

Е. А. Макаренкова, М. В. Малахов, А. А. Мельников, А. Д. Викулов

Сравнительный анализ влияния произвольной гипервентиляции и физической нагрузки на функцию равновесия человека

Проведено сравнение влияния произвольной гипервентиляции и субмаксимальной аэробной физической нагрузки на функцию равновесия. Установлено, что произвольное увеличение глубины и частоты дыхания приводило к большему снижению устойчивости вертикальной позы, чем нагрузка. Дыхательные движения вносят вклад в снижение устойчивости только при гипервентиляции.

Ключевые слова: гипервентиляция, стабилография, физическая нагрузка, равновесие.

E. A. Makarenkova, M. V. Malakhov, A. A. Melnikov, A. D. Vikulov

Comparative Analysis of Influence of Hyperventilation and Exercises on Human Postural Stability

Comparison of influence of voluntary hyperventilation and submaximal aerobic exercises on human postural stability was made. It was found that postural steadiness decreased more under influence of the hyperventilation than of the exercise. Respiratory movements make a contribution in the decrease of the postural stability only during the hyperventilation.

Keywords: hyperventilation, stabilography, exercises, a balance.

Введение

Способность поддерживать вертикальную позу необходима для обеспечения нормальной физической активности человека и его перемещения в пространстве [3]. Известно, что мышечное утомление существенно снижает функцию равновесия [2], что может приводить к падениям и травмам [4]. К причинам, вызывающим ухудшение устойчивости при утомлении, обычно относят нарушение функции проприорецепторов [5], снижение эффективности нервно-мышечной передачи из-за метаболических сдвигов в мышечной ткани [6], а также снижение стабильности суставов [7], необходимой для поддержания вертикальной позы [8]. Однако еще одним фактором, приводящим к снижению способности поддерживать вертикальную позу, может являться увеличение частоты и глубины дыхания, обусловленное физической нагрузкой [9].

Известно, что состояние тревожности, прием ряда лекарственных препаратов, боль могут быть причиной гипервентиляции, которая приводит к гипокапнии [10]. Гипокапния, в свою очередь, оказывает существенное воздействие на ряд физиологических процессов, что вызывает снижение вертикальной устойчивости [11]. Функция равновесия при гипервентиляции ухудшается не только вследствие метаболических сдвигов, но и

из-за увеличения дыхательного объема и частоты дыхательных движений [12].

Таким образом, фактором, влияющим на баланс как при физической нагрузке, так и при произвольной гипервентиляции является повышение глубины и частоты дыхательных движений. Однако остается неясным, в какой степени этот фактор определяет снижение устойчивости вертикальной позы в каждом из этих состояний.

Цель нашей работы – сравнить влияние физической нагрузки и произвольной гипервентиляции на функцию равновесия человека и выявить вклад дыхательных движений в снижение вертикальной устойчивости в том и другом случае.

Методы исследования

Организация исследования. Нами было обследовано 111 здоровых добровольцев (50 женщин) в возрасте 18–30 лет. Испытуемые в течение 30 секунд стояли на стабилографической платформе Стабилан 01-2, «ОКБ» Ритм (пятки на расстоянии 2 см, стопы под углом 30^0), стараясь как можно меньше отклонять тело от вертикального положения, и смотрели на белый круг на черном фоне, расположенный на расстоянии 1,5 м на уровне глаз. Этот этап исследования обозначался как «Покой». Дыхание было спонтанным.

Потом испытуемым предлагалось, стоя на стабилографической платформе, в течение 20 секунд дышать как можно глубже и чаще («Гипервентиляция»).

После этого они выполняли субмаксимальную аэробную нагрузку на велоэргометре «Kettler FX1». Нагрузку увеличивали ступенчато. На первой ступени, длительность которой составляла 3 мин., величина нагрузки равнялась 50 Вт, затем мощность увеличивали на 30 Вт на каждой последующей ступени (длительность 1 мин.). Во время работы частота сердечных сокращений регистрировалась пульсометром «Polar S810». Когда в конце ступени ЧСС превышала 170 уд/мин., нагрузку прекращали. Затем испытуемые как можно быстрее (чтобы избежать снижения физиологических эффектов физической нагрузки вследствие восстановления) вставали на стабилографическую платформу и выполняли первый тест (30 секунд смотрели на белый круг на черном фоне («Восстановление»)).

Стабилометрические параметры. На стабилографическом анализаторе определялись следующие классические стабилометрические параметры для каждого из этапов обследования: среднее квадратическое отклонение (разброс) смещения центра давления (ЦД) во фронтальном (Q_x , мм) и сагиттальном (Q_y , мм) направлениях, средняя скорость перемещения ЦД (V , мм/с), скорость перемещения ЦД, площадь доверительного эллипса, то есть основная

часть площади стабилограммы без выбросов (S , мм²).

Показатели дыхания. Для каждого этапа исследования рассчитывались также показатели дыхания. Дыхание оценивалось с помощью тензометрического датчика, который входит в комплект Стабилан-01 ОКБ «Ритм». Тензометрический датчик крепится ремнем к грудной клетке, он регистрирует ее экскурсию и позволяет рассчитать частоту дыхательных движений (f , мин⁻¹), а также относительный показатель – амплитуду дыхания (RA), который равняется разности между максимумом вдоха и минимумом выдоха. На основе f и RA можно вычислить косвенный показатель, вентиляцию (Vent) [1].

Статистика. Данные представлены как среднее арифметическое (M) ± стандартное отклонение (s). Гипотеза о взаимосвязи данных проверялась с помощью параметрической корреляции Пирсона. Для выявления различий между стабилографическими параметрами и показателями дыхания на разных этапах исследования использовался однофакторный дисперсионный анализ для повторных измерений (ANOVA). Апостериорные сравнения выполнены с использованием критерия Шеффе.

Результаты исследования

Нами установлено, что по сравнению с этапом «Покой» показатели дыхания при произвольной гипервентиляции повышались в большей степени, чем во время этапа «Восстановление» (табл. 1).

Таблица 1

Дыхательные показатели на разных этапах исследования (n=111)

	Покой	Гипервентиляция	Восстановление
RA	0,56±0,33	2,40±0,97***	2,02±0,93***^^^
f , мин ⁻¹	14,20±5,24	55,14±18,03***	25,82±6,06***^^^
Vent	7,80±4,75	126,55±54,62***	51,72±25,56***^^^

Примечание: *** – $p < 0,001$ по сравнению с этапом «Покой», ^^ – $p < 0,001$ по сравнению с этапом «Гипервентиляция».

По данным нашего исследования все классические стабилографические показатели возрастали по сравнению с этапом «Покой» как при произвольной гипервентиляции, так в период вос-

становления после физической нагрузки. Однако степень этого увеличения при произвольной гипервентиляции была значительно выше (табл. 2).

Таблица 2

Стабилографические показатели на разных этапах исследования (n=111)

	Покой	Гипервентиляция	Восстановление
$Q(x)$, мм	2,16±0,71	4,04±1,35***	3,62±1,61***^
$Q(y)$, мм	2,86±1,12	6,31±2,43***	5,08±2,12***^^^

V, мм/сек	7,77±2,17	31,67±21,12***	15,59±6,62***^^^
S, мм ²	85,54±47,38	375,97±248,74***	274,02±277,85***^^

Примечание: *** – $p < 0,001$ по сравнению с этапом «Покой», ^, ^^, ^^ – $p < 0,05$, $< 0,01$, $< 0,001$ по сравнению с этапом «Гипервентиляция».

Обсуждение

Мы исследовали влияние произвольной гипервентиляции и субмаксимальной аэробной физической нагрузки на функцию равновесия. Нами установлено, что как в первом, так и во втором случае отмечалось повышение стабิโลграфических индексов, однако при гипервентиляции это повышение было более выраженным.

Ухудшение равновесия при произвольной гипервентиляции было связано с повышением частоты и амплитуды дыхательных движений [12], а также рядом других физиологических процессов. В работе [11] исследуется влияние гипервентиляции на механизмы регуляции вертикальной позы. Авторы установили, что произвольное увеличение глубины и частоты дыхания приводит к возрастанию импульсации в волокнах соматосенсорных нервов, в том числе обеспечивающих иннервацию проприорецепторов. Поскольку проприоцептивная информация является важным компонентом регуляции вертикального положения тела, ее искажение приводит к снижению устойчивости.

Повышенная возбудимость нервных волокон при гипервентиляции обусловлена рядом метаболических сдвигов. Гипервентиляция приводит к гипокапнии, которая, в свою очередь, является причиной метаболического ацидоза. Поскольку ионы кальция и водорода конкурентно связываются с белками плазмы, снижение концентрации H^+ вызывает повышение количества связанных ионов кальция, поэтому содержание в плазме и внеклеточной жидкости свободного Ca^{2+} уменьшается. Из-за понижения уровня Ca^{2+} и H^+ , во-первых, уменьшается трансмембранный потенциал, а во-вторых, увеличивается проницаемость мембраны для ионов Na^+ . Эти изменения и являются причиной повышенной возбудимости нервной ткани [13].

Утомление вследствие физической нагрузки также приводило к снижению вертикальной устойчивости (табл. 2). Под влиянием утомления в мышечной ткани накапливается ряд метаболитов (фосфат ионы, ионы водорода, активные формы кислорода) [14], в результате чего сократительная способность мышц падает. Следовательно,

для обеспечения мышечного сокращения требуется более длительная и интенсивная стимуляция со стороны нервной системы, что приводит к снижению скорости и эффективности контроля положения тела и ухудшению функции равновесия [6].

Кроме того, утомление приводит к уменьшению чувствительности проприорецепторов и, как следствие, снижению вертикальной устойчивости [5]. В исследовании [15] указывается, что при интенсивной физической нагрузке в результате метаболических и температурных изменений в области нервно-мышечного веретена развивается утомление интрафузальных мышечных волокон, что, в свою очередь, и вызывает нарушение проприорецепции.

Еще одной причиной ухудшения функции равновесия после физической нагрузки может являться уменьшение стабильности суставов нижних конечностей при утомлении, связанное со снижением сократительной способности соответствующих мышц [7, 16]. Стабильность суставов необходима для нормальной устойчивости тела [8].

Согласно нашим данным степень увеличения стабิโลграфических индексов при гипервентиляции была значительно выше, чем после физической нагрузки, следовательно, произвольное увеличение глубины и частоты дыхания сильнее влияло на вертикальную устойчивость, чем мышечное утомление. Однако вклад дыхательных движений в снижение устойчивости в том и другом случае остается неясным. Для выявления влияния дыхательных движений на функцию равновесия мы провели корреляционный анализ между дыхательными и стабิโลграфическими показателями на разных этапах исследования. Нами были получены корреляции средней силы между стабิโลграфическими индексами и частотой дыхания ($r=0,27$, $p=0,004$ для Q_x , $r=0,25$, $p=0,008$ для S , $r=0,54$, $p=0,00001$ для V) и показателем вентиляции ($r=0,23$, $p=0,013$ для V) при произвольной гипервентиляции, тогда как в период восстановления после нагрузки дыхательные показатели не были связаны со стабิโลграфическими. Таким образом, наши данные проти-

воречат результатам [9] и свидетельствуют об отсутствии вклада дыхательных движений в снижение вертикальной устойчивости после физической нагрузки. Ухудшение равновесия в период «Восстановление», очевидно, было связано в основном с мышечным утомлением.

Заключение

Как произвольная гипервентиляция, так и субмаксимальная аэробная физическая нагрузка вызывали снижение вертикальной устойчивости, что проявлялось в возрастании стабиллографических показателей. Снижение устойчивости вертикальной позы при произвольной гипервентиляции было связано с увеличением глубины и частоты дыхательных движений, а также, вероятно, с повышением импульсации с проприоре-

цепторов вследствие метаболических сдвигов. Ухудшение функции равновесия после кратковременных интенсивных физических нагрузок было обусловлено нарушением проприорецепции, уменьшением стабильности суставов нижних конечностей, а также снижением эффективности контроля положения тела. Увеличение вентиляции после физической нагрузки не внесло существенного вклада в снижение вертикальной устойчивости. Степень увеличения стабиллографических индексов была значительно выше при произвольном увеличении частоты и глубины дыхания, что свидетельствует о более выраженном по сравнению с физическим утомлением влиянии гипервентиляции на функцию равновесия.

Библиографический список

1. Войнов, В. Б. Методы оценки состояния систем кислородообеспечения организма человека [Текст] : учебно-методическое пособие / В. Б. Войнов, Н. В. Воронова, В. В. Золотухин. – Ростов-на-Дону : УНИИ валеологии РГУ, 2002. – 99 с.
2. Мельников, А. А. Устойчивость позы во время статического напряжения до и после субмаксимального аэробного велоэргометрического теста у спортсменов [Текст] / А. А. Мельников [и др.] // Физиология человека. – 2012. – Т. 38, № 2. – С. 66–72.
3. Winter, D. A. Assessment of balance control in humans / D. A. Winter, A. E. Patla, J. S. Frank // *Med. Prog. Technol.* – 1990. – V. 16, №1-2. – P. 31–51.
4. Cetin, N. Effects of Lower-Extremity and Trunk Muscle Fatigue on Balance / N. Cetin, M. Bayramoglu, A. Aytar, O. Surenkok, O. U. Yemisci // *The Open Sports Medicine Journal.* – 2008. – V. 2. – P. 16–22.
5. Hiemstra, L. A. Effect of fatigue on knee proprioception: implications for dynamic stabilization / L. A. Hiemstra, I. K. Lo, P. J. Fowler // *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* – 2001. – V. 31, № 10. – P. 598–605.
6. Mello, R. G. Anticipation mechanism in body sway control and effect of muscle fatigue / R. G. Mello, L. F. Oliveira, J. Nadal // *J. Electromyogr. Kinesiol.* – 2007. – V. 17, № 6. – P. 739–746.
7. Gutierrez, G. M. Effect of fatigue on neuromuscular function at the ankle / G. M. Gutierrez, N. D. Jackson, K. A. Dorr, S. E. Margiotta, T. W. Kaminski // *J. Sport Rehabil.* – 2007. – V. 16, № 4. – P. 295–306.
8. Edwards, W. T. Effect of joint stiffness on standing stability / W. T. Edwards // *Gait Posture.* – 2007. – V. 25, № 3. – P. 432–439.
9. Zemková, E. Postural Sway Response to Different Forms of Resistance Exercise / E. Zemková, D. Hamar // *International Journal of Applied Sports Sciences.* – 2005. – V. 17, № 1. – P. 1–6.
10. Laffey, J. G. Hypocapnia / J. G. Laffey, B. P. Kavanagh // *N. Engl. J. Med.* – 2002. – V. 347, № 1. – P. 43–53.
11. Sakellari, V. The effects of hyperventilation on postural control mechanisms / V. Sakellari, A. M. Bronstein, S. Corna, C. A. Hammon, S. Jones, C. J. Wolsley // *Brain.* – 1997. – V. 120. – P. 1659–1673.
12. Hodges, P. W. Coexistence of stability and mobility in postural control: evidence from postural compensation for respiration / P. W. Hodges, V. S. Gurfinkel, S. Brumagne, T. C. Smith, P. C. Cordo // *Exp. Brain Res.* – 2002. – V. 144, №3. – P. 293–302.
13. Mogyoros, I. Excitability changes in human sensory and motor axons during hyperventilation and ischaemia / I. Mogyoros, M. C. Kiernan, D. Burke, H. Bostock // *Brain.* – 1997. – V. 120. – P. 317–325.
14. Allen, D. G. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms / D. G. Allen, G.D. Lamb, H. Westerblad // *Physiol. Rev.* – 2008. – V. 88. – P. 287–332.
15. Zhang, L. Q. Reflex and intrinsic changes induced by fatigue of human elbow extensor muscles / L. Q. Zhang, W. Z. Rymer // *J. Neurophysiol.* – 2001. – V. 86, №3. – P. 1086–1094.
16. Smith, M. P. Effects of fatigue on frontal plane knee motion, muscle activity, and ground reaction forces in men and women during landing / M. P. Smith, P. S. Sizer, C. R. James // *Journal of Sports Science and Medicine.* – 2009. – V.8. – P. 419–427.