

---

---

УДК 612.886

*МАКАРЕНКОВА Елена Александровна, аспирант кафедры физического воспитания Ярославского государственного педагогического университета им. К.Д. Ушинского. Автор 9 научных публикаций*

*МАЛАХОВ Максим Викторович, кандидат биологических наук, ассистент кафедры нормальной физиологии с биофизикой Ярославской государственной медицинской академии. Автор 24 научных публикаций, в т. ч. двух учебных пособий*

*МЕЛЬНИКОВ Андрей Александрович, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой физического воспитания Ярославского государственного педагогического университета им. К.Д. Ушинского. Автор 130 научных публикаций, в т. ч. одной монографии, 5 учебных пособий*

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ГИПЕРВЕНТИЛЯЦИИ И ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ФУНКЦИЮ РАВНОВЕСИЯ ЧЕЛОВЕКА**

В работе проведено сравнение степени снижения устойчивости вертикальной позы у здоровых испытуемых ( $n = 111$ ) в результате двух возмущающих воздействий: во время максимальной произвольной гипервентиляции и сразу после субмаксимальной велоэргометрической нагрузки. Устойчивость вертикальной позы исследована с помощью стабиллографии. Установлено, что оба возмущающих воздействия значительно увеличивают разброс колебаний по фронтальной и сагиттальной плоскостям, площадь колебаний, а также среднюю линейную скорость колебаний центра давления. Между показателями стабиллографии и вентиляции установлены корреляции средней силы. Степень снижения устойчивости вертикальной позы во время максимальной гипервентиляции была выше, чем после субмаксимальной нагрузки. Таким образом, эффект максимальной гипервентиляции на устойчивость вертикальной позы больше, чем эффект субмаксимальной физической нагрузки.

**Ключевые слова:** функция равновесия человека, стабиллография, велоэргометрия, гипервентиляция.

**Введение.** Способность поддерживать вертикальную позу необходима для обеспечения нормальной физической активности человека и его перемещения в пространстве [2, 12]. Из-

вестно, что мышечное утомление существенно снижает функцию равновесия [3]. К причинам, вызывающим ухудшение постуральной устойчивости при утомлении, обычно относят

нарушение функции проприорецепторов [6], снижение эффективности нервно-мышечной передачи из-за уменьшения рН мышечной ткани [10], а также снижение стабильности суставов [6]. Кроме того, важным фактором, приводящим к снижению способности поддерживать вертикальную позу, может являться гипервентиляция, обусловленная физической нагрузкой. Действительно, ряд авторов [7, 8] указывает, что увеличение глубины и частоты дыхания приводит к ухудшению функции равновесия. Более того, в работе [13], посвященной исследованию способности поддерживать вертикальную позу после различных по интенсивности и длительности физических нагрузок, а также во время произвольного увеличения глубины и частоты дыхания, прямо говорится о ведущей роли гипервентиляции в снижении устойчивости после кратковременной нагрузки высокой интенсивности. Таким образом, сравнение устойчивости вертикальной позы при произвольной гипервентиляции и в период восстановления после физической нагрузки позволит глубже изучить механизмы ее снижения при мышечном утомлении. Цель нашей работы – сравнить устойчивость вертикальной позы сразу после физической нагрузки и во время произвольной гипервентиляции.

**Материалы и методы.** Обследовано 111 здоровых добровольцев (61 мужчина, 50 женщин) в возрасте 18–30 лет.

Анализ устойчивости вертикальной позы выполнен с помощью АПК «Стабилан 01-2» (ОКБ «Ритм»). Испытуемые в течение 30 с стояли на стабилотроне (пятки на расстоянии 2 см, стопы под углом 30°), 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 ОГ». Затем испытуемые, не меняя положения тела, в течение 30 с стояли с закрытыми глазами («Покой ЗГ»).

Далее испытуемым предлагалось стоя на стабилотроне в течение 20 с дышать как можно глубже и чаще сначала с от-

крытыми («Гипервентиляция ОГ»), а затем с закрытыми («Гипервентиляция ЗГ») глазами.

После этого испытуемые выполняли суб-максимальную 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 быстро вставали на стабилотрону и выполняли первый тест (30 с смотрели на белый круг на черном фоне («Восстановление ОГ»), затем 30 с стояли с закрытыми глазами («Восстановление ЗГ»)).

*Стабилометрические параметры.* Для каждого из этапов обследования рассчитывали: среднее квадратическое отклонение (разброс) смещения центра давления (ЦД) во фронтальном ( $Q(x)$ , мм) и сагиттальном ( $Q(y)$ , мм) направлениях, среднюю скорость перемещения ЦД ( $V_{cp}$ , мм/с), площадь доверительного эллипса статокинезиграмм ( $S_{эд}$ , мм<sup>2</sup>).

Рассчитывались также показатели дыхания. Дыхание оценивалось с помощью тензометрического датчика, который входит в комплекс «Стабилан-01» (ОКБ «Ритм»). Тензометрический датчик крепится ремнем к грудной клетке, он регистрирует ее экскурсию и позволяет рассчитать частоту дыхательных движений ( $f$ , мин<sup>-1</sup>), 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].

Поскольку по критерию Шапиро – Уилка распределение полученных показателей было нормальным, данные представлены как среднее арифметическое ( $M$ ) ± стандартное отклонение ( $s$ ). Гипотеза о взаимосвязи данных проверялась с помощью параметрической корреляции Пирсона. Для выявления различий

между стабиллографическими параметрами и показателями дыхания на разных этапах измерения использовался однофакторный дисперсионный анализ для повторных измерений (ANOVA). Апостериорные сравнения выполнены с использованием критерия Ньюмена–Кейлса. Различия между стабиллографическими и спектральными показателями с открытыми и закрытыми глазами определялись с помощью парного t-критерия Стьюдента.

**Результаты.** Как с открытыми, так и с закрытыми глазами по сравнению с этапом «Покой» показатели дыхания при произвольной гипервентиляции повышались в большей степени, чем во время этапа «Восстановление» (табл. 1).

шей силы наблюдались между дыхательными показателями f, Vent и средней линейной скоростью.

**Обсуждение.** В ходе нашего исследования рост всех классических стабиллографических параметров, свидетельствующий о снижении устойчивости вертикальной позы, отмечался как при произвольной гипервентиляции, так и после физической нагрузки (табл. 2).

Считается, что снижение равновесия при произвольной гипервентиляции прямо связано с повышением частоты и амплитуды дыхательных движений [7], а также и рядом других физиологических процессов. Установлено [11], что произвольное увеличение глубины и частоты дыхания приводит к возрастанию импульса-

Таблица 1

#### ДЫХАТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Показатели	Пробы	Покой	Гипервентиляция	Восстановление
RA	ОГ	0,56±0,33	2,40±0,97***	2,02±0,93***^^
	ЗГ	0,61±0,33	2,33±0,95***	1,70±0,80***^^
f, мин <sup>-1</sup>	ОГ	14,2±5,2	55,1±18,0***	25,8±6,1***^^
	ЗГ	16,9±5,3	57,9±17,4***	23,9±5,9***^^
Vent, ед.	ОГ	7,8±4,7	126,5±54,6***	51,7±25,6***^^
	ЗГ	10,1±5,8	129,4±55,0***	39,5±19,6***^^

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

В ходе нашего исследования все классические стабиллографические показатели возрастали по сравнению с этапом «Покой» как при произвольной гипервентиляции, так и в период восстановления после физической нагрузки. Однако степень этого увеличения при произвольной гипервентиляции была значительно выше (табл. 2).

Ниже представлены данные анализа корреляционных связей между стабиллографическими и дыхательными показателями при суммировании результатов на всех этапах обследования (табл. 3).

Все дыхательные показатели были связаны со стабиллографическими, корреляции наиболь-

шии в волокнах соматосенсорных нервов, в т. ч. обеспечивающих иннервацию проприорецепторов. Поскольку проприоцептивная информация является важным компонентом регуляции вертикального положения тела, ее искажение приводит к снижению устойчивости вертикальной позы.

Повышенная возбудимость нервных волокон при гипервентиляции обусловлена рядом метаболических сдвигов. Гипервентиляция приводит к гипокапнии, которая в свою очередь является причиной метаболического алкалоза. Поскольку ионы кальция и водорода конкурентно связываются с белками плазмы, снижение концентрации H<sup>+</sup> вызывает увеличение

Таблица 2

СТАБИЛОГРАФИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ИССЛЕДОВАНИЯ, М±S

Показатели	Пробы	Покой	Гипервентиляция	Восстановление
Q(x), мм	ОГ	2,16±0,71	4,04±1,35***	3,62±1,61***^
	ЗГ	3,38±1,33	5,39±1,96***	3,82±1,38***^^
Q(y), мм	ОГ	2,86±1,12	6,31±2,43***	5,08±2,12***^^
	ЗГ	4,12±1,40	7,09±2,60***	4,87±1,68***^^
V <sub>ср</sub> , мм/с	ОГ	7,7±2,2	31,7±21,1***	15,6±6,6***^^
	ЗГ	13,4±4,9	41,7±25,9***	17,7±7,9***^^
S <sub>эл</sub> , мм <sup>2</sup>	ОГ	85,5±47,3	375,9±248,7***	274,0±277,8***^^
	ЗГ	206,3±146,5	586,4±458,1***	273,6±163,8***^^

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

количества связанных ионов кальция, поэтому содержание в плазме и внеклеточной жидкости свободного Ca<sup>2+</sup> уменьшается. Из-за понижения уровня Ca<sup>2+</sup> и H<sup>+</sup>, во-первых, уменьшается трансмембранный потенциал, а во-вторых, увеличивается проницаемость мембраны для ионов Na<sup>+</sup>. Эти изменения и являются причиной повышенной возбудимости нервной ткани [7].

Мышечное утомление вследствие физической нагрузки также приводит к снижению постуральной устойчивости. Под влиянием утомления в мышечной ткани снижается рН, и 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 [9].

Кроме того, утомление приводит к уменьшению чувствительности проприорецепторов и, как следствие, к снижению постуральной устойчивости [6]. В исследовании [14] указывается, что при интенсивной физической нагрузке вследствие 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 [6]. Стабильность суставов необходима для нормальной устойчивости тела [4].

Согласно нашим данным степень увеличения стабилографических индексов при произвольной гипервентиляции была значительно выше, чем после физической нагрузки. Так, Q(x) на этапе «Гипервентиляция ОГ» было в 1,87 раза, а на этапе «Восстановление ОГ» – в

Таблица 3

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ  
МЕЖДУ ДЫХАТЕЛЬНЫМИ  
И СТАБИЛОГРАФИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

Показатели	RA	f	Vent
Q(x)	0,28***	0,48***	0,43***
Q(y)	0,38***	0,51***	0,49***
V <sub>ср</sub>	0,32***	0,71***	0,60***
S <sub>эл</sub>	0,28***	0,49***	0,44***

Примечание. \*\*\* – p < 0,001.

---

---

1,68 раза выше, чем на этапе «Покой ОГ». Q(y) при гипервентиляции возросло в 2,21 раза по сравнению с покоем, а после физической нагрузки – в 1,78 раза. Средняя линейная скорость и площадь доверительного эллипса на этапе «Гипервентиляция ОГ» повысились по сравнению с этапом «Покой ОГ» в 4,08 и 4,4 раза соответственно, а на этапе «Восстановление ОГ» – в 2,01 и 3,2 раза соответственно. С закрытыми глазами степень прироста стабиллографических показателей при гипервентиляции была еще больше, чем после нагрузки. Такой характер изменения стабиллографических параметров позволяет предположить, что максимальное увеличение глубины и частоты дыхательных движений в большей степени влияет на постуральную устойчивость, чем описанные выше физиологические процессы, происходящие при утомлении. Другими словами,

гипервентиляция является большим фактором, возмущающим устойчивость вертикальной позы, чем совокупность факторов, связанных с субмаксимальной физической нагрузкой. О влиянии дыхания на функцию равновесия свидетельствуют также корреляции дыхательных и стабиллографических показателей (табл. 3).

**Заключение.** Как произвольная гипервентиляция, так и субмаксимальная велоэргометрическая физическая нагрузка вызывали снижение устойчивости вертикальной позы, что проявлялось в возрастании стабиллографических показателей. Степень увеличения стабиллографических индексов была значительно выше при произвольном повышении частоты и глубины дыхания, чем сразу после физической нагрузки, что свидетельствует о значительном влиянии роста легочной вентиляции на увеличение колебаний вертикального положения тела.

## Список литературы

1. Войнов В.Б., Воронова Н.В., Золотухин В.В. Методы оценки состояния систем кислородобеспечения организма человека: учеб.-метод. пособие. Ростов н/Д, 2002. 99 с.
2. Грибанов А.В., Шерстенникова А.К. Физиологические механизмы регуляции постурального баланса человека: обзор // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Мед.-биол. науки. 2013. № 4. С. 20–29.
3. Мельников А.А., Савин А.А., Емельянова Л.В., Викулов А.Д. Регуляция равновесия у борцов-самбистов на фоне физического утомления после субмаксимальной велоэргометрической нагрузки // Вестн. спортив. науки. 2010. № 5. С. 136–141.
4. Edwards W.T. Effect of Joint Stiffness on Standing Stability // Gait Posture. 2007. Vol. 25, № 3. P. 432–439.
5. Gutierrez G.M., Jackson N.D., Dorr K.A. et al. Effect of Fatigue on Neuromuscular Function at the Ankle // J. Sport Rehabil. 2007. Vol. 16, № 4. P. 295–306.
6. Hiemstra L.A., Lo I.K., Fowler P.J. Effect of Fatigue on Knee Proprioception: Implications for Dynamic Stabilization // J. Orthop. Sports Phys. Ther. 2001. Vol. 31, № 10. P. 598–605.
7. Hodges P.W., Gurfinkel V.S., Brumagne S. et al. Coexistence of Stability and Mobility in Postural Control: Evidence From Postural Compensation for Respiration // Exp. Brain Res. 2002. Vol. 144, № 3. P. 293–302.
8. Kuczyński M., Wieloch M. Effects of Accelerated Breathing on Postural Stability // Human Movement. 2008. Vol. 9, № 2. P. 107–110.
9. Mello R.G., Oliveira L.F., Nadal J. Anticipation Mechanism in Body Sway Control and Effect of Muscle Fatigue // J. Electromyogr. Kinesiol. 2007. Vol. 17, № 6. P. 739–746.
10. Mogyoros I., Kiernan M.C., Burke D., Bostock H. Excitability Changes in Human Sensory and Motor Axons During Hyperventilation and Ischaemia // Brain. 1997. Vol. 120. P. 317–325.
11. Sakellari V., Bronstein A.M., Corna S. et al. The Effects of Hyperventilation on Postural Control Mechanisms // Brain. 1997. Vol. 120. P. 1659–1673.
12. Winter D.A., Patla A.E., Frank J.S. Assessment of Balance Control in Humans // Med. Prog. Technol. 1990. Vol. 16, № 1-2. P. 31–51.

13. Zemková E., Hamar D. Postural Sway Response to Exercise: The Effect of Intensity and Duration // *Int. J. Appl. Sports Sci.* 2005. Vol. 17, № 1. P. 1–6.
14. Zhang L.Q., Rymer W.Z. Reflex and Intrinsic Changes Induced by Fatigue of Human Elbow Extensor Muscles // *J. Neurophysiol.* 2001. Vol. 86, № 3. P. 1086–1094.

## References

1. Voynov V.B., Voronova N.V., Zolotukhin V.V. *Metody otsenki sostoyaniya sistem kislorodoobespecheniya organizma cheloveka* [Methods of Assessing the State of the Systems Providing Oxygen in a Human Body]. Rostov-on-Don, 2002. 99 p.
2. Griбанov A.V., Sherstennikova A.K. Fiziologicheskie mekhanizmy regulyatsii postural'nogo balansa cheloveka: obzor [Physiological Mechanisms of Human Postural Balance Regulation (Review)]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser.: Mediko-biologicheskie nauki*, 2013, no. 4, pp. 20–29.
3. Mel'nikov A.A., Savin A.A., Emel'yanova L.V., Vikulov A.D. Regulyatsiya ravnovesiya u bortsov-sambistov na fone fizicheskogo utomleniya posle submaksimal'noy veloergometricheskoy nagruzki [Effects of Fatigue on Postural Balance Control in Wrestlers After Submaximal Bicycle Exercise]. *Vestnik sportivnoy nauki*, 2010, no. 5, pp. 136–141.
4. Edwards W.T. Effect of Joint Stiffness on Standing Stability. *Gait Posture*, 2007, vol. 25, no. 3, pp. 432–439.
5. Gutierrez G.M., Jackson N.D., Dorr K.A., et al. Effect of Fatigue on Neuromuscular Function at the Ankle. *J. Sport Rehabil.*, 2007, vol. 16, no. 4, pp. 295–306.
6. Hiemstra L.A., Lo I.K., Fowler P.J. Effect of Fatigue on Knee Proprioception: Implications for Dynamic Stabilization. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 2001, vol. 31, no. 10, pp. 598–605.
7. Hodges P.W., Gurfinkel V.S., Brumagne S., et al. Coexistence of Stability and Mobility in Postural Control: Evidence From Postural Compensation for Respiration. *Exp. Brain Res.*, 2002, vol. 144, no. 3, pp. 293–302.
8. Kuczyński M., Wieloch M. Effects of Accelerated Breathing on Postural Stability. *Human Movement*, 2008, vol. 9, no. 2, pp. 107–110.
9. Mello R.G., Oliveira L.F., Nadal J. Anticipation Mechanism in Body Sway Control and Effect of Muscle Fatigue. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 2007, vol. 17, no. 6, pp. 739–746.
10. Mogyoros I., Kiernan M.C., Burke D., Bostock H. Excitability Changes in Human Sensory and Motor Axons During Hyperventilation and Ischaemia. *Brain*, 1997, vol. 120, pp. 317–325.
11. Sakellari V., Bronstein A.M., Corna S., et al. The Effects of Hyperventilation on Postural Control Mechanisms. *Brain*, 1997, vol. 120, pp. 1659–1673.
12. Winter D.A., Patla A.E., Frank J.S. Assessment of Balance Control in Humans. *Med. Prog. Technol.*, 1990, vol. 16, no. 1–2, pp. 31–51.
13. Zemková E., Hamar D. Postural Sway Response to Exercise: The Effect of Intensity and Duration. *Int. J. Appl. Sports Sci.*, 2005, vol. 17, no. 1, pp. 1–6.
14. Zhang L.Q., Rymer W.Z. Reflex and Intrinsic Changes Induced by Fatigue of Human Elbow Extensor Muscles. *J. Neurophysiol.*, 2001, vol. 86, no. 3, pp. 1086–1094.

**Makarenkova Elena Aleksandrovna**

Postgraduate Student, Yaroslavl State Pedagogical University  
named after K.D. Ushinsky (Yaroslavl, Russia)

**Malakhov Maksim Viktorovich**

Yaroslavl State Medical Academy (Yaroslavl, Russia)

**Melnikov Andrey Aleksandrovich**

Yaroslavl State Pedagogical University  
named after K.D. Ushinsky (Yaroslavl, Russia)

---

---

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF VOLUNTARY HYPERVENTILATION AND EXERCISE ON HUMAN BALANCE FUNCTION

The paper compares the degrees of postural stability reduction in healthy subjects ( $n = 111$ ) as a result of two disturbing actions: during maximal voluntary hyperventilation and immediately after submaximal bicycle exercise. Vertical posture stability was investigated using stabilography. We found that both disturbing actions significantly increase the variance of fluctuations in the frontal and sagittal planes, the area of fluctuations as well as the mean linear velocity of center of pressure fluctuations. Medium strength correlations were established between stabilographic and ventilation parameters. The degree of reduction of postural stability was higher during maximal hyperventilation than after submaximal exercise. Thus, the effect of maximal hyperventilation on vertical posture stability is greater than the effect of submaximal exercise.

**Keywords:** *human balance, stabilography, bicycle exercise, hyperventilation.*

*Контактная информация:*

Макаренкова Елена Александровна

*адрес:* 150000, г. Ярославль, ул. Республиканская, д. 108;

*e-mail:* elena.makarenkova.00@mail.ru

Малахов Максим Викторович

*адрес:* 150000, г. Ярославль, ул. Революционная, д. 5;

*e-mail:* malahovmv@mail.ru

Мельников Андрей Александрович

*адрес:* 150000, г. Ярославль, ул. Республиканская, д. 108;

*e-mail:* meln1974@yandex.ru

Рецензент – *Грибанов А.В.*, доктор медицинских наук, профессор, директор института медико-биологических исследований САФУ имени М.В. Ломоносова