

УДК 612.766.1

## РЕАКЦИЯ ДЫХАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА НА ГИПОКСИЧЕСКУЮ ГИПОКСИЮ

В.Н. Голубев<sup>1</sup>, Ю.Н. Королев<sup>1</sup>, Н.Н. Тимофеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Арктика» ДВО РАН, Магадан

<sup>2</sup>Военный институт физической культуры, Санкт-Петербург

Установлено что, при дыхании гипоксической газовой смесью с 10% O<sub>2</sub> возникают изменения в легочной вентиляции. При этом МОД возрастает главным образом за счет увеличения ДО. Однако, образование оксигемоглобина крови, оттекающей от легких, у разных испытуемых различно, что свидетельствует об индивидуальной стратегии адаптации к гипоксии при примерно равных условиях газообмена в легких. Полученные данные позволили выделить две основные группы людей по изменению SpO<sub>2</sub> в ответ на гипоксию: группу «устойчивых» и группу «неустойчивых». Данные о физической работоспособности, оцененные по различным тестам, показали что, в группе «устойчивых» происходит более эффективная мобилизация функциональных резервов, благодаря чему суммарная величина выполнения велоэргометрической нагрузки у них достоверно больше, чем у всей группы и группы «неустойчивых».

**Ключевые слова:** дыхательная система, гипоксическая гипоксия, физическая нагрузка, адаптационные возможности организма.

**Введение.** Гипоксия является наиболее общим фактором лимитирующим работоспособность человека при больших физических нагрузках, особенно в условиях средне- и высокогорья, а также при нахождении в высоких широтах [1–5]. Наиболее ранние и эффективные механизмы аварийной компенсации гипоксического состояния реализуются через гипервентиляцию и возрастанием минутного объема дыхания [7; 8; 11; 12]. В связи с этим, исследование изменения функции дыхательной системы в условиях гипоксической гипоксии в покое и при физической нагрузке представляется весьма перспективным для изучения адаптационных возможностей организма человека.

**Методика.** В исследовании приняли участие 41 мужчина в возрасте от 18 до 21 года, добровольцы, ведущие однотипный образ жизни.

Гипоксическая нормобарическая гипоксия вызывалась дыханием гипоксической газовой смесью с 10% содержанием кислорода. Протокол исследования включал в себя: исходное состояние (при нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре испытуемый сидел в течение 2 мин и дышал атмосферным воздухом); гипоксическую нагрузку (в течение 15 мин испытуемый дышал через маску газовой смесью); и восстановление – в течение 3 мин после

гипоксической нагрузки испытуемый дышал атмосферным воздухом. Во всех трех периодах у испытуемых регистрировали: показатели внешнего дыхания (минутный объем дыхания (МОД) и частоту дыхания (ЧД)), насыщение гемоглобина крови кислородом ( $SpO_2$ ) методом пульсоксиметрии на пульсоксиметре ЭЛОКС-01СЗМ, электрокардиограмму.

По оксигемограмме были рассчитаны следующие показатели: 1)  $SpO_2H$  – величина снижения (%) уровня насыщения крови кислородом на 5-й, 10-й и 15-й минуте экспозиции по отношению к исходному уровню (~99%); 2)  $SpO_2S$  – площадь снижения ( $см^2$ ) насыщения крови кислородом за 5, 10 и 15 минут экспозиции газовой смесью соответственно; 3)  $SpO_2S$  площадь восстановления – площадь снижения величины насыщения крови кислородом в восстановительном периоде после экспозиции газовой смесью.

Физическая работоспособность определялась при выполнении велоэргометрической нагрузки ступенчато возрастающей мощности, теста  $PWC_{170}$ , а также теста максимальной анаэробной мощности (МАМ).

Мощность каждой ступени велоэргометрической нагрузки рассчитывалась, исходя из величин 1, 1,5, 2 и 2,5 Вт на 1 кг массы тела. Работа при нагрузке каждой мощности выполнялась в течение 5 мин при частоте вращения педалей 60 об/мин. Между нагрузкой 1, 2 и 3-й мощности испытуемому предлагался отдых в течение 1 мин. Нагрузка 4-й мощности и далее выполнялась без отдыха до отказа. Суммарная величина нагрузки ( $\sum A$ ) рассчитывалась путем сложения всех величин выполненной работы до отказа.

Были определены коэффициенты парных корреляций этих функций с показателями:  $\sum A$  – суммарной величины выполненной велоэргометрической нагрузки, ступенчато возрастающей мощности до отказа; МАМ – максимальной анаэробной мощностью;  $PWC_{170}$  – аэробной производительностью организма;  $SpO_2S$  за 15 мин – суммарным значением снижения степени кислородного насыщения гемоглобина за 15 мин экспозиции в период гипоксической пробы.

Были изучены следующие показатели: МОД (max) (в/э) – максимальное значение легочной вентиляции при велоэргометрической нагрузке возрастающей мощности; МОД ( $\sum_{\text{раб}} - \sum_{\text{пок}}$ ) (в/э) – суммарная величина легочной вентиляции при выполнении велоэргометрической нагрузки за исключением легочной вентиляции покоя (т.н. рабочая прибавка); МОД (x 1) (в/э), МОД (x 4) (в/э) – средние величины легочной вентиляции в минуту при велоэргометрических нагрузках 1, 2, 3 и 4-й ступенях мощности; ЧД (max) (в/э) – максимальное значение частоты дыхания при велоэргометрической нагрузке возрастающей мощности; ЧД ( $\sum_{\text{раб}} - \sum_{\text{пок}}$ ) (в/э) – суммарная величина частоты дыхания при выполнении

велозргометрической нагрузки за исключением частоты дыхания покоя (т.н. рабочая прибавка); ЧД (x1) (в/э), ЧД (x4) (в/э) – средние величины частоты дыхания в минуту при велозргометрических нагрузках 1, 2, 3 и 4 ступенях мощности; ДО – те же исследования дыхательного объема.

Обработка данных велась с помощью программы Origin Pro 7.5 (Origin Lab Corporation). Данные представлены в виде среднего арифметического со стандартной ошибкой средней ( $\bar{x} \pm m$ ). Достоверными считались отличия при  $p < 0,05$ . Коэффициенты парных корреляций рассчитывались по методике Спирмена.

**Результаты и обсуждение.** Показателем, отражающим дефицит кислорода в организме, является концентрация оксигемоглобина  $SpO_2(\%)$ . [7; 8]. У всей группы испытуемых через 5 мин дыхания гипоксической смесью кислородное насыщение гемоглобина снижется в среднем до 90%, а к концу экспозиции – до 85%. Достоверные отличия от исходного состояния наблюдались уже через 3 мин ( $p < 0,05$ ) вдыхания газовой смеси. В восстановительном периоде уже через 3 мин дыхания атмосферным воздухом в  $SpO_2$  практически не отличался от исходного.

Наряду с общей тенденцией динамики сатурации, наблюдались индивидуальные различия.

Так, у одних, через 3 мин гипоксической нагрузки  $SpO_2$  снизился до 92% и в дальнейшем колебался от 90 до 95%, не снижаясь до конца экспозиции (Группа устойчивых). У других испытуемых, уровень сатурации крови равномерно снижался в течение всего периода гипоксической пробы и в конце нагрузки составил 78% (группа неустойчивых). В обеих группах наблюдалось полное восстановление исходного  $SpO_2$  в течение 3 мин после окончания нагрузки.

Наибольшие изменения МОД (в исходном состоянии) происходило к концу первой минуты дыхания гипоксической смесью, при этом МОД увеличивался в среднем на 58% ( $p < 0,05$ ). В дальнейшем МОД изменяется незначительно, а к концу нагрузки еще более возрастал в сравнении с исходным состоянием ( $p < 0,05$ ). Восстановление МОД наступало в течение 2–3 мин дыхания атмосферным воздухом после гипоксической нагрузки.

Как видно из табл. 1, при физических нагрузках в зависимости от устойчивости к гипоксии, МОД дифференцированно изменяется, хотя и мало связан с характеристикой и видом нагрузки, что свидетельствует о неспецифической реакции дыхательной системы на гипоксию при любом изменении кислородного преферендума.

Таблица 1  
Динамика минутного объема дыхания при велозргометрических нагрузках в условиях гипоксической пробы

Испытуемые	Показатель	МОД (max) (в/э)	МОД ( $\Sigma p - \Sigma n$ ) (в/э)	МОД (x1) (в/э)	МОД (x2) (в/э)	МОД (x3) (в/э)	МОД (x4) (в/э)
Все	x±m	53,85 ±1,68	466,2 ±19,22	20,71 ±0,90	30,87 ±0,96	38,37 ±1,23	46,2 ±1,39
Подгруппа устойчивых		55,8 ±2,86	516,8 ±24,65	20,92 ±1,87	34,38 ±2,13	40,52 ±2,11	48,72 ±2,31
Подгруппа неустойчивых		52,65 ±2,47	454,48 ±30,22	20,7 ±1,08	29,9 ±1,19	37,77 ±1,71	45,14 ±2,14
Коэффициенты парных корреляций							
Все	$\Sigma A$	0,11	0,39	-0,19	0,09	-0,11	0,05
	MAM	-0,06	0,01	-0,13	0,05	0,08	-0,09
	$\Sigma A$ PWC <sub>170</sub>	-0,14	0,16	-0,28	-0,13	-0,08	-0,18
	SPO <sub>2</sub> S15	-0,13	-0,21	-0,08	-0,23	-0,13	-0,22
Подгруппа устойчивых	$\Sigma A$	-0,35	-0,23	-0,46	-0,11	-0,3	-0,31
	MAM	-0,12	-0,18	-0,46	0,07	0,08	-0,24
	$\Sigma A$ PWC <sub>170</sub>	-0,59	-0,33	-0,32	0,16	0,35	-0,55
	SPO <sub>2</sub> S15	0,26	-0,12	-0,32	0,15	0,24	0,04
Подгруппа неустойчивых	$\Sigma A$	0,15	0,42	-0,09	0,18	0,02	0,12
	MAM	-0,05	0,05	-0,01	0,07	0,08	-0,06
	$\Sigma A$ PWC <sub>170</sub>	-0,03	0,26	-0,42	-0,19	-0,17	-0,09
	SPO <sub>2</sub> S15	-0,14	-0,17	-0,08	-0,13	-0,09	-0,22

Средние значения ЧД незначительно изменялись во время гипоксической нагрузки, находясь в пределах 11–13 дыхательных циклов в 1 мин и не отличалась от исходного. При велоэргометрическом тестировании (табл. 2) в условиях гипоксии не удалось выявить существенных различий ЧД между выделенными группами устойчивых и неустойчивых к гипоксии.

Значимые корреляции ДО с MAM и PWC<sub>170</sub> (табл. 3) свидетельствуют о том, что увеличение МОД при гипоксии может быть обусловлено преимущественно увеличением ДО. Увеличение МОД является одной из первых реакций, направленных на поддержание гомеостаза при недостатке кислорода во вдыхаемом воздухе, и это увеличение обеспечивается возрастанием ДО [8; 9].

Индивидуальные различия в реакциях дыхательной системы на гипоксию были весьма существенными. Выделено несколько типов таких реакций. У одной группы испытуемых на первых минутах дыхания гипоксической смесью наблюдалось уменьшение ЧД и МОД, и эти изменения, в той или иной степени, сохранялись до конца нагрузки. У испытуемых другой группы наблюдались противоположные изменения: увеличение ЧД и МОД. Наконец, у нескольких испытуемых снижение частоты дыхания сопровождалось увеличением МОД за счет дыхательного объема.

Динамика частоты дыхания при велоэргометрических нагрузках  
в условиях гипоксической пробы

Испытуемые	Показатель	ЧД (max) (в/э)	ЧД ( $\Sigma p - \Sigma n$ ) (в/э)	ЧД (x1) (в/э)	ЧД (x2) (в/э)	ЧД (x3) (в/э)	ЧД (x4) (в/э)
Все	x±m	39,68 ±1,40	242,17 ±16,52	20,03 ±0,82	24,34 ±0,96	29,7 ±1,13	34,75 ±1,26
Подгруппа устойчивых		40 ±2,97	236,8 ±36,18	20,94 ±1,50	23,74 ±1,85	28,38 ±2,19	34,47 ±2,68
Подгруппа неустойчивых		39,87 ±2,05	258,35 ±23,11	19,45 ±1,04	24,31 ±1,32	30,29 ±1,64	34,63 ±1,79
Коэффициенты парных корреляций							
Все	$\Sigma A$	0,04	0,09	-0,14	-0,18	-0,2	-0,06
	MAM	-0,07	-0,06	-0,09	0,04	-0,04	-0,03
	$\Sigma A PWC_{170}$	-0,12	-0,09	-0,24	-0,24	-0,18	-0,23
	SPO <sub>2</sub> S15	0	0,02	-0,19	-0,07	0,04	-0,02
Подгруппа устойчивых	$\Sigma A$	0,13	0,18	-0,18	0,02	0,02	-0,03
	MAM	0,01	0,1	-0,44	0,05	-0,01	0,04
	$\Sigma A PWC_{170}$	-0,42	-0,41	-0,21	-0,1	-0,36	-0,47
	SPO <sub>2</sub> S15	-0,12	0,09	-0,49	-0,05	-0,18	0,03
Подгруппа неустойчивых	$\Sigma A$	-0,03	0,03	-0,2	-0,21	-0,2	-0,11
	MAM	-0,07	-0,19	0,09	0,06	-0,01	-0,03
	$\Sigma A PWC_{170}$	-0,05	-0,06	-0,3	-0,33	-0,17	-0,19
	SPO <sub>2</sub> S15	0,01	-0,3	-0,08	-0,18	-0,05	-0,05

Вероятно, различное насыщение крови кислородом, выявленное при определении SpO<sub>2</sub>, оказывает разное влияние на возбудимость дыхательного центра. Возможно, гипоксия вызывала снижение возбудимости, что проявилось в уменьшении обоих регистрируемых показателей при относительно стабильной величине дыхательного объема. В другом случае возбудимость дыхательного центра повышалась, на что указывает увеличение МОД, однако разными путями – за счет увеличения ЧД или дыхательного объема.

Аэробная производительность, которая оценивалась по тесту PWC<sub>170</sub>, свидетельствует о том, что средние значения всей группы составляют 829,9±26,0 кГм, колеблются в диапазоне от 531 до 1365 кГм, имеют большую величину дисперсии 166,9. В подгруппах «устойчивых» и «неустойчивых» эти значения составляют соответственно 774,9±43 и 858±40 кГм, различия не значимы.

Средние значения MAM для всей группы составляют 93,5±2,9 кГм с диапазоном от 54,0 до 137,0 кГм, при дисперсии в 18,6 кГм. Различия между подгруппами «устойчивых» и «неустойчивых» не выявлены, средние значения составляют соответственно 93,6±7,9 и

Таблица 3

Динамика величины дыхательного объема при велоэргометрических нагрузках  
 в условиях гипоксической пробы

Испытуемые	Показатель	ДО (x1) (в/э)	ДО (x2) (в/э)	ДО (x3) (в/э)	ДО (x4) (в/э)
Все	x±m	1091,9 ±58,93	1316,2 ±57,63	1347,66 ±57,49	1347,98 ±51,74
Подгруппа устойчивых		1071,1 ±135,21	1521,4 ±150,80	1497,7 ±150,77	1334 ±126,94
Подгруппа неустойчивых		1120,74 ±81,27	1289,91 ±71,23	1309,35 ±73,18	1357,22 ±70,69
Коэффициенты парных корреляций					
Все	ΣА	0,01	0,3	0,16	0,1
	МАМ	0,01	0,04	0,17	-0,15
	ΣА PWC <sub>170</sub>	-0,05	0,15	0,16	0,1
	SPO <sub>2</sub> S15	0,1	-0,06	-0,09	-0,06
Подгруппа устойчивых	ΣА	-0,1	0,04	-0,05	-0,27
	МАМ	0,02	0,08	0,18	-0,6
	PWC <sub>170</sub>	-0,02	0,24	0,52	0,03
	SPO <sub>2</sub> S15	0,23	0,25	0,47	0
Подгруппа неустойчивых	ΣА	0,13	0,41	0,29	0,32
	МАМ	-0,07	0,02	0,11	0,06
	ΣА PWC <sub>170</sub>	-0,11	0,23	0,08	0,12
	SPO <sub>2</sub> S15	0,01	0,1	-0,03	-0,22

При рассмотрении ΣА средние значения всей группы составляют 2236,4±54,7 Вт, что соответствует удовлетворительной оценке этого показателя для здоровых молодых мужчин. Анализ значения этого показателя по подгруппам (3247,3±77,2 Вт для «устойчивых» и 2226,9±80,1 Вт для «неустойчивых»), выявил тенденцию различий между подгруппами в показателях работоспособности. Коэффициенты парных корреляций между показателем работоспособности ΣА и другими ее показателями не имеют значимых величин при сравнении их внутри всей группы. Выявлена лишь средняя связь между ΣА и PWC<sub>170</sub> в подгруппах «устойчивых» и «неустойчивых» на уровне коэффициентов 0,47 и 0,56 соответственно. Самая значимая положительная корреляционная связь (0,72) отмечена в группе «устойчивых» между SpO<sub>2</sub> (S за 15 мин) и МАМ.

**Заключение.** Установлено что, практически с первой минуты дыхания гипоксической газовой смесью с 10% содержанием кислорода возникают изменения в легочной вентиляции. При этом МОД возрастает главным образом за счет глубины дыхания. Однако, образование оксигемоглобина крови, оттекающей от легких, у разных

испытуемых различно, что свидетельствует об индивидуальной стратегии адаптации к гипоксии при примерно равных условиях газообмена в легких. Последнее подтверждается быстрым восстановлением легочной вентиляции, уже на третьей минуте дыхания нормальной воздушной смесью. Полученные данные позволили выделить две основные группы людей по количеству SpO<sub>2</sub>: группу «устойчивых» и группу «неустойчивых».

Причины таких различий в образовании оксигемоглобина могут быть или при разных условиях диффузии газа из альвеол в кровь, или особенностей кислородосвязывающих свойств крови, и то, и другое требует дополнительных исследований.

Изменения физической работоспособности, оцененные по различным тестам, показали что, в группе «устойчивых» выявлены тенденции к лучшей реализации функциональных резервов, благодаря чему суммарная величина выполнения велоэргомет-рической нагрузки у них достоверно больше, чем у всей группы и группы «неустойчивых». Наличие положительной корреляционной связи (0,72) в группе «устойчивые» между SpO<sub>2</sub> (S за 15 мин) и МАМ говорит о том, что существуют механизмы обеспечения адаптации к гипоксии данного уровня и в других физиологических системах, таких как кровообращение и энергетический обмен у людей, специально не тренированных к недостатку кислорода.

#### **Список литературы**

1. Агаджанян Н.А., Елфимов А.И. Функции организма в условиях гипоксии и гиперкапнии. М.: Медицина, 1986. 270 с.
2. Березовский В.А., Бойко К.А., Клименко С.С. Гипоксия и индивидуальные особенности реактивности. Киев: Наукова думка, 1978. 216 с.
3. Бурых Э.А., Сороко С.И., Бекшаев С.С., Сергеева Е.Г. Комплексное многопараметрическое исследование системных реакций организма человека при дозированном гипоксическом воздействии // Физиология человека. 2005. Т. 31, № 5. С. 88–109.
4. Колчинская А.З. Гипоксическая гипоксия, гипоксия нагрузки: повреждающий и конструктивный эффекты // *Nuroxia Med. J.* 1993. Т. 1, № 3. Р. 8–13.
5. Колчинская А.З. Кислород, физическое состояние, работоспособность. Киев: Наукова думка, 1991. 206 с.
6. Колчинская А.З. Система дыхания, процесс массопереноса кислорода в организме, кислородные режимы организма // Вторичная тканевая гипоксия. Киев: Наукова думка, 1983. С. 5–14.

7. *Королев Ю.Н.* О влиянии гипоксии на дыхательную систему // Баротерапия в комплексном лечении раненых больных и поражённых: мат. 6-й Всеармейской нач-практ конф. СПб.: ВМедА., 2006. С. 94–95.
8. *Королев Ю.Н.* Об оценке типов адаптивных реакций при гипоксической нагрузке // Баротерапия в комплексном лечении раненых больных и поражённых: мат. 6-й Всеармейской нач-практ конф. СПб.: ВМедА., 2006. С. 95–96.
9. *Миррахимов М.М.* Лечение внутренних болезней горным климатом. Л.: Медицина, 1977. 208 с.
10. *Нестеров С.В.* Влияние острой экспериментальной гипоксии на мозговое кровообращение и вегетативную регуляцию сердечного ритма у человека: автореф. дис. ... канд. мед. наук. СПб., 2004. 20 с.
11. *Рябов Г.А.* Гипоксия критических состояний. М.: Медицина, 1988. 288 с.
12. *Самойлов В.О., Голубев В.Н., Антоненкова Е.В., Борисенко Н.С.* О влиянии гипоксических тренировок на параметры гипоксической устойчивости // Баротерапия в комплексном лечении раненых больных и поражённых: мат. 7-й Всеармейской нач-практ конф. СПб.: ВМедА., 2009. С. 110–111.
13. *Шерер Ж.* Физиология труда (эргономия). М.: Медицина. 1973. 496 с.

## THE REACTION OF THE HUMAN RESPIRATORY SYSTEM TO HYPOXIC HYPOXIA

V.N. Golubev<sup>1</sup>, Yu.N. Korolev<sup>1</sup>, N.N. Timofeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Center «Arctic» RAS, Magadan

<sup>2</sup>Military Institute of Physical Culture, Saint-Petersburg

Minute ventilation increased mainly due to increase in tidal volume during breathing a hypoxic gas mixture of 10% O<sub>2</sub>. However, the formation of oxyhemoglobin blood flowing from the lungs is different in different subjects, indicating that individual strategies of adaptation to hypoxia at about equal conditions of gas exchange in the lungs. The obtained data of two main groups of people to change S%O<sub>2</sub> in response to hypoxia: "stable" and «unstable» groups. Maximal work performance was significantly increased in the «stable» than that of all the groups and «unstable» because of the more effective mobilization of functional reserves.

**Keywords:** hypoxia, maximal work performance, hypoxic stability.

*Об авторах:*

ГОЛУБЕВ Виктор Николаевич—доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУ НИЦ «Арктика» Дальневосточного отделения РАН, 685000, Магадан, пр. Карла Маркса, д. 24.

КОРОЛЕВ Юрий Михайлович—кандидат медицинских наук, доцент, старший научный сотрудник ФГБУ НИЦ «Арктика» Дальневосточного отделения РАН, 685000, Магадан, пр. Карла Маркса, д. 24.

ТИМОФЕЕВ Николай Николаевич—доцент Военного института физической культуры, 194353, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., д. 63, e-mail: nikotima@yandex.ru