

THE CONTROL OF PULMONARY VENTILATION DURING MUSCULAR WORK IN HEALTHY UNTRAINED PEOPLE

L. L. Shik, R. S. Vinitskaya, T. A. Khanlarova

The parameters: $\dot{V}$, $\dot{V}_{CO_2}$, $\dot{V}_{O_2}$, PAO_2 , $PaCO_2$, pH were measured in untrained healthy people during exercise (500, 1000, 1200 km/min). The average $PaCO_2$ values during exercise did not differ significantly from those at rest. Special statistical analysis revealed that PCO_2 , PO_2 and pH changes in total contributed but slightly into the exercise hyperpnea. The results presented support the concept that respiration is controlled by the combined system based on both disturbance (open-loop) control and feedback control. The increase of $\dot{V}$ during the exercise is caused by the open-loop disturbance system, while the feedback control corrects $\dot{V}$ in accordance with the metabolism level.

A. V. Vishnevsky Institute of Surgery,
Academy of Medical Sciences of the USSR, Moscow

1. Бреслав И. С., Исаев Г. Г. Состояние и перспективы изучения механизмов регуляции дыхания // Физиол. журн. СССР.— 1985.— 71, № 3.— С. 283—291.
2. Гродинз Ф. Теория регулирования и биологические системы.— М.: Мир, 1987.— 255 с.
3. Колчинская А. З. Кислородные режимы организма ребенка и подростка.— Киев: Наук. думка, 1973.— 260 с.
4. Колчинская А. З., Лауэр Н. В., Шкабара Е. А. О регулировании кислородных режимов организма // Кислородный режим организма и его регулирование.— Киев, 1966.— С. 341—356.
5. Костюк П. Г. Учебник «Физиология человека» / Под ред. Г. И. Косицкого (рецензия) // Успехи физиол. наук.— 1985.— 16.— С. 119—121.
6. Маршак М. Е. Регуляция дыхания у человека.— М.: Медгиз, 1961.— 266 с.
7. Маршак М. Е. Регуляция дыхания // Руководство по физиологии: Физиология дыхания.— Л.: Наука, 1973.— С. 256—279.
8. Урбах В. Ю. Статистический анализ в биологических и медицинских исследованиях.— М.: Медицина, 1975.— 158 с.
9. Шик Л. Л. Принципы и механизмы управления системой внешнего дыхания // Общие вопросы физиологических механизмов: Тр. Международ. симпози. ИФАК по техн. и биол. пробл. упр. 24—28 сент. 1968, Москва.— М.: Наука, 1970.— С. 118—125.
10. Шик Л. Л. Общие принципы регуляции дыхания // Руководство по физиологии: Физиология дыхания.— Л.: Наука, 1973.— С. 279—287.
11. Шик Л. Л. Регуляция дыхания при мышечной работе // Биол. науки.— 1985.— № 6.— С. 18—29.
12. Dejours P. Control of respiration in muscular exercise // Handbook of physiology. Sect. 3. Respiration.— Washington, 1964.— Vol. 1.— P. 631—648.
13. Demsey J. A., Vidruk E. H., Mitchell G. S. Pulmonary control systems in exercise: update // Fed. Proc.— 1985.— 44.— P. 2260—2270.
14. Grodins F. S. Exercise hyperpnea. The ultra secret // Adv. Physiol. Sci.— 1981.— 10.— P. 243—247.
15. Wasserman K., Whipp B. J. Humoral control of ventilation during exercise in man // Ibid.— P. 285—297.
16. Whipp B. J. Ventilatory control during exercise in human // Ann. Rev. Physiol.— 1983.— 45.— P. 393—413.

Ин-т хирургии им. А. В. Вишневского
АМН СССР, Москва

Поступила 28.02.86

УДК 612.216.2.612.22

Спонтанные колебания состава альвеолярного воздуха в покое и при нагрузке

Р. С. Виницкая, Н. А. Коганова, А. А. Маркосян, Г. И. Серегин

Постоянство состава альвеолярного воздуха со времен работ Д. Холдена [5] считалось неотъемлемой чертой гомеостаза организма. Однако постоянство внутренней среды, по результатам последующих детальных исследований [3, 6], не является жестко ограниченным: газовый состав артериальной крови, параметры кислотно-основного состояния и другие физиологические показатели имеют определенные пределы вариаций.

Малонинерционные газоанализаторы позволяют подойти к вопросу о постоянстве состава альвеолярного воздуха с современных позиций [2, 4, 7, 8].

Цель данной работы — выяснение пределов вариабельности концентрации кислорода и двуокиси углерода в конечной порции выдыхаемого воздуха у здоровых людей в состоянии покоя и при физической нагрузке умеренной мощности.

Методика

Испытуемых (50 человек в возрасте от 16 до 60 лет) обследовали в положении сидя, утром, через один-два часа после легкого завтрака и после 20—30-минутного отдыха в исследовательской лаборатории. Относительное содержание (%) O_2 и CO_2 регистрировали с помощью масс-спектрометра МХ-6202, число дыханий в минуту, дыхательный объем (ДО) и минутный объем дыхания (МОД) — с помощью отечественного прибора «Комплекс»¹ автоматически каждые 30 с в состоянии покоя не менее 5—7 мин. Затем испытуемый преодолевал нагрузку на велоэргометре (ЭРГ-3, входящем в комплект прибора «Комплекс») мощностью 40—70 Вт в течение 4 мин. У части испытуемых регистрировали спирограмму на спирографе СГ-1М и определяли функциональную остаточную емкость (ФОЕ) с помощью азотографа.

Результаты и их обсуждение

Масс-спектрометр позволяет регистрировать изменения относительного содержания газа с малой инерционностью. В связи с этим при каждом дыхательном цикле во время вдоха содержание углекислого газа снижается до нуля, содержание кислорода увеличивается до 20,9 %, а во

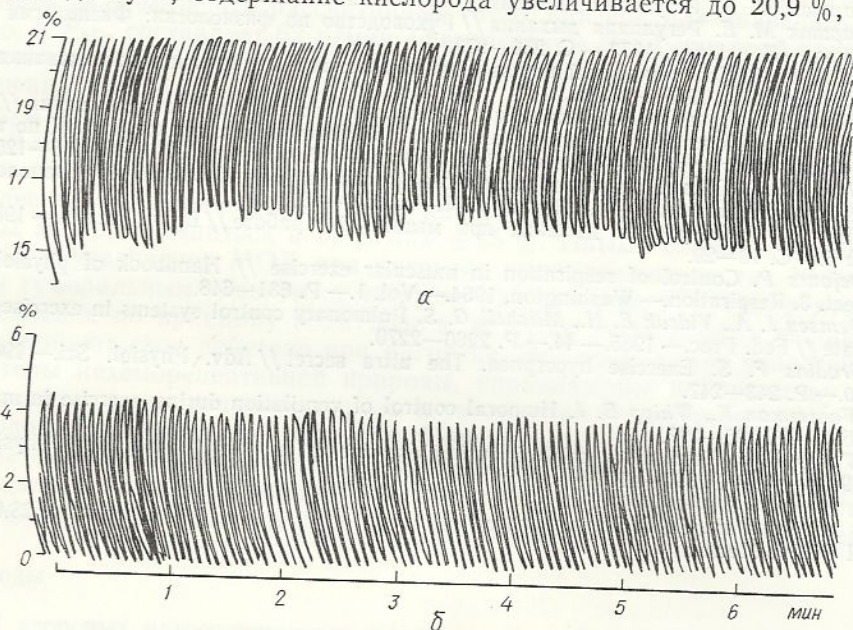


Рис. 1. Регистрация концентраций выдыхаемых газов (F_{O_2} — а; F_{CO_2} — б) с помощью масс-спектрометра в условиях спокойного дыхания.

время выдоха содержание газов в конечной порции соответствует их содержанию в альвеолярном воздухе (F_{ACO_2} и F_{AO_2}). Неравномерность вентилиционно-перфузионных отношений изменяет форму капнограммы. По конечной концентрации нельзя судить о средней концентрации газов в альвеолярном воздухе. Чтобы исключить влияние неравномерного распределения газов, анализировали те исследования, капнограмма которых имела выраженное плато. В этих случаях прирост CO_2 в альвеолярной фазе выдоха не превышал 0,5 %.

¹ Изготовлен Научно-производственным объединением «Медфизприбор», г. Казань

Во время спокойного дыхания у большинства здоровых людей наблюдаются относительно небольшие изменения F_{AO_2} и F_{ACO_2} . Эти изменения отражали медленную вариативность состава альвеолярного воздуха: периодичность вариаций составляла от 20—30 с до нескольких минут. Конечные концентрации O_2 и CO_2 синхронно плавно увеличивались и снижались. На рис. 1 представлены кривые относительного содержания (%) O_2 и CO_2 при спокойном дыхании. В данном примере

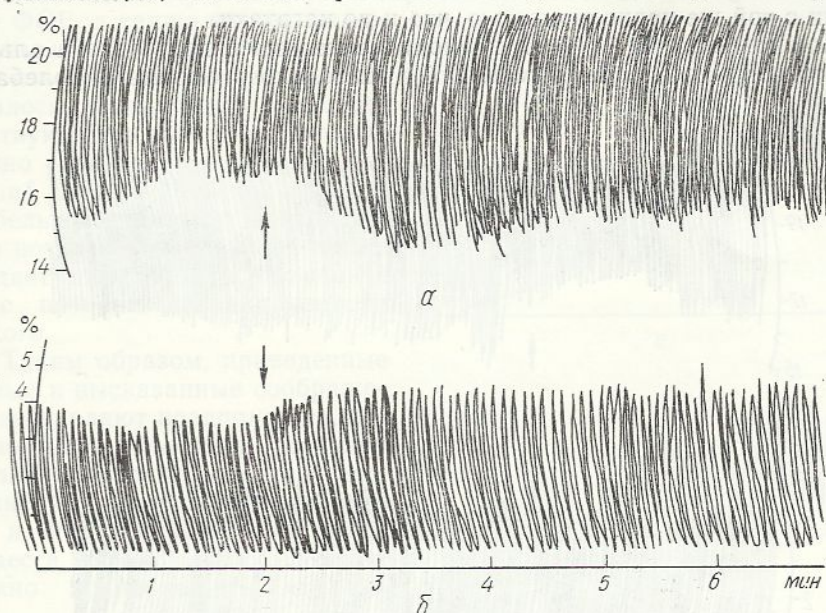


Рис. 2. Регистрация концентраций выдыхаемых газов (F_{O_2} — а; F_{CO_2} — б) с помощью масс-спектрометра в условиях спокойного дыхания и при нагрузочной пробе на велоэргометре. Стрелкой отмечено начало нагрузки.

периодичность вариативности состава альвеолярного воздуха имела почти правильный характер, близкий к синусоиде. На оксиграмме максимальное значение F_{AO_2} — 16,1 % (при этом разность между вдыхаемой и конечной — альвеолярной концентрацией составляла 4,8 %) выглядит как «впадина» медленной волны, минимальное значение F_{AO_2} — 14,9 % (при этом разность вдыхаемой и конечной концентрации составляла 6 %) выглядит как «гребень» медленной волны. Одновременно F_{ACO_2} изменялось от 4,3 до 5,0 %. Можно убедиться, что «гребни» и «впадины» вариативности относительного содержания обоих газов совпадают. В данном примере пределы вариации F_{AO_2} составили 1,2 %, F_{ACO_2} — 0,7 %. Пределы вариации содержания O_2 , как правило, несколько больше, чем CO_2 . В отдельных случаях размах вариаций F_{AO_2} составлял 2,6 %, тогда как F_{ACO_2} — не превышал 1 %. Был вычислен дыхательный коэффициент, относящийся к отдельному выдоху. Оказалось, что при минимальной F_{ACO_2} ДК, вычисленный с учетом концентрации азота (рис. 1), составлял 0,872; при максимальной — 0,799. В случаях наиболее выраженной вариативности состава альвеолярного газа ДК изменялся от 0,85 до 0,66. Мы не обнаружили заметных различий амплитуды вариаций состава альвеолярного воздуха от возраста испытуемых в состоянии покоя. Медленные вариации состава альвеолярного воздуха не всегда имели четко выраженную периодичность. В ряде случаев она сменялась более ровным фоном или носила сложный характер.

При переходе от покоя к нагрузке умеренной мощности у здоровых людей, как правило, F_{ACO_2} несколько увеличивалась (на 0,5—0,8 %), а F_{AO_2} — уменьшалась. Переходный период такой нагрузки длился 1—1,2 мин (рис. 2). У испытуемых, для которых нагрузка ощущалась как субмаксимальная, повышения F_{ACO_2} не наблюдалось (рис. 3). В первом

случае вентиляция легких увеличивалась несколько меньше, чем увеличивался метаболизм; во втором — вентиляция увеличивалась соответственно метаболизму. Однако и в том, и другом случаях при нагрузке периоды медленных вариаций становились короче, чем в покое. На второй-третьей минутах нагрузки их размах уменьшался, а иногда они переставали выявляться. После прекращения нагрузки на второй-третьей минутах отдыха вновь появлялись отчетливые медленные вариации с той же периодичностью, что и до нагрузки.

Можно было бы отнести периодические изменения состава альвеолярного воздуха за счет изменений дыхательного объема и колебаний

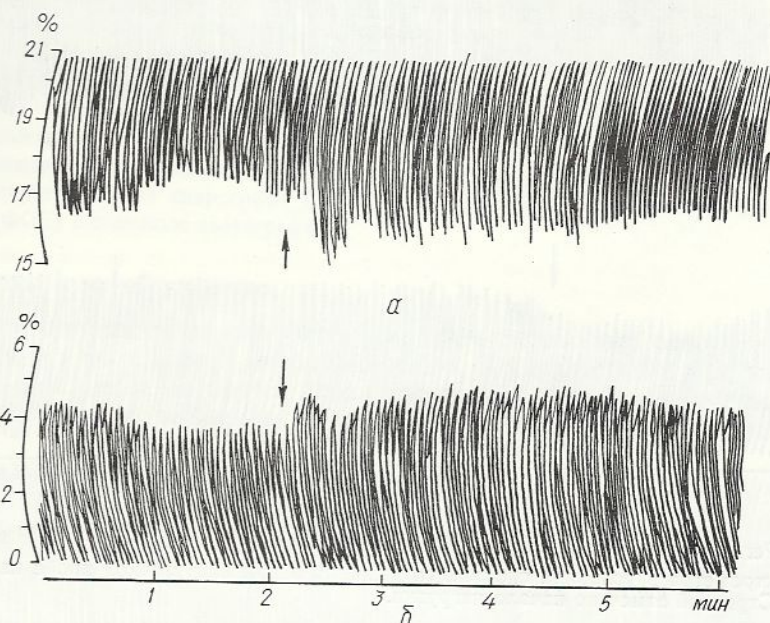


Рис. 3. Регистрация концентраций выдыхаемых газов (F_{O_2} — а; F_{CO_2} — б) с помощью масс-спектрометра в условиях спокойного дыхания и при нагрузочной пробе на велоэргометре. Стрелкой отмечено начало нагрузки.

значений функциональной остаточной емкости. Действительно, у здоровых людей дыхательный объем (даже в состоянии полного покоя) не является строго постоянным: значение его варибельности находится в пределах (± 10) — (± 15) % средней, вычисленной с помощью автоматического устройства прибора «Комплекс» и обработкой спирограмм. Такие же, а иногда и большие изменения дыхательного объема отмечались при автоматическом его подсчете прибором «Эрготест».

Известно, что ФОЕ может изменяться вследствие некоторых колебаний уровня дыхания, связанного с текущим стоянием диафрагмы, колебаниями внутрибрюшинного давления и пр. [9, 10, 11]. Если обратить внимание на уровень дыхания при записи спирограммы, то, как правило, можно видеть небольшие колебания, не превышающие 50—100 мл (рис. 4, а). Эти колебания не носят выраженного периодического характера и при измерении скорости потребления кислорода обычно на них не обращают внимания. На рис. 4, б приведена спирограмма с выраженными колебаниями уровня дыхания, имеющими характер периодических. Сдвиг уровня дыхания, составляющий 200 мл, можно отнести к изменению ФОЕ. Дыхательный объем также изменялся: в данном примере его максимальное значение составляло 700 мл, минимальное — 560. Наибольшему значению ДО соответствовало наибольшее значение ФОЕ, так как уровень дыхания смещался в сторону вдоха. При значении ФОЕ менее 2000 мл (по расчету) состав альвеолярного воздуха мог бы измениться до значения, близкого к тому, что мы наблюдали при регистрации F_{AO_2} и F_{ACO_2} .

Надо заметить, что такие выраженные изменения уровня дыхания и дыхательного объема встречались редко, тогда как периодические вариации состава альвеолярного воздуха — часто. Кроме того, когда с возрастом ФОЕ увеличивается вдвое, то состав альвеолярного воздуха должен был бы, по расчету, варьировать значительно меньше, чем это наблюдалось в действительности. Мы не смогли отметить четкой зависимости между амплитудой вариаций состава альвеолярного воздуха и ФОЕ, а также возрастом испытуемых. Изменения дыхательного коэффициента, о которых говорилось выше, также не соответствуют тем расчетам, которые можно сделать на основании вариаций ДО и ФОЕ. Динамика вариабельности состава альвеолярного воздуха при нагрузке также не дает возможности объяснить их с позиции вентилируемости легкого.

Таким образом, приведенные данные и высказанные соображения заставляют предполагать, что полностью объяснить причину медленных вариаций состава альвеолярного воздуха изменениями ДО и ФОЕ нельзя. Генез этого процесса, по-видимому, сложнее. Можно предположить, что пе-

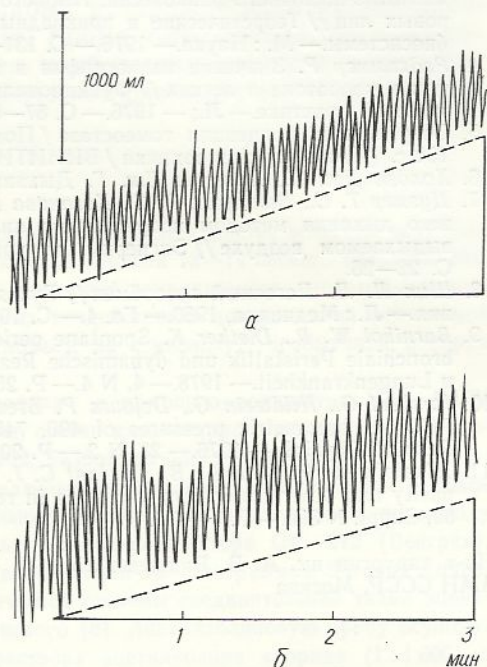


Рис. 4. Спирограммы (а; б) двух разных людей.

риодические спонтанные вариации состава альвеолярного воздуха связаны с общей периодикой вегетативных функций, в том числе и периодическими колебаниями уровня метаболизма в тканях. О таких колебательных процессах метаболизма периодом в несколько минут, выражающихся в изменениях уровня сахара, хлоридов и молочной кислоты, сообщали еще в 1947 г. Алексенцева, Гофман и др. [1]. Вероятно, что вариации состава альвеолярного воздуха — результат деятельности нервной системы, стремящейся сохранить гомеостаз организма. Полученные данные указывают на то, что в процессе регулирования постоянства парциального давления газов в артериальной крови дыхательный центр осуществляет «поиск» оптимального уровня, допуская недорегулирование и перерегулирование. Выражением этого, вероятно, и являются описанные выше медленные волнообразные вариации газового состава альвеолярного воздуха.

SPONTANEOUS FLUCTUATIONS OF THE COMPOSITION OF ALVEOLAR AIR AT REST AND DURING EXERCISE

R. S. Vinitskaya, N. A. Koganova, A. A. Markosyan, G. I. Seregin

Slow fluctuation of P_{AO_2} and P_{ACO_2} (the period from 0.5 min to several minutes) were recorded in healthy people at rest. Amplitudes of these fluctuations were to 17 Torr for P_{AO_2} and 7 Torr for P_{ACO_2} . During exercise (40-60 W) the duration of these fluctuations diminished and restored to the initial value 2-3 min after cessation of the exercise. The mechanism of generation of these fluctuations and their significance in maintenance of the gaseous homeostasis is discussed.

A. V. Vishnevsky Institute of Surgery,
Academy of Medical Sciences of the USSR, Moscow

1. Алексенцева Э. С., Гофман Е. Н., Дорохова О. Н. и др. Периодические колебания некоторых составных частей крови как функция регуляторных механизмов // VII Всесоюз. съезд физиологов, биохимиков, фармакологов. Москва, 1947 г.— М., 1947.— С. 557—558.
2. Дегтярева З. Я., Синицина Т. М., Верховская В. А., Бородулина Г. З. Возможности клинического применения масспектрометра для оценки внешнего дыхания у больных легочной патологией // Организационные и методические вопросы клинической физиологии дыхания.— Л., 1973.— С. 85—90.
3. Окунева Г. Н., Шевелева Л. Г., Миргородская В. А., Вялова Е. Н. Суточные ритмы кислотно-щелочного равновесия, газового состава крови и внешнего дыхания у здоровых лиц // Теоретические и прикладные аспекты анализа временной организации биосистемы.— М.: Наука.— 1976.— С. 131—137.
4. Редхаммер Р. Значение капнографии в оценке нарушений распределения вентиляции и кровотока в легких // Функциональные исследования дыхания в пульмонологической практике.— Л.; — 1976.— С. 57—61.
5. Современные концепции гомеостаза / Под ред. В. А. Шидловского.— М., 1982.— 154 с. (Итоги науки и техники / ВИНТИ. физиология человека и животных; Т. 25).
6. Холден Дж. С., Пристли Дж. Г. Дыхание.— М.: Биомедгиз, 1937.— 461 с.
7. Цузмер Т. С., Виницкая Р. С., Коганова Н. А. Функциональные исследования внешнего дыхания методом непрерывного анализа концентрации двуокиси углерода в выдыхаемом воздухе // Эксперим. хирургия и анестезиология.— 1967.— № 3.— С. 22—26.
8. Шик Л. Л. Легочный газообмен // Руководство по клинической физиологии дыхания.— Л.: Медицина, 1980.— Гл. 4.— С. 109—161.
9. Barnikol W. R., Diether K. Spontane periodische Totraumvolumens beim Menschen— bronchiale Peristaltik und dynamische Reaktion der Bronchialmuskulatur // Atemwege u Lungenkrankheit.— 1978.— 4, N 4.— P. 257—258.
10. Lambert G., Hildwein G., Dejours P. Breath-to-breath variation of alveolar PO_2 and PCO_2 at barometric pressures of 490, 745 and 1500 torr in resting awake dogs // Respirat. Physiol.— 1976.— 28, N 2.— P. 207—215.
11. Hlastala M. P., Wranne B., Lenfant C. J. Periodic changes in functional residual capacity and other respiratory variables in resting man // Acta physiol. Scand.— 1973.— 89, Suppl. N 396.— P. 74—78.

Ин-т хирургии им. А. В. Вишневского
АМН СССР, Москва

Поступила 08.03.86

УДК 612.121.2

Вентиляторный ответ на гиперкапнический стимул как показатель реактивности системы дыхания человека

В. А. Березовский, Т. В. Серебровская

Учение о реактивности в значительной мере сложилось и получило развитие в трудах отечественных ученых [1, 4, 11, 13]. При этом реактивность рассматривается как свойство организма отвечать определенным образом на воздействия окружающей среды, потенциальную готовность к той или иной форме реагирования. Однако в вопросе оценки состояния реактивности в целом и отдельных функциональных систем до сих пор нет единого мнения, не выработаны достаточно четкие критерии. Некоторые авторы предлагают оценивать реактивность по отношению амплитуды отклонения показателя в ответ на раздражение к его исходному значению [2 и др.]. Однако такое определение характеризует лишь силу отдельной реакции на определенный раздражитель, не учитывая закономерности реагирования на раздражители разной силы. Вместе с тем амплитуда физиологических ответов на сильное и слабое воздействия различна и значительно зависит от возраста испытуемого [3] и функционального состояния организма [6]. Так, у детей наблюдаются бурные реакции на средние раздражители и снижение ответов на увеличение силы раздражителя в связи с истощением функциональных резервов [15, 18]. В то же время люди с хорошей физической подготовкой обладают сниженным ответом на возмущение средней силы