

АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИПОКСИИ

В. Н. Голубев¹, Ю. Н. Королев¹, Н. В. Мургаева¹, К. Г. Стрельцова¹

¹ ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ, г. Санкт-Петербург, Россия

ADAPTIVE REACTIONS OF THE HUMAN BODY TO HYPOXIA

V. N. Golubev¹, Yu. N. Korolev¹, N. V. Murgaeva¹, K. G. Strel'tsova¹

¹ S. M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Defense Ministry, Saint Petersburg, Russia

Резюме

Цель: изучить индивидуальные различия в реакции газо-транспортной системы человека на гипоксию, используя модель нормобарической гипоксической гипоксии.

Материалы и методы. Моделирование гипоксии производилось дыханием воздушной смеси с 10% содержанием O₂ в течение 15 мин, что соответствовало pO₂ 75 мм рт. ст. В исходном состоянии, при гипоксической нагрузке и в период восстановления после нагрузки у испытуемых регистрировали показатели внешнего дыхания: минутный объем дыхания, частоту дыхания, насыщение гемоглобина крови кислородом, вариабельность сердечного ритма.

Результаты. При срочной адаптации человека к воздействию гипоксической гипоксии происходят существенные изменения в функционировании газотранспортной системы организма: внешнего дыхания, сердечно-сосудистой системы и степени насыщения кислородом гемоглобина.

Заключение. Определены два типа срочной адаптивной реакции в зависимости от уровня насыщения кислородом гемоглобина крови при гипоксическом воздействии: «устойчивые» и «неустойчивые». В этих подгруппах были обнаружены разнонаправленные реакции не только степени насыщения кислородом гемоглобина при гипоксии, но и изменения вариабельности ритма сердца и различные уровни общей работоспособности (библ.: 4 ист.)

Ключевые слова: адаптация, вариабельность сердечного ритма, велоэргометрия, гипоксическая гипоксия, кислородный транспорт, физическая работоспособность.

Статья поступила в редакцию 23.09.2019 г.

Summary

Objective: to study individual differences in the reaction of the human gas transport system to hypoxia using the normobaric hypoxic hypoxia model.

Materials and methods. Hypoxia was simulated by breathing an air mixture with a 10% O₂ content for 15 minutes, which corresponded to a pO₂ of 75 mm Hg. Art. In the initial state, during hypoxic exercise and during the recovery period after exercise, the subjects recorded external respiration indicators: minute respiratory volume (MOD), respiration rate (RR), blood hemoglobin oxygen saturation, heart rate variability (HRV).

Results. With the urgent adaptation of a person to the effects of hypoxic hypoxia, significant changes occur in the functioning of the body's gas transport system: external respiration, the cardiovascular system and the degree of oxygen saturation of hemoglobin.

Conclusion. Two types of urgent adaptive reactions were determined depending on the level of oxygen saturation of hemoglobin in blood during hypoxic exposure: "stable" and "unstable". In these subgroups, multidirectional reactions were found not only of the degree of oxygen saturation of hemoglobin during hypoxia, but also changes in heart rate variability and various levels of overall performance (bibliography: 4 refs).

Key words: adaptation, bicycle ergometry, heart rate variability, hypoxic hypoxia, oxygen transport, physical performance.

Article received 23.09.2019.

Гипоксия любого генеза приводит к нарушению ресинтеза макроэргов и снижению общей работоспособности и выносливости. Следовательно, вопрос повышения общей работоспособности и выносливости в этих условиях приобретает большое значение. Снижение потребления кислорода организмом отмечается уже при pO₂ в воздухе ниже 125 мм рт. ст., что соответствует 200 м над уровнем моря. При нахождении в высоких широтах период адаптации длится более 4–6 недель, в зависимости от высоты от уровня моря и применяемых методов, и сохраняется в течение нескольких недель и месяцев при спуске на равнину [1]. В связи с этим, вопросы ускорения адаптивных процессов к гипок-

сии и повышения общей работоспособности и выносливости в указанных экстремальных условиях приобретают исключительное значение.

Наиболее ранними и эффективными механизмами срочной адаптации к гипоксии являются гипервентиляция, увеличение минутного объема дыхания (МОД) и возрастание минутного объема кровообращения (МОК) — реакций, направленных на поддержание кислородного гомеостаза в период действия сниженного pO₂ во вдыхаемом воздухе. Сердечно-сосудистая система реагирует на снижение pO₂ во вдыхаемом воздухе учащением частоты сердечных сокращений (ЧСС) и увеличением артериального давления (АД). Одновременно

увеличивается МОК. Возрастание МОК происходит по-разному: у одних людей — за счет увеличения ударного объема (УО), у других — за счет увеличения ЧСС. При воздействии гипоксии отмечаются значительные изменения вариабельности сердечного ритма (ВСР) в виде депрессии пятна Пуанкаре, отношений мощностей низкочастотной компоненты к высокочастотной — так называемый показатель симпатовагального баланса; изменяются и другие показатели ВСР [2, 3].

Изменения процента насыщения кислородом гемоглобина (SpO_2) — один из показателей функционирования газотранспортной системы — при воздействии гипоксии на организм имеют выраженный индивидуальный характер. В одних случаях отмечается значительное снижение SpO_2 до 80% и ниже, в других — снижение SpO_2 не наблюдается совсем или оно выражено незначительно [1, 3, 4]. Выявление закономерностей и механизмов индивидуальных различий в процессе развертывания срочной адаптации к гипоксии имеет практический интерес как с точки зрения разработки методик формирования адаптации, так и с точки зрения отбора индивидуумов, наиболее пригодных для этого.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучить индивидуальные различия в реакции газотранспортной системы человека на гипоксию, используя модель нормобарической гипоксической гипоксии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделирование гипоксии производилось дыханием воздушной смеси с 10% содержанием O_2 в течение 15 мин, что соответствовало pO_2 75 мм рт. ст. Схема исследования включала: исходное состояние (при нормальном атмосферном давлении испытуемый в течение 3 мин дышал атмосферным воздухом); 15-минутное дыхание обедненной газовой смесью; восстановление (в течение 3 мин после гипоксической нагрузки испытуемый дышал атмосферным воздухом).

В исходном состоянии, при гипоксической нагрузке и в период восстановления после нагрузки у испытуемых регистрировали показатели внешнего дыхания: минутный объем дыхания (МОД), частоту дыхания (ЧД), насыщение гемоглобина крови кислородом, вариабельность сердечного ритма (ВСР).

Для измерения динамики насыщения гемоглобина кислородом (SpO_2) во время исследования

использовали метод пульсоксиметрии. Значения SpO_2 регистрировали каждую минуту на протяжении всего эксперимента. Физическая работоспособность до и после гипоксии определялась при помощи выполнения велоэргометрической нагрузки ступенчато возрастающей мощности, теста PWC_{170} , а также теста максимальной анаэробной мощности (МAM). Мощность каждой ступени велоэргометрической нагрузки составляла, соответственно: 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 Вт на 1 кг массы тела. Нагрузка 4-й ступени выполнялась до отказа.

В исследовании принимали участие 41 испытуемый мужского пола, в возрасте от 18 до 21 года, не имевшие специальной физической подготовки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно мнению ряда исследователей, показателем, отражающим дефицит кислорода в организме, является процент насыщения гемоглобина кислородом SpO_2 (%).

В нашем исследовании через 5 мин дыхания гипоксической смесью кислородное насыщение гемоглобина снижалось в среднем до 90%, а к концу экспозиции — до 85%. Достоверные отличия от исходного состояния наблюдались уже через 3 мин вдыхания газовой смеси ($p < 0,05$). В восстановительном периоде уже через 3 мин дыхания атмосферным воздухом уровень SpO_2 практически не отличался от исходного.

Испытуемые, у которых снижение SpO_2 практически не наблюдалось, были сведены в группу «устойчивых». Группу «неустойчивых» составили испытуемые, у которых имело место значительное (до 78%) снижение SpO_2 в ответ на гипоксическую нагрузку. Несмотря на разницу в реакции, в обеих группах наблюдалось полное восстановление SpO_2 до исходного уровня в течение 3 мин после окончания гипоксической нагрузки.

При изучении функции внешнего дыхания было установлено, что при данном виде гипоксии наибольшие изменения МОД происходят уже к концу первой минуты дыхания гипоксической смесью; при этом МОД увеличивался в среднем на 58% ($p < 0,05$). В дальнейшем изменения МОД были незначительны, но к концу нагрузки еще более возрастали в сравнении с исходным состоянием ($p < 0,05$). Восстановление МОД до исходного уровня происходило в течение 2–3 мин дыхания атмосферным воздухом. Эти изменения МОД были схожи в группах и не связаны с уровнем SpO_2 , а также с характеристикой и видом нагрузки, что свидетельствует о неспецифической реакции дыхательной системы на гипоксию.

Средние значения ЧД изменялись незначительно во время гипоксической нагрузки, находясь в пределах 11–13 дыхательных циклов в 1 мин и не отличались от исходного уровня. При велоэргометрическом тестировании в условиях гипоксии не удалось выявить существенных различий дыхательного объема (ДО) между выделенными группами «устойчивых» и «неустойчивых» к гипоксии. При корреляционном анализе были выявлены значимые корреляции увеличения ДО с MAM и $PWC_{170'}$. Это может свидетельствовать о том, что увеличение МОД при гипоксии обусловлено преимущественно возрастанием ДО.

В ходе эксперимента отмечались весьма существенные индивидуальные различия в реакциях дыхательной системы на гипоксию. У одной группы испытуемых на первых минутах дыхания гипоксической смесью наблюдалось уменьшение ЧД и МОД. Эти изменения, в той или иной степени, сохранялись до конца нагрузки. У других наблюдались противоположные изменения: увеличение ЧД и МОД. Наконец, у нескольких испытуемых снижение частоты дыхания сопровождалось увеличением МОД за счет дыхательного объема.

Вероятно, различное насыщение крови кислородом, выявленное при определении SpO_2 , оказывает разное влияние на возбудимость дыхательного центра. Возможно, в одних случаях гипоксия вызывала снижение возбудимости дыхательного центра, что проявлялось в уменьшении обоих регистрируемых показателей при относительно стабильной величине дыхательного объема. В других — возбудимость дыхательного центра вероятно повышалась, на что указывает увеличение МОД. Однако, увеличение МОД реализовывалось разными путями: за счет увеличения ЧД или дыхательного объема.

При велоэргометрической нагрузке на всех четырех ступенях было отмечено существенное снижение SpO_2 по сравнению с исходным 99% уровнем. Средние значения для всей группы составляют, соответственно, на 1–4-й ступенях $94,5 \pm 0,4\%$; $95,1 \pm 0,3\%$; $94,5 \pm 0,25\%$; $92,7 \pm 0,4\%$. Причем, снижение средних значений этого показателя сходно и в подгруппах. Статистически значимые различия по данным показателям между подгруппами не определялись. Однако, в обеих группах, как «устойчивых», так и «неустойчивых», наблюдалось статистически значимое снижение SpO_2 во время работы 4-й ступени по сравнению с первой ($p < 0,05$). Это обусловлено тем, что работа 4-й ступени становилась весьма существенной нагрузкой для организма, так как это вторая зона работы большой мощности.

При корреляционном анализе была выявлена средняя положительная связь (0,52) между степенью снижения SpO_2 и ΣA в подгруппе «устойчивых».

Значимые корреляционные связи между SpO_2 и ΣA , MAM, $PWC_{170'}$, SpO_2 (5 за 15 мин) отсутствовали.

Показатель аэробной производительности, которая оценивалась по тесту $PWC_{170'}$, колебался в диапазоне от 531 до 1365 кгм и имел большую величину дисперсии 166,9 ($m = 829,9 \pm 26,0$ кгм). Это характерно для нижней границы среднего уровня оценки данного теста применительно к обычной выборке испытуемых, не занимающихся специально развитием общей выносливости. В подгруппах «устойчивых» и «неустойчивых» эти значения составляют, соответственно $774,9 \pm 43$ и 858 ± 40 кгм, различия не значимы.

Средние значения MAM для всей группы составляют $93,5 \pm 2,9$ кгм, с диапазоном от 54,0 до 137,0 кгм, при дисперсии в 18,6 кгм (средний уровень анаэробной устойчивости). Различий по этому показателю между подгруппами «устойчивых» и «неустойчивых» не выявлено. Положительная корреляционная связь отмечалась в группе «устойчивых» между SpO_2 (8 за 15 мин) и MAM — 0,72.

Показатели ЧСС по средним групповым характеристикам гипоксической пробы с 6-й по 15-ю мин свидетельствуют о достоверном ($p < 0,05$) увеличении ЧСС и сохранении его практически на одном уровне (85–86 уд/мин) по сравнению с уровнем покоя. Отмечалась тенденция к уменьшению реакции ЧСС на гипоксическую нагрузку в подгруппе «устойчивых» по сравнению с подгруппой «неустойчивых». Систолическое и диастолическое давление до нагрузки и после ее выполнения характеризовалось нормативными величинами — 128/74 мм рт. ст. в исходном состоянии и 124/74 мм рт. ст. в восстановительном периоде, как в среднем по группе, так и в подгруппах.

Известно, что гипоксия сопровождается существенным снижением вариабельности сердечного ритма, приводя к одновременному усилению влияния симпатического (области частот LF — low frequency, 0,04–0,15 Гц) и ослаблению влияния парасимпатического (HF — high frequency, 0,15–0,4 Гц) отделов вегетативной нервной системы (ВНС). При исследовании вариабельности сердечного ритма на спектрограмме в ходе гипоксического воздействия (предварительные данные) наблюдалось снижение как HF, так и LH ($p < 0,05$) компонентов на протяжении всей гипоксической экспозиции. В восстановительном периоде эти показатели возвращались к исходному уровню.

При дыхании атмосферным воздухом в группе «устойчивых» преобладал вклад парасимпатического отдела ВНС. В этой группе снижение HF-компоненты было достоверно меньше, чем в группе «неустойчивых» ($p < 0,05$). Исходный уровень соотношения мощности высокочастотной и низко-

частотной составляющей в обеих группах характеризовался повышением тонуса симпатического отдела ВНС. При оценке этого соотношения при гипоксическом воздействии было выявлено, что подгруппе «устойчивых» «симпатический компонент» был более выражен. Различия на 12–15 мин гипоксической пробы между подгруппами характеризовались как достоверные ($p < 0,05$). Анализ значений коэффициента парных корреляций не показал достоверных связей изучаемого показателя с показателями ΣA , MAM, PWC_{170} , SpO_2 на 15-й мин гипоксической пробы.

Корреляционная ритмография представляет собой метод графического представления динамического ряда кардиоинтервалов в виде «облака», скатерограммы или пятна Пуанкаре путем построения ряда точек в прямоугольной системе координат. Важным достоинством этого метода является то, что он позволяет эффективно распознавать и анализировать сердечные аритмии. Резкое уменьшение размеров эллипса «облака» или депрессия вариабельности ритма сердца является признаком гипоксии миокарда. В ряде случаев этот тест оказывается более чувствительным, чем определение SpO_2 . Депрессия вариабельности сердечного ритма в группе «неустойчивых» была более выражена ($p < 0,05$) и не восстанавливалась к исходному значению в течение 5 мин после гипоксии.

Таким образом, показатель площади пятна Пуанкаре характеризует особенности скаттерграм-

мы как показателя ритма сердечной деятельности, и достаточно убедительно отражает различия в реакциях на гипоксическую пробу в подгруппах «устойчивых» и «неустойчивых». При гипоксии в подгруппе «устойчивых» сохраняется исходная площадь пятна Пуанкаре на скаттерграмме. В подгруппе «неустойчивых» эти показатели снижаются, то есть имеет место гипоксия миокарда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования было выявлено, что при срочной адаптации человека к воздействию гипоксической гипоксии происходят существенные изменения в функционировании газотранспортной системы организма (внешнего дыхания, сердечно-сосудистой системы и степени насыщения кислородом гемоглобина — SpO_2). Определены два типа срочной адаптивной реакции в зависимости от уровня SpO_2 при гипоксическом воздействии: «устойчивые» и «неустойчивые». В этих подгруппах были обнаружены разнонаправленные реакции не только степени насыщения кислородом гемоглобина при гипоксии, но и изменения вариабельности ритма сердца, а также различные уровни общей работоспособности. Возможно, здесь мы имеем дело с генетически обусловленными разными механизмами адаптационных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Korolev Yu. N. et al. On the effect of hypoxia on the respiratory system. In: *Baroterapiya v kompleksnom lechenii ranenyykh bol'nykh i porazhennykh. Tezisy dokladov 6 Vsearmeyской nauchno-prakticheskoy konferentsii* (Barotherapy in the complex treatment of wounded and afflicted patients. Proceedings of the 6 All-Army scientific and practical conference). Saint Petersburg: VMedA; 2006: 94–5. Russian (Королев Ю. Н. и др. О влиянии гипоксии на дыхательную систему. В кн.: Баротерапия в комплексном лечении раненых больных и пораженных. Тезисы докладов 6 Всеармейской научно-практической конференции. СПб.: ВМедА; 2006: 94–5).
2. Korolev Yu. N. et al. On the evaluation of types of adaptive reactions under hypoxic load. In: *Baroterapiya v kompleksnom lechenii ranenyykh bol'nykh i porazhennykh. Tezisy dokladov 6 Vsearmeyской nauchno-prakticheskoy konferentsii* (Barotherapy in the complex treatment of wounded and afflicted patients. Proceedings of the 6 All-Army scientific and practical conference). Saint Petersburg: VMedA; 2006: 95–6. Russian (Королев Ю. Н. и др. Об оценке типов адаптивных реакций при гипоксической нагрузке. В кн.: Баротерапия в комплексном лечении раненых больных и пораженных. Тезисы докладов 6 Всеармейской научно-практической конференции. СПб.: ВМедА; 2006: 95–6).
3. Nesterov S. V. Effect of acute experimental hypoxia on cerebral circulation and autonomic regulation of heart rate in humans. Ph. D. thesis. Saint Petersburg; 2004. Russian (Нестеров С. В. Влияние острой экспериментальной гипоксии на мозговое кровообращение и вегетативную регуляцию сердечного ритма у человека. Автореф. дис. ... канд. мед. наук. СПб.; 2004).
4. Golubev V. N., et al. On the influence of hypoxic training on the parameters of hypoxic stability. In: *Baroterapiya v kompleksnom lechenii ranenyykh bol'nykh i porazhennykh. Tezisy dokladov 6 Vsearmeyской nauchno-prakticheskoy konferentsii* (Barotherapy in the complex treatment of wounded and afflicted patients. Proceedings of the 6 All-Army scientific and practical conference). Saint Petersburg: VMedA; 2006: 110–111. Russian (Голубев, В. Н. и др. О влиянии гипоксических тренировок на параметры гипоксической устойчивости. В кн.: Баротерапия в комплексном лечении раненых больных и пораженных. Тезисы докладов 6 Всеармейской научно-практической конференции. СПб.: ВМедА; 2006: 110–111).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Голубев Виктор Николаевич — докт. мед. наук, профессор, заведующий кафедрой нормальной физиологии, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ, 194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6

Королев Юрий Николаевич — канд. мед. наук, доцент, кафедра нормальной физиологии, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ, 194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6

Мургаева Наталья Васильевна — канд. биол. наук, старший преподаватель, кафедра нормальной физиологии, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ, 194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6

Стрельцова Кира Геннадьевна — преподаватель, кафедра биологии, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ, 194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Golubev Victor N. — M. D., D. Sc. (Medicine), Professor, epy Head of the Normal Physiology Department, S. M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Defense Ministry, 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, Russia, 194044

Korolev Yuri N. — M. D., Ph. D. (Medicine), Associate Professor, Normal Physiology Department, S. M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Defense Ministry, 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, Russia, 194044

Murgaeva Natalia V. — Ph. D. (Biology), Senior Lecturer, Normal Physiology Department, S. M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Defense Ministry, 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, Russia, 194044

Strel'tsova Kira G. — Lecturer, Biology Department, S. M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Defense Ministry, 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, Russia, 194044