 120,7±3,0 уд/мин и затем неуклонно увеличивалась практически пропорционально дальнейшему нарастанию интенсивности нагрузки, достигнув 194,3±2,1 уд/мин при VO₂max. С увеличением интенсивности нагрузки относительные величины частоты пульса, рассчитанные в определенное время восстановления через 0,5, 1 и 3 мин к частоте пульса окончания нагрузки, и их отношение, установленное по данным, полученным через 0,5 и 3 мин (гPS0.5/3), изменялись по-разному. Величина гPS0.5 неуклонно росла с 0,77±0,01 до 0,89±0,01 ед., начиная с нагрузки 50%VO₂max и при дальнейшем увеличении интенсивности до 100%, тогда как показатель гPS3, составив 0,72±0,02 ед. при наименьшей интенсивности нагрузки, достоверно снизился до 0,63±0,01 ед. к максимальной интенсивности нагрузки. Для анализа использовали также показатель гPS0.5/3, характеризующий их отношение. Соответственно, величина гPS0.5/3, составив 1,10±0,01 ед. при наименьшей интенсивности нагрузки, неуклонно увеличивалась с нарастанием интенсивности и достигла 1,42±0,02 ед. при максимальной интенсивности нагрузки. Величина показателя гPS1 изменялась нелинейно – вначале уменьшалась с нарастанием интенсивности нагрузки, а затем росла.

Параметры и статистические показатели экспоненциальной модели уравнения, описывающей динамику относительной величины пульса

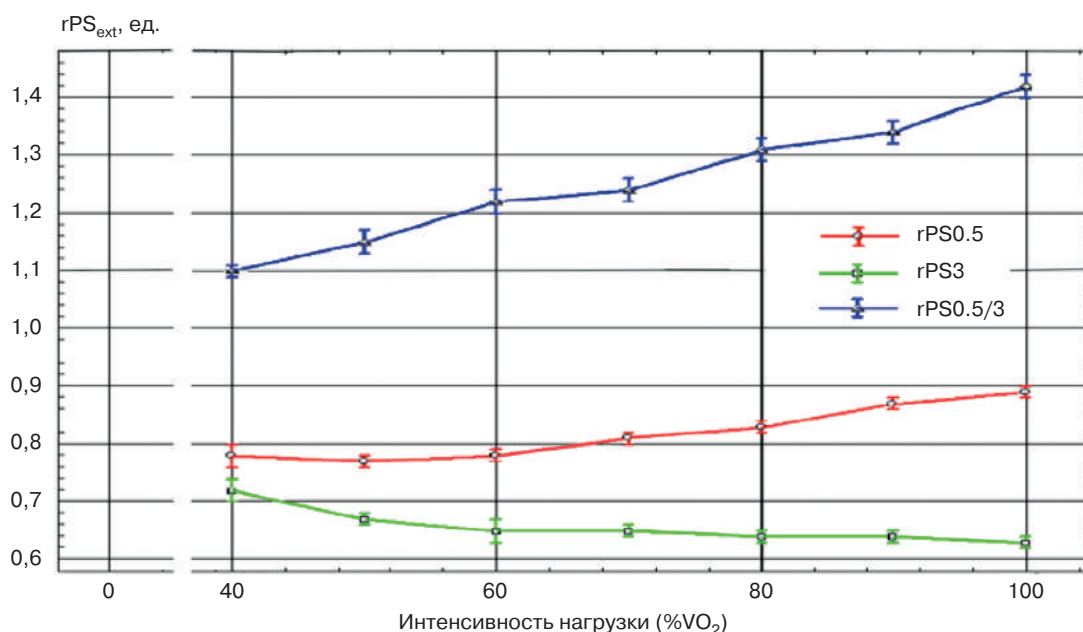


Рис. 2. Относительные показатели восстановления частоты пульса юных спортсменов в зависимости от интенсивности нагрузки.

rPS0.5 и rPS3 – отношение частоты пульса через 0,5 и 3 мин восстановления к частоте пульса окончания нагрузки; rPS0.5/3 – отношение rPS0.5 к rPS3

Таблица 2

Параметры и статистические показатели экспоненциального уравнения восстановления частоты пульса в зависимости от интенсивности нагрузки ($M \pm m$), ед.

Параметр	Интенсивность нагрузки, %VO ₂ max						
	40	50	60	70	80	90	100
a_0	0,71±0,02	0,67±0,01	0,64±0,02	0,64±0,01	0,62±0,01	0,60±0,01	0,53±0,02
a_1	0,31±0,02	0,36±0,02	0,37±0,02	0,38±0,02	0,40±0,02	0,42±0,02	0,49±0,02
a_2	-3,38±0,30	-2,78±0,25	-2,02±0,19	-1,86±0,17	-1,42±0,12	-1,10±0,1	-0,69±0,07
OD	2,20±0,19	3,20±0,26	3,70±0,42	4,10±0,35	5,00±0,35	5,29±0,34	6,12±0,37
OstD	0,82±0,07	0,81±0,07	0,67±0,07	0,53±0,06	0,33±0,04	0,22±0,02	0,14±0,02
OstD/OD	0,39±0,03	0,27±0,03	0,20±0,03	0,15±0,02	0,07±0,01	0,045±0,004	0,023±0,003

Примечание. a_0 , a_1 , a_2 – параметры уравнения; OD – общая дисперсия, OstD – остаточная дисперсия.

в восстановительном периоде, приведены в таблице 2 и на рисунке 3. Величины параметров регрессии a_0 , a_1 и a_2 в процессе нарастания интенсивности нагрузки неуклонно изменялись: a_0 снижался с $0,71 \pm 0,02$ до $0,53 \pm 0,02$ ед. при нарастании интенсивности с $40\%VO_{2max}$ до максимального уровня нагрузки, a_1 пропорционально рос с $0,31 \pm 0,02$ до $0,49 \pm 0,02$, a_2 увеличивался по абсолютной величине (снижение цифровых значений с отрицательным знаком) с $-3,38 \pm 0,30$ до $-0,69 \pm 0,07$.

Статистические показатели экспоненциального уравнения (см. табл. 2, рис. 4) при нарастании интенсивности нагрузки с $40\%VO_{2max}$ до максимального уровня изменялись следующим

образом: общая дисперсия OD, определяемая произведением среднего квадратичного отклонения на количество сердечных сокращений за 3 мин, неуклонно увеличивалась с $2,20 \pm 0,19$ до $6,12 \pm 0,37$ ед.; остаточная дисперсия OstD при описании восстановления сердечного ритма за 3 мин неуклонно снижалась с $0,82 \pm 0,07$ ед. при наименьшей интенсивности до $0,14 \pm 0,02$ ед. при максимальной интенсивности нагрузки. Соответственно, отношение остаточной дисперсии к общей OstD/OD с нарастанием интенсивности нагрузки неуклонно снижалось, составив 39% при интенсивности нагрузки $40\%VO_{2max}$ и 2,3% при максимальной интенсивности нагрузки.

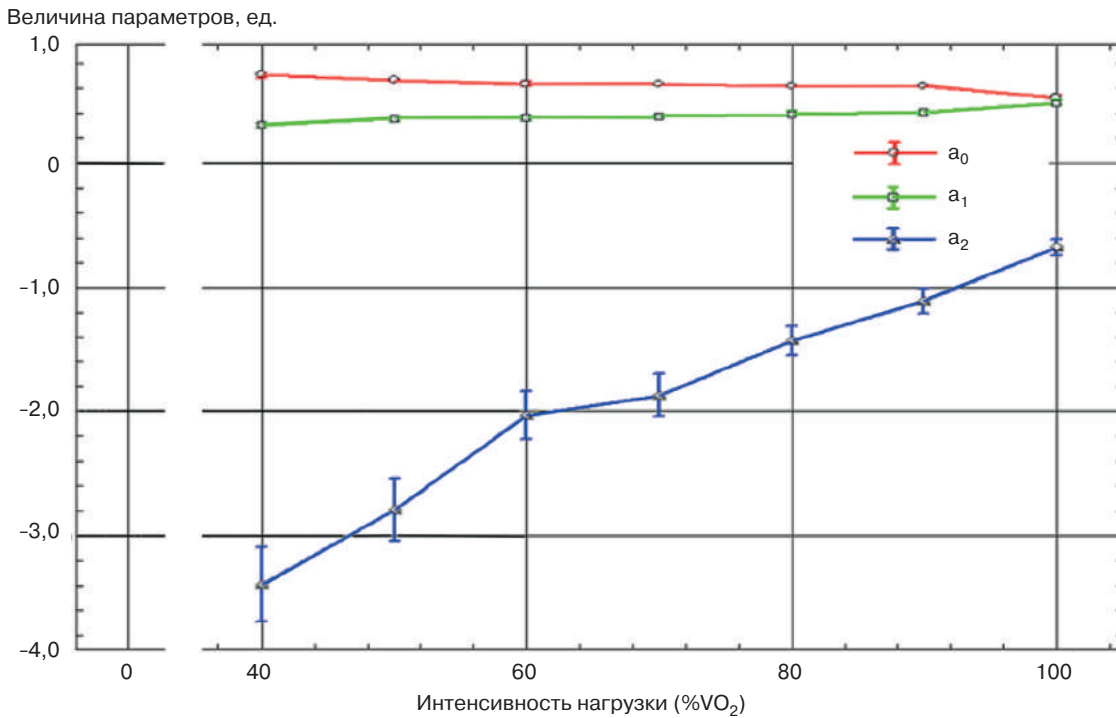


Рис. 3. Величины параметров экспоненциального уравнения у юных спортсменов в восстановительном периоде в зависимости от интенсивности предшествующей нагрузки

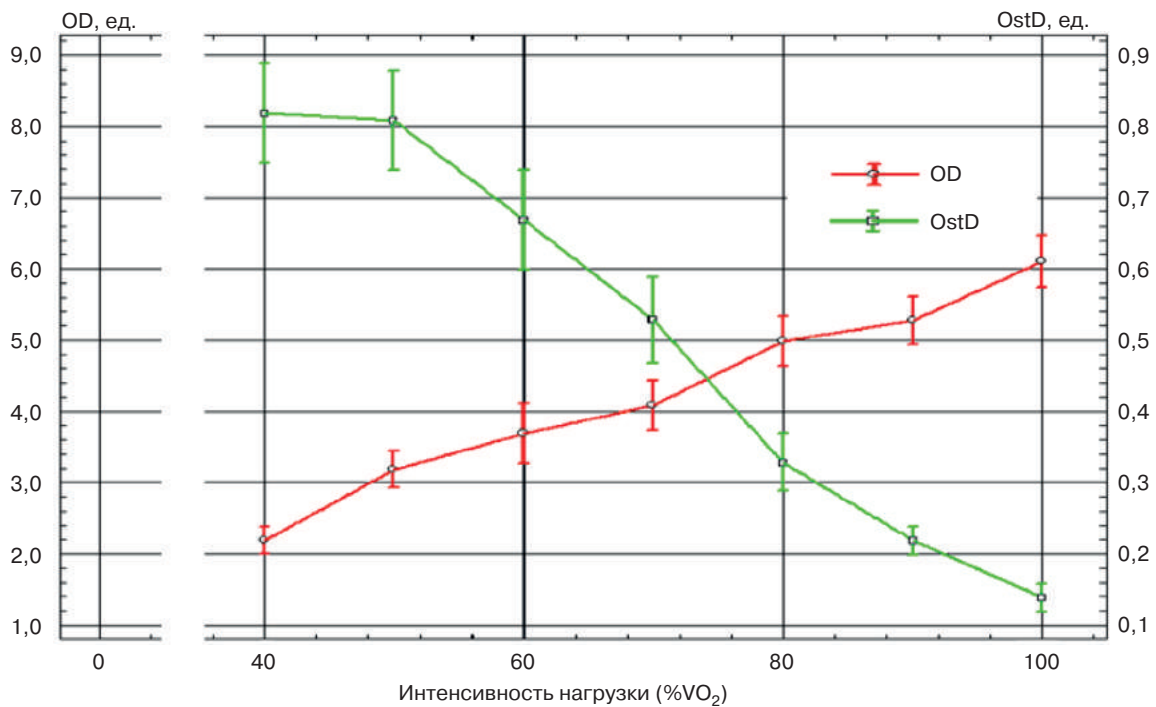


Рис. 4. Общая и остаточная дисперсия динамики пульса в восстановительном периоде в зависимости от интенсивности предшествующей нагрузки. OD – общая дисперсия; OstD – остаточная дисперсия

Между относительными показателями интенсивности нагрузки %VO_{2max} и %PWCmax, зарегистрированными на отдельных ступенях нагрузки, определяли высокую сопряженность, коэффициент корреляции составил 0,96 по дан-

ном общей матрицы. Коэффициенты корреляции показателей восстановления частоты пульса, рассчитанные по экспоненциальному уравнению с показателями интенсивности выполняемой нагрузки, представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции показателей
восстановления частоты пульса
с показателями интенсивности нагрузки %PWCmax
и %VO₂max (n = 137)**

Показатели восстановления частоты пульса	Показатели интенсивности нагрузки	
	%PWCmax	%VO ₂ max
rPS0.5	0,56	0,55
rPS3	-0,38	-0,39
rPS0.5/3	0,79	0,78
a ₀	-0,57	-0,57
a ₁	0,54	0,54
a ₂	0,72	0,72
OD	0,58	0,59
OstD	-0,73	-0,74
OstD/OD	-0,8	-0,81

Примечание. См. таблицы 1, 2.

Для большинства анализируемых переменных ВСП определяли достоверные корреляции от низкого до высокого уровня значимости с показателями интенсивности выполняемой нагрузки. Наиболее высокие уровни значимости корреляций с показателями интенсивности нагрузки зафиксированы для отношения остаточной дисперсии к общей, отношения PS, зарегистрированного через 0,5 мин восстановительного периода к таковому, полученному через 3 мин (rPS0.5/3), а также параметра a₂.

Установление значимости отдельных показателей экспоненциального уравнения для определения интенсивности выполняемой велоэргометрической нагрузки позволило разработать критерии расчета интенсивности нагрузки на основании многопараметрических уравнений. В таблице 4 приведены переменные, включаемые в эти уравнения, и значение их коэффициентов. Множественные коэффициенты корреляции при расчете %PWCmax и %VO₂max составляли 0,89 и 0,87 соответственно. Для расчета

максимальных показателей работоспособности предназначены формулы:

$$PWC_{max} = N_T \times 100 / \%PWC_{max} \text{ и}$$

$$VO_{2max} = VO_{2T} \times 100 / \%PO_{max},$$

где N_T и VO_{2T} – величины мощности нагрузки и потребления O₂, используемые при расчете показателей интенсивности нагрузки.

Обсуждение

Обзор литературы и данные, полученные нами, подтверждают надежность экспоненциальной модели уравнения для описания динамики пульса в восстановительном периоде после велоэргометрических нагрузок различной интенсивности. Использование данной модели позволяет получить комплекс разнообразных показателей. Кроме широко применяемых в медицине и спорте показателей частоты пульса и его относительных величин, рассчитываемых в определенное время восстановления с учетом пульса окончания нагрузки, мы проанализировали значение для оценки ВСП-параметров и статистических показателей экспоненциального уравнения, описывающих динамику частоты пульса в течение 3-минутного восстановительного периода.

С увеличением интенсивности нагрузки величины параметров и статистических показателей экспоненциального уравнения существенно изменяются, отражая рост напряженности функционирования организма при нагрузке. Показатель общей дисперсии, параметр a₁, множественный коэффициент корреляции экспоненциального уравнения увеличиваются, тогда как параметр a₀ и цифровое выражение параметра a₂, величина остаточной дисперсии, ее доля в общей дисперсии снижаются с нарастанием интенсивности нагрузки.

Динамика относительных показателей пульса с учетом интенсивности нагрузки зависит от регистрируемого времени восстановления. Величина rPS0.5 неуклонно повышается с нараста-

Таблица 4

**Прогнозирование интенсивности физической нагрузки по показателям восстановления частоты пульса
(многомерный анализ, пошаговая регрессия)**

Прогнозируемый показатель	R множ.	Математические модели прогнозирования
%PWCmax	0,89	61 – 66 × OstD/OD + 72 × rPS0.5/3 + 4,5 × a ₂
%VO ₂ max	0,87	25 – 61 × OstD/OD + 49 × rPS0.5/3 + 3,8 × a ₂

Примечание. R множ. – множественный коэффициент корреляции, определяемый на основании многомерного анализа показателей восстановления частоты пульса с интенсивностью нагрузки.

нием интенсивности, тогда как $rPS3$ снижается. Рассчитываемый по отношению двух предшествующих показателей индекс $rPS0.5/3$ имеет довольно высокую корреляцию с индикаторами интенсивности нагрузки.

Заключение

Установлена высокая информативность комплекса анализируемых показателей ВСР, определяемых по экспоненциальной модели для прогнозирования интенсивности выполняемой нагрузки от максимального уровня и для определения аэробной работоспособности. С этими целями разработаны два линейных многопараметрических уравнения и подготовлены две формулы для расчета показателей аэробной работоспособности PWC_{max} и VO_{2max} . Наибольший уровень значимости для прогнозирования имели показатели остаточной дисперсии, ее отношения к общей дисперсии, параметр a_2 экспоненциального уравнения, отношение $rPS0.5/3$.

Разработанные алгоритмы имеют важное практическое значение, позволяя без использования максимальных тестов (которые часто противопоказаны в рамках исследования) объективно судить о динамике функционального состояния и работоспособности юных спортсменов по результатам тестирования на основе нагрузок умеренной и невысокой интенсивности. Также оценка восстановления сердечного ритма после физических нагрузок с применением экспоненциального уравнения может использоваться при динамическом контроле функциональных возможностей организма в научной и практической деятельности у не занимающихся спортом и в клинических условиях.

Конфликт интересов

Конфликт интересов не заявляется.

Библиографический список [References]

1. Cole C.R., Blackstone E.H., Pashkov F.J., Snader C.E., Lauer M.S. Heart-rate recovery immediately after exercise as a predictor of mortality. *N. Engl. J. Med.* 1999; 341 (18): 1351–7. DOI: 10.1056/NEJM199910283411804
2. Peçanha T., Silva-Júnior N.D., Forjaz C.L. Heart rate recovery: autonomic determinants, methods of assessment and association with mortality and cardiovascular diseases. *Clin. Physiol. Funct. Imaging.* 2014; 34 (5): 327–39. DOI: 10.1111/cpf.12302
3. Lin L.Y., Kuo H.K., Lai L.P., Lin J.L., Tseng C.D., Hwang J.J. Inverse correlation between heart rate recovery and metabolic risks in healthy children and adolescents: insight from the National Health and Nutrition Examination Survey 1999–2002. *Diabetes Care.* 2008; 31 (5): 1015–20. DOI: 10.2337/dc07-2299
4. Laguna M., Aznar S., Lara M.T., Lucía A., Ruiz J.R. Heart rate recovery is associated with obesity traits and related cardiometabolic risk factors in children and adolescents. *Nutr. Metab. Cardiovasc. Dis.* 2013; 23 (10): 995–1001. DOI: 10.1016/j.numecd.2012.002
5. Singh T.P., Gauvreau K., Rhodes J., Blume E.D. Longitudinal changes in heart rate re-recovery after maximal exercise in pediatric heart transplant recipients: evidence of auto-nomic reinnervation? *J. Heart Lung Transplant.* 2007; 26 (12): 1306–12. DOI: 10.1016/j.healun.2007.08.013
6. Giardini A., Fenton M., Derrick G., Burch M. Impairment of heart rate recovery after peak exercise predicts poor outcome after pediatric heart transplantation. *Circulation.* 2013; 128 (11 Suppl. 1): S199–204. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.112.000369
7. Borresen J., Lambert M.I. Autonomic control of heart rate during and after exercise: measurements and implications for monitoring training status. *Sports Med.* 2008; 38 (8): 633–46. DOI: 10.2165/00007256-200838080-00002
8. Coote J.H. Recovery of heart rate following intense dynamic exercise. *Exp. Physiol.* 2010; 95 (3): 431–40. DOI: 10.1113/expphysiol.2009.047548
9. Savin W.M., Davidson D.M., Haskell W.L. Autonomic contribution to heart rate recovery from exercise in humans. *J. Appl. Physiol. Respir. Environ. Exerc. Physiol.* 1982; 53 (6): 1572–5. DOI: 10.1152/jappl.1982.53.6.1572
10. Прусов П.К., Прусова М.П. Характеристика и некоторые детерминанты скорости восстановления частоты пульса у юных спортсменов после ступенчато-возрастающей велоэргометрии до отказа. Итоговый сборник научных материалов V Международной научной конференции по вопросам состояния и перспективам развития медицины в спорте высших достижений. М.; 2010: 270–6. [Prusov P.K., Prusova M.P. Characteristics and some determinants of the heart rate recovery in young athletes after stepwise-increasing велоergometry to failure. The final collection of the proceedings of the 5th International Scientific Conference on the State and Prospects of Development of Medicine in the Highest Achievements Sports. Moscow; 2010: 270–6 (in Russ.).]
11. Imai K., Sato H., Hori M., Kusuoka H., Ozaki H., Yokoyama H. et al. Vagally mediated heart rate recovery after exercise is accelerated in athletes but blunted in patients with chronic heart failure. *J. Am. Coll. Cardiol.* 1994; 24 (6): 1529–35. DOI: 10.1016/0735-1097(94)90150-3
12. Goldberger J., Le F.K., Lahiri M., Kannankeril P.J., Ng J., Kadish A.H. Assessment of parasympathetic reactivation after exercise. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2006; 290 (6): H2446–52. DOI: 10.1152/ajpheart.01118.2005
13. Perini R., Orizio C., Comandè A., Castellano M., Beschi M., Veicsteinas A. Plasma norepinephrine and heart rate dynamics during recovery from submaximal exercise in man. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1989; 58 (8): 879–83. DOI: 10.1007/bf02332222
14. Прусов П.К. Показатели экспоненциального уравнения в оценке восстановления частоты пульса у юных спортсменов после выполнения возрастающих по мощности, прерывистых велоэргометрических нагрузок до отказа. *Спортивная медицина: наука и практика.* 2012; 4 (1): 12–9. [Prusov P.K. Parameters of exponential equation in estimation of recovery a pulse rate by young sportsmen after execution accelerated capacity, interrupted велоergometer loading to overflowing. *Sports Medicine: Research and Practice.* 2012; 4 (1): 12–9 (in Russ.).]
15. Tanaka H., Monahan K.D., Seals D.R. Age-predicted maximal heart rate revisited. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2001; 37 (1): 153–6. DOI: 10.1016/s0735-1097(00)01054-8
16. Кулаичев А.П. Методы и средства анализа данных в среде Windows. Stadia. М.: Информатика и компьютеры; 2002. [Kulaichev A.P. Methods and tools for data analysis in Windows environment. Stadia. Moscow: Informatika i Komp'yutery; 2002 (in Russ.).]

Поступила 09.04.2018

Принята к печати 19.04.2018