

С. Г. Попов, А. А. Мельников

Корреляция реакций показателей центральной и периферической гемодинамики на тилт-тест с физической работоспособностью

В работе установлена корреляционная связь индекса PWC140 с реакцией региональных объемов крови в шее, в абдоминальном регионе и нижних конечностях в ответ на тилт-тест. Повышенное снижение кровотока в периферических сосудах может быть механизмом повышения эффективности распределения кровотока в пользу сосудов шеи во время ортостатического стресса у спортсменов.

Ключевые слова: ортостатическая устойчивость, тилт-тест, периферическое кровообращение, физическая работоспособность.

S. G. Popov, A. A. Melnikov

Correlation between Reactions of Central and Peripheral Hemodynamics to the Tilt Test and Physical Performance

In the paper we found correlations of index PWC140 with reactions of the regional blood volumes in the neck, in the abdominal region and in lower limbs in response to the tilt test. Increased blood flow reduction in peripheral vessels may be the mechanism of more effective distribution of the blood flow in favour of the vessels of the neck during the orthostatic stress in athletes.

Keywords: orthostatic tolerance, a tilt-test, peripheral blood circulation, physical performance.

Введение

Во время перехода из положения лежа в положение стоя система кровообращения испытывает гравитационный стресс, или ортостресс, обусловленный уменьшением центрального (в грудной полости) объема крови в результате ее оттока в нижние части тела, в основном в венозные сосуды брюшной полости и нижних конечностей [14]. Это приводит к снижению центрального венозного давления, кровенаполнения полостей сердца и уменьшению ударного объема крови в положении стоя [8, 14]. Неблагоприятные последствия сниженного ударного объема компенсируются активацией симпатической нервной системы: повышением ЧСС и вазоконстрикторной реакцией периферических сосудов [13, 14], а также другими механизмами ауторегуляции церебрального кровотока [5, 8, 13, 14] и гормональными механизмами [12].

Низкая ортостатическая устойчивость часто ассоциируется с дефицитом вазоконстрикторного потенциала, что ведет к оттоку крови на периферию, ее задержке, падению тонуса сосудов и церебрального кровотока, в конечном итоге развитию предобморочного состояния [1, 4, 14]. Ортостатическая устойчивость у человека по мере роста физической работоспособности остается

полностью не изученной. Так, с одной стороны, имеются экспериментальные подтверждения точки зрения, что «спортсмен хорошо бежит, но плохо стоит в неподвижном положении» [4, 9, 10]. С другой стороны, получены положительные эффекты физической тренировки в повышении ортостатической устойчивости [7]. Целью нашей работы было исследовать связь между реакцией показателей центральной и периферической гемодинамики на тилт-тест с общей физической работоспособностью у здоровых испытуемых с разным уровнем физической тренированности. Мы полагаем, что у лиц с повышенной работоспособностью в ответ на тилт-тест степень снижения шейного кровотока, косвенного показателя мозгового кровотока, будет меньше, а степень снижения периферического кровотока в верхних и нижних конечностях или абдоминальном регионе туловища – больше.

Организация методы и исследования

Субъекты. В качестве испытуемых были обследованы молодые лица мужского пола ($n=59$, возраст: $22,4\pm 5,5$ лет) с разным уровнем физической подготовленности и с различной регулярностью занимающиеся спортом.

Методы. Для определения центральной и периферической гемодинамики использован «Анализатор гемодинамики импедансный» (НТЦ «Медасс»). В основе измерения лежит метод тетраполярной биоимпедансметрии. В анализаторе генерированный ток распределяется на 8 каналов по 125 Гц, что позволяет одновременно определять изменение импеданса в 6 регионах тела: в обеих руках («руки»), от подмышечной впадины до кистей рук), ногах («ноги»), от паха до щиколотки), шее («шея»), от основания шеи до височной области) и абдоминальной части туловища («абдом»), от мечевидного отростка до паха), а также определять ЭКГ в первом стандартном отведении. Для измерения импеданса использовались 5 пар (токовый и потенциальный) электродов, которые располагались на щиколотках, запястьях и висках. Измерения в необходимом отведении проводились с помощью автоматического переключения токовых и потенциальных электродов. Ударный объем крови оценивался стандартным тетраполярным методом по Кубичеку: измерением импеданса торакальной части туловища от мечевидного отростка до яремной ямки. Объемы крови за каждый кардиоцикл (за 60 сек) в измеряемом регионе рассчитывали по формуле Кубичека, учитывая антропометрические размеры региона, базовый импеданс, максимальную амплитуду первой производной реограммы во время систолы и константу электропроводности крови [3]. Полученные данные для центральной гемодинамики (ЦГД) представлены как ударный объем крови (УОК, мл) и минутный объем крови (МОК, л/мин). Для оценки периферической гемодинамики использовали пульсовый объем крови за кардиоцикл (ПОК, мл) и региональный объемный кровотока за минуту (РОК, мл/мин), равный произведению ПОК на ЧСС для каждого периферического региона. Данные для левых и правых рук и ног усреднялись.

Для оценки распределения объема крови рассчитывали отношение регионального объемного кровотока, поступающего в шейный регион (РОК_{шея}), к суммарному РОК в остальных периферических регионах: РОК_{шея}/периф (отн. ед.) = РОК_{шея} (мл) / (РОК_{руки} + РОК_{ноги} + РОК_{абдоминальный регион}) (мл). Данное отношение успешно использовалось для оценки распределения кровотока в пользу церебральных сосудов в ответ на тилт-тест в различных исследованиях [1].

Тилт-тест. Ортостатический стресс вызвали с помощью тилт-теста на самодельном орто-

столе с подставками для ног. Измерение показателей в положении лежа проводили через 5 мин отдыха в этом положении. Сначала измеряли периферические объемы крови (30 сек), затем – ударный объем крови (30 сек). Далее испытуемого пассивно переводили в положение стоя. Измерение показателей в ортоположении выполняли на 10 мин, то есть через 3 мин (7–9 мин) после перехода в это положение: сначала измеряли ударный объем крови (30 сек) и затем – периферические объемы крови (30 сек). В целом, тилт-тест продолжался 10 мин. Артериальное давление среднее (АДС) в плечевой артерии определяли в положениях лежа и стоя с помощью сфигмоманометра “Omron 907”.

Реакция показателей ЦГД и ПГД, выражалась в % и определялась по формуле: $\Delta(\text{Индекс}) = (\text{Индекс}_{\text{Стоя}} - \text{Индекс}_{\text{Лежа}}) * 100 / \text{Индекс}_{\text{Лежа}}$, где «Индекс» – показатель гемодинамики, Лежа и Стоя – значения «Индекса» в положениях лежа и стоя соответственно.

Физическую работоспособность определяли по индексу PWC140. Испытуемым предлагали выполнить ступенчато-возрастающую физическую нагрузку на велоэргометре “Kettler FX1” до ступени, при которой ЧСС достигнет 140 уд/мин, начиная с 50 Вт по 2 мин с шагом 30 Вт.

Статистика. Для выявления корреляционных связей между индексом PWC140 и реакциями показателей ЦГД и ПГД использовалась корреляция Пирсона, при $p < 0,05$ считали связь значимой. Для выявления независимых корреляций (r^2) между PWC140 и показателями центральной и периферической гемодинамики использовали множественный регрессионный анализ.

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты показывают (табл. 1), что индекс общей физической работоспособности PWC140 оказался корреляционно связан с реакцией на тилт-тест минутных объемов крови (РОК) в следующих регионах тела: шеи ($r=0,270$, $p=0,039$), абдоминальной части туловища ($r=-0,297$, $p=0,023$), нижних конечностях ($r=-0,340$, $p=0,008$, рис. 1) – с индексом РОК_{шея}/периф ($r=0,326$, $p=0,012$), а также центральным показателем кровотока – МОК ($r=0,269$, $p=0,039$).

Однако множественный регрессионный анализ аннулировал большинство связей и оставил статистически значимой только корреляцию с реакцией РОК_{ноги} ($r^2=-0,398$, $p=0,003$).

Таблица 1

Корреляционная связь между индексом общей физической работоспособности и реакцией показателей периферической и центральной гемодинамики у испытуемых (n=59)

	Корреляция Пирсона		Множественная регрессия	
	г	р	гβ	р
ΔУОК	-0,153	нд	-	
ΔЧСС	0,165	нд	-	
ΔПОКабдом	-0,247	0,059	-	
ΔПОКноги	-0,260	0,043	-	
ΔПОКруки	-0,112	нд	-	
ΔПОКшея	0,270	0,039	-	
ΔРОКшея	0,265	0,043	0,315	0,081
ΔРОКабдом	-0,297	0,023	-0,103	нд
ΔРОКноги	-0,340	0,008	-0,398	0,003
ΔРОКруки	-0,198	нд	-	
ΔРОКшея/периф	0,326	0,012	-	
ΔМОК	0,270	0,039	0,046	нд
ΔОПСС	0,112	нд	-	
ΔАДС	0,163	нд	-	

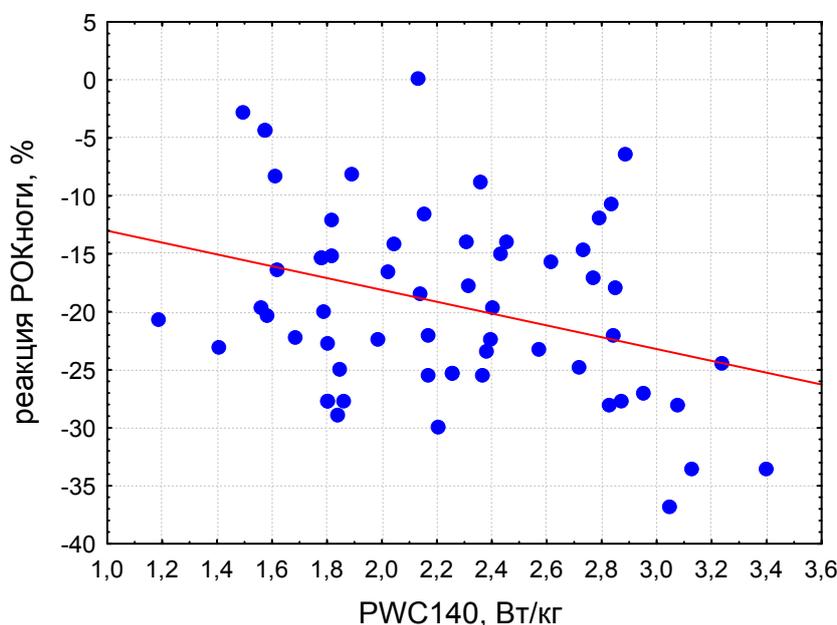


Рис. 1. Корреляция между реакцией РОК в нижних конечностях на тилт-тест и показателем общей работоспособности индексом PWC140 в общей группе обследованных лиц (n=59)

Таким образом, наши данные показывают, что у лиц с повышенной общей физической работоспособностью степень снижения кровотока в ответ на тилт-тест увеличивается главным образом в нижних конечностях, при этом минутный ре-

гиональный кровоток в шейном отделе в ответ на тилт-тест не только не снижается, но может даже увеличиваться. Кроме того, у испытуемых с повышенной работоспособностью в ответ на тилт-тест наблюдалось более выраженное увеличение

индекса распределения кровотока в сторону шейного региона – индекса РОК_{шейя/периф}. Эти результаты позволяют сделать вывод, что с ростом физической работоспособности развиваются механизмы поддержания шейного кровотока и повышения ортостатической устойчивости.

Отсутствие корреляции между реакцией УОК, ЧСС и даже положительная – с МОК в ответ на тилт-тест противоречит концепции снижения ортостатической устойчивости за счет более выраженного снижения УОК при ортостатическом стрессе у спортсменов с высокой аэробной работоспособностью [9, 10]. Вместе с тем эти же авторы [10] в своей работе указывают, что связь между максимальным потреблением кислорода и степенью снижения УОК в ответ на ортостатический стресс не является линейной, поскольку у тренированного организма развиваются механизмы, не только способствующие, но и препятствующие падению УОК. К ним можно отнести увеличение объема крови и плазмы, что приводит к росту венозного возврата крови к сердцу и снижает степень падения УОК при тилт-тесте [7].

В ответ на тилт-тест РОК во всех периферических регионах, кроме шейного, снижался, что может быть связано с повышением тонуса артериальных сосудов в этих регионах. Множественный анализ выявил, что характерная особенность лиц с повышенной работоспособностью – это более выраженное снижение кровотока в нижних конечностях в ответ на тилт-тест. То есть при переходе из положения лежа в ортоположение степень сужения артериальных сосудов в нижних конечностях была повышена у лиц с высокой работоспособностью, что, по-видимому, могло сохранять объем крови для его перераспределения в шейный регион. Также отрицательная связь реакции индекса РОК_{шейя/периф} с PWC140 при ортострессе, отражающая перераспределение кровотока в пользу шейного региона [1], указывает, что распределение сердечного выброса было более эффективным при повышении физической работоспособности. Хотя в некоторых источниках говорится об уменьшении вазоконстрикции при ортострессе в сосудах почек в результате физической тренировки [4], однако в других исследованиях в соответствии с нашими данными указывается на позитивный эффект физической тренировки в сохранении благоприятного для церебральной перфузии перераспределения кровотока, как раз за счет более существенного снижения кровотока в нижних конечностях и брюшной полости при ортострессе [1].

Среди предполагаемых механизмов повы-

шенной вазоконстрикции в периферических сосудах у лиц с повышенной работоспособностью можно выделить снижение чувствительности адренорецепторов сердца и центральных артерий. Анализ проблемы ортостатических обмороков указывает на важную роль чувствительности адренорецепторов сердца и сосудов в механизме развития вазовагальных обмороков [6]. Считается, что в ответ на ортостаз снижение венозного возврата и УОК активирует барорецепторы, а это усиливает активность симпатической нервной системы, которая, в свою очередь, вызывает рост частоты и силы сокращения сердца [13, 14]. При высокой чувствительности адренорецепторов усиление сокращений сердца оценивается его механорецепторами как избыточное, что рефлекторно (рефлекс Бецоляда – Яриша) снижает активность симпатической нервной системы и усиливает парасимпатическую активность. Это ведет к снижению тонуса сосудов, падению ЧСС и артериального давления, вызывая развитие вазовагальных обмороков. В таких случаях использование бета-адреноблокаторов является эффективным средством лечения обмороков [6]. Регулярная физическая тренировка вызывает снижение чувствительности бета-адренорецепторов сердца и других клеток в организме спортсменов [2], что может уменьшить тормозные влияния на симпатическую активность со стороны механорецепторов сердца. Другими словами, физическая тренировка может имитировать прием бета-адреноблокаторов и повышать вазоконстрикторную реакцию со стороны периферических сосудов, обеспечивая снижение кровотока в различных органах и повышая эффективность распределения сердечного выброса в сторону шейного региона при ортостатическом стрессе.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что у лиц с повышенной работоспособностью установлено более выраженное снижение кровотока в периферических сосудах, в наибольшей мере в нижних конечностях в ответ на тилт-тест, что может быть механизмом повышения эффективности распределения кровотока в сторону шейного региона при ортостатическом стрессе. Таким образом, повышенное снижение кровотока в нижних конечностях и обусловленный этим рост эффективности распределения кровотока может быть важным механизмом повышения ортостатической устойчивости при регулярной физической тренировке.

Библиографический список

1. Arbeille, P. Insufficient flow reduction during LBNP in both splanchnic and lower limb areas is associated with orthostatic intolerance after bedrest / P. Arbeille, P. Kerbeci, L. Mattar et al. // *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* - 2008. - V. 295. P. H1846–H1854.
2. Butler, J. Relationship of β -adrenoreceptor density to fitness in athletes / J. Butler, M. O'Drien, K. O'Malley, and J.G. Kelly // *Nature*. - 1982. - V. 298. - P. 60–62.
3. Ebert, T. J. Impedance cardiograms reliably estimate beat-by-beat changes of left ventricular stroke volume in humans / T. J. Ebert, D. L. Eckberg, G. M. Vetrovec, M.J. Cowley // *Cardiovasc. Res.* - 1984. - V. 18. - P. 354–360.
4. Erin, E. C. Endurance training reduces renal vasoconstriction to orthostatic stress / E. C. Erin, A. E. Fogelman, C. L. Sauder, and C. A. Ray // *Am. J. Physiol. Renal. Physiol.* - 2010. - V. 298. - P. F279–F284.
5. Lind-Holst, M. Cerebral autoregulation dynamics in endurance-trained individuals / M. Lind-Holst, J. D. Cotter, J. W. Helge // *J. Appl. Physiol.* - 2011. - V. 110. - P. 1327–1333.
6. Mahanonda, N. Randomized double-blind, placebo-controlled trial of oral atenolol in patients with unexplained syncope and positive upright tilt-table test results / N. Mahanonda, B. Kiertijai, C. Kangkagate // *Am. Heart. J.* - 1995. - V. 130. - P. 1250–1253.
7. Mtinangi, B. L. Effects of moderate exercise training on plasma volume, baroreceptor sensitivity and orthostatic tolerance in healthy subjects / B. L. Mtinangi, R. Hainsworth // *Exp. Physiology*. - 1999. - V. 84. - P. 121–130.
8. Ogoh, S. The effect of changes in cardiac output on middle cerebral artery mean blood velocity at rest and during exercise / S. Ogoh, R.M. Brothers, Q. Barnes, W. L. Eubank // *J. Physiol.* - 2005. - V. 569. - P. 697–704.
9. Ogoh, S. Carotid baroreflex responsiveness to head-up tilt-induced central hypovolaemia: effect of aerobic fitness / S. Ogoh, S. Volianitis, P. Nissen // *J. Physiol.* - 2003. - V. 551. - P. 601–608.
10. Raven, P. B. Chronic endurance exercise training: a condition of inadequate blood pressure regulation and reduced tolerance to LBNP / P. B. Raven, and J. A. Pawelczyk // *Med. Sci. Sports Exerc.* - 1993. - V. 25. - P. 713–721.
11. Smith, M. L. Blood pressure regulation during cardiac autonomic blockade: effect of fitness / M. L. Smith, D. L. Hudson, H. M. Graitzer, P. B. Raven // *J. Appl. Physiol.* - 1988. - V. 65. - P. 1789–1795.
12. Staegeger, C. Effects of angiotensin blockade on the splanchnic circulation in normotensive humans / C. Staegeger, B. Hesse, O. Henriksen, N. J. Christensen // *J. Appl. Physiol.* - 1989. - V. 67. - P. 786–791.
13. Stewart, J. M. Mechanisms of sympathetic regulation in orthostatic intolerance / J. M. Stewart // *J. Appl. Physiol.* - 2012. - V. 113. - P. 1659–1668.
14. Van Lieshout, J. J. Syncope, cerebral perfusion and oxygenation / J. J. Van Lieshout, W. Wieling, J. M. Karemaker // *J. Appl. Physiol.* - 2003. - V. 94. - P. 833–848.

Bibliograficheskij spisok

1. Arbeille, P. Insufficient flow reduction during LBNP in both splanchnic and lower limb areas is associated with orthostatic intolerance after bedrest / P. Arbeille, P. Kerbeci, L. Mattar et al. // *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* - 2008. - V. 295. P. H1846–H1854.
2. Butler, J. Relationship of β -adrenoreceptor density to fitness in athletes / J. Butler, M. O'Drien, K. O'Malley, and J.G. Kelly // *Nature*. - 1982. - V. 298. - P. 60–62.
3. Ebert, T. J. Impedance cardiograms reliably estimate beat-by-beat changes of left ventricular stroke volume in humans / T. J. Ebert, D. L. Eckberg, G. M. Vetrovec, M. J. Cowley // *Cardiovasc. Res.* - 1984. - V. 18. - P. 354–360.
4. Erin, E. C. Endurance training reduces renal vasoconstriction to orthostatic stress / E. C. Erin, A. E. Fogelman, C. L. Sauder, and C. A. Ray // *Am. J. Physiol. Renal. Physiol.* - 2010. - V. 298. - P. F279–F284.
5. Lind-Holst, M. Cerebral autoregulation dynamics in endurance-trained individuals / M. Lind-Holst, J. D. Cotter, J. W. Helge // *J. Appl. Physiol.* - 2011. - V. 110. - P. 1327–1333.
6. Mahanonda, N. Randomized double-blind, placebo-controlled trial of oral atenolol in patients with unexplained syncope and positive upright tilt-table test results, [Tekst] / N. Mahanonda, B. Kiertijai, C. Kangkagate // *Am. Heart. J.* - 1995. - V. 130. - P. 1250–1253.
7. Mtinangi, B. L. Effects of moderate exercise training on plasma volume, baroreceptor sensitivity and orthostatic tolerance in healthy subjects [Tekst] / B. L. Mtinangi, R. Hainsworth // *Exp. Physiology*. - 1999. - V. 84. - P. 121–130.
8. Ogoh, S. The effect of changes in cardiac output on middle cerebral artery mean blood velocity at rest and during exercise / S. Ogoh, R. M. Brothers, Q. Barnes, W. L. Eubank // *J. Physiol.* - 2005. - V. 569. - P. 697–704.
9. Ogoh, S. Carotid baroreflex responsiveness to head-up tilt-induced central hypovolaemia: effect of aerobic fitness / S. Ogoh, S. Volianitis, P. Nissen // *J. Physiol.* - 2003. - V. 551. - P. 601–608.
10. Raven, P. B. Chronic endurance exercise training: a condition of inadequate blood pressure regulation and reduced tolerance to LBNP / P. B. Raven, and J. A. Pawelczyk // *Med. Sci. Sports Exerc.* - 1993. - V. 25. - P. 713–721.
11. Smith, M. L. Blood pressure regulation during cardiac autonomic blockade: effect of fitness [Tekst] / M. L. Smith, D. L. Hudson, H. M. Graitzer, P. B. Raven // *J. Appl. Physiol.* - 1988. - V. 65. - P. 1789–1795.

12. Stadeager, C. Effects of angiotensin blockade on the splanchnic circulation in normotensive humans / C. Stadeager, B. Hesse, O. Henriksen, N. J. Christensen // J. Appl. Physiol. – 1989. – V. 67. – P. 786–791.

13. Stewart, J. M. Mechanisms of sympathetic regulation in orthostatic intolerance / J. M. Stewart // J. Appl. Physiol. – 2012. – V. 113. – P. 1659–1668.

14. Van Lieshout, J. J. Syncope, cerebral perfusion and oxygenation / J. J. Van Lieshout, W. Wieling, J. M. Karemaker // J. Appl. Physiol. – 2003. – V. 94. – P. 833–848.