

УДК 612.233:612.5.05

## ИНФОРМАТИВНОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАРДИОГЕМОДИНАМИКИ И ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА У ЮНОШЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ГИПОКСИЧЕСКИ-ГИПЕРКАПНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

А.Л. Максимов, И.В. Аверьянова

*Научно-исследовательский центр «Арктика» ДВО РАН, г. Магадан*

На основе показателей газообмена в процессе дыхания в замкнутом пространстве (ререспирация) была проведена оценка устойчивости организма к гипоксически-гиперкапнической воздушной смеси у 96 юношей – жителей Магаданской области. При этом были выделены группы высоко- и низкоустойчивых испытуемых. Статистический анализ показателей гемодинамики и вариабельности кардиоритма проводился отдельно по каждой группе до (фон) и в процессе ререспирации. Установлено, что по показателям вариабельности кардиоритма, записанного в процессе выполнения пробы, можно оценивать уровень устойчивости организма к дыханию гипоксически-гиперкапнической воздушной смесью, не используя для этих целей измерение уровней кислорода, углекислого газа и оксигеомограммы, что указывает на достаточно высокий уровень информативности изученных характеристик вариабельности сердечного ритма.

**Ключевые слова:** юноши, кардиоритм, показатели гемодинамики, ререспирация, гипоксически-гиперкапническая устойчивость.

**Введение.** Оценка и прогнозирование врожденного уровня гипоксической устойчивости человека остаются одними из наиболее важных прикладных задач спортивной, авиакосмической и клинической физиологии, в решении которых применяются сложные методические приемы с использованием различных строго дозированных гипоксических дыхательных смесей в состоянии как нормо-, так и гипербарии, барокамерные исследования, подъемы в высокогорные условия. Все эти методы требуют достаточно сложного оборудования, значительных финансовых и организационных затрат, а также специально подготовленного персонала. В то же время методы дыхания в замкнутом пространстве крайне просты в исполнении и не требуют в процессе их выполнения сложного оборудования и тонких методических подходов. Однако, несмотря на то что еще в 70–80 гг. прошлого столетия проводились исследования в области прогнозирования и оценки гипоксической устойчивости и неспецифической резистентности человека, метод ререспирации использовался в них в единичных случаях [1, 2, 28]. Практически отсутствуют

высокоинформативные интегральные критерии, позволяющие на основе показателей вариабельности кардиоритма оценивать степень гипоксически-гиперкапнической устойчивости человека в процессе его дыхания в замкнутом пространстве.

**Цель исследования.** Сравнительное изучение информативности ряда наиболее простых для регистрации показателей кардиогемодинамики у группы студентов в процессе ререспирации.

**Материалы и методы.** Было обследовано 96 юношей-студентов: возраст 17–21 год, средний возраст  $18,9 \pm 0,2$  года, длина тела –  $178,5 \pm 1,0$  см, масса тела  $72,2 \pm 1,3$  кг. Все обследуемые до начала теста выполняли через загубник 3 выдоха (каждый объемом не менее ЖЕЛ) в специальный герметический мешок, откуда в процессе ререспирации совершались циклы вдоха и выдоха общей продолжительностью 3 мин, при этом нос закрывался зажимом.

По окончании выполнения пробы с возвратным дыханием через прибор «Карбоник» прокачивался оставшийся в мешке воздух для процентного определения в нем содержания

кислорода ( $O_2$ ) и углекислого газа ( $CO_2$ ). На основе полученных результатов проводилась индивидуальная оценка устойчивости обследуемого лица к дыханию гипоксически-гиперкапнической смесью (ГГКС). При этом лица, у которых уровень содержания  $CO_2$  в мешке превышал 7 %, а уровень  $O_2$  составлял менее 12 %, относились к низкоустойчивым, при  $CO_2$  менее 7 % и  $O_2$  более 12 % – к высокоустойчивым.

Отметим, что до начала проведения теста с ререспирацией у всех обследуемых на основании показателей variability сердечного ритма (BCP), записанных в состоянии оперативного покоя, была проведена оценка ведущего типа вегетативной нервной регуляции с использованием ряда статистических и спектрально-волновых критериев, полученных ранее [7]. Запись кардиоритма продолжалась в процессе выполнения всей пробы, при этом до и на ее пике регистрировалось артериальное давление. Расчетным путем определяли ударный объем по Старру (УО, мл), систолический объем крови (СОК, мл), минутный объем кровообращения (МОК, л/мин), общее периферическое сопротивление сосудов (ОПСС,  $\text{дин}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-5}$ ) [11]. Насыщение гемоглобина кислородом ( $HbO_2$ , %) во время пробы определяли методом фотооксигеметрии с использованием пульсоксиметра NPB-40 (США). Показатели регистрировали каждую минуту пробы.

Запись и дальнейший анализ BCP проводились с учетом рекомендаций группы российских экспертов [3]. У испытуемых регистрировались: ЧСС (HR) (уд./мин) – частота сердечных сокращений; MxDMn (мс) – разность между максимальным и минимальным значениями кардиоинтервалов, или вариационный размах; SDNN (мс) – стандартное отклонение полного массива кардиоинтервалов; CV (%) – коэффициент вариации полного массива кардиоинтервалов; RMSSD (мс) – квадратный корень из суммы разностей последовательного ряда кардиоинтервалов; pNN50 (%) – число пар кардиоинтервалов с разницей более 50 мс к общему числу кардиоинтервалов; Mo (мс) – мода; AMo (мс) – амплитуда моды; SI (усл. ед.) – стресс-индекс (индекс напряжения регуляторных систем);

TP ( $\text{мс}^2$ ) – суммарная мощность спектра сердечного ритма; HF (High Frequency) ( $\text{мс}^2$ ) – мощность спектра высокочастотного компонента BCP в диапазоне 0,4–0,15 Гц (дыхательные волны); LF (Low Frequency) ( $\text{мс}^2$ ) – мощность спектра низкочастотного компонента variability сердечного ритма в диапазоне 0,15–0,04 Гц (сосудистые волны); VLF (Very Low Frequency) ( $\text{мс}^2$ ) – мощность спектра очень низкочастотного компонента variability ритма сердца в диапазоне 0,040–0,015 Гц. Общая суммарная мощность спектра кардиоритма (TP) рассчитывалась без учета ультранизкочастотной составляющей (ULF), но с учетом требований корректности применения анализа коротких временных рядов с использованием метода преобразования Фурье [6].

Полученные результаты подвергнуты статистической обработке с применением пакета прикладных программ Statistica 7.0. Проверка на нормальность распределения измеренных переменных осуществлялась на основе теста Шапиро–Уилка. Результаты непараметрических методов обработки представлены в виде медианы (Me) и интерквартильного размаха в виде 25 и 75 перцентилей (C25 и C75), а параметрических с среднего значения (M) и ошибки средней арифметической (m). Статистическая значимость различий для независимых выборок определялась с помощью t-критерия Стьюдента для независимых выборок с параметрическим распределением и непараметрического критерия Манна–Уитни для выборок с ненормальным распределением. В случае зависимых выборок для показателей с нормальным распределением был использован t-критерий Стьюдента для зависимых выборок. Критический уровень значимости p в работе принимался равным 0,05; 0,01; 0,001 [5].

**Цель исследования.** Определение возможных информативных показателей variability кардиоритма, позволяющих на основании пробы с ререспирацией проводить оценку уровня гипоксически-гиперкапнической устойчивости без контроля газового метаболизма.

**Результаты и обсуждение.** Известно, что сердечно-сосудистая система одной из

первых реагирует на функциональные нагрузки вне зависимости от характера их воздействия, вида, интенсивности и тяжести, обеспечивая тем самым срочную адаптацию организма к воздействующим факторам. Регуляторные перестройки в значительной степени обеспечиваются реакцией вегетативной нервной системы, а активность состояния ее различных звеньев можно количественно оценивать по математическим показателям variability сердечного ритма [3]. При этом по изменению кардиоритма можно судить не только о регуляторных перестройках кардиогемодинамики, но и о функциональных резервах организма в целом [4, 9, 13].

Анализ всей обследуемой нами выборки молодых уроженцев Магаданской области из числа европеоидов показал, что их функциональные системы в различной степени реагировали на стандартную пробу с ререспирацией, что позволило нам предположить об их различных уровнях устойчивости к сочетан-

ному действию нарастающей гипоксии и гиперкапнии. Необходимо отметить, что лица, демонстрировавшие высокую и низкую устойчивость к действию ГГКС, встречаются вне зависимости от индивидуального исходного преобладающего типа вегетативной нервной регуляции, т.е. среди ваго-, нормо- и симпатотоников. При этом лица, демонстрировавшие высокую или сниженную гипоксически-гиперкапническую устойчивость, распределились среди всей выборки обследуемых примерно одинаково (устойчивые – 46 чел., неустойчивые – 50 чел.). Подчеркнем, что между этими группами все функциональные показатели, характеризующие газообмен и сатурацию гемоглобина кислородом, значимо различались между собой (табл. 1), что отражало правильность проведенного нами разделения всей выборки на 2 условные группы по показателям уровней  $O_2$  и  $CO_2$ , оставшихся в мешке после респирации.

Таблица 1

**Показатели газоанализа и уровень оксигемоглобина у юношей с различным уровнем гипоксически-гиперкапнической устойчивости**

| Показатели  | Исследуемые группы    |                         | Уровень значимости различий |
|---|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|
|   | Устойчивые (группа 1) | Неустойчивые (группа 2) |                             |
| Концентрация $CO_2$ в выдыхаемом воздухе (фон), % | 3,4±0,1               | 3,7±0,1                 | p<0,01                      |
| Концентрация $O_2$ в выдыхаемом воздухе (фон), %  | 16,8±0,1              | 16,5±0,1                | p<0,05                      |
| Концентрация $CO_2$ в мешке после ререспирации, % | 6,2±0,1               | 7,9±0,1                 | p<0,001                     |
| Концентрация $O_2$ в мешке после ререспирации, %  | 13,5±0,1              | 11,6±0,1                | p<0,001                     |
| HbO <sub>2</sub> (фон), %                         | 98,6±0,1              | 98,3±0,1                | p<0,05                      |
| HbO <sub>2</sub> 1-й мин пробы, %                 | 98,0±0,1              | 97,6±0,1                | p<0,05                      |
| HbO <sub>2</sub> 2-й мин пробы, %                 | 97,3±0,1              | 96,6±0,1                | p<0,001                     |
| HbO <sub>2</sub> 3-й мин пробы, %                 | 96,7±0,1              | 95,7±0,2                | p<0,001                     |

При дальнейшем анализе показателей кардиогемодинамики отдельно по группам высоко- и низкоустойчивых испытуемых установлено, что значимые различия наблюдались по величинам систолического и диастолического артериального давления, а также по большинству статистических показателей

вариабельности кардиоритма (табл. 2). При этом только один показатель, характеризующий общую мощность спектра (TP) и представляющий в нашем случае сумму нормированных значений высоко- и низкочастотных составляющих (HF, LF, VLF), имел достоверные различия между исследуемыми группами.

Таблица 2

**Показатели кардиогемодинамики на пике пробы с ререспирацией  
у юношей с различным уровнем гипоксически-гиперкапнической устойчивости**

| Функциональные показатели                  | Исследуемые группы |                   | Уровень значимости различий |
|--|--------------------|-------------------|-----------------------------|
|  | Устойчивые         | Неустойчивые      |                             |
| САД, мм рт. ст.                            | 127±1,5            | 139±1,8           | p<0,001                     |
| ДАД, мм рт. ст.                            | 83,0±1,7           | 93,5±1,9          | p<0,001                     |
| ЧСС, уд./мин                               | 74,5±1,2           | 76,1±1,2          | p=0,41                      |
| СОК, мл                                    | 63,6±2,0           | 56,2±1,6          | p<0,01                      |
| МОК, мл/мин                                | 4512,0±114,4       | 4229,3±131,7      | p=0,14                      |
| ОПСС, дин <sup>2</sup> ·с·см <sup>-5</sup> | 2229,8±243,6       | 2491,6±135,0      | p=0,32                      |
| МхDMп, мс                                  | 363 (312; 422)     | 418 (355; 506)    | p<0,05                      |
| RMSSD, мс                                  | 55 (38;67)         | 67 (51; 98)       | p<0,05                      |
| pNN50, %                                   | 34 (20; 45)        | 42 (29; 58)       | p<0,05                      |
| SDNN, мс                                   | 74 (64; 84)        | 95 (71; 115)      | p<0,01                      |
| CV, %                                      | 10 (8; 11)         | 12 (9; 14)        | p<0,01                      |
| Мо, мс                                     | 776 (724; 875)     | 727 (677; 849)    | p=0,22                      |
| АМо, мс                                    | 27 (24; 32)        | 22 (19; 29)       | p<0,01                      |
| SI, усл. ед.                               | 46 (36; 72)        | 34 (23; 54)       | p<0,05                      |
| TP, мс <sup>2</sup>                        | 4157 (2982; 6473)  | 5590 (3702; 9237) | p<0,05                      |
| HF, мс <sup>2</sup>                        | 1513 (964; 2770)   | 2272 (1232; 4419) | p=0,08                      |
| LF, мс <sup>2</sup>                        | 1344 (835; 2341)   | 1319,0(866; 2170) | p=0,88                      |
| VLF, мс <sup>2</sup>                       | 464 (262; 694)     | 663 (381; 842)    | p=0,15                      |

Известно, что уровень артериального давления и его производные показатели могут выступать информативными маркерами функционального состояния сердечно-сосудистой системы, особенно среди спортсменов, лиц пожилого возраста, контингентов, хронически подвергающихся действиям неблагоприятных производственных факторов, даже без использования специальных нагрузочных тестов. Однако в нашем случае при обследовании в состоянии оперативного покоя статистически значимых различий между изучаемыми характеристиками не отмечалось (табл. 3).

Из представленных в табл. 2 данных видно, что у юношей типизированных групп величины систолического и диастолического артериального давления находятся в пределах функциональной нормы, рекомендованной ВНОК [10]. Отсутствуют межгрупповые различия и в величинах систолического и минутного объемов крови, которые находились в пределах физиологической нормы для данной возрастной группы мужчин, соответственно составляя 60–80 мл и 4,5–5,2 л/мин [12].

Таблица 3

**Показатели гемодинамики в состоянии покоя  
у юношей с различным уровнем гипоксически-гиперкапнической устойчивости**

| Показатели                                 | Изучаемые группы |              | Уровень значимости различий |
|--|------------------|--------------|-----------------------------|
|  | Устойчивые       | Неустойчивые |                             |
| САД, мм рт. ст.                            | 123,8±1,2        | 124,6±1,3    | p=0,72                      |
| ДАД, мм рт. ст.                            | 74,8±0,8         | 75,0±0,9     | p=0,92                      |
| ЧСС, уд./мин                               | 72,7±1,3         | 69,5±1,1     | p=0,09                      |
| УО, мл                                     | 69,4±0,6         | 69,2±1,0     | p=0,99                      |
| МОК, мл/мин                                | 5022,7±88,6      | 4809,2±95,4  | p=0,12                      |
| ОПСС, дин <sup>2</sup> ·с·см <sup>-5</sup> | 1566,7±32,0      | 1662,2±39,6  | p=0,08                      |

Проба с ререспирацией выявила различия в показателях артериального давления и систолического объема крови, в отличие от показателей в состоянии покоя. Так, в группе «неустойчивых» систолическое и диастолическое артериальное давление на пике пробы превышало аналогичные показатели группы «устойчивых» соответственно на 12 и 6,5 мм рт. ст., при этом величина систолического объема крови была достоверно ниже (на 7,4 мл). Другие показатели гемодинамики не имели значимых различий между испытуемыми исследуемых групп.

Детальный анализ показателей ВСР выявил, что в процессе ререспирации из 12 изученных показателей, достаточно полно отражающих вклад симпатического и парасимпатического регуляторного звена в состояние реактивности вегетативной нервной системы, статистически значимые различия ( $p < 0,05$ ) наблюдались по 8 характеристикам кардиоритма (табл. 2). При этом различия в величинах, достоверно отличающихся между высоко- и низкоустойчивыми лицами при дыхании гипоксически-гиперкапнической воздушной смесью, всегда превышали 10 %, находясь в диапазоне 13–26 %, что позволяет считать эти показатели достаточно информативными при оценке и прогнозе устойчивости организма юношей к действию нормоборической газовой смеси.

**Заключение.** Таким образом, проведенные исследования показали, что значения вариабельности кардиоритма могут служить

информативными маркерами для оценки устойчивости человека к дыханию нарастающей гипоксически-гиперкапнической воздушной смесью. При этом лица со сниженной устойчивостью проявляют большую чувствительность к нарастающей гиперкапнии, которая, активируя парасимпатическое звено, отражается в значениях следующих показателей кардиоритма, которые можно рекомендовать для выявления лиц со сниженной резистентностью к гипоксически-гиперкапническому воздействию:  $MxDMn \geq 418$ ;  $RMSSD \geq 67$ ;  $pNN50 \geq 42$ ;  $SDNN \geq 84$ ;  $CV \geq 12$ ;  $AMo50 \leq 22$ ;  $SI \leq 34$ ;  $TP \geq 5590$ . В то же время для типизации лиц с высокой устойчивостью значения ВСР соответственно составляют:  $MxDMn \leq 363$ ;  $RMSSD \leq 55$ ;  $pNN50 \leq 33$ ;  $SDNN \leq 74$ ;  $CV \leq 9$ ;  $AMo50 \geq 28$ ;  $SI \geq 46$ ;  $TP \leq 4000$ .

Представленные показатели ВСР позволяют в процессе выполнения ререспирации для предварительной оценки уровня гипоксически-гиперкапнической устойчивости юношей ограничиться только регистрацией вышеперечисленных показателей кардиоритма. Определение значений ВСР, характерных для лиц других возрастов, и среднего уровня резистентности к изучаемой газовой смеси составляет предмет наших дальнейших исследований.

1. Агаджанян Н. Н. Адаптация и резервы организма / Н. Н. Агаджанян. – М. : Физкультура и спорт, 1983. – 176 с.

2. Айдаралиев А. А. Адаптация человека к экстремальным условиям: Опыт прогнозирования / А. А. Айдаралиев, А. Л. Максимов. – Л. : Наука, 1988. – 126 с.
3. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем : методич. рекомендации / Р. М. Баевский [и др.] // Вестн. аритмологии. – 2001. – № 24. – С. 65–83.
4. Баевский Р. М. Введение в донологическую диагностику / Р. М. Баевский, А. П. Берсенева. – М. : Слово, 2008. – 176 с.
5. Боровиков В. П. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов / В. П. Боровиков. – СПб. : Питер, 2003. – 688 с.
6. Витязев В. В. Анализ неравномерных временных рядов / В. В. Витязев. – СПб. : СПбГУ, 2001. – 49 с.
7. Максимов А. Л. Возрастные перестройки variability сердечного ритма и гемодинамики у аборигенов в зависимости от ведущего типа вегетативной регуляции / А. Л. Максимов, А. Л. Лоскутова // Российский физиологический журн. им. И. М. Сеченова. – 2014. – № 5. – С. 634–647.
8. Малкин В. Б. Острая и хроническая гипоксия / В. Б. Малкин, Е. Б. Гиппенрейтер. – М. : Наука, 1977. – 315 с.
9. Попов В. В. Variability сердечного ритма: возможность применения в физиологии и клинической медицине / В. В. Попов, Л. Н. Фрицше // Украинский медицинский часопис. – 2006. – № 2 (52). – С. 24–31.
10. Профилактика, диагностика и лечение артериальной гипертензии. Российские рекомендации (второй пересмотр) : прилож. к журн. «Кардиоваскулярная терапия и профилактика». – 2004. – 20 с.
11. Рост и развитие ребенка / В. В. Юрьев [и др.] ; под ред. В. В. Юрьева. – СПб. : Питер, 2003. – 272 с.
12. Солодков А. С. Физиология человека. Общая. Спортивная. Возрастная / А. С. Солодков, Е. Б. Сологуб. – М. : Терра-Спорт, 2001. – 510 с.
13. Щербатых Ю. В. Вегетативные проявления экзаменационного стресса : автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Ю. В. Щербатых. – СПб., 2001. – 32 с.

## INFORMATIVE VALUE OF CARDIOHEMODYNAMICS AND HEART RATE VARIABILITY INDICES OBSERVED IN YOUNG MALES WITH DIFFERENT LEVELS OF HYPOXIA-HYPERCAPNIA RESISTANCE

A.L. Maximov, I.V. Averyanova

Scientific Research Center "Arktika" FEB RAS, Magadan

Male residents of Magadan region (n=96) were examined at enclosure breathing (rerespiration) to study the body resistance to hypoxia-hypercapnia air mixture based on the ventilation indices. The examinees were divided into two groups of high- or low resistant ones. Statistic analysis of hemodynamics and heart rate variability was performed separately on each group before (baseline) and during the rerespiration test. Found that, heart rate variability indices registered during the test can be used to assess the body resistance to breathing hypoxia-hypercapnia air mixture instead of oxygen and carbon dioxide rates or oxihemogram to be used for this purpose. The findings testify to a rather high informative level of the studied heart rate variability characteristics.

**Keywords:** young males, heart rate, hemodynamics, rerespiration, hypoxia-hypercapnia resistance.