

УДК 616-092

Изучение сердечно-сосудистого и дыхательного синхронизма при различных режимах дыхания

Носкин Л.А.¹, Рубинский А.В.², Романчук А.П.³, Марченко В.Н.²,
Пивоваров В.В.⁴, Черепов А.Б.⁵, Заровкина Л.А.²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». 188300, Ленинградская обл., Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации. 197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8

³ Одесский медицинский институт Международного гуманитарного университета. Украина 65009, Одесса, ул. Фонтанская дорога, д. 33

⁴ НАО Институт кардиологической техники «Инкарт». 194214, Санкт-Петербург, Выборгское ш., д. 22а

⁵ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт общей патологии и патофизиологии». 125315, Москва, ул. Балтийская, д. 8

Актуальность. В работе обоснован диагностический алгоритм, позволяющий объективно устанавливать критерии синхронизации в регуляции кардио-респираторной системы, обеспечивающей адекватный уровень адаптации организма при умеренных внешних воздействиях. **Целью** данной работы явилось изучение возможных параметров сопряженности сердечного, сосудистого и дыхательного ритмов при выполнении функциональных проб: пробы с фиксированной частотой дыхания и ступенчато-возрастающей умеренной физической нагрузкой. **Методы.** Для реализации диагностического алгоритма был использован действующий макет комплекса «Спироартериокардиоритмограф-01», адаптированный под совместное использование с велоэргометром. Подобный подход обеспечивает объективный мониторинг сердечно-дыхательного синхронизма в динамике разнообразных внешних воздействий на организм. **Результаты.** На основе прямых динамических показателей обоснован алгоритм расчета отношения минутного объема кровообращения и минутного объема дыхания, отражающий степень функционального баланса сердечно-дыхательного гомеостаза. **Выводы.** Многопараметровость, быстрота и неинвазивность исследований обеспечивают востребованность данной методологии в разнообразных направлениях предиктивной диагностики.

Ключевые слова: адаптация, физическая нагрузка, сердечно-сосудистая система, режим дыхания, сердечно-дыхательный синхронизм.

Для цитирования: Носкин Л.А., Рубинский А.В., Романчук А.П., Марченко В.Н., Пивоваров В.В., Черепов А.Б., Заровкина Л.А. Изучение сердечно-сосудистого и дыхательного синхронизма при различных режимах дыхания. *Патогенез*. 2018; 16(4): 90-96

DOI: 10.25557/2310-0435.2018.04.90-96

Для корреспонденции: Рубинский Артемий Владимирович, e-mail: rubinskiyav@1spbgtmu.ru

Финансирование. Исследование не имеет спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 12.08.2018

Study of cardiovascular and respiratory synchronization in different types of breathing

Noskin L.A.¹, Rubinskiy A.V.², Romanchuk A.P.³, Marchenko V.N.², Pivovarov V.V.³, Cherepov A.B.⁴, Zarovkina L.A.²

¹ B.P. Konstantinov Petersburg Institute of Nuclear Physics, Microdistrict Orlova Roshcha 1, Gatchina of the Leningrad Region 188300, Russian Federation

² I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University, Ljva Tolstogo Str. 6-8, St. Petersburg 197022, Russian Federation

³ Odessa Medical Institute of the International Humanitarian University, Fontanskaya Doroga Str. 33, Odessa 65009, Ukraine

⁴ JSC Institute of Cardiology «Inkart», Vyborgskoe Shosse 22a, St. Petersburg 194214, Russian Federation

⁵ Institute of General Pathology and Pathophysiology, Baltijskaya Str. 8, Moscow 125315, Russian Federation

The authors justified a diagnostic algorithm for establishing objective criteria of cardiovascular and respiratory synchronization, which provides an adequate adaptive response to different external factors. For evaluation of the diagnostic algorithm, the Spiroarteriokardiogram-01 complex compatible with a bicycle ergometer was used. This approach provides objective monitoring of cardiovascular and respiratory synchronism under the influence of various external factors. Multiparameter, fast, and non-invasive

features of these studies will cover a demand for this method in predictive diagnostics. Based on direct dynamic indicators an algorithm was substantiated for calculation of the blood flow minute volume to respiratory minute volume ratio, which reflects the degree of functional balance in the cardiovascular and respiratory homeostasis.

Key words: adaptation, physical activity, cardio-vascular system, respiration, cardio-respiratory synchronism.

For citation: Noskin L.A., Rubinskiy A.V., Romanchuk A.P., Marchenko V.N., Pivovarov V.V., Cherepov A.B., Zarovkina L.A. [Study of cardiovascular and respiratory synchronization in different types of breathing]. *Patogenez [Pathogenesis]*. 2018; 16(4): 90-96 (in Russian)

DOI: 10.25557/2310-0435.2018.04.90-96

For correspondence: Rubinskiy Artemiy Vladimirovich, e-mail: rubinskiyav@1spbgmu.ru

Funding. The study had no sponsorship.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received: 12.08.2018

Введение

Согласно современным представлениям, в научной литературе прочно утвердилось мнение, что в регуляции сердечного ритма большую роль играет дыхание посредством эфферентных сигналов, распространяющихся по волокнам блуждающего нерва к сердцу, инициируя его сокращение [1, 2]. Приведенные в настоящей работе данные о сопряженности сердечного и дыхательного ритмогенеза позволили предложить принцип создания сердечно дыхательного синхронизма (СДС) посредством заданной частоты произвольного дыхания, превышающей исходный сердечный ритм [3].

На основе СДС разработан и внедряется в клиническую практику индекс регуляторно-адаптивного статуса (иРАС), оцениваемый по значениям диапазона дыхательной синхронизации (ДС) и длительности ее развития на минимальной границе ($DлP_{мин.гр.}$) по формуле:

$$иРАС = ДС / DлP_{мин.гр.} \times 100,$$

а по нему – регуляторно-адаптивные возможности благоприятного исхода сердечно-сосудистых заболеваний: иРАС > 100 – высокие; 50-99 – хорошие; 24-49 – удовлетворительные; 9-23 – низкие; < 9 – неудовлетворительные [4].

Как правило, даже с использованием современных компьютерных технологий, удаётся установить только сам факт формирования СДС [5, 6]. Этот подход реализован в приборе «ВНС-микро», созданного ООО «Нейрософт», позволяющий формировать базу данных записей всех проб и с определенной периодичностью фиксировать параметры СДС [7].

Одновременная и непрерывная спироартериокардиограмма может быть более информативной в вопросах дифференциации адаптивных резервов, так как позволяет регистрировать не только частотные показатели перечисленных систем, но и значения артериального давления на каждом сердечном цикле при различных функциональных пробах [8, 9].

Целью данной работы явилось изучение возможных параметров сопряженности сердечного, сосудистого и дыхательного ритмов при выполнении функциональных проб: пробы с фиксированной частотой дыхания и ступенчато-возрастающей умеренной физической нагрузкой.

Материалы и методы исследования

В работе было обследовано 76 студентов (21 юноша и 55 девушек), средний возраст $19,0 \pm 2,3$ года. В исследовании приняли участие 19 человек из основной и 57 человек из подготовительной групп, для занятий по физическому воспитанию – по данным медицинского осмотра, проведенного в соответствии с приказом МЗ РФ от 21 декабря 2012 г. № 1346н «О порядке прохождения несовершеннолетними медицинских осмотров, в том числе при поступлении в образовательные учреждения и в период обучения в них». Протокол исследования одобрен на заседании Этического комитета ПСПбГМУ им. акад. И.П. Павлова от 05 сентября 2016 года (протокол № 187). В дальнейшем результаты всех испытуемых анализировали как единую группу, так как они не имели признаков соматической патологии, которая могла оказать отрицательное влияние на кардио-респираторную систему.

Для реализации диагностического алгоритма был использован действующий макет комплекса «Спироартериокардиограмма-01» (САКР), который сертифицирован и лицензирован (регистрационное удостоверение №29/03020703/5869-04, сертификат соответствия №7569782). САКР позволяет регистрировать частоту сердечных сокращений, артериальное кровяное давление с последующим усреднением этих показателей на каждый дыхательный цикл, а частота дыхания и дыхательный объем регистрируются для каждого дыхательного цикла.

Для оценки синхронизма нами были использованы две функциональные пробы:

- контролируемое дыхание (6 дыханий в минуту);
- нагрузочная проба с умеренной ступенчато-возрастающей физической нагрузкой (до 80 Вт).

Для оценки динамики адаптационных процессов при использовании больших неравных инкрементов нагрузки нарушающих линейные отношения, мы остановили свой выбор на RAMP-протоколе, предполагающем приращение нагрузки с малым шагом (10 Вт) через небольшую промежуток времени (1 мин) без достижения «устойчивого состояния» [10]. Поскольку целью работы было установление чувствительности используемого метода к определению синхронизма при минимизированных внешних воздействиях, мы ограничились продолжительностью нагрузочного периода в пределах

Основные функциональные показатели кардио-респираторной системы и их вариабельность в покое и при выполнении функциональных проб

Показатели	Произвольный режим дыхания	Фиксированный режим дыхания	Режим дыхания при физической нагрузке	p		
	1	2	3	1-2	1-3	2-3
ЧСС, уд./мин	95,2 ± 15,0	94,5 ± 13,3	136,8 ± 15,4	0,220	<0,001	<0,001
САД, мм рт.ст.	111,3 ± 17,7	109,1 ± 17,7	136,9 ± 18,3	0,030	<0,001	<0,001
ДАД, мм рт.ст.	82,6 ± 13,6	79,5 ± 13,9	79,9 ± 14,6	0,001	0,140	0,840
ПД, мм рт.ст.	29,7 ± 11,8	38,9 ± 14,1	61,8 ± 14,8	<0,001	<0,001	<0,001
Размах ЧСС, уд./мин	8,2 (5,3; 10,8)	27,4 (20,3; 36,8)	4,3 (3,3; 6,1)	<0,001	0,050	<0,001
Размах САД, мм рт.ст.	7,0 (5,1; 10,2)	17,3 (13,6; 21,8)	11,7 (9,2; 5,1)	<0,001	<0,001	<0,001
Размах ДАД, мм рт.ст.	3,3 (2,6; 4,1)	10,1 (8,0; 12,3)	9,4 (6,7; 12,3)	<0,001	<0,001	0,980
ЧД, циклов/мин	16,9 (13,3; 18,8)	6,1 (6,1; 6,1)	23,5 (20,6; 25,6)	<0,001	<0,001	<0,001

Примечание: при сравнении показателей ЧСС, САД, ДАД и ПД использован парный t-критерий Стьюдента, при сравнении размахов ЧСС, САД и ДАД и ЧД – парный критерий Вилкоксона.

5 минут и лимитированной мощностью 80 Вт, что соответствует 3-4 МЕТ – уровню легкой или умеренной физической нагрузки [11]. Использование в данном протоколе нагрузочного тестирования с помощью САКР позволяет количественно охарактеризовать функциональную активность 3 регуляторных систем:

- регуляцию дыхания (ультразвуковая спирометрия),
- регуляцию сосудистого кровотока (пальцевая фотоплетизмография),
- регуляцию сердечного ритма (кардиоритмография)

На начальном этапе для определения уровня информативности данных подходов нам представлялось необходимым установить варианты дифференциально значимых критериев регуляторных сдвигов у здоровых лиц при незначительных нагрузках:

- для дыхательной системы – частота дыхания (ЧД) и минутный объем дыхания (МОД),
- для сосудистого компонента – величина систолического давления (САД), величина диастолического давления (ДАД), величина пульсового давления (ПД) и их вариабельность (ВСД, ВДД, ВПД),
- для сердечного компонента – частота сердечных сокращений (ЧСС) и вариабельность сердечного ритма (ВСР).

Измеряемые критерии являются общепризнанными для задач кардиологии. Однако только с помощью САКР представляется возможным определить ряд этих показателей на каждом сердечном сокращении.

На современном уровне дифференциальной кардиодиагностики уже используются отдельные кумулятивные оценки уровней синхронизации: индекса «двойного произведения» (ДП) – отношения произведения ЧСС и САД к 100 (САД × ЧСС / 100) и индекса Хильденбранта – отношения ЧСС к частоте дыхания (ЧСС / ЧД).

Кроме того, в современной кардиологической диагностике, при отсутствии прямого определения ударного объема (УО) каждого сокращения сердца, предлагаются преимущественно расчетные варианты оценки минутного объема кровообращения (МОК), включающего определение сердечного выброса по пульсовому давлению. Предложено несколько эмпирических подходов [12, 13]. В нашем исследовании была использована формула Старра:

$$\text{УО (мл)} = 100 + 0,5 \times \text{ПД} - 0,6 \times \text{ДАД} - 0,6 \times \text{возраст (лет)}$$

По нашему мнению, в рекомендованных способах расчета МОК имеется определенное прогностическое значение. Возможность суммирования всех вариантов УО за одну минуту позволяет определить МОК достаточно точно.

Поскольку измерение значений функциональных показателей (ЧСС, САД, ДАД, МОД, ЧД) в покое, при пробах с фиксированным режимом дыхания и физической нагрузкой проводили последовательно для каждого испытуемого, то для выявления статистически достоверных различий использовали критерии для зависимых выборок. После проверки данных на соответствие нормальному закону распределения применяли дисперсионный анализ (F-критерий) для трех выборок, а для поиска отличий – попарное сравнение с помощью парного критерия Стьюдента. Для выборок, не соответствующих нормальному закону распределения, применяли критерий Фридмана и попарно сравнивали с помощью критерия Вилкоксона. Для определения достоверности сдвигов принимали p строго менее 0,05.

Примечание: при сравнении показателей ЧСС, САД, ДАД и ПД использован парный t-критерий Стьюдента, при сравнении размахов ЧСС, САД и ДАД и ЧД – парный критерий Вилкоксона.

Результаты исследования и обсуждение

В результате проведенного обследования для исследуемой однородной группы были получены представленные в табл. 1 значения традиционных показателей сердечно-сосудистой системы, применяемые определения адаптационного ответа на внешние факторы.

Как видно из табл. 1, для различных тестовых систем были охарактеризованы следующие изменения основных показателей сердечно-сосудистой системы:

- отсутствие изменений ЧСС в условиях фиксированного режима дыхания и статистически значимое увеличение при умеренной физической нагрузке;
- статистически достоверное снижение САД в условиях фиксированного режима дыхания и значимое увеличение при умеренной физической нагрузке;

Усредненные значения показателей трехуровневой синхронизации в покое и при выполнении функциональных проб.

Показатели	Произвольный режим дыхания	Фиксированный режим дыхания	Режим дыхания при физической нагрузке	<i>p</i> (по критерию Вилкоксона)		
	1	2		1-2	1-3	2-3
Кластер центральной регуляции						
ДП / ЧД	6,23 (5,41; 8,52)	16,37 (14,13; 19,17)	8,55 (6,72; 10,20)	<0,001	0,001	<0,001
ДП×ЧД/100	16,91 (12,81; 21,11)	6,20 (5,42; 7,12)	44,37 (37,73; 55,04)	<0,001	<0,001	<0,001
Кластер смешанной регуляции						
ДП/МОД	9,24 (7,69; 11,88)	8,72 (6,99; 10,66)	7,39 (6,57; 8,82)	0,330	<0,001	0,001
ДП×МОД/100	11,91 (8,44; 15,44)	12,28 (8,62; 14,65)	51,57 (44,61; 62,83)	0,790	<0,001	<0,001
Кластер вегетативной регуляции						
ДП/(ДО×100)	0,62 (0,50; 0,73)	1,41 (1,14; 1,79)	0,33 (0,26; 0,44)	<0,001	0,040	<0,001
ДП×ДО/100	0,72 (0,56; 0,91)	2,02 (1,44; 2,45)	2,31 (1,84; 2,75)	<0,001	<0,001	0,180

– статистически достоверное снижение ДАД при фиксированном режиме дыхания и отсутствие изменений при умеренной физической нагрузке. При этом отсутствуют статистически достоверные различия ДАД при фиксированном режиме дыхания относительно умеренной физической нагрузки.

Согласно приведенным в табл. 1 результатам можно заключить, что при фиксированном дыхании отчетливо регистрируется угнетение вегетативной регуляции. Вместе с тем, при умеренной физической нагрузке модификации иные: резко активируются показатели центрального регуляторного кластера, в то время как функциональная активация вегетативного регуляторного кластера существенно не изменяется. Полученные данные согласуются с результатами других исследований [14, 15].

Для дифференциации комплексных сдвигов мы использовали условные обозначения кластеров как вегетативных, центральных и смешанных сдвигов соответствующие вариантам понижения или повышения функциональных значений (ЧСС, АД, и др.) Подобные варианты в традиционной кардиологии используются для интегральных характеристик спектров мощности ЧСС. Так, при фиксированной ЧД констатируется угнетение вегетативной регуляции, а в динамике умеренной физической нагрузки резко активируется центральные регуляторные механизмы на фоне неизменной активности вегетативных.

С целью дифференциации регуляторных кластеров мы использовали значения ДП в произведении ЧД и ДО (табл. 2), а также в сравнении с их удельной обеспеченностью (суммарные значения для снижения численной значимости делили на 100). Предложенная модель 3-уровневой синхронизации предлагает следующие варианты функциональных оценок:

ДП / ЧД – удельная обеспеченность кровотока относительно ЧД (преимущественно центральная регуляция синхронизации).

– ДП × ЧД / 100 – интегральный уровень функциональной обеспеченности кардио-респираторной системы, модулированный по ЧД (преимущественно центральная регуляция синхронизации).

– ДП / (ДО × 100) – удельная обеспеченность кровообращения дыхательным объемом (преимущественно вегетативная регуляция синхронизации);

– ДП × ДО / 100 – интегральная обеспеченность кровообращения дыхательным объемом (преимущественно вегетативная регуляция синхронизации).

Согласно предложенным выше показателям, мы предполагаем, что характер интегральной регуляции кардио-респираторного гомеостаза определяется произведением функциональных показателей каждой из систем, а уровень удельной функциональной обеспеченности кровообращения определяется отношением двойного произведения к ДО и двойного произведения к ЧД. При этом величина дыхательного объема (воздухообмена) одного дыхательного акта в покое составляет $0,73 \pm 0,08$ л, при фиксированном режиме дыхания – $1,60 \pm 0,18$ л, а при умеренной физической нагрузке – $1,34 \pm 0,08$ л

Анализируя приведенные в табл. 2 результаты, можно утверждать, что уровень удельной обеспеченности кровообращения по ЧД статистически достоверно увеличился (почти в 3 раза) при фиксированном режиме дыхания ($p < 0,001$) и значительно менее, но статистически достоверно, при физической нагрузке.

Другая ситуация определяется при анализе тройного произведения по частоте дыхания: интегральная обеспеченность кровотока на один акт дыхания в 4 раза интенсифицируется при умеренной физической нагрузке ($p < 0,001$), но почти в 3 раза снижается при фиксированном режиме дыхания.

При фиксированном режиме относительно произвольного режима дыхания удельная обеспеченность кровотока на одно сердечное сокращение заметно снижается (почти в 3 раза), в то время как интегральное

Усредненные значения показателя дыхательного объема кровообращения (ДОК) и удельные значения в покое и при выполнении функциональных проб

Критериальные определители	Произвольный режим дыхания	Фиксированный режим дыхания	Режим дыхания при физической нагрузке	p (по критерию Вилкоксона)		
	1	2	3	1-2	1-3	2-3
ДОК, мл	324,07 (251,90; 388,88)	848,26 (725,20; 977,79)	405,64 (351,46; 503,90)	<0,001	<0,001	<0,001
ДОК/ДО, у.е.	1,70 (1,26; 2,93)	11,73 (9,77; 15,32)	0,84 (0,61; 1,06)	<0,001	<0,001	<0,001
ДОК/ЧД, мл/мин	20,24 (13,17; 30,66)	137,98 (115,37; 159,09)	19,71 (14,98; 25,25)	<0,001	0,500	<0,001

Таблица 4

Интегративные показатели двигательной обеспеченности сердечно-дыхательной синхронизации в пределах умеренных внешних воздействий.

Критериальные определители	Варианты нагрузок		
	Произвольный режим дыхания	Фиксированный режим дыхания	Режим дыхания при физической нагрузке
	1	2	3
МОД, л/мин	11,20 (9,31; 13,71)	11,78 (9,80; 13,74)	27,20 (23,90; 28,97)
МОК, л/мин	5,06 ± 1,06	5,25 ± 1,12	9,47 ± 1,94
МОД/МОК	0,45 (0,37; 0,58)	0,43 (0,37; 0,56)	0,37 (0,32; 0,44)

обеспечение кровотока дыхательным объемом пропорционально возрастает. При умеренной физической нагрузке выявляются иные соотношения: удельная обеспеченность кровообращения дыхательным объемом сохраняется на уровне произвольного режима дыхания, а интегральное обеспечение кровообращения статистически достоверно возрастает.

Объективный анализ функциональной обеспеченности сердечно-дыхательной синхронизации определяется соотношением двух параметров дыхания: ЧД и ДО. Апробируемая методика САКР позволяет количественно определять произведение этих параметров: $ДО \times ЧД = МОД$. Таким образом, можно строго определять соответствие каждого сердечного выброса и дыхательного объема. В этом случае обсужденные выше функциональные критерии сводятся к двум:

– $ДП \times МОД / 100$ – интегральный уровень функциональной обеспеченности кардиореспираторной системы, модулированный по МОД (смешанная регуляция синхронизации).

– $ДП / МОД$ – удельная обеспеченность кровотока относительно МОД (смешанная регуляция синхронизации).

Уровень удельной обеспеченности кровообращения по МОД не изменяется при фиксированном режиме дыхания, но статистически значимо снижался при физической нагрузке.

В то же время, увеличение функциональной обеспеченности кровотока относительно МОД недостоверно изменяется при фиксированном режиме дыхания, но

статистически достоверно повышается при умеренной физической нагрузке.

Обратим внимание на то обстоятельство, что варианты модуляции кровотока относительно МОД не модифицируются при фиксированном режиме дыхания. Имея возможность расчета усредненного УО за одну минуту, можно получить как МОК, так и рассчитать объем кровообращения за один дыхательный цикл (табл. 3). Такой комплексный показатель, характеризующий объем кровообращения за один дыхательный акт, предложили назвать дыхательным объемом кровообращения (ДОК). Более информативным можно считать отношение $ДОК / ДО$ ($\text{мл}_{\text{кровоток}} / \text{мл}_{\text{воздух}}$), аналогом которого в минутном выражении будет отношение $МОК / МОД$ ($\text{мл}_{\text{кровоток}} / \text{мл}_{\text{воздух}}$). То есть, если первый будет показывать эффективность обеспечения сердцем одного ДО, то второй более стационарен, а его поминутная вариативность может быть информативна при характеристике динамических процессов.

Прежде всего отметим, что ДОК статистически достоверно активизируется при всех испытанных вариантах умеренных физических нагрузок. Однако удельный показатель ДОК на единичный ДО строго дифференцирует исследованные физические нагрузки, в то время как удельный показатель ДОК относительно ЧД не дифференцирует состояние кровообращения. Вариативность приведенных показателей позволяет обосновать дифференциальную значимость следующих интегральных критериев, непосредственно устанавливаемых с помощью САКР.

Кроме того, нам представляется интересным сравнить функциональные минутные показатели сердечно-сосудистой и дыхательной систем (МОК, МОД и их соотношение). Результаты представлены в табл. 4.

Как видно из результатов, приведенных в табл. 4, соотношение динамических показателей обеспеченности кровотоком одного дыхательного цикла остается постоянным при произвольном режиме дыхания и при пробе с фиксированным режимом дыхания. При этом минутные показатели дыхательной и сердечно-сосудистой систем синхронно интенсифицируются при ступенчатой умеренной физической нагрузке.

Традиционно для оценки сердечно-дыхательного синхронизма используют интегральные показатели функционирования сердечно-сосудистой и дыхательной систем. С использованием САКР те же функциональные

показатели нормируются на каждое сердечное сокращение и каждый дыхательный цикл. Информативность такого подхода в том, что непосредственно детектируется МОК и МОД (усредненное значение произведения ДО на ЧД). Соотношение МОК / МОД (л/дых.цикл) представляется индивидуальной характеристикой степени синхронизации сердечно-сосудистой и дыхательного гомеостаза. Методология оценки динамических соотношений кровообращения и дыхания впервые проведено в данном исследовании.

Приведенные результаты позволяют утверждать, что апробированный метод САКР позволяет количественно определить уровни синхронизации сердечной и дыхательной регуляции кровообращения, обеспеченной стабильным уровнем динамических соотношений объемов кровообращения на один дыхательный цикл. Нами представляется данный результат весомым аргументом для использования обсуждённых полисистемных критериев в объективной диагностике степени сопряженности регуляторных систем сердечно-сосудисто-дыхательного гомеостаза, который достаточно активно обсуждается в отечественной и зарубежной научной литературе.

Заключение

Для задач дифференциации механизмов синхронизации сердечно-дыхательной функции нами апробированы новые критериальные подходы, выполняемые с использованием методологии САКР. Выявленная высокая дифференциальная способность при анализе умеренных внешних воздействий обосновывает перспективность внедрения данной методологии для объективного, неинвазивного экспрессного анализа функционального статуса сердечно-дыхательного гомеостаза в динамике самых разнообразных актуальных патологий на ранних стадиях их инициации и объективного контроля коррекционных мероприятий и лечебных подходов.

Таким образом, методология динамического контроля кардио-респираторного гомеостаза по одновременной регистрации параметров в трех основных регуляторных системах представляется адекватной для регистрации вариантов функциональной синхронизации при умеренных внешних воздействиях.

Список литературы

1. Лосев Н.И. *Некоторые механизмы функциональных связей кровообращения и дыхания в норме и в критических состояниях организма*. В кн.: Патологическая физиология сердечно-сосудистой системы. Тбилиси, 1964. 1: 281-283.
2. Bucher K., Schwitter H., Hool-Zulauf B., Batschelet E. Links between cardiac and respiratory rhythmicity. *Res. Exp. Med.* 1972; 157: 281-288.
3. Покровский В. М. *Сердечно-дыхательный синхронизм в оценке регуляторно-адаптивных возможностей организма*. Краснодар: Кубань-Книга, 2010.
4. Трегубов В.Г. Канорский С.Г., Покровский В.М. Оценка регуляторно-адаптивного статуса в определении прогноза при систолической хронической сердечной недостаточности. *Клиническая медицина*. 2015; 93(11): 22-28.
5. Moertl M.G., Lackner H.K., Papousek I., Roessler A., Hinghofer-Szalkay H., Lang U., Kolovetsiou-Kreiner V, Schlembach D. Phase Synchronization of Hemodynamic Variables at Rest and after Deep Breathing Measured during the Course of Pregnancy. *PLoS One*. 2013; 8(4): e60675. DOI: 10.1371/journal.pone.0060675

6. Krause H.F., Kraemer J., Penzel T., Kurths J., Wessel N. On the difference of cardiorespiratory synchronisation and coordination. *Chaos*. 2017; 27(9): 093933. DOI: 10.1063/1.4999352
7. Глузмина М.М., Покровский В.М. Регуляторно-адаптивный статус у лиц с акне (acne vulgaris). *Кубанский научный медицинский вестник*. 2017; 24(4): 49-53.
8. Носкин Л.А., Рубинский А.В., Воробьева Т.В., Шандыбина Н.Д. Объективный мониторинг функционального состояния сердечно-сосудистой и легочной систем у детей младшей возрастной группы с дефектами речи и слуха. *Патогенез*. 2015; 13(2): 31-35.
9. Герасимова Л.С., Шандыбина Н.Д., Носкин Л.А., Рубинский А.В., Павлидис К. Спиро-артерио-кардио-ритмография как дифференциатор индивидуального адаптогенеза при медитации. *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2016. 15(1): 22-27.
10. Михайлов В.М. *Нагрузочное тестирование под контролем ЭКГ: велоэргометрия, тредмилл-тест, степ-тест, ходьба*. Иваново: Талка, 2008.
11. Garber C.E., Blissmer B., Deschenes M.R., Franklin B.A., Lamonte M.J., Lee I.M., Nieman D.C., Swain D.P.; American College of Sports Medicine. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2011; 43(7): 1334-1359. DOI: 10.1249/MSS.0b013e318213fe1b
12. Starr I. Clinical tests of the simple method of estimating cardiac stroke volume from blood pressure and age. *Circulation*. 1954; 9: 664-668.
13. Kim T.H., Hur J., Kim S.J., Kim H.S., Choi B.W., Yoon Y.W., Kwon H.M. Two-phase reconstruction for the assessment of left ventricular volume and function using retrospective ECG-gated MDCT: comparison with echocardiography. *Am. J. Roentgenol.* 2005; 185(2): 319-325. DOI: 10.2214/ajr.185.2.01850319
14. Rittayamai N., Beloncle F., Goligher E.C., Chen L., Mancebo J., Richard J.M., Brochard L. Effect of inspiratory synchronization during pressure controlled ventilation on lung distension and inspiratory effort. *Ann. Intensive Care*. 2017; 7: 100. DOI: 10.1186/s13613-017-0324-z
15. Guzii O.V., Romanchuk A.P. Heart rate variability during controlled respiration after endurance training. *Journal of Physical Education and Sport*. 2017; 17(3), 203: 2024 – 2029. DOI: 10.5281/zenodo.802943

Reference

1. Losev N.I. [Some mechanisms of functional connections of blood circulation and respiration in normal and critical conditions of the body]. *Pathological physiology of the cardiovascular system*. 1964; 1: 281-283 (in Russian)
2. Bucher K., Schwitter H., Hool-Zulauf B., Batschelet E. Links between cardiac and respiratory rhythmicity. *Res. Exp. Med.* 1972; 157: 281-288.
3. Pokrovskii V.M. [Cardiorespiratory synchronism used for estimation of regulatory-adaptive possibilities of organism]. *Krasnodar: Kuban-Kniga*, 2010. (in Russian)
4. Tregubov V.G., Kanorskiy S.G., Pokrovskiy V.M. [Evaluation of the regulatory-adaptive status for prognosis in systolic chronic heart failure]. *Klinicheskaya meditsina [Clinical Medicine]*. 2015; 93(11): 22-28. (in Russian)
5. Moertl M.G., Lackner H.K., Papousek I., Roessler A., Hinghofer-Szalkay H., Lang U., Kolovetsiou-Kreiner V, Schlembach D. Phase Synchronization of Hemodynamic Variables at Rest and after Deep Breathing Measured during the Course of Pregnancy. *PLoS One*. 2013; 8(4): e60675. DOI: 10.1371/journal.pone.0060675
6. Krause H.F., Kraemer J., Penzel T., Kurths J., Wessel N. On the difference of cardiorespiratory synchronisation and coordination. *Chaos*. 2017; 27(9): 093933. DOI: 10.1063/1.4999352
7. Gluzmina M.M., Pokrovskiy V.M. [The regulatory-adaptive status in persons with acne vulgaris]. *Kubanskiy nauchnyy medicinskiy vestnik [Kuban Scientific Medical Bulletin]*. 2017; 24(4): 49-53. (in Russian)
8. Noskin L.A., Rubinskiy A.V., Vorob'eva T.V., Shandybina N.D. [Objective monitoring of the functional states of the cardiovascular and pulmonary systems of the youngest age group of children with speech and hearing defects]. *Patogenez [Pathogenesis]*. 2015; 13(2): 31-35. (in Russian)
9. Gerasimova L.S., Shandybina N.D., Noskin L.A., Rubinsky A.V., Pavlidis K. [Spiro-artery-how cardiorythmography a meditation as a moderator of individual adaptogenesis]. *Sistemnyj analiz i upravlenie*

- v biomeditsinskikh sistemah [System analysis and management in biomedical systems]*. 2016; 15(1): 22-27. (in Russian)
10. Mikhailov V.M. [*Load testing under ECG control: Bicycle ergometry, treadmill test, step test, walking*]. Ivanovo: Talka, 2008. (in Russian)
 11. Garber C.E., Blissmer B., Deschenes M.R., Franklin B.A., Lamonte M.J., Lee I.M., Nieman D.C., Swain D.P.; American College of Sports Medicine. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2011; 43(7): 1334-1359. DOI: 10.1249/MSS.0b013e318213fefb
 12. Starr I. Clinical tests of the simple method of estimating cardiac stroke volume from blood pressure and age. *Circulation.* 1954; 9: 664-668.
 13. Kim T.H., Hur J., Kim S.J., Kim H.S., Choi B.W., Yoon Y.W., Kwon H.M. Two-phase reconstruction for the assessment of left ventricular volume and function using retrospective ECG-gated MDCT: comparison with echocardiography. *Am. J. Roentgenol.* 2005; 185(2): 319-325. DOI: 10.2214/ajr.185.2.01850319
 14. Rittayamai N., Beloncle F., Goligher E.C., Chen L., Mancebo J., Richard J.M., Brochard L. Effect of inspiratory synchronization during pressure controlled ventilation on lung distension and inspiratory effort. *Ann. Intensive Care.* 2017; 7: 100. DOI: 10.1186/s13613-017-0324-z
 15. Guzii O.V., Romanchuk A.P. Heart rate variability during controlled respiration after endurance training. *Journal of Physical Education and Sport.* 2017; 17(3), 203: 2024 – 2029. DOI: 10.5281/zenodo.802943 (in Ukrainian)

Сведения об авторах:

Носкин Леонид Алексеевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией медицинской биофизики Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Рубинский Артемий Владимирович – кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры медицинской реабилитации и адаптивной физической культуры Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Романчук Александр Петрович – доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой общемедицинских наук Одесского медицинского института Международного гуманитарного университета

Марченко Валерий Николаевич – доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры госпитальной терапии им. акад. М.В. Черноруцкого Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Пивоваров Владимир Вячеславович – доктор технических наук, заместитель директора по науке НАО Общества Институт кардиологической техники «Инкарт»

Черепов Антон Борисович – научный сотрудник лаборатории физико-химической и экологической патофизиологии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт общей патологии и патофизиологии».

Заровкина Любовь Анатольевна – кандидат медицинских наук, доцент кафедры медицинской реабилитации и адаптивной физической культуры Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации