

УДК 613.731:613.735

ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ВРЕМЕННОГО РЯДА КАРДИОРИТМОГРАММЫ СТРЕССТЕСТА

© 2019 г. А. Л. Похачевский^{1, 3, *}, М. М. Лапкин³, Е. А. Трутнева³, Н. С. Бирченко³,
В. А. Похачевский², А. Б. Петров⁴, Ю. В. Шулико⁴, А. В. Калинин⁴

¹ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет
им. И.М. Сеченова МЗ РФ, Москва, Россия

²Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ФГБОУ ВО Рязанский государственный медицинский университет
им. акад. И.П. Павлова МЗ РФ, Рязань, Россия

⁴ФГБОУ ВО Национальный государственный Университет физической культуры,
спорта и здоровья им. П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: sport_med@list.ru

Поступила в редакцию 09.12.2017 г.

После доработки 04.08.2018 г.

Принята к публикации 01.11.2018 г.

Анализ индивидуальной переносимости физической нагрузки (ФН) объективно связан с изменчивостью временного ряда (ВР) кардиоритмограммы (КРГ). Ее математическое моделирование (М) — один из наиболее детальных способов изучения. Цель исследования — выявить изменчивость КРГ стресс-теста методом математического моделирования ее временного ряда с целью обнаружения прогностических маркеров переносимости ФН. Исследована смешанная выборка (СВ) практически здоровых испытуемых 18–22 лет (68 чел) из которой выделены 2 равные группы (34 чел): спортивной (1) и неспортивной (2) молодежи. Проведено максимальное велоэргометрическое тестирование по индивидуальному протоколу. Выделенный ВР КРГ подвергнут математическому моделированию. Маркеры М ВР КРГ раннего адаптационного периода (РАП) сопоставлены (*Spearman*) с индивидуальными нагрузочными и восстановительными показателями. Проведено межгрупповое сравнение (*Mann-Whitney*). Выяснено, что изменчивость КРГ РАП несет в себе характерные черты всего нагрузочного периода и связана с индивидуальной переносимостью ФН. Маркеры линейной и гиперболической модели РАП отражают особенности всего временного ряда и могут быть использованы для изучения изменчивости и связей с иными адаптационными механизмами. Минутные модели РАП выявили его критические этапы: максимальной изменчивости (1–2 мин), и стабильности (3 мин); максимальной скорости изменчивости (1 мин), выраженного снижения скорости (2 мин), минимальной скорости (3 мин). Последняя (3) минута РАП в смешанной выборке и 2 группе наилучшим образом отражает предел индивидуальной нагрузочной переносимости. Однородные группы существенно отличаются друг от друга по максимальному уровню и хронотропным параметрам переносимости ФН, времени начала и скорости изменения ВР КРГ. При этом для смешанной выборки и группы неспортивной молодежи маркеры М РАП отражают индивидуальную переносимость ФН в меньшей степени, чем средние и максимальные значения ЧСС, определенные за весь нагрузочный период. Для спортсменов настоящие маркеры в меньшей степени определяют максимум переносимости, но свидетельствуют о качестве переносимости ФН. Маркеры М РАП, выявляя характерные черты и особенности хронотропной адаптации, могут быть использованы: в смешанной популяции для скрининга; в спортивной группе — для изучения и прогноза формирования выносливости, тренированности, контроля усвоения ФН в динамике, профилактики перегрузки, перетренировки; в группе неспортивной молодежи — объективно свидетельствовать о состоянии здоровья, существенности нарушений адаптационных процессов (переносимости ФН).

Ключевые слова: математическое моделирование кардиоритмограммы, критерии, маркеры, прогноз переносимости физической нагрузки, максимальное нагрузочное тестирование.

DOI: 10.1134/S0131164619030147

Анализ индивидуальной переносимости физической нагрузки (ФН) объективно связан с изменчивостью сердечного ритма (СР) при нагрузочном тестировании [1–6]. Одним из направле-

ний, позволяющим наиболее детально изучить эту изменчивость является исследование временного ряда (ВР) кардиоритмограммы (КРГ) – последовательности длительностей кардиоинтервалов (КИ) [7–11]. До настоящего времени чаще всего используются классические производные хронотропной функции миокарда: средние, экстремальные (максимальные, минимальные), фрагментарные, случайные и пиковые значения частоты сердечных сокращений (ЧСС). Несмотря на хорошую воспроизводимость, достаточную точность и легкость регистрации каждый из перечисленных дериватов ЧСС обладает существенными погрешностями, так как отражает эмпирически выбранную часть временного ряда КРГ. В свою очередь математическое моделирование (М) и анализ ВР КРГ позволяет объективно выявить наиболее значимые маркеры изменчивости, определить их реперные величины и в дальнейшем обнаружить связи с другими показателями адаптационных реакций. Кроме того изучение ранних маркеров изменчивости ВР КРГ вероятно позволит реализовать их прогностические возможности связанные с выяснением предельных возможностей организма при субмаксимальных и даже минимально значимых нагрузках. Последнее весьма актуально при назначении ФН с реабилитационной целью на соответствующих этапах после перенесенных коронарных инцидентов и оперативных вмешательств, а также контроля нагрузочной толерантности [12–20].

Настоящий подход в целом имеет целью вывести спортивно-тренировочный процесс на доказательный уровень, с вероятностным прогнозом переносимости ФН, ее усвоения организмом, контроля процессов восстановления, профилактики перегрузки и перетренировки [21, 22].

Цель исследования – изучить изменчивость ВР КРГ стресса методом математического моделирования с целью обнаружения прогностических маркеров переносимости ФН.

МЕТОДИКА

Смешанную выборку (СВ) практически здоровых испытуемых 18–22 лет (68 чел) разделили на 2 равные группы по 34 чел: спортивную (1) и неспортивную (2) молодежь по анамнестическому признаку отношения к систематическим физическим нагрузкам. Группу 1 (19 юношей, 15 девушек) подвергали систематическим физическим нагрузкам – тренировкам преимущественно на выносливость не реже 1, 2 раз в день по 90–120 мин, 5–6 раз в нед. Группу 2 (21 юноша, 13 девушек) занимали физической культурой только по плану учебного учреждения – не чаще 1, 2 раз в неделю по 90 мин. Максимальное велоэргометрическое тестирование осуществляли по индивидуальному протоколу. Мощность $W1$ (Ватт) первой ступени

длительностью 3 мин рассчитывали исходя из величины должного основного обмена (ДОО) в килокалориях по формуле $W1(Вт) = ДОО \times 0.1$. В дальнейшем нагрузка ступенчато возрастает на 30 Вт каждую минуту до индивидуального максимума (Wmx) – снижения скорости педалирования ниже 30 оборотов в мин, обуславливающего конец нагрузки и начало восстановительного периода длительностью 7 мин [8–11].

Нагрузочные пробы проводили в первой половине дня с 8 до 12 ч на велоэргометре *LodeCorival* (диапазон нагрузки 7–1000 Вт). В течение всего времени тестирования посредством кардиоанализатора “ПолиСпектр-12” (Нейрософт, частота квантования 1000 Гц) записывали оцифрованную электрокардиограмму, из которой выделяли последовательный временной ряд RR -интервалов ($R-R$) – кардиоритмограмму и удаляли все эктопические сокращения.

Временные ряды КРГ нагрузочного периода анализировали как линейные (Лин) $Y = aX + b$ и гиперболические (Гип) $Y = a/X + b$ математические модели, где X – порядковый номер RR -интервала во временном ряду КРГ, Y – длительность RR -интервала, “ a ” – параметр модели наклон (Н), характеризующий (скорость для линейной модели) уровень изменчивости временного ряда и “ b ” – параметр модели отрезок (О), определяющий его постоянную составляющую. Оптимизацию моделей достигали методом наименьших квадратов. Математическому моделированию подвергали ВР КРГ раннего адаптационного периода (РАП): отдельно первой (1), второй (2), третьей (3) минуты нагрузки; попарно: 1, 2; 2, 3; 1, 3; всего раннего адаптационного периода: 1–3.

Обработку и математическое моделирование ЧСС всего нагрузочного (НП) и восстановительного (ВП) периодов осуществляли в виде гиперболической модели: $Y = a/X + b$, где X – время нагрузки или восстановления, Y – ЧСС в момент времени X нагрузочного или восстановительного периода, “ n ” (НПн, ВПн) и “ o ” (НПо, ВПо) – параметры модели, определяющие уровень и постоянную составляющую изменчивости (в нагрузочный и восстановительный периоды соответственно). Оптимизацию моделей достигали методом наименьших квадратов.

Длительность восстановления определяли интегральным показателем (ИП), как сумму КИ за 7 мин восстановительного периода.

ЧСС нагрузочного периода учитывали по абсолютным показателям: $ЧСС_{mx}$, $ЧСС_1$, $ЧСС_{ср}$, где “ mx ” – максимальная (пиковая) ЧСС на высоте нагрузки, “1” – средняя ЧСС первой ступени нагрузки, “ср” – средняя ЧСС за весь нагрузочный период; относительный показатель – индекс хронотропного резерва (ИХР) рассчитывали по

формуле: $(ЧСС_{mx} - ЧСС_1) / ЧСС_1 \times 100$. Все показатели ЧСС рассчитывали как $60/R - R$ (ударов в мин) исходя из временного ряда КРГ с использованием *Microsoft Excel*.

При анализе переносимости ФН учитывали абсолютные показатели: достигнутый максимум ФН (W_{mx}) в Ваттах; разницу между W_{mx} и мощностью первой ступени (W_1): $W = W_{mx} - W_1$; относительные показатели переносимости: производительность работы левого желудочка (ПРЛЖ), вычисляемые по формуле: $(W_{mx} / ЧСС_{mx}) \times 100$, где $ЧСС_{mx}$ – максимальная ЧСС на пике нагрузки; W/P_s – по формуле: $W / ЧСС_{mx}$.

Результаты исследования обрабатывали с помощью статистического пакета *Statistica 6.0*. Поскольку распределение полученных значений отличалось от нормального, данные представляли в виде перцентильного (Пц) ряда (25–Me–75), минимального (Min) и максимального (Mx) значений. Для статистической обработки использовали непараметрические методы сравнения: *Mann-Whitney* и корреляционный анализ *Spearman*. Принятый уровень статистической существенности: $p < 0.005$ (если не указано иначе).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Смешанная выборка характеризуется существенным разнообразием показателей переносимости ФН с широким диапазоном колебаний (табл. 1). Их экстремальные значения могут различаться на 29% ($ЧСС_{mx}$), в 3 (ПРЛЖ) и даже в 6 раз (W). Ширина диапазона, вероятно, отражает неоднородность популяции, обусловленную уровнем переносимости ФН. Группы, выделенные с учетом настоящего признака характеризуются существенными различиями не только по всем показателям переносимости ФН, но и квартильному размаху (25–75 Пц) – объему изменчивости. При этом если абсолютный показатель переносимости ФН и хронотропных резервов существенно преобладает в группе спортсменов, то их квартильный размах – в группе сравнения. Те же закономерности характеризуют показатели относительной переносимости (ПРЛЖ, W/P_s). В свою очередь все маркеры ЧСС нагрузочного периода проявляются существенным доминированием, включая квартильный размах, в группе неспортивной молодежи. Восстановительный период обуславливается существенным преобладанием скорости изменения (урегия) ЧСС в группе спортсменов, а показателей длительности восстановления (ИП) и частотного уровня (ВПо) в группе сравнения, в ней же по всем показателям устойчиво доминирует и объем интерквартильной изменчивости.

Таким образом, наличие в группе спортсменов развитой аэробно-анаэробной выносливости – высокой физической работоспособности (ФР), проявляется не только преобладающим уровнем перенесенной нагрузки, но и максимумом хронотропных резервов. Последнее обстоятельство, кроме того, позволяет осуществлять больший объем адаптационных реакций на преобладающих скоростях хронотропной изменчивости. Следовательно, превалирующий уровень хронотропных резервов в нагрузочный период и скорость их изменчивости (в нагрузочный и восстановительный период) позволяют достичь больших максимальных нагрузок при меньших хронотропных затратах, а после прекращения нагрузки – быстрее восстановиться. Большой объем изменчивости показателей переносимости ФН в группе неспортивной молодежи свидетельствует о незавершенности системогенеза функциональной системы (ФС) отвечающей за формирование выносливости – высокого уровня переносимости ФН [23].

Взаимосвязи хронотропных маркеров переносимости с абсолютными и относительными показателями мощности ФН также имеют существенные различия в зависимости от уровня выносливости (табл. 2).

В смешанной выборке механизмы взаимосвязи обуславливаются достаточно сильной обратной закономерностью, когда большему значению любого из показателей мощности ФН (W , ПРЛЖ, W/P_s) соответствует меньшее значение всех проявлений нагрузочной (первой ступени, средней, максимальной, маркеров модели КРГ) и восстановительной (маркеров модели и ИП) ЧСС. Однако это связано с особенностью самой выборки объединяющей испытуемых с полярным уровнем развития выносливости, когда большая ФН у спортсмена обеспечивается меньшей нагрузочной ЧСС и быстрым восстановлением, в то время как представитель неспортивной молодежи переносит меньшую нагрузку при больших хронотропных затратах и длительном восстановлении. Естественно, что в относительно однородных группах возникают иные закономерности.

Характерными чертами нагрузочных показателей в группе спортсменов являются взаимосвязи с маркерами восстановления проявляющимися необходимостью в дополнительных хронотропных расходах (большей ЧСС, длительности периода и меньшей скорости увеличения КИ) возникающих в условиях предельных (для популяции) объемов перенесенных нагрузок. Нечеткая связь со скоростью изменения ЧСС в восстановительный период вероятно обуславливается взаимной компенсацией (максимально развитых у спортсменов) интенсивных тормозных вагусных модуля-

Таблица 1. Референтные величины нагрузочных параметров исследуемых групп*

| Показатель/ Группа | Пц | ПРЛЖ | ИХР | W/Ps | W(Вт) | НПн | НПо | ЧСС1 | ЧСС _{mx} | ЧСС _{ср} | ИП | ВПн | ВПо |
|-----------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------------------|--------|-------|-------|
| СВ | 25 | 143.8 | 119.3 | 67.9 | 127.5 | -60.3 | 152.1 | 110.0 | 164.3 | 136.1 | 740.8 | 86.3 | 57.7 |
| | Me | 241.5 | 161.5 | 144.2 | 240.0 | -52.8 | 170.0 | 117.5 | 172.0 | 150.6 | 842.0 | 94.6 | 75.5 |
| | 75 | 259.0 | 189.3 | 150.9 | 240.0 | -44.3 | 193.4 | 155.8 | 189.8 | 177.8 | 1117.8 | 104.4 | 111.8 |
| | Min | 101.0 | 70.7 | 31.6 | 60.0 | -69.4 | 143.6 | 94.0 | 157.0 | 124.1 | 677.0 | 69.3 | 49.4 |
| | Max | 305.0 | 230.0 | 206.9 | 360.0 | -18.9 | 204.7 | 176.0 | 203.0 | 184.9 | 1182.0 | 109.2 | 121.3 |
| 1 | 25 | 245.0 | 174.0 | 146.6 | 240.0 | -63.9 | 147.1 | 105.5 | 160.3 | 132.8 | 703.5 | 91.7 | 51.9 |
| | Me | 255.0 | 184.5 | 150.9 | 240.0 | -54.9 | 153.9 | 110.0 | 166.5 | 136.3 | 759.5 | 103.2 | 59.6 |
| | 75 | 268.8 | 193.5 | 159.1 | 270.0 | -49.8 | 159.0 | 115.8 | 169.8 | 142.9 | 819.8 | 105.9 | 68.0 |
| | Min | 229.0 | 126.0 | 141.2 | 240.0 | -69.4 | 143.6 | 94.0 | 157.0 | 124.1 | 677.0 | 74.2 | 49.4 |
| | Max | 305.0 | 230.0 | 206.9 | 360.0 | -43.8 | 174.7 | 126.0 | 174.0 | 160.3 | 928.0 | 109.2 | 84.9 |
| 2 | 25 | 110.0 | 78.0 | 47.6 | 90.0 | -53.7 | 191.1 | 155.0 | 189.0 | 172.6 | 1117.0 | 72.6 | 111.5 |
| | Me | 143.0 | 115.0 | 63.3 | 120.0 | -37.8 | 197.2 | 158.5 | 194.0 | 181.1 | 1131.5 | 84.5 | 112.9 |
| | 75 | 146.0 | 139.0 | 73.9 | 150.0 | -22.3 | 201.3 | 170.0 | 203.0 | 183.2 | 1159.0 | 94.6 | 115.6 |
| | Min | 101.0 | 70.7 | 31.6 | 60.0 | -60.4 | 184.5 | 146.0 | 182.0 | 170.2 | 1093.0 | 69.3 | 104.7 |
| | Max | 163.0 | 152.0 | 88.7 | 180.0 | -18.9 | 204.7 | 176.0 | 203.0 | 184.9 | 1182.0 | 103.3 | 121.3 |

Примечание: * – различия между 1 и 2 группой статистически существенны по всем показателям ($p < 0.005$). СВ – смешанная выборка; Пц – перцентиль: 25, 75, Me (медиана); Min (минимальное), Max (максимальное) значение. ПРЛЖ – производительность работы левого желудочка. ИХР – индекс хронотропного резерва. W – абсолютная мощность нагрузки (Вт). Маркеры математической модели КРГ: НПн, НПо – нагрузочный период; ВПн, ВПо – восстановительный период; наклон, отрезок соответственно. ЧСС1, ЧСС_{mx}, ЧСС_{ср} – частота сердечных сокращений, 1 степени, пиковое, среднее значение соответственно (уд./мин). ИП – интегральный показатель восстановления.

Таблица 2. Корреляционные связи нагрузочных и хронотропных маркеров ($p < 0.005$)

| Маркеры | | ИХР | НПн | НПо | ЧСС1 | ЧСС _{mx} | ЧСС _{ср} | ИП | ВПн | ВПо |
|---------|----|--------|--------|--------|--------|-------------------|-------------------|-------|--------|--------|
| W | СВ | 0.74 | -0.68 | -0.59 | -0.73 | -0.56 | -0.60 | -0.59 | 0.58 | -0.62 |
| | 1 | -0.07* | -0.26* | 0.14* | -0.02* | 0.32 | 0.17* | 0.56 | -0.34 | 0.59 |
| | 2 | 0.37 | -0.66 | 0.60 | -0.49 | 0.58 | 0.43 | 0.31 | 0.66 | -0.03* |
| W/Ps | СВ | 0.66 | -0.58 | -0.65 | -0.76 | -0.62 | -0.66 | -0.58 | 0.48 | -0.60 |
| | 1 | -0.12* | 0.04* | -0.08* | -0.04* | 0.04* | -0.08* | 0.43 | -0.55 | 0.52 |
| | 2 | 0.81 | -0.87 | 0.67 | -0.72 | 0.60 | 0.26* | 0.32 | 0.67 | 0.03* |
| ПРЛЖ | СВ | 0.67 | -0.55 | -0.70 | -0.78 | -0.68 | -0.72 | -0.61 | 0.40 | -0.61 |
| | 1 | 0.10* | -0.56 | 0.59 | 0.27 | 0.78 | 0.61 | 0.72 | -0.09* | 0.68 |
| | 2 | 0.46 | -0.75 | 0.70 | -0.52 | 0.68 | 0.46 | 0.41 | 0.72 | 0.01* |

Примечание: * – $p > 0.05$. Обозначения см. табл. 1.

ций, урежающих ЧСС и возросших хронотропных затрат из-за предельно высоких ФН – увеличивающих ЧСС периода [7, 10].

Утраченная связь с ИХР и ЧСС1 в нагрузочный период свидетельствует об истощенности хронотропных влияний на переносимость ФН, так как уровень этого резерва в данной группе максимальный и не может быть увеличен. При анализе W, W/Ps влияние иных нагрузочных маркеров также не выявляется. Тем не менее, изучение ПРЛЖ вскрыло участие маркеров модели,

средних и максимальных значений ЧСС. При этом большему уровню ПРЛЖ соответствует преобладающая скорость изменчивости, НПн, рост максимальных и средних значений ЧСС нагрузочного периода. Следовательно, лучшей переносимости максимальной нагрузки способствует большая хронотропная реактивность (скорость изменения ЧСС) с учетом подключения всех имеющихся возможностей, приводящих как к достижению максимальных значений ЧСС, так и к соответствующему увеличению его средних значе-

ний. Однако здесь стоит отметить разницу показателей – ПРЛЖ, W/Ps . Если первый характеризует переносимость максимальной нагрузочной ступени, то второй – переносимость всего нагрузочного объема определяемого разностью максимальной и первой ступени нагрузки. Различие настоящих показателей заключается в учете первой ступени, которая зависит от ДОО и соответственно масса-ростовых и возрастных показателей. Чем больше по массе спортсмен, тем больше мощность первой ступени и тем выше вероятность достижения преобладающего относительно спортсменов с меньшей массой и ростом максимума нагрузки, в то время как количество нагрузочных ступеней и соответственно общий объем нагрузки может быть меньшим. Таким образом, показатель ПРЛЖ, отражая максимально достигнутое значение мощности нагрузки и игнорируя общий объем перенесенной ФН, вряд ли может быть использован для точного анализа переносимости ФН, в то время как показатель W/Ps – лишенный этого недостатка, является предпочтительным.

Группа неспортивной молодежи в нагрузочный период весьма требовательна к общему объему хронотропных резервов (за счет обеих границ): его левой границе – ЧСС первой ступени, так как эти резервы в настоящей группе далеки как от максимального объема, так и от оптимального использования, ЧСС mx – правой границе, высокой скорости роста ЧСС и маркера математической модели НПо (физиологически соответствующее среднему значению ЧСС), что подтверждает необходимость большего объема хронотропных издержек при возрастании ФН. Последнее обстоятельство находит подтверждение и в восстановительный период, фактически лишенный рациональных регуляторных амбиций. При этом возрастание длительности восстановления (ИП) и увеличение скорости урежения КИ не отражающееся на ЧСС восстановительного периода в целом, вероятно, свидетельствует о напряженности и нехватке парасимпатического тормозного потенциала [7].

Таким образом, взаимосвязи маркеров переносимости с абсолютными и относительными показателями мощности нагрузки в смешанной выборке обуславливаются достаточно сильной обратной закономерностью, когда большему значению мощности соответствует меньшее значение средней, максимальной ЧСС. При этом относительные нагрузочные параметры переносимости демонстрируют больший уровень взаимосвязи с показателями ЧСС ($ср, mx, 1$) – ПРЛЖ $> W/Ps > W$, в то время как ИХР существенно доминирует для абсолютных значений мощности (W). Однако обращают на себя внимание еще несколько моментов. Во-первых, знак взаимосвязи ИХР отличается от остальных значений ЧСС. Во-вторых, значение связи ЧСС1 во всех случаях превосходит

значения ЧСС ($ср, mx$), имеющие отношение ко всему массиву нагрузочного периода. В третьих, направление связи ЧСС1 и mx противоположны.

Действительно, чем более выражены хронотропные резервы, тем шире диапазон изменчивости ЧСС и тем большая нагрузка может быть достигнута. Однако достижения максимума диапазона, возможно как за счет снижения ЧСС1, так и повышения ЧСС mx , что и происходит в группе неспортивной молодежи. При этом увеличение переносимости ФН требует не столько количественного увеличения хронотропных резервов сколько их качественного улучшения, которое бы позволило преодолевать ФН в режиме энерго- и хроносбережения. По данным исследования, во-первых, расширение ХР происходит преимущественно за счет низкого частотного диапазона, что определяется нижней границей – ЧСС1, во-вторых, рабочий диапазон ЧСС при этом уменьшается, что и доказывает его (сравнительно) меньший интерквартильный размах. Кроме того, в рамках сформированной у спортсмена функциональной системы и четко определенных ею оптимальных значений ЧСС (для преодоления предельно-возможных нагрузок), большой хронотропный диапазон не требуется. В условиях незавершенного системогенеза в группе неспортивной молодежи перебор возможных вариантов хронотропного обеспечения в рамках большого объема степеней свобод и приводит к максимальному расширению объема ХР за счет всех возможностей, тем более что увеличение ЧСС mx достигается быстрее, хотя и энергозатратнее, нежели чем вагусное хроно- и энергосбережение, которое определяется частотой включения ФС (частотой в недельном микроцикле и качеством тренировок) по преодолению ФН – эффект которых, связанный с совершенствованием ФС и называется тренированностью, приводя к формированию выносливости.

В смешанной же выборке благодаря ее неоднородности, связанной с включением полярных (по уровню выносливости) групп, удается установить и показать преобладающее значение для улучшения переносимости ФН не верхней границы ХР, определяемой по ЧСС mx , а нижней – ЧСС1, что подтверждается и ранее полученными данными [7, 10]. Настоящая закономерность подтверждается обратной связью и возрастанием роли средней ЧСС, которая и в данном случае в большей степени определяется уровнем ЧСС первой ступени, нежели, чем ее максимальным значением.

Когда речь идет об относительных показателях характеризующих хронотропную эффективность переносимости ФН, определяемую по затратам ЧСС на единицу достигнутой мощности, становятся понятными выявленные закономерности в группе неспортивной молодежи. Прямая связь со

Таблица 3. Маркеры временного ряда КРГ раннего адаптационного периода

| Временные отрезки | | 1 | | 2 | | 3 | | 1, 2 | | 2, 3 | | 1, 3** | | 1–3** | |
|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| М | Группа | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин |
| Н | СВ | 173.8 | −0.97 | 26.85 | −0.12 | 15.80 | −0.12 | 229.9 | −0.38 | 51.60 | −0.10 | 254.5 | −0.39 | 269.9 | −0.21 |
| | 1 | 206.1 | −1.26 | 15.84 | −0.04 | 11.28 | −0.07 | 256.8 | −0.43 | 13.19 | −0.03 | 258.6 | −0.40 | 274.1 | −0.20 |
| | 2 | 155.6 | −0.63 | 37.49 | −0.17 | 27.00 | −0.13 | 228.6 | −0.36 | 74.98 | −0.14 | 254.5 | −0.39 | 269.9 | −0.21 |
| О | СВ | 554.3 | 600.7 | 527.4 | 536.9 | 520.7 | 522.9 | 543.6 | 580.6 | 524.9 | 528.7 | 545.1 | 580.6 | 538.3 | 566.5 |
| | 1 | 584.5 | 673.6 | 566.1 | 568.1 | 554.8 | 566.4 | 572.9 | 636.6 | 558.3 | 573.4 | 559.3 | 636.2 | 563.5 | 612.9 |
| | 2 | 435.2 | 481.9 | 389.0 | 406.3 | 379.7 | 383.6 | 411.0 | 467.2 | 382.5 | 401.2 | 403.2 | 465.9 | 399.3 | 450.0 |

Примечание: ** – различия между 1 и 2 группой статистически существенны по всем показателям ($p < 0.005$), за исключением Н 1, 3; 1–3 ($p > 0.05$). М – маркеры математической модели: Н (наклон), О (отрезок); Гип – гиперболическая, Лин – линейная модель. СВ – смешанная выборка.

средней и максимальной ЧСС в ней указывает на несовершенство адаптационных процессов, когда уровень хронотропной стоимости возрастает не пропорционально нагрузке и настолько велик, что препятствует преодолению и абсолютному росту последней.

При этом, если ЧСС_{тх} в большей степени регламентирована возрастными и генетическими факторами, то ЧСС (ср, 1) определяются индивидуальным уровнем развития аэробно-анаэробной выносливости, что в существенной степени имеет отношение к спортивной тренировке, формирующей это качество. Кроме того развитие данного физического качества приводит и к снижению ЧСС_{тх}, что не только не позволяет достичь возрастного максимума, но и проводить у спортсменов циклических видов спорта пробу РВС170, так как значение ЧСС в 170 ударов в минуту у них вообще не достижимо [7]. При этом последнее обстоятельство не только не препятствует достижению в стрессе сверхвысокой физической работоспособности (ФР), но и способствует этому. Иными словами максимальная ФР определяется объемом ХР (диапазоном ЧСС), оптимальный уровень которых достигается преимущественно за счет ЧСС первой ступени. При этом среднее значение ЧСС, кроме того, определяется низкой скоростью роста данного показателя при возрастании ФН.

Минимум зарегистрированных хронотропных влияний в группе спортсменов связан с предельным напряжением одноименных ресурсов – минимуме степеней свобод – истощенности резервов (но остаются варианты со специальными нагрузками), участие ЧСС1 также отсутствует (но это со ступенью в целом, возможно существуют связи с более короткими отрезками).

Выясненные закономерности, а именно существенное участие первой ступени в формировании нагрузочной переносимости, потребовало ее более детального изучения (табл. 3). Особого вни-

мания заслуживают взаимосвязи предельных показателей переносимости ФН и изменчивости КРГ раннего адаптационного периода (табл. 4–6).

Сравнение групп по выраженности показателей модели и их изменчивости проявляется существенным преобладанием линейной скорости укорочения КИ на первой минуте в группе спортсменов (в 2 раза), гиперболическая изменчивость демонстрирует меньшую динамику (+32%). На второй и третьей минуте преобладание скорости демонстрирует группа сравнения: в линейном масштабе – в 4.4 и 1.8 соответственно, в гиперболическом – в равной степени для обеих минут в 2.4 раза. Линейная скорость на отрезке 1–2 превалирует на 22% в группе спортсменов (гиперболическая – на 12%) в то время как на отрезке в 2–3 – в группе сравнения: линейная – в 4.3 раза, гиперболическая – в 5.7. Скорости на отрезке 1; 3 и 1–3 (на всем РАП) фактически неразличимы.

Поминутная изменчивость: депрессия скорости ко 2 мин существенно преобладает в группе спортсменов (линейная: в 32 раза, против 3.7 – в группе сравнения, гиперболическая в 13 и 4.2 раза соответственно); к 3 мин линейная скорость увеличивается у спортсменов в 1.8 раза и продолжает снижаться в группе сравнения в 1.4 раза, гиперболическая – в равной степени уменьшается для обеих групп в 1.4 раза. Различия в парах также существенны: линейная изменчивость доминирует к отрезку 2–3 в группе спортсменов (13.4 против 2.55), преобладание в гиперболическом масштабе еще более существенно (19.5 против 3.1).

Сравнительная поминутная изменчивость маркера модели О характеризуется равным возрастанием ко второй минуте в линейном масштабе в обеих группах (15%), в гиперболическом – на 3% в группе спортсменов, 10% – в группе сравнения; к 3 мин в линейном масштабе – 0.2% в группе спортсменов, 5.6% в группе сравнения, в гиперболическом – на 1.9 и 2.4% соответственно; к от-

Таблица 4. Взаимосвязи параметров РАП и переносимости ФН ($p < 0.005$)*

| Параметры | Временные отрезки | | 1 | | 2 | | 3 | | 1, 2 | | 2, 3 | | 1, 3 | | 1–3 | | |
|-----------|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|--|
| | М | | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | |
| W | Н | СВ | | –0.27 | –0.36 | 0.43 | –0.35 | | | | | –0.58 | 0.41 | | | | |
| | | 1 2 | –0.52 | 0.67 | 0.93 | –0.64 | –0.70 | 0.75 | –0.35 | | | 0.70 | –0.52 | 0.46 | –0.52 | | |
| | О | СВ | 0.72 | 0.69 | 0.75 | 0.70 | 0.72 | 0.75 | 0.73 | 0.70 | 0.74 | 0.71 | 0.70 | 0.71 | 0.73 | 0.72 | |
| | | 1 2 | –0.36 | | | –0.30 | –0.31 | | | | | | –0.39 | | –0.3 | | |
| W/Ps | Н | СВ | | | –0.43 | 0.53 | –0.38 | | | | | –0.69 | 0.54 | | | | |
| | | 1 2 | –0.66 | 0.77 | 0.94 | –0.54 | –0.77 | 0.83 | –0.49 | | | 0.77 | –0.66 | 0.60 | –0.66 | 0.37 | |
| | О | СВ | 0.69 | 0.65 | 0.77 | 0.67 | 0.76 | 0.78 | 0.72 | 0.66 | 0.77 | 0.70 | 0.72 | 0.67 | 0.75 | 0.68 | |
| | | 1 2 | –0.32 | | | –0.28 | | | | | | | | | | | |
| ПРЛЖ | Н | СВ | | –0.37 | –0.43 | 0.48 | –0.42 | | | –0.31 | –0.67 | 0.56 | | | | | |
| | | 1 2 | | 0.38 | 0.81 | –0.78 | | 0.35 | | | –0.3 | 0.49 | | | | | |
| | О | СВ | 0.74 | 0.72 | 0.76 | 0.69 | 0.80 | 0.78 | 0.76 | 0.74 | 0.77 | 0.70 | 0.75 | 0.74 | 0.78 | 0.73 | |
| | | 1 2 | 0.93 | | 0.72 | 0.78 | 0.58 | 0.58 | 0.78 | 0.52 | 0.58 | 0.55 | 0.58 | 0.52 | 0.72 | 0.52 | |

Примечание: * – показатели, не достигшие статистической существенности ($p > 0.05$), не приводятся. Обозначения см. табл. 1, 3.

резку 2–3 в линейном масштабе – 10 и 14%, в гиперболическом – 2.5 и 7% соответственно.

Таким образом, существенное различие времени начала и скорости изменчивости КИ при сравнимых колебаниях уровня выделяет группу спортсменов как ранне- и быстро реагирующую (быстро адаптируемую) и требует более подробного рассмотрения.

В группе спортсменов линейная скорость ускорения КИ на второй минуте теряет 97%, снижаясь в 32 раза (гиперболическая – 92%, в 13 раз), к 3 мин чуть возрастает в 1.8 раза прибавляя относительно второй минуты 80% (гиперболическая продолжает падение еще на 29% в 1.4 раза). Между 1–2 и 2–3 мин линейная скорость падает в 13.5 раза (93%) (гиперболическая в 19.5 раз (95%)).

Вероятно реперы критической (наибольшей или наименьшей) изменчивости РАП будут наилучшим образом связаны с маркерами переносимости ФН. При этом если общая мощность нагрузки находит лишь незначительное отражение в изменчивости РАП и проявляется наибольшими значениями связи на отрезках 3 и 2, 3 мин, не достигающих статистической существенности, тем не менее, найденные маркеры наибольшей изменчивости РАП отражаются в значениях свя-

зи. Достойное подтверждение настоящего предположения выявлено в наличии существенных связей с показателями относительной переносимости ФН: с W/Ps на второй, ПРЛЖ – на 2, 3 мин, НПн, -о, ЧСС $_{тх}$ – 2, 3. Те же закономерности сохраняются и при анализе связей с маркерами КРГ восстановительного периода: ИП, ВПн.

Параметр модели – О на 2 мин в линейном масштабе характеризуется снижением на 15.6% и фактически не изменяется к третьей, в гиперболическом – проявляется незначительным снижением на 2 (3%) и 3 (2%) мин. Динамика пар 1–2 и 2–3 имеет прогрессивный характер: 10% в линейном и 2.5% в гиперболическом масштабе.

С учетом незначительной динамики, актуальными для обнаружения связи с переносимостью ФН и восстановлением вероятно станут значения 1 мин и отрезка 1–3, так как он включает максимальную изменчивость крайних минут РАП. При этом и минимальная динамика и ее показатели также могут стать существенными отправными точками связи, так как тоже являются критическими. Действительно, для параметров, характеризующих предельную (максимальную) переносимость ФН, минимальная динамика связей с РАП определяется весьма тонкой изменчивостью, которая вероятно, в рамках сформирован-

Таблица 5. Взаимосвязи параметров РАП и нагрузочного периода ($p < 0.005$)*

| Параметры | Временные отрезки | | 1 | | 2 | | 3 | | 1, 2 | | 2, 3 | | 1, 3 | | 1–3 | | |
|-------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | М | | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | |
| НПн | Н | СВ | -0.31 | 0.33 | | | | | | 0.29 | | | | | | | |
| | | 1 | -0.33 | 0.26 | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | | -0.26 | -0.60 | 0.89 | | | | | | | | | | | | 0.26 |
| | О | СВ | -0.65 | -0.61 | -0.60 | -0.62 | -0.52 | -0.54 | -0.62 | -0.61 | -0.55 | -0.63 | -0.55 | -0.63 | -0.58 | -0.64 | |
| | 1 | | -0.29 | | | | | | | | -0.34 | | -0.29 | | -0.36 | | |
| | 2 | -0.94 | -0.31 | -0.83 | -0.77 | -0.77 | -0.77 | -0.77 | -0.77 | -0.43 | -0.77 | -0.49 | -0.77 | -0.43 | -0.83 | -0.37 | |
| НПо | Н | СВ | | 0.36 | 0.54 | -0.54 | 0.39 | | | | | 0.75 | -0.58 | | | | -0.34 |
| | | 1 | | | | | | | | | | 0.52 | -0.63 | | -0.3 | | -0.38 |
| | 2 | | | 0.66 | -0.60 | -0.37 | 0.43 | 0.26 | -0.49 | 0.26 | 0.37 | | | | | | -0.37 |
| | О | СВ | -0.76 | -0.70 | -0.83 | -0.79 | -0.89 | -0.87 | -0.82 | -0.73 | -0.86 | -0.80 | -0.87 | -0.71 | -0.86 | -0.74 | |
| | 1 | -0.38 | | -0.54 | -0.39 | -0.77 | -0.67 | -0.49 | -0.3 | -0.64 | -0.33 | -0.70 | | -0.65 | | | |
| | 2 | 0.66 | 0.49 | | | | | | 0.49 | | | | 0.49 | | 0.26 | | |
| ЧСС _{тх} | Н | СВ | | 0.34 | 0.55 | -0.55 | 0.38 | | | | | 0.74 | -0.59 | | | | -0.31 |
| | | 1 | | | | -0.27 | | | | | | 0.57 | -0.61 | | | | -0.29 |
| | 2 | | | 0.64 | -0.64 | -0.41 | 0.41 | 0.32 | -0.52 | | 0.41 | | | | | | -0.32 |
| | О | СВ | -0.74 | -0.67 | -0.80 | -0.75 | -0.85 | -0.82 | -0.78 | -0.70 | -0.82 | -0.77 | -0.84 | -0.69 | -0.83 | -0.72 | |
| | 1 | -0.3 | | -0.35 | | -0.62 | -0.46 | -0.32 | | -0.47 | | -0.54 | | -0.50 | | | |
| | 2 | 0.64 | 0.52 | | | | | | 0.46 | | | | 0.46 | | | | |

Примечание: НПн, НПо – маркеры математической модели КРГ нагрузочного периода; наклон, отрезок соответственно. Остальные обозначения см. табл. 1, 3, 4.

ной ФС весьма индивидуальна, но при этом имеет и общие черты, проявляющиеся в однонаправленной взаимосвязи с КРГ в нагрузочный и восстановительный период, свидетельствующие о родственных механизмах автономной регуляции – парасимпатическом торможении.

Итак, в группе спортсменов связи с параметрами перенесенной нагрузки минимальны по количеству, характеризуются статистически пограничными по существенности и умеренными по интенсивности значениями. В отличие от смешанной выборки большему объему перенесенной нагрузки соответствует меньшая длительность КИ, однако требования к скорости их изменения (большей нагрузке – преобладающая скорость) в обеих группах одинаковы. Связи с общим массивом ЧСС нагрузочного периода более продуктивны и проявляются усилением отрицательных связей к 3 мин РАП, достигая высокой интенсивности. Та же динамика характеризует и ЧСС_{тх}. При этом как и в смешанной выборке меньшему значению НПо, ЧСС_{тх} соответствует большее – КИ РАП.

Обратная связь с маркерами восстановления достигает умеренных значений и характеризуется максимальным уровнем для ИП на всем отрезке

РАП (1–3), при этом уровень связи на 1; 1, 2; 1, 3 и 1–3 отрезках фактически не различим. Связь с ВПо также имеет отрицательное значение и достигает максимума на 1 и 1–3 отрезках РАП. Взаимодействие (Н) с ВПн проявляется на 2, 3; 1, 3 и 1–3 отрезках (ИП на 2, 3 (0.36); с ВПо – отсутствует).

Таким образом, вероятными предикторами интенсивности (мощности), переносимости ФН и раннего восстановления в группе спортсменов является специфическая изменчивость КИ РАП, установленная в результате анализа маркеров ММ КРГ РАП (меньшая скорость (на 2), меньший КИ (на 1; 1–3) – соответствует лучшей переносимости ФН; большая скорость (2, 3), меньший КИ (1; 1, 3 мин) – длительному восстановлению и большей ЧСС восстановления; большая скорость (2, 3), меньший КИ (3; 1, 3) – большей ЧСС_{ср}, тх нагрузочного периода).

В группе неспортивной молодежи линейная скорость укорочения КИ ко 2 мин снижается на 73% (в 3.7 раза), гиперболическая на 75% (в 4.2 раза), к 3 мин – на 27% (в 1.4 раза) и 28% (в 1.4 раза) соответственно. При анализе пар линейная скорость снижается к интервалу 2–3 на 61% (в 2.6 раза), гиперболическая – на 67% (в 3.1 раза). Не случайно большую по интенсивности и значимости

Таблица 6. Взаимосвязи параметров РАП и восстановительного периода ($p < 0.005$)*

| Параметры | Временные отрезки | | 1 | | 2 | | 3 | | 1, 2 | | 2, 3 | | 1, 3 | | 1–3 | |
|-----------|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | М | | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин | Гип | Лин |
| ИП | Н | СВ | | 0.38 | 0.47 | -0.45 | 0.40 | | | | 0.67 | -0.49 | | | | |
| | | 1 2 | | | | | | 0.26 | | | 0.36 | | | -0.31 | | -0.37 |
| | О | СВ | -0.81 | -0.74 | -0.80 | -0.81 | -0.82 | -0.79 | -0.83 | -0.78 | -0.81 | -0.79 | -0.84 | -0.77 | -0.83 | -0.8 |
| | | 1 2 | -0.46 | | -0.37 | -0.41 | -0.42 | -0.28 | -0.48 | -0.34 | -0.36 | -0.32 | -0.49 | -0.29 | -0.50 | -0.33 |
| ВПн | Н | СВ | | -0.31 | | | -0.35 | 0.26 | | -0.32 | | | | | | |
| | | 1 2 | | | 0.34 | -0.3 | | | | | 0.41 | -0.38 | | -0.42 | 0.29 | -0.41 |
| | О | СВ | 0.67 | 0.61 | 0.50 | 0.58 | 0.45 | 0.46 | 0.58 | 0.64 | 0.46 | 0.50 | 0.51 | 0.64 | 0.50 | 0.62 |
| | | 1 2 | 0.29 | 0.28 | | | -0.26 | | | 0.34 | | | | 0.35 | | 0.35 |
| ВПо | Н | СВ | | 0.40 | 0.37 | -0.38 | 0.44 | -0.27 | | 0.28 | 0.61 | -0.46 | | | | |
| | | 1 2 | | | -0.26 | 0.31 | 0.26 | | -0.26 | 0.31 | 0.31 | -0.26 | | -0.26 | | |
| | О | СВ | -0.83 | -0.77 | -0.78 | -0.81 | -0.79 | -0.76 | -0.82 | -0.80 | -0.78 | -0.76 | -0.82 | -0.79 | -0.80 | -0.81 |
| | | 1 2 | -0.49 | | -0.30 | -0.42 | -0.29 | | -0.45 | -0.37 | -0.28 | -0.31 | -0.41 | -0.33 | -0.41 | -0.37 |
| | | | -0.31 | | | | | -0.26 | | 0.26 | | -0.26 | | | | |

Примечание: ВПн, ВПо – маркеры математической модели КРГ восстановительного периода; наклон, отрезок соответственно. ИП – интегральный показатель восстановления. Остальные обозначения см. табл. 1, 3, 4.

связь с переносимостью ФН демонстрируют отрезки 2 и 2, 3 для всех исследуемых показателей, включая ВПн. Лишь в двух случаях, характеризующих W и W/Ps , достается значимости 1 и 3 мин РАП. Причем хронотропные требования для достижения максимальной и наилучшей переносимости ФН к 1 и 3 мин РАП противоположны запросам ко второй.

С НПо и ЧСС_{тх} умеренный уровень положительных взаимосвязей (О) проявляется на отрезках 1, 2 и 1, 3 (0.46, 0.49), достигая максимума на 1 мин (0.66, 0.64), критерий Н характеризуется существенными значениями на отрезках 2; 3; 1, 2 с максимумом ± 0.66 на 2 мин. С НПн высокого уровня связи критерия О выявляются со всеми отрезками РАП и достигают максимума на 1 мин (-0.94); с маркером Н – исключительно на 2 мин РАП (0.89).

Таким образом, большей нагрузке и лучшей ее переносимости на 1 и 3 мин РАП должна соответствовать меньшая изменчивость КИ, на второй же минуте – большая. Требования же в спортивной группе и смешанной выборке, по крайней мере, ко второй минуте – обратные. Действительно, необходимость меньшей изменчивости ко второй минуте была бы логичной для сохранения

хронотропных резервов, в то время как их большее количество задействуется для адаптации к ФН на 1 мин. В группе неспортивной молодежи вышеописанная динамика продиктована меньшим изначальным объемом хронотропных резервов, существенный расход которых на 1 мин, не позволяет иметь желаемую (расходную) динамику и на второй, что и требует дополнительного сбережения в дальнейшем (на 3 мин). Поэтому настоящая динамика хронотропных резервов является оптимальной только в условиях их изначальной недостаточности.

Параметр модели – О на 2 мин в линейном масштабе характеризуется снижением на 15.6 и на 5.6% к третьей, в гиперболическом – соответственно на 10.6 и 2.4%. Линейная динамика пар (1–2; 2–3) характеризуется снижением на 14%, гиперболическая – на 7%. Умеренное снижение интенсивности ко второй минуте и продолжение процесса к третьей вероятно найдет свое отражение в динамике связи с переносимостью ФН на всем протяжении РАП с максимумом на 1 мин. Настоящее предположение нашло свое подтверждение при анализе взаимосвязи с абсолютными и относительными значениями переносимости ФН, а так же всех дериватов ЧСС нагрузочного

периода. Период восстановления обнаружил выраженные связи только со скоростью изменения длительности КИ (ВПн), минимальные, пограничные, но достойные упоминания (связи) — с ВПо, тем не менее, регистрируются только на 1 мин. По сути связей с нагрузочным и восстановительным периодом стоит отметить, что большей длительности КИ РАП соответствует не только преобладающий уровень абсолютной и относительной работоспособности, но и уровень НПо и ЧСС_{тх}, при этом максимальные значения связи определяются на 1 мин и во всех случаях доминируют для гиперболической экстраполяции. Обратная закономерность имеет место только для НПн, так как логично, что большим КИ РАП соответствует меньшая скорость увеличения ЧСС.

Связь с маркерами восстановления минимальна как по количеству вариантов, так и выраженности. С ИП — отрицательная связь (Н) всего периода РАП (−0.37). С ВПн — умеренный уровень (О: 0.49) на отрезках, связанных с первой минутой (1, 2; 1, 3) с максимумом непосредственно на первой минуте (0.71); умеренный уровень (Н: ±0.5) на отрезках 3; 1, 2; 2, 3 с максимумом ±0.77 на 2 мин. Иные связи ИП и ВПо статистически не существенны. В целом в период восстановления большему длительности КИ РАП соответствует большая скорость восстановления ВПн, и меньшее значение ВПо.

Таким образом, в группе неспортивной молодежи абсолютная нагрузка тем больше чем длиннее КИ РАП, настоящая закономерность проявляется на всех отрезках и достигает высокого уровня на 1 мин. Действительно, чем большими хронотропными резервами располагает организм, тем легче их распределять во время ФН и тем больший объем последней будет преодолен. Обратное значение настоящей взаимосвязи в группе спортсменов — следствие работы ФС, требующей в рамках памятного следа большего уровня ЧСС на старте и первой ступени. С относительными показателями переносимости ФН те же закономерности — наличие существенной положительной связи на всех отрезках РАП с максимумом на 1 мин. Те же закономерности и для критерия математической модели Н — однако максимальный акцент сдвигается ко 2 мин. Полярные различия знаков взаимосвязей на 1–3 мин РАП обуславливается существенным различием скорости изменчивости КРГ в данный период и связаны с недостаточностью хронотропных резервов.

Лучшая переносимость ФН требует меньшей скорости изменчивости на 1 мин, большей на 2 и вновь меньшей на 3; при увеличении длительности КИ на всем РАП максимально на 1; 1, 3 отрезках. Отличие от спортсменов (требование меньшей скорости на 2 и 2, 3 отрезках в условиях уменьшения КИ на 1, 2 и 1–3) — объяснено выше.

Изменчивость РАП смешанной выборки подкупает разнообразием и связана с вышеописанной неоднородностью. Линейная скорость (параметр Н) ко второй минуте снижается в 8 раз (гиперболическая в 6.5), к третьей — не изменяется (гиперболическая снижается в 1.7 раза). При парном сравнении (между 1–2 и 2–3 мин) линейная скорость изменяется в 3.8 раза (гиперболическая в 4.5).

Параметр математической модели — О в линейном масштабе ко 2 мин снижается на 10% (в гиперболическом на 5%), к третьей — на 3% (гиперболическом — на 1.5%). При парном сравнении: линейный — теряет 9%, гиперболический — 3.5%.

Таким образом, максимальная изменчивость в виде снижения скорости роста ЧСС проявляется на 1–2 мин с достижением стабилизации на третьей. При этом изменение (уменьшение) длительности RR-интервалов (параметр О), имея схожую (с параметром — Н) тенденцию максимального снижения на 1 и стабилизации на 2–3 мин, гораздо менее выражено, более плавно и стабильно прогрессивно.

В свою очередь параметры М ВР КРГ “О” смешанной выборки демонстрируют усиление взаимосвязи от 1 к 3 мин, как с абсолютными, так и относительными маркерами переносимости ФН, а также максимальной ЧСС. При этом максимум взаимосвязи определяется на 2, 3 мин нагрузки, что подтверждается как при поминутном, так и парном анализе. Кроме того ни парные временные критерии, ни весь массив РАП в целом не превосходят по уровню взаимосвязи показатели 3 мин РАП.

Связи с маркерами восстановления для ИП имеют статистически существенные отрицательные значения средней интенсивности и затрагивают весь РАП с максимумом на отрезке 1–3, близкие значения определяются в период 1, 3; 1, 2 и 1 мин. Фактически те же закономерности, но с максимумом связи на 1 мин имеют место и для ВПо. Положительные связи с ВПн, несколько проигрывают по интенсивности, но также достигают максимума на отрезках 1–3; 1, 3; 1, 2 и 1 мин. Таким образом, преобладающая длительность КИ РАП соответствует большей скорости, меньшей длительности и ЧСС восстановительного периода.

Параметры математической модели “Н”, обусловленные изменчивостью КРГ достигают уровня статистической существенности (при умеренной интенсивности) в зависимости от преобладания паттерна (преимущественного математического закона) изменчивости. Наличие взаимосвязи с линейной моделью на первой минуте, гиперболической — на третьей и с обоими на второй, потребовало более точного анализа КРГ.

Известно, что изменчивость КРГ при ФН связана с увеличением ЧСС, т.е. поступательным уменьшением длительности КИ, кроме того этот процесс сопровождают затухающие колебания длительности КИ, которые в виде обертонов накладываются на основную тенденцию и полностью исчезают на 4–6 мин нагрузки, при этом дальнейшее увеличение ЧСС продолжается до 8–10 мин. В свою очередь восстановление СР после прекращения ФН сопровождается обратной динамикой – не только урежением ЧСС, но и появлением нарастающих, обертоновых колебаний длительности КИ [9–11].

Максимум различий ко 2, а в парах на отрезке 2, 3 мин, определяют вероятностную тенденцию максимальных взаимосвязей с маркерами переносимости ФН. Настоящее предположение находит подтверждение как для абсолютных и относительных маркеров перенесенной нагрузки, нагрузочной ЧСС (НПо, ЧСС_{тх}), так и для маркеров КРГ восстановительного периода, так как их максимальные связи определяются на 2 и 2, 3 мин. При этом меньшей скорости изменения КИ РАП соответствует большая нагрузка, лучшая ее переносимость, меньшая нагрузочная средняя и максимальная ЧСС, большая скорость, меньшая длительность (показатель ИП) и ЧСС восстановления. Положительные значения линейных взаимосвязей на 1 мин свидетельствуют о необходимости большего объема хронотропных резервов, максимум которых обуславливается минимальным значением ЧСС в момент начала ФН, при этом большая возможность израсходования на 1 мин также будет способствовать лучшей переносимости ФН и раннему восстановлению.

Следует отметить, что никакая модель, тем более подчиненная строго определенному математическому закону, не может в точности соответствовать экспериментальной кривой. Поэтому интерес к моделируемому (экспериментальному) ВР не может быть утрачен полностью. Кроме того, основная тенденция изменчивости КРГ РАП весьма оригинальна и определяется выраженным снижением длительности КИ на первой минуте с дальнейшей вариативной одноименной и противоположной девиацией – на второй и третьей. При этом скорость изменения ЧСС на первой и второй минутах может различаться не только на порядок (в 10 раз), но и по знаку. Вероятно длительность, выраженность и качество изменчивости РАП обуславливаются уровнем развития аэробно-анаэробной выносливости.

Выявленная изменчивость СР – не что иное как перебор в рамках имеющихся степеней свободы адаптационных механизмов и определение оптимального уровня СР для обеспечения функциональной системы данной интенсивности нагрузки [10]. Так как весь пейзаж поиска наилуч-

шего адаптационного результата разворачивается в РАП именно в это время и регистрируется как максимум изменчивости СР (1 мин), так и его связи с переносимостью ФН в целом (2–3 мин). Вероятно поэтому выявленная избыточная изменчивость на 1–2 мин не может нести точных прогностических маркеров переносимости ФН, что компенсируется их нарастанием на 2 и 3 мин, когда хронотропное поведение миокарда становится более упорядоченным и подчиненным регуляционным влияниям. Исчерпанность хронотропных резервов в группе спортсменов свидетельствует не о конечности (невозможности) дальнейшей адаптации, а о ее еще большей специфичности, когда перебор степеней свободы идет в пользу специальной адаптации, направленной на преодоление той соревновательной дистанции, которая для данного спортсмена на соответствующем этапе подготовки является главной.

Нет необходимости в противопоставлении гиперболических и линейных методов моделирования, так как каждый из них более применим там, где достигается наилучшее соответствие опытной кривой КРГ. Тем не менее, на коротких участках появления обоюдно высоких корреляционных коэффициентов, может свидетельствовать о наличии ранее не обнаруженной более сложной изменчивости, что и демонстрирует 2 мин РАП. Иными словами вид математического моделирования может быть использован как диагностический подход в рамках определения изменчивости КРГ на определенных, изучаемых или реперных участках КРГ.

ВЫВОДЫ

1. Изменчивость КРГ раннего адаптационного периода несет в себе характерные черты всего нагрузочного временного ряда и связана с индивидуальной нагрузочной переносимостью, уровнем развития аэробно-анаэробной выносливости.
2. Гиперболическая и линейная модели временного ряда КРГ РАП отражают его особенности и могут быть использованы для изучения его изменчивости и связей с иными адаптационными механизмами.
3. Минутные модели РАП выявили его критические этапы: максимальной изменчивости (1–2 мин), и стабильности (3 мин); максимальной скорости изменения скорости (1 мин), выраженного снижения скорости (2 мин), минимальной скорости (3 мин). Последняя (3) мин РАП в смешанной выборке и 2 группе наилучшим образом отражает предел индивидуальной нагрузочной переносимости.
4. Однородные группы существенно отличаются друг от друга по максимальному уровню и хронотропным параметрам переносимости ФН,

времени начала и скорости изменения ВР КРГ. При этом для смешанной выборки и группы неспортивной молодежи маркеры М РАП отражают индивидуальную переносимость ФН в меньшей степени, чем средние и максимальные значения ЧСС определенные за весь нагрузочный период. Для группы спортсменов настоящие маркеры в меньшей степени определяют максимум переносимости, но свидетельствуют о качестве переносимости ФН.

5. Маркеры М РАП, выявляя характерные черты и особенности хронотропной адаптации, могут быть использованы: в смешанной популяции для скрининга; в спортивной группе для изучения и прогноза формирования выносливости, тренированности, контроля усвоения ФН в динамике, профилактики перегрузки, перетренировки; в группе неспортивной молодежи — объективно свидетельствовать о состоянии здоровья, существенности нарушений адаптационных процессов (переносимости ФН).

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом Рязанский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова Министерства здравоохранения РФ.

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Благодарности. Благодарность сотрудникам кафедры нормальной физиологии с курсом психофизиологии Рязанского государственного медицинского университета им. акад. И.П. Павлова Министерства здравоохранения РФ; сотрудникам кафедры физической культуры и спорта Академии права и управления Федеральной службы исполнения наказаний (Рязань).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Меерсон Ф.З., Пшенникова М.Г.* Адаптация к стрессовым ситуациям и физическим нагрузкам. М.: Медицина, 1988. 253 с.
2. *Тарасова О.С., Боровик А.С., Кузнецов С.Ю. и др.* Динамика физиологических показателей при изменении интенсивности физической нагрузки // Физиология человека. 2013. Т. 39. № 2. С. 17.
3. *Лелявина Т.А., Ситникова М.Ю., Березина А.В. и др.* Новые подходы к выделению этапов (фаз) непрерывно возрастающей физической нагрузки на примере кардиореспираторного теста // Сердце: журн. для практикующих врачей. 2012. № 3. С. 146.
4. *Макаров Л.М., Балькова Л.А., Горбунова И.А. и др.* Изменения интервала QT в процессе пробы с дозированной физической нагрузкой у здоровых подростков 11–15 лет // Кардиология. 2012. Т. 52. № 9. С. 15.
5. *Салтыкова М.М.* Основные механизмы, обуславливающие изменения амплитуды зубцов комплекса QRS на электрокардиограмме при нагрузочном тестировании практически здоровых лиц // Физиология человека. 2015. Т. 41. № 1. С. 74.
6. *Олейников В.Э., Кулюцин А.В., Лукьянова М.В.* Оригинальный способ оценки хронотропной функции сердца по данным суточной записи электрокардиограммы // Сердце: журнал для практикующих врачей. 2012. Т. 11. № 1. С. 38.
7. *Михайлов В.М.* Нагрузочное тестирование под контролем ЭКГ: велоэргометрия, тредмилл-тест, степ-тест, ходьба. Иваново: Талка, 2008. 545 с.
8. *Похачевский А.Л.* Временной анализ распределения кардиоинтервалов при нагрузочном тестировании // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 2011. № 2. С. 34.
9. *Петров А.Б., Похачевский А.Л.* Динамика изменчивости кардиоритмограммы при нагрузочном тестировании // Спортивная медицина: наука и практика. 2015. № 4. С. 41.
10. *Лапкин М.М., Похачевский А.Л.* Значение изменчивости кардиоинтервалов при нагрузочном тестировании // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 1. С. 71.
11. *Михайлов В.М., Похачевский А.Л., Садельников Б.А.* Способ определения переносимости физической нагрузки по точке ускользания сердечного ритма от вегетативного контроля. Пат. 2355301.МПК8А61 В5/0452. № 2007143527/14. заявл. 23.11.2007. опубл. 20.05.2009. Бюл. 14. 5 с.
12. *Scott J., Haykowsky M., Eggebeen J. et al.* Reliability of peak exercise testing in patients with heart failure with preserved ejection fraction // Am. J. Cardiol. 2012. V. 110. P. 1809.
13. *Haykowsky M., Brubaker P., Stewart K. et al.* Effect of endurance training on the determinants of peak exercise oxygen consumption in elderly patients with stable compensated heart failure and preserved ejection fraction // J. Am. Coll. Cardiol. 2012. V. 60. P. 120.
14. *Помешкина С.А., Локтионова Е.Б., Архипова Н.В. и др.* Эффективность домашних физических тренировок и приверженность к лечению у пациентов, подвергшихся коронарному шунтированию // Кардиология. 2017. Т. 57. № 1. С. 23.
15. *Сыркин А.Л., Глазачев О.С., Копылов Ф.Ю. и др.* Адаптация к интервальной гипоксии-гипероксии в реабилитации пациентов с ишемической болезнью сердца: переносимость физических нагрузок и качество жизни // Кардиология. 2017. Т. 57. № 5. С. 10.

16. Аронов Д.М., Бубнова М.Г., Иоселиани Д.Г. и др. Комплексная программа реабилитации больных ишемической болезнью сердца после коронарного шунтирования в условиях поликлинического кардиореабилитационного отделения: клинические эффекты третьего этапа реабилитации // Кардиология. 2017. Т. 57. № 3. С. 10.
17. Гайсёнок О.В., Марцевич С.Ю. Прогностическая значимость интегральных индексов в диагностике ишемической болезни сердца в зависимости от возможности выполнения пробы с дозированной физической нагрузкой // Кардиология. 2013. Т. 53. № 8. С. 24.
18. Саундерс Д.Г., Сандерсон М., Браззелли М. и др. Физические тренировки для пациентов с инсультом. Обновленный обзор // Stroke. 2014. Т. 36. № 4. С. 75.
19. Мухарлямов Ф.Ю., Головунина И.С., Рассулова М.А. и др. Этапная реабилитация больных гипертонической болезнью с применением циклических и силовых нагрузок // Сердце: журнал для практикующих врачей. 2013. Т. 12. № 3. С. 162.
20. Лямина Н.П., Котельникова Е.В. Возможности расширения физической реабилитации у пациентов после чрескожных коронарных вмешательств с нарушениями ритма // Сердце: журнал для практикующих врачей. 2013. Т. 12. № 5. С. 311.
21. Фомичев А.В., Глушков С.А., Воробьев А.Н. и др. Изменчивость кардиоритмограммы при непредельных физических нагрузках // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. 2014. Т. 115. № 9. С. 122.
22. Похачевский А.Л. Оценка функционального состояния организма по кардиоритмограмме при нагрузочном тестировании // Теория и практика физической культуры. 2007. № 1. С. 10.
23. Анохин П.К. Узловые вопросы теории функциональной системы. М.: Наука, 1980. 96 с.

Prognostic Potential of Time Series Markers in Cardiac Rhythmogram in Stress Testing

A. L. Pokhachevskiy^{a, c, *}, M. M. Lapkin^c, E. A. Trutneva^c, N. S. Birchenko^c, V. A. Pokhachevskiy^b,
A. B. Petrov^d, Yu. V. Shuliko^d, and A. V. Kalinin^d

^aFirst Moscow State Medical University, Moscow, Russia

^bMoscow State University, Moscow, Russia

^cRyazan State Medical University, Ryazan, Russia

^dLesgaft National State University of Physical Education, Sport and Health, St. Petersburg, Russia

*E-mail: sport_med@list.ru

The analysis of individual physical exercise (PE) tolerance is related to the variability of time series (TS) in the cardiac rhythmogram (CRG). Mathematical modeling (M) is one of the most detailed methods for such studies. We investigated the variability of the cardiac rhythmogram (CRG) in stress testing using mathematical modeling of its time series in order to determine the prognostic markers of PE tolerance. We examined a mixed sample (MS) of apparently healthy subjects aged 18–22 years ($n = 68$), which was divided into two equal groups ($n = 34$): sporting (1) and non-sporting (2) subjects. We performed maximal ergometry testing according to an individual protocol. We applied M to the derived CRG TS. The markers of M for CRG TS of the early adaptation period (EAP) were matched (Spearman) with individual load and recovery figures. Then we performed inter-group comparison (Mann-Whitney). It was found that the variability of EAP CRG has some specific traits of the entire loading period and is connected with the individual PE tolerance. Markers of M for CRG TS reflect the specific traits of the entire time series and can be used to study the variability and relations with other adaptation mechanisms. The minute models of EAP allowed to reveal its critical stages: maximal variability (1–2 min), and stability (3 min); maximal velocity of the variability (1 min), significant velocity reduction (2 min), minimal velocity (3 min). Last (3) minute of EAP in the mixed sample and in group 2 reflects the limit of the individual loading tolerance with the highest accuracy. Homogeneous groups significantly differ in the maximal level and chronotropic parameters of PE tolerance, start time and the velocity of changes in CRG TS. At the same time, the markers of M for CRG TS for the mixed sample and the non-sporting group reflect the individual PE tolerance with the same accuracy as the average and maximal HR values determined for the entire loading period. For sporting subjects these markers determine the tolerance maximum with lower accuracy but reflect the quality of PE tolerance. The markers of M for CRG TS that reflect the traits of chronotropic adaptation can be used for screening in a mixed population, for the investigation and prediction of tolerance development and training level in the sporting group, for the follow-up control of PE mastering, for the prevention of overload and overtraining, and for the estimation of the health status and disorders of adaptation processes (PE tolerance) in the non-sporting group.

Keywords: mathematical modeling of cardiac rhythmogram, criteria, markers, prediction of physical exercise tolerance, maximal load test.