

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ КАРДИОРЕСПИРАТОРНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ НОРМОБАРИЧЕСКОЙ ГИПОКСИИ

А.И. Ширияева\*, Е.Б. Шустов, И.В. Фатеев, М.В. Калтыгин, М.В. Захарова

ФГБУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт  
военной медицины» Минобороны России  
195043, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Лесопарковая, д. 4

Изучение реакции кардиореспираторной системы при длительном воздействии гипоксии (более 60-ти минут) представляет собой научный интерес как для понимания механизмов адаптации организма в условиях дефицита кислорода. Цель: выявить наиболее чувствительные к гипоксии параметры кардиореспираторной системы человека, находящегося в условиях относительного покоя, и наиболее оптимальный по продолжительности временной интервал для проведения гипоксической пробы. Исследование проводили в нормобарическом гипоксическом комплексе, в котором создавали гипоксические дыхательные газовые среды, соответствующие по парциальному давлению кислорода пребыванию на высотах 3500 и 4500 м. Реакцию кардиореспираторной системы оценивали при помощи эргоспирометрической системы MetaLyzer 3B (Cortex, Германия). К категории чувствительных к умеренной нормобарической гипоксии показателей для состояния покоя могут быть отнесены: сатурация гемоглобина кислородом (наиболее чувствительный показатель), эффективность вентиляции легких по кислороду и углекислому газу ( $VE/VO_2$  и  $VE/VCO_2$ ), частота дыхания, дыхательный коэффициент ( $VCO_2/VO_2$ ). Значимое изменение показателей кардиореспираторной системы на высоте 4500 м наступает уже через 5 минут после гипоксического воздействия, поэтому для проведения нормобарической гипоксической пробы рекомендуется использовать именно эту высоту с продолжительностью гипоксического воздействия в течение 30-ти минут.

**Ключевые слова:** нормобарическая гипоксия, кардиореспираторная система, адаптация к гипоксии

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Ширияева А.И., Шустов Е.Б., Фатеев И.В., Калтыгин М.В., Захарова М.В. Исследование реакции кардиореспираторной системы в условиях нормобарической гипоксии. *Биомедицина*. 2020;16(3):120–124. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-16-3-120-124>

Поступила 29.06.2020

Принята после доработки 10.07.2020

Опубликована 10.09.2020

## STUDY OF THE CARDIORESPIRATOR SYSTEM RESPONSE TO NORMOBARIC HYPOXIA

Alyona I. Shiryayeva\*, Yevgeniy B. Shustov, Ivan V. Fateev, Maksim V. Kaltygin,  
Maria V. Zakharova

State Scientific Research Test Institute of Military Medicine of the Ministry of Defence of Russia  
195043, Russian Federation, Saint Petersburg, Lesoparkovaya str., 4

Research into cardiorespiratory responses to prolonged hypoxia (more than 60 minutes) is of particular interest in terms of elucidating adaptive mechanisms under the conditions of oxygen deficiency. Aim: to identify the parameters of the cardiorespiratory system under relative rest most sensitive to hypoxia and to determine the most optimal time interval for a hypoxic test. Experiments were carried out in a normobaric hypoxic complex, in which hypoxic respiratory gas conditions were created corresponding to the partial

oxygen pressure at altitudes of 3500 and 4500 m. Cardiorespiratory responses were evaluated using a MetaLyzer 3B ergospirometric system (Cortex, Germany). Indicators sensitive to moderate normobaric hypoxia under relative rest include hemoglobin oxygen saturation (the most sensitive indicator), oxygen and carbon dioxide ventilation efficiency ( $VE/VO_2$  and  $VE/VCO_2$ ), respiratory rate and respiratory coefficient ( $VCO_2/VO_2$ ). A significant change in the indicators of the cardiorespiratory system at an altitude of 4500 m was noted within 5 minutes following hypoxic exposure; therefore, normobaric hypoxic tests should be carried out at this height under the hypoxic exposure of 30 minutes.

**Keywords:** normobaric hypoxia, cardiorespiratory system, adaptation to hypoxia

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Shiryayeva A.I., Shustov Ye.B., Fateev I.V., Kaltygin M.V., Zakharova M.V. Study of the Cardiorespirator System Response to Normobaric Hypoxia. *Journal Biomed.* 2020;16(3):120–124. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-16-3-120-124>

Submitted 29.06.2020

Revised 10.07.2020

Published 10.09.2020

## Введение

Несмотря на наличие обширных данных по изменению физиологических показателей организма человека в условиях гипоксии, проблема реактивности организма человека при дефиците кислорода в окружающей среде до сих пор сохраняет актуальность и содержит много нерешённых вопросов. Имеющиеся данные по изменению параметров, характеризующих реакцию кардиореспираторной системы в условиях гипоксии, разнородны вследствие преимущественного использования различных по длительности и выраженности гипоксии стимулов, не превышающих 30 мин [1–6]. Изучение реакции кардиореспираторной системы при более длительном воздействии гипоксии представляет собой научный интерес как для понимания механизмов адаптации организма в условиях дефицита кислорода, так и для оценки устойчивости человека к гипоксии.

**Целью** настоящего исследования являлось выявление наиболее чувствительных к гипоксии параметров кардиореспираторной системы человека, находящегося в условиях относительного покоя, и наиболее оптимального по продолжительности временного интервала для проведения гипоксической пробы.

## Материалы и методы

Исследование проводили в нормобарическом гипоксическом комплексе, в котором создавали гипоксические дыхательные газовые среды, соответствующие по парциальному давлению кислорода пребыванию на высотах 3500 (13,1 %) и 4500 м (11,5 %). Реакцию кардиореспираторной системы оценивали у 9-ти здоровых добровольцев в состоянии оперативного покоя в течение 1 ч при помощи эргоспирометрической системы MetaLyzer 3B (Cortex, Германия) после 10-минутной адаптации к условиям гипоксии. Анализировались первичные (сатурация капиллярной крови, легочная вентиляция, парциальное давление кислорода и углекислого газа, частота сердечных сокращений, частота дыхания, дыхательный объем) и производные показатели (потребление кислорода, выделение углекислого газа, удельное потребление кислорода, кислородный пульс, дыхательный коэффициент, эффективность газообмена по кислороду и углекислому газу, интенсивность метаболизма в покое).

Статистическая обработка полученных данных проводилась с использованием пакета математических программ GraphPad Prism 8.

## Результаты и их обсуждение

В условиях покоя контролируруемыми факторами были: уровень гипоксии (высоты 0, 3500 и 4500 м); длительность гипоксического воздействия (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 и 60 мин). Влияние индивидуальных особенностей организма добровольцев (пол, возраст, состояние здоровья) было отнесено к неконтролируемым факторам исследования. Результаты однофакторного дисперсионного анализа влияния гипоксии на анализируемые показатели кардиореспираторной системы представлены в табл. 1.

Таким образом, к категории чувствительных к гипоксии показателей для состояния относительного покоя могут быть отнесены: сатурация, эффективность вентиляции легких по кислороду и углекислому газу, коэффициент эффективности потребления кислорода, дыхательный объем, частота дыхания, минутный объем дыхания, дыха-

тельный коэффициент. При этом ключевым, наиболее значимым показателем является уровень сатурации периферической крови.

Обращает на себя внимание, что показатели активности сердечной деятельности как менее специфичные к транспорту кислорода у здоровых добровольцев в состоянии покоя проявляют низкую чувствительность к умеренной нормобарической гипоксии.

В табл. 2 представлен уровень значимости изменений показателей на каждой временной точке по сравнению с высотой 0 м. В таблицу включены только достоверно значимые показатели.

Таким образом, при проведении нормобарической гипоксической пробы на высоте 3500 м ее начало должно быть не раньше, чем через 30 мин после начала гипоксического воздействия, а при ее выполнении на высоте 4500 м — через 5 мин

**Таблица 1.** Результаты дисперсионного анализа значимости фактора «гипоксия»

**Table 1.** Dispersion analysis of the significance of the hypoxia factor

Показатель	Центроиды групп			Коэффициент детерминации, D	Уровень значимости, p
	Высота 0	Высота 3500	Высота 4500		
Сатурация	97,8±0,1	91,4±0,2	85,9±0,4	0,50	$2 \times 10^{-34}$
VE/VCO <sub>2</sub>	30,5±1,0	33,0±0,3	36,2±0,4	0,19	$8 \times 10^{-11}$
VE/VO <sub>2</sub>	27,0±1,1	31,1±0,4	33,7±0,4	0,13	$10^{-7}$
ДО	0,87±0,06	0,72±0,01	0,80±0,02	0,10	$2 \times 10^{-5}$
ЧД	12,9±0,9	16,7±0,3	16,3±0,2	0,09	$4 \times 10^{-5}$
VO <sub>2</sub> /logVE	0,32±0,01	0,28±0,01	0,28±0,01	0,05	0,003
ДК	0,88±0,01	0,94±0,01	0,93±0,01	0,05	0,003
МОД (VE)	10,8 ±0,09	11,9±0,2	13,0±0,3	0,04	0,007
КП (VO <sub>2</sub> /ЧСС)	4,20±0,30	3,67±0,06	3,80±0,09	0,02	0,10
VO <sub>2</sub> /кг	3,98±0,25	3,65±0,05	3,71±0,05	0,02	0,16
МЕ	1,17±0,07	1,08±0,02	1,10±0,02	0,01	0,35
ЧСС	78,9±3,3	82,9±0,6	82,6±0,7	0,01	0,23
VO <sub>2</sub>	0,33±0,03	0,30±0,01	0,31±0,01	0,008	0,40
VCO <sub>2</sub>	0,29±0,02	0,29±0,01	0,29±0,01	0,001	0,92

**Примечание:** VE — легочная вентиляция (л/мин), VO<sub>2</sub> — потребление кислорода (мл O<sub>2</sub>/мин), VCO<sub>2</sub> — выделение углекислого газа (мл CO<sub>2</sub>/мин), ДО — дыхательный объем при спокойном дыхании (л/мин), ЧД — частота дыхания (мин<sup>-1</sup>), ДК — дыхательный коэффициент (отн. ед.), МОД — минутный объем дыхания, легочная вентиляция (л/мин), КП — кислородный пульс, МЕ — интенсивность метаболизма в покое (мет), ЧСС — частота сердечных сокращений (мин<sup>-1</sup>).

**Note:** VE — pulmonary ventilation (l/min), VO<sub>2</sub> — oxygen consumption (ml O<sub>2</sub>/min), VCO<sub>2</sub> — release of carbon dioxide (ml CO<sub>2</sub>/min), ДО — respiratory volume under calm breathing (l/min), ЧД — respiratory rate (min<sup>-1</sup>), ДК — respiratory coefficient (in units), МОД — minute volume of breath, pulmonary ventilation (l/min), КП — oxygen pulse, МЕ — intensity of metabolism at rest (meth), ЧСС — heart rate (min<sup>-1</sup>).

**Таблица 2.** Результаты дисперсионного анализа значимости фактора «длительность гипоксического воздействия» (p)

**Table 2.** Dispersion analysis of the significance of the hypoxic exposure duration factor (p)

Высота 3500 м												
Время, мин	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
VE/CO <sub>2</sub>	0,06	0,04	0,10	0,13	0,12	0,11	0,11	<b>0,05</b>	0,14	0,09	0,10	0,14
VE/VO <sub>2</sub>	0,18	0,24	0,35	0,39	0,29	0,34	0,31	0,16	0,34	0,21	0,23	0,32
ЧД	0,08	0,18	0,08	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,001</b>	<b>0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,008</b>
ДК	0,06	<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	<b>0,04</b>	0,08	0,06	0,06	<b>0,01</b>	0,063	0,064	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>
SaO <sub>2</sub>	<b>0,0002</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>0,0002</b>	<b>0,0002</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>
Высота 4500 м												
Время, мин	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
VE/CO <sub>2</sub>	<b>0,008</b>	<b>0,005</b>	<b>0,009</b>	<b>0,009</b>	<b>0,003</b>	<b>0,008</b>	<b>0,016</b>	<b>0,005</b>	<b>0,006</b>	<b>0,008</b>	<b>0,005</b>	<b>0,008</b>
VE/VO <sub>2</sub>	<b>0,020</b>	<b>0,013</b>	<b>0,019</b>	<b>0,013</b>	<b>0,008</b>	<b>0,012</b>	<b>0,022</b>	<b>0,012</b>	<b>0,008</b>	<b>0,014</b>	<b>0,008</b>	<b>0,01</b>
ЧД	<b>0,03</b>	<b>0,045</b>	<b>0,03</b>	<b>0,015</b>	0,11	0,07	<b>0,002</b>	<b>0,018</b>	<b>0,005</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,015</b>
ДК	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	0,24	0,09	0,24	0,23	0,23	0,48
SaO <sub>2</sub>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0005</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>0,0002</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>&lt;0,0001</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,0001</b>

после начала гипоксического воздействия. При этом эффективность вентиляции легких по кислороду и углекислому газу (VE/VO<sub>2</sub> и VE/VCO<sub>2</sub>) достоверно изменяются только на высоте 4500 м.

## Выводы

1. К категории чувствительных к умеренной нормобарической гипоксии показателей для состояния покоя могут быть отнесены: сатурация гемоглобина кислородом (наиболее чувствительный показате-

тель), эффективность вентиляции легких по кислороду и углекислому газу (VE/VO<sub>2</sub> и VE/VCO<sub>2</sub>), частота дыхания, дыхательный коэффициент (VCO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>).

2. Значимое изменение показателей кардиореспираторной системы на высоте 4500 м наступает уже через 5 мин после гипоксического воздействия, поэтому для проведения нормобарической гипоксической пробы рекомендуется использовать именно эту высоту с продолжительностью гипоксического воздействия в течение 30 мин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Быков В.Н., Ветряков О.В., Цыган В.Н., Халимов Ю.Ш., Анохин А.Г., Фатеев И.В. и др. Оценка устойчивости военнослужащих к гипоксии на фоне гипобарии и высокой активности. *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2017;4:129–133. [Bykov V.N., Vetryakov O.V., Tsygan V.N., Khalimov Yu.Sh., Anokhin A.G., Fateyev I.V., et al. Otsenka ustoychivosti voyennosluzhashchikh k gipoksii na fone gipobarii i vysokoy aktivnosti [Assessment of resistance of military personnel to hypoxia against a background of hypobarium and high activity]. *Vestnik Rossiyskoy voyenno-meditsinskoy akademii* [Bulletin of the Russian Military Medical Academy]. 2017;4: 129–133. (In Russian)].
2. Грошили С.М. Динамические критерии нормобарической гипоксической пробы. *Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Естественные науки*. 2005;3:114–117. [Groshilin S.M. Dinamicheskiye kriterii normobaricheskoy gipoksicheskoy proby [Dynamic criteria of normobaric hypoxic test]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-kavkazkiy region. Yeststvennyye nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Natural Sciences]. 2005;3:114–117. (In Russian)].
3. Диверт В.Э., Кривошеков С.Г., Водяницкий С.Н. Индивидуально-типологическая оценка реакций кардиореспираторной системы на гипоксию и гиперкапнию у здоровых молодых мужчин. *Физиология человека*. 2015;41(2):64–73. [Divert V.E., Krivoshchekov S.G., Vodyanitskiy S.N. Individual'no-tipologicheskaya otsenka reaktsiy kardiorespiratornoy sistemy na gipoksiyu i giperkapniyu u zdorovykh molodykh muzhchin [Individual-typological assessment of the reactions of the cardiorespiratory system to hypoxia and hypercapnia

- in healthy young men]. *Fiziologiya cheloveka [Human Physiology]*. 2015;41(2):64–73. (In Russian)].
4. Новиков В.С., Лустин С.И. Гипобарическая гипоксия как метод коррекции функционального состояния. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 1994;1:40–44. [Novikov V.S., Lustin S.I. Gipobaricheskaya gipoksiya kak metod korrektsii funktsional'nogo sostoyaniya [Hypobaric hypoxia as a method of correction of a functional state]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina [Aerospace and Environmental Medicine]*. 1994;1:40–44. (In Russian)].
  5. Новиков В.С., Сороко С.И., Шустов Е.Б. Деадаптационные состояния человека при экстремальных воздействиях и их коррекция. СПб.: Политехника-принт, 2018. 548 с. [Novikov V.S., Soroko S.I., Shustov Ye.B. *Dezadaptatsionnyye sostoyaniya cheloveka pri ekstremal'nykh vozdeystviyakh i ikh korrektsiya [Disadaptation states of a person under extreme impacts and their correction]*. Saint Petersburg: Politehnika-print Publ., 2018. 548 p. (In Russian)].
  6. Прокопюк З.Н. Устойчивость организма спортсменов к гипоксии и её коррекция низкоинтенсивным лазерным воздействием: на примере циклических видов спорта: Автореферат дис. ... к.б.н.: Смоленск, 2010. 23 с. [Prokopyuk Z.N. *Ustoychivost' organizma sportsmenov k gipoksii i yeyo korrektsiya nizkointensivnym lazernym vozdeystviyem: na primere tsiklicheskikh vidov sorta: Avioreferat dis. ... k.b.n. [The resistance of athletes to hypoxia and its correction by low-intensity laser exposure: on the example of cyclic types of varieties: Abstract of Cand. Sci. (Biol.) thesis]*. Smolensk, 2010. 23 p. (In Russian)].

---

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

---

**Ширяева Алёна Игоревна\***, ФГБУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины» Минобороны России;  
e-mail: [gniiivm\\_2@mil.ru](mailto:gniiivm_2@mil.ru)

**Шустов Евгений Борисович**, д.м.н., проф., ФГБУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины» Минобороны России;  
e-mail: [shustov-msk@mil.ru](mailto:shustov-msk@mil.ru)

**Фатеев Иван Владимирович**, д.м.н., ФГБУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины» Минобороны России;  
e-mail: [gniiivm\\_2@mil.ru](mailto:gniiivm_2@mil.ru)

**Калтыгин Максим Владимирович**, к.м.н., ФГБУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины» Минобороны России;  
e-mail: [gniiivm\\_2@mil.ru](mailto:gniiivm_2@mil.ru)

**Захарова Мария Вячеславовна**, ФГБУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины» Минобороны России;  
e-mail: [gniiivm\\_2@mil.ru](mailto:gniiivm_2@mil.ru)

**Alyona I. Shiryayeva\***, State Scientific Research Test Institute of Military Medicine of the Ministry of Defence of Russia;  
e-mail: [gniiivm\\_2@mil.ru](mailto:gniiivm_2@mil.ru)

**Yevgeniy B. Shustov**, Dr. Sci. (Med.), Prof., State Scientific Research Test Institute of Military Medicine of the Ministry of Defence of Russia;  
e-mail: [shustov-msk@mil.ru](mailto:shustov-msk@mil.ru)

**Ivan V. Fateev**, Dr. Sci. (Med.), State Scientific Research Test Institute of Military Medicine of the Ministry of Defence of Russia;  
e-mail: [gniiivm\\_2@mil.ru](mailto:gniiivm_2@mil.ru)

**Maksim V. Kaltygin**, Cand. Sci. (Med.), State Scientific Research Test Institute of Military Medicine of the Ministry of Defence of Russia;  
e-mail: [gniiivm\\_2@mil.ru](mailto:gniiivm_2@mil.ru)

**Maria V. Zakharova**, State Scientific Research Test Institute of Military Medicine of the Ministry of Defence of Russia;  
e-mail: [gniiivm\\_2@mil.ru](mailto:gniiivm_2@mil.ru)

---

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author