

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
СТАТЬИ

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТА КИСЛОРОДА У ЧЕЛОВЕКА В ПОКОЕ

© 2019 г. В. Г. Гришин<sup>1</sup>, \*, О. В. Гришин<sup>2</sup>, В. В. Гулытьева<sup>3</sup>,  
М. И. Зинченко<sup>3</sup>, Д. Ю. Урюмцев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт физиологии  
и фундаментальной медицины, Новосибирск, Россия

\*E-mail: victor.grishin.nsk@gmail.com

Поступила в редакцию 21.05.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 20.06.2019 г.

Исследованы показатели variability ритма сердца, вентиляции легких и легочного газообмена в VLF-диапазоне у 11 здоровых человек (5 мужчин, 6 женщин) в возрасте от 22 до 59 лет. Данные потребления кислорода, выделения углекислого газа, частоты дыхания, дыхательного объема, R–R интервалов электрокардиограммы в течение 60 мин регистрировали в первой половине дня в положении сидя в состоянии относительного покоя. Для анализа частотных свойств использовали метод быстрого преобразования Фурье (окно 2048 отсчетов, весовая функция – Hamming). Показана периодическая динамика всех измеряемых показателей в VLF-диапазоне с совпадением интегральных максимумов спектральной мощности сердечного ритма, параметров газообмена и вентиляции в пределах от 0.003 до 0.02 Гц. Совпадение частотных характеристик регистрируемых показателей позволяют сделать вывод об устойчивом характере квазипериодических колебаний, который формируется в результате взаимодействия управляющих механизмов кардиореспираторного ритмогенеза.

*Ключевые слова:* variability сердечного ритма, variability параметров вентиляции, variability параметров газообмена, спектральная мощность, VLF-диапазон, квазипериодические колебания

DOI: 10.1134/S0869813919090061

Известно, что variability R–R интервалов в “высокочастотном” диапазоне от 0.15 до 0.4 Гц (HF-диапазон) совпадает с частотой дыхания [1]. Это обусловлено циклическим характером функционирования системы дыхания и кровообращения. Наиболее вероятным механизмом взаимодействия может быть циклическое изменение внутригрудного давления на вдохе и выдохе, которое влияет на общую гемодинамику. Автоматическую подстройку обеспечивает вегетативная нервная система, что позволяет оценивать вклад парасимпатической нервной системы в регуляцию сердечной деятельности [2]. Известно также, что взаимодействие систем, обеспечивающих перенос кислорода из атмосферы в ткани, регулируется по принципу обратной связи на уровне подкорковых структур [3, 4]. При этом регулируемые параметры постоянно варьируют в некоторых диапазонах физиологических норм, поэтому согласованность сокращений сердца и дыхательных экскурсий отражается в совпадении variability мониторируемых параметров.

Вместе с этим, вентиляционная функция зависит от потребностей кислорода и соответственно от напряжения кислорода и углекислого газа в артериальной крови. Уровень этих показателей также регулируется по принципу обратной связи в рамках определенного диапазона, что дает основание для формирования колебательных процессов газообмена. В ряде исследований было установлено, что у человека в состоянии покоя и в состоянии сна имеется “синусоидальная” динамика скорости потребления кислорода с периодом от 40 с [5] до 5 мин [6]. Это диапазон от 0.003 до 0.04 Гц, который характеризуется как “очень низкочастотный” (VLF-диапазон) [1], и совпадает с вариабельностью показателей легочной вентиляции [7]. Было сделано предположение, что регуляция дыхательного паттерна подчиняется механизмам метаболического контроля, поэтому отличается от “простого” ритмогенеза. Изучение частотных характеристик внешнего дыхания позволило нам установить наличие модуляции дыхательного цикла в VLF диапазоне, которая полностью совпадает с вариабельностью показателей легочного газообмена. Спектры показателей вентиляции в частотном диапазоне 0.003–0.04 Гц были получены различными методами и воспроизводились при повторных исследованиях. Был сделан вывод о том, что медленные колебания вентиляции и газообмена обусловлены энергетическими процессами [8].

Подобный характер вариабельности в VLF-диапазоне наблюдается при анализе сердечного ритма [2, 9]. Существует предположение, что этот феномен обусловлен регуляторными ритмами гипоталамуса и эндокринной системы [10], однако прямых доказательств существования “энергетического ритма”, который бы продемонстрировал совпадение частотных спектров показателей легочной вентиляции, R–R интервалов и газообмена, в доступной литературе мы не встречали. Выполненная нами работа, в которой было показано подобное совпадение с помощью пульсоксиметрии, имела значительные ограничения из-за особенностей обработки данных пульсоксиметрии [8]. В связи с этим целью настоящих исследований было изучить вариабельность сердечного ритма (BCP), вентиляции легких и легочного газообмена, а также установить возможную между ними связь в частотном диапазоне 0.003–0.04 Гц.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования были проведены у 11 условно здоровых человек (5 мужчин, 6 женщин) в возрасте от 22 до 59 лет, в первой половине дня в состоянии относительного покоя в положении сидя.

Все добровольцы перед исследованием были проконсультированы у терапевта. Условно здоровыми считали лиц, не имевших в день обследования жалоб, патологических симптомов и обострения хронических заболеваний. Учитывая пилотный характер исследований, был выбран подход с проведением исследования на неоднородной (по полу и возрасту) группе. Совпадение частотных характеристик различных показателей, измеренных различными методами, в такой неоднородной группе будет указывать на фундаментальный характер выявленного феномена в области VLF-диапазона.

Исследование проведено без риска для здоровья людей с соблюдением всех принципов гуманности и этических норм (Хельсинкская декларация, 2000 г., Директивы Европейского сообщества 86/609).

Для анализа вариабельности дыхания в VLF-диапазоне регистрировали показатели легочного газообмена и вентиляции легких методом “breath-by-breath” в течение 60 мин на метаболографе Ultima PFX (США). Дыхание осуществлялось через лицевую маску. Частотный анализ был проведен по следующим показателям:  $VCO_2$  – скорость выделения углекислого газа;  $VO_2$  – скорость потребления кислорода;  $Vt$  –

дыхательный объем; BR — частота дыхания. Одновременно с регистрацией показателей дыхания в течение 60 мин выполнялась регистрация ритма сердца методом электрокардиографии (ЭКГ) в трех отведениях по НЭБУ с определением длительности R–R интервалов с помощью кардиографического комплекса ПолиСпектр 8 (ООО НЕЙРОСОФТ, Россия).

Для исследования частотных свойств использовали метод быстрого преобразования Фурье (БПФ). Поскольку показатели вентиляции и газообмена регистрировались breath-by-breath, а данные ритмограммы сердца регистрировались beat-to-beat, была выполнена интерполяция данных с дискретой 1 с методом Cubic Spline Interpolation, что позволило применить метод оконного БПФ. Интерполяция данных выполнялась с помощью программного обеспечения (ПО) DataFit v 9.1.32 (Oakdale Engineering). С помощью ПО PowerGraph v.3.3 (ООО ДИСофт, Россия) были подготовлены массивы данных с учетом совпадения во времени, проведена нормализация данных и фильтрация от шумов.

Интегральная оценка (для массива 3600 отсчетов — 60 мин) частотных свойств производилась методом БПФ со следующими параметрами: окно — 2048 точек, весовая функция — Hamming. Для анализа синхронизации колебаний в VLF-диапазоне по спектрам с помощью ПО PowerGraph v.3.3 определялась частота гармонической составляющей с максимальной мощностью (ГСММ) для каждого регистрируемого показателя. На рис. 1 показан пример (мужчины 29 лет) спектров показателей с указанием ГСММ.

Статистический анализ. Поскольку распределение частот ГСММ сердечных сокращений в целом по группе достоверно отличалось от нормального (Lilliefors  $p < 0.01$ ) (у двух испытуемых частоты ГСММ были почти в 2 раза выше, чем остальных девяти человек), а также из-за малой численности исследуемой группы применены непараметрические методы статистического анализа. Для сравнения частот ГСММ исследуемых показателей провели дисперсионный непараметрический анализ для зависимых переменных Friedman ANOVA. Для последующих попарных сравнений использовали критерий знаков, для анализа взаимосвязей — непараметрический корреляционный анализ (коэффициент корреляции Спирмена).

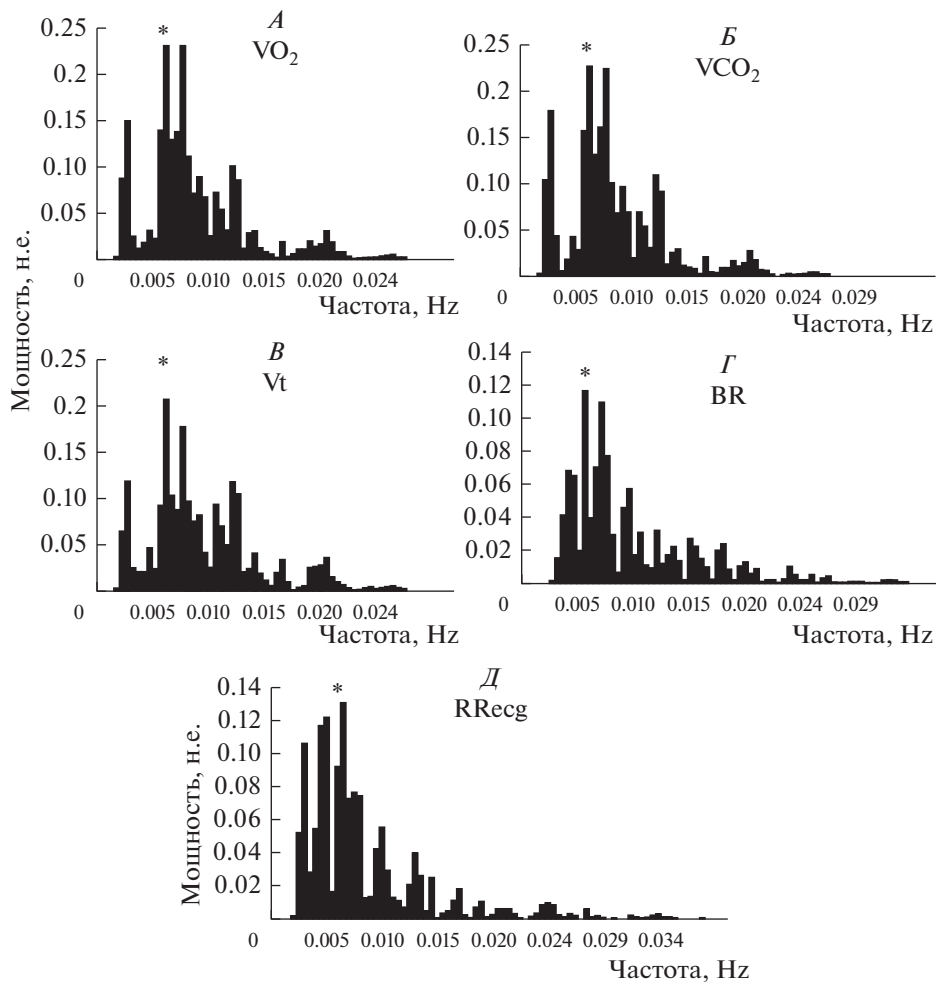
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Первичный анализ динамики показателей*

Фрагмент результатов синхронной регистрации показателей одного из добровольцев в состоянии покоя представлен на рис. 2. Визуальная оценка исходных массивов позволяет предположить, что вариабельность показателей находится в пределах VLF-диапазона. Так как и частота дыхания, и частота сердечных сокращений характеризуются наличием других несоизмеримых частот в высокочастотном и низкочастотном диапазонах (HF-, LF-диапазоны) [1, 2], наблюдаемую вариабельность можно отнести к квазипериодическим колебаниям, занимающим “промежуточное” положение между регулярными и хаотическими колебаниями [11].

С целью первичной оценки выраженности динамики, были рассчитаны коэффициенты вариации регистрируемых показателей. В табл. 1 приведены средние значения ( $M \pm SD$ ) и коэффициент вариации (CV) показателей вентиляции, легочного газообмена и сердечного ритма.

Значения коэффициента вариации существенно превышают точность измерения метабологафа Ultima PFX: концентрации кислорода  $\pm 0.03$  об. %, концентрации углекислого газа  $\pm 0.05$  об. %, по потоку не более  $\pm 3.0\%$ . То же самое относится и к вариативности R–R интервалов: коэффициент вариации длительности сердечного ритма существенно превышает ошибку измерения R–R-интервалов кардиографическим комплексом ПолиСпектр 8, составляющую 0.16%. Это означает что



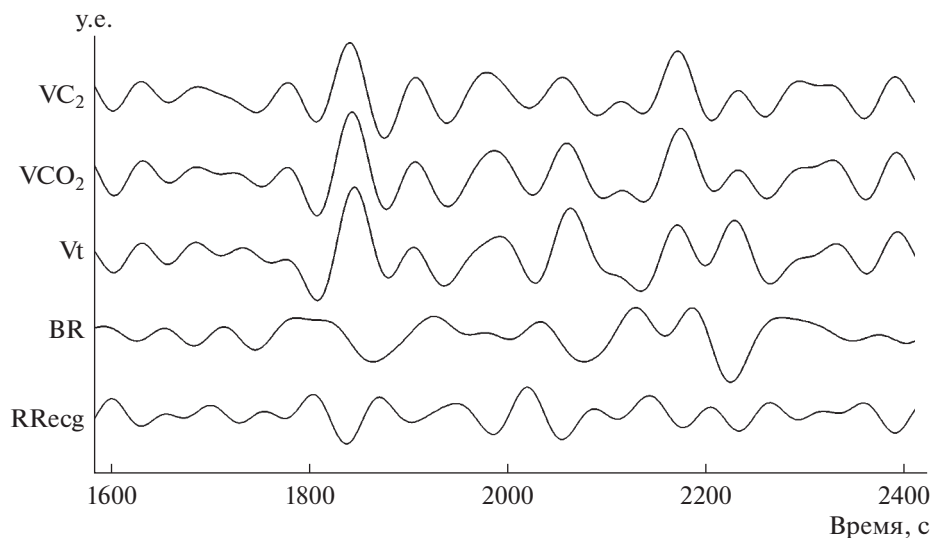
**Рис. 1.** Спектры показателей системы транспорта кислорода: *A* – VO<sub>2</sub> – скорость потребления кислорода; *Б* – VCO<sub>2</sub> – скорость выделения углекислого газа; *В* – Vt – дыхательный объем; *Г* – BR – частота дыхания; *Д* – RRecg – R–R интервалы-ЭКГ. \* – гармоническая составляющая с максимальной мощностью (ГСММ). По оси *X* – частота в Гц, по оси *Y* – мощность спектра в нормированных единицах.

наблюдаемая периодическая динамика является самостоятельным физиологическим феноменом, а не ошибкой измерения применявшихся методов.

#### *Анализ частотных характеристик в VLF-диапазоне*

На рис. 3 представлены значения частот ГСММ по каждому показателю для всех 11 добровольцев. Обращает на себя внимание, что все значения находятся в границах от 0.0034 до 0.019 Гц VLF-диапазона. При этом 53 из 55 значений располагаются в относительно узких границах: 0.0034–0.0112 Гц (период колебаний от 1.5 до 5 мин).

При описании в целом по выборке, медианы частот ГСММ исследуемых показателей находятся в диапазоне 0.0059–0.0078 Гц (период колебаний 2.8–2.1 мин, табл. 2).

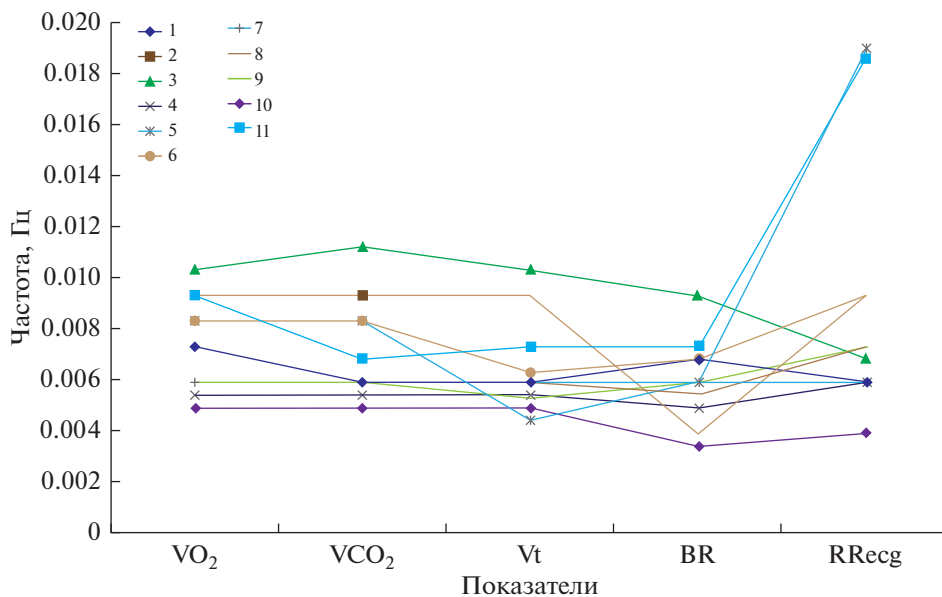


**Рис. 2.** Фрагмент записи нормализованных и отфильтрованных данных легочного газообмена ( $VO_2$ ,  $VCO_2$ ), вентиляции легких ( $Vt$ , BR) и ритмограммы сердца (RRecg) у здорового мужчины 29 лет. По оси  $X$  – время (с), шкала  $Y$  – условные единицы.

Статистический непараметрический анализ Friedman ANOVA при включении всех исследуемых показателей выявил достоверное различие между частотами ГСММ (ANOVA Chi Sqr. ( $N = 11$ ,  $df = 4$ ) = 12,1;  $p = 0.02$ ). Парные сравнения с помощью критерия знаков показали, что различаются частоты ГСММ для показателей  $VO_2$  и BR ( $z = 2.7$ ;  $p < 0.01$ ). Достоверного различия между частотами ГСММ для четырех показателей –  $VO_2$ ,  $VCO_2$ ,  $Vt$ , RRecg – не было (ANOVA Chi Sqr. ( $N = 11$ ,

**Таблица 1.** Средние значения ( $M \pm SD$ ) и коэффициент вариации (CV, %) показателей вентиляции ( $Vt$ , BR), легочного газообмена ( $VO_2$ ,  $VCO_2$ ) и сердечного ритма (RRecg) в течение 60 минутного мониторинга у каждого испытуемого

№ исп.	$VO_2$ , мл/мин		$VCO_2$ , мл/мин		$Vt$ , мл		BR, мин <sup>-1</sup>		RRecg, мс	
	$M \pm SD$	CV	$M \pm SD$	CV	$M \pm SD$	CV	$M \pm SD$	CV	$M \pm SD$	CV
1	220 ± 14	6.4	175 ± 12	6.9	532 ± 57	6.9	13 ± 1.4	10.8	944 ± 53	5.6
2	302 ± 27	8.9	280 ± 23	8.2	597 ± 46	8.2	17 ± 1.4	8.2	903 ± 48	5.3
3	185 ± 23	12.4	168 ± 21	12.5	393 ± 47	12.5	17 ± 1.9	11.2	873 ± 36	4.1
4	190 ± 20	10.5	157 ± 19	12.1	393 ± 35	12.1	16 ± 1.0	6.3	992 ± 75	7.6
5	189 ± 27	14.3	158 ± 23	14.6	420 ± 54	14.6	16 ± 1.4	8.8	1037 ± 55	5.3
6	195 ± 23	11.8	171 ± 19	11.1	472 ± 50	11.1	12 ± 1.5	12.5	790 ± 58	7.3
7	163 ± 19	11.7	132 ± 13	9.8	345 ± 19	9.8	16 ± 1.0	6.3	873 ± 35	4.0
8	250 ± 43	17.2	208 ± 34	16.3	559 ± 76	16.3	12 ± 1.5	12.5	901 ± 76	8.4
9	195 ± 18	9.2	196 ± 19	9.7	465 ± 31	9.7	14 ± 0.8	5.7	1000 ± 68	6.8
10	222 ± 30	13.5	193 ± 26	13.5	485 ± 39	13.5	15 ± 1.0	6.7	1152 ± 49	4.3
11	204 ± 27	13.2	189 ± 24	12.7	458 ± 55	12.7	14 ± 1.5	10.7	938 ± 61	6.5



**Рис. 3.** Частоты гармонической составляющей с максимальной мощностью показателей системы транспорта кислорода для 11 человек (VLF диапазон: 0.003–0.04 Гц). Линиями соединены показатели для одного человека. По оси  $X$  – показатели, по оси  $Y$  – частота ГСММ, Гц.

$df = 3) = 5.9; p > 0.11$ ) Таким образом, частоты ГСММ для 4-х показателей системы транспорта кислорода ( $VO_2$ ,  $VCO_2$ ,  $V_t$ ,  $RRecg$ ) не различаются.

При расчете корреляций были выявлены достоверные обратные связи между частотами с максимальной мощностью R–R интервалов ЭКГ и возрастом, а также между ГСММ дыхательного объема и индексом массы тела (табл. 3).

**Таблица 2.** Частоты гармонических составляющих с максимальной мощностью (ГСММ) для показателей кардиореспираторной системы в целом по выборке

	Частота ГСММ (Гц) для показателей:				
	$VO_2$	$VCO_2$	$V_t$	BR	RRecg
Медиана	0.0078	0.0063	0.0059	0.0059	0.0073
Нижний квартиль	0.0059	0.0059	0.0054	0.0052	0.0059
Верхний квартиль	0.0093	0.0088	0.0083	0.0070	0.0093

**Таблица 3.** Коэффициенты корреляции Спирмана между частотами ГСММ показателей системы транспорта кислорода и антропометрическими данными

	Частота ГСММ (Гц) для показателей:				
	$VO_2$	$VCO_2$	$V_t$	BR	RRecg
Возраст	–0.30	–0.29	–0.33	–0.06	–0.66*
Вес	–0.16	–0.10	–0.40	–0.14	–0.08
Рост	0.30	0.36	0.21	–0.06	0.31
ИМТ ( $кг/м^2$ )	–0.29	–0.21	–0.62*	0.05	–0.10

Примечание. \* Отмеченные корреляции достоверно значимы,  $p < 0.05$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, наши данные 60-минутного мониторинга системы транспорта кислорода показали, что в состоянии относительного покоя в положении сидя имеет место функционально значимая периодическая динамика показателей газообмена, легочной вентиляции и сердечного ритма, выходящая за пределы хаотической variability методической погрешности. Динамика наблюдается в пределах VLF-диапазона, а 96% значений максимальной мощности спектров обусловлены осцилляциями с периодом от 1.5 до 5.0 мин. При этом интегральные максимумы спектральной мощности сердечного ритма, параметров газообмена и глубины дыхания совпадают в VLF диапазоне.

Представленные показатели по существу относятся к различным подсистемам, которые объединены в общую систему транспорта кислорода (СТК), обеспечивающую доставку кислорода из окружающей атмосферы в митохондрии клеток и удаление углекислого газа в обратном направлении. Показатели  $\dot{V}O_2$  и  $\dot{V}CO_2$  в устойчивом состоянии отражают динамику кислородного запроса (интенсивность тканевого дыхания) и интегральную функцию СТК в целом, показатели  $\dot{V}_t$  и BR – вентиляционную функцию легких, а длительность R–R интервала – функцию сердечно-сосудистой системы. Теоретически это предполагает наличие определенной согласованности между перечисленными функциональными звеньями. Полученные данные позволяют считать, что качество этой согласованности можно оценивать в VLF-диапазоне по любому из представленных параметров.

Корреляционный анализ (табл. 3) показал, что с увеличением возраста периодические колебания RR интервалов сердечного ритма в VLF-диапазоне замедлялись. Вторая достоверная зависимость показала, что с увеличением индекса массы тела, у лиц с низкой физической активностью отражающего накопление жировой массы, замедлялись колебания в динамике дыхательного объема. Это косвенным образом отражает связь изучаемых нами волновых процессов с уровнем метаболизма.

Вариабельность каждого показателя представляет изменение его величины во времени и характеризуется дисперсией относительно некоторой “базовой” величины математического ожидания. Если динамика измеряемой величины имеет периодический характер, то вариабельность, скорее всего, будет отражать некоторый контролируемый функциональный процесс, имеющий определенный временной период. Можно предположить, что система транспорта кислорода, включающая в себя легочную вентиляцию, кровообращение и процесс газообмена, имеет общую периодичность, которая будет проявляться в вариабельности соответствующих функциональных показателей. Полученные результаты согласуются с изменением ритмогенеза дыхания и сердечных сокращений у крыс в условиях гипоксии [12]. Авторы предположили, что кардиореспираторная система управления может действовать как слабосвязанный осциллятор для поддержания ритмов с ограниченной изменчивостью. Согласованность сердечного и дыхательного ритмов в VLF-диапазоне также показана при тепловом воздействии на человека [13]. В 2017 г. T. Sobiech с соавт. [14], изучая кардиореспираторную связь у молодых здоровых лиц, пришел к выводу о возможном наличии двойного механизма респираторного ритмогенеза, предложенного Галлетти и Ларсеном. Подобная зависимость проявлялась при стимуляции энергетических затрат с помощью специализированного напитка. Это исследование выявило корреляцию между уровнем энергетического обмена и уровнем мощности спектра ВСР во всех трех диапазонах (HF, LF, VLF) [15].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совпадение частотных характеристик ритма сердца и частотных характеристик газообмена и вентиляции легких в пределах VLF-диапазона позволяет сделать вы-

вод об устойчивом характере выявленного волнового процесса, который, предположительно, объединяется единым набором управляющих механизмов. Речь идет о внутренней “широкополосной синхронизации” колебательных процессов, объединенных квазипериодической динамикой. Поиск математического инструментария для описания подобных процессов может оказаться полезным для решения практических диагностических задач с определением основного звена функциональных нарушений в системе транспорта кислорода при тяжелых состояниях, сопровождающихся гипоксией и полиорганной недостаточностью.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке базового проекта фундаментальных исследований РАН IV 35.2.6.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation*. 93(5): 1043–1065. 1996.
2. *Laborde S., Mosley E., Thayer J.F.* Heart Rate Variability and Cardiac Vagal Tone in Psychophysiological Research – Recommendations for Experiment Planning, Data Analysis, and Data Reporting *Front. Psychol.* 8. 213: 1–18. 2017.
3. *Бреслав И.С.* Дыхательная сенсорика человека, ее физиологическая роль. *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова*. 88 (2): 257–266. 2002. [*Breslav I.S.* Human respiratory sensory system, its physiological role. *Russ. Fiziol. Zh. Im. I.M. Sechenova*. 88(2): 257–266. 2002. (In Russ.)].
4. *Safonov V.A., Tarasova N.N.* Nervous control of respiration. *Human Physiology*. 32(4): 429–439. 2006.
5. *Cadena-Méndez M., Escalante-Ramírez B., Azpiroz-Leehan J., Infante-Vázquez O.*  $VO_2$  and  $VCO_2$  variabilities through indirect calorimetry instrumentation. *Springer Plus*. 2: 688. 1–12. 2013.
6. *Grishin O.V., Grishin V.G., Kovalenko Yu.V.* The variability of pulmonary gas exchange and respiratory pattern. *Human Physiology*. 38(2): 194–199. 2012.
7. *Rostig S., Kantelhardt J.W., Penzel T., Cassel W., Peter J.H., Vogelmeier C., Becker H.F., Jerrentrup A.* Nonrandom variability of respiration during sleep in healthy humans. *Sleep*. 28(4): 411–417. 2005.
8. *Grishin O.V., Grishin V.G., Uryumtsev D.Yu., Smirnov S.V., Jilina I.G.* Metabolic Rate Variability Impact on Very Low-Frequency of Heart Rate Variability. *World Appl. Sci. J.* 19(8): 1133–1139. 2012.
9. *Флейшман А.Н.* Вариабельность ритма сердца и медленные колебания гемодинамики. Нелинейные феномены в клинической практике. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2009. [*Fleishman A.N.* Variabelnost ritma serdtsa i medlennyye kolebaniya gemodinamiki. Nelineynyye fenomeny v klinicheskoy praktike [The heart rate variability and slow hemodynamic oscillations: non-linear phenomena in clinical practice]. Novosibirsk. Publishing house “SB RAS”. 2009].
10. *Berntson G.G., Bigger J.T., Eckberg D.L., Grossman P., Kaufmann P.G., Malik M., Nagaraja H.N., Porges S.W., Saul J.P., Stone P.H., Van Der Molen M.W.* Heart rate variability: Origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*. 34: 623–648. 1997.
11. *Кузнецов А.П., Сатаев И.Р., Станкевич Н.В., Трююкина Л.В.* Физика квазипериодических колебаний. Саратов. Наука. 2013. [*Kuznetsov A.P., Tjurjukina L.V., Sataev I.R., Stankevich N.V.* Fizika kvaziperiodicheskikh kolebanii. [Physics of quasi-periodic oscillations] Saratov Nauka. 2013].
12. *Dick T.E., Hsieh Y.H., Dhingra R.R., Baeky D.M., Galán R.F., Wehrwein E., Morris K.F.* Cardiorespiratory Coupling: Common Rhythms in Cardiac, Sympathetic, and Respiratory Activities. *Prog. Brain. Res.* 209: 191–205. 2014.
13. *Вергунов Е.Г., Вайнер Б.Г.* Модификация метода Блэнда–Алтмана и ее применение для оценки согласованности сердечного и дыхательного ритмов. *Вестник психофизиологии*. 4: 34–44. 2016. [*Vergunov E.G., Weiner B.G.* Modification of the Blend-Altman method and its application to assess the consistency of the cardiac and respiratory rhythms. *Bull. Psychophysiol.* 4: 34–44. 2016. (In Russ.)].
14. *Sobiech T., Buchner T., Krzesinski P., Gielerak G.* Cardiorespiratory coupling in young healthy subjects. *Physiol. Meas.* 38(12): 2186–2202. 2017.



15. *Millis R.M., Austin R.E., Hatcher M.D., Bond V., Goring K.L.* Metabolic Energy Correlates of Heart Rate Variability Spectral Power Associated with a 900-Calorie Challenge. *J. Nutrition and Metabolism*. Article ID 715361: 1–6. 2011.

### **Very-Low-Frequency Oscillations of Oxygen Transport in Resting Humans**

**V. G. Grishin<sup>a, \*</sup>, O. V. Grishin<sup>b</sup>, V. V. Gulyaeva<sup>c</sup>, M. I. Zinchenko<sup>c</sup>, D. Yu. Uryumtsev<sup>c</sup>**

<sup>a</sup>*Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia*

<sup>b</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

<sup>c</sup>*Research Institute of Physiology and Fundamental Medicine, Novosibirsk, Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: victor.grishin.nsk@gmail.com*

Parameters of heart rate variability, pulmonary ventilation, and gas exchange in the VLF range were studied in 11 healthy subjects (5 men, 6 women) aged from 22 to 59 years. Data on oxygen consumption, carbon dioxide production, breathing rate, tidal volume, R–R intervals of electrocardiogram were recorded in the first half of the day in the sitting position in a state of relative rest. To process the frequency properties, the fast Fourier transform method was used (window of 2048 samples, weighting function – Hamming). It is shown that during the 60-minute monitoring there is a functionally significant dynamics of all measured parameters in the VLF-range with the coincidence of the integral maxima of the spectral power of the heart rate, the parameters of gas exchange and ventilation in the range from 0.003 to 0.02 Hz. The coincidence of frequency characteristics with periodic dynamics within 1–5 minutes allows us to conclude that the quasi-periodic oscillations are stable and formed as a result of the interaction of the controlling mechanisms of cardiorespiratory rhythmogenesis.

*Keywords:* heart rate variability, ventilation variability, gas exchange variability, spectral power, VLF-range, quasiperiodic oscillations

#### **ЦИТИРОВАТЬ:**

Гришин В.Г., Гришин О.В., Гуляева В.В., Зинченко М.И., Урюмцев Д.Ю. Низкочастотные колебания показателей системы транспорта кислорода у человека в покое. *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова*. 105(9): 1154–1162.

DOI: 10.1134/S0869813919090061

#### **TO CITE THIS ARTICLE:**

Grishin V.G., Grishin O.V., Gulyaeva V.V., Zinchenko M.I., Uryumtsev D.Yu. Very-Low-Frequency Oscillations of Oxygen Transport in Resting Humans. *Russian Journal of Physiology*. 105(9): 1154–1162.

DOI: 10.1134/S0869813919090061