

УДК 612.2

ПОСТУРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИЙ ДЫХАНИЯ НА ДОБАВОЧНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

**А.В. Миняева, Г.И. Морозов, М.Н. Петушков,
Я.Г. Золотухина, Р.А. Калашникова, К.Г. Кичатов,
Д.Е. Людоговская, Н.О. Орлова, В.И. Миняев**
Тверской государственной университет

У молодых мужчин изучены особенности реакций торакального и абдоминального компонентов системы дыхания на добавочное инспираторно-экспираторное сопротивление, обусловленные положением тела в пространстве (стоя и лежа на спине). Компенсаторная реакция на добавочное сопротивление – увеличение глубины дыхания на фоне уменьшения частоты, независимо от положения тела испытуемых, осуществляется за счет торакального компонента системы дыхания. Исходные вклады в дыхательный объем, соответствующие каждому положению тела, при дыхании с добавочным сопротивлением не изменяются. Обсуждаются возможные механизмы.

Ключевые слова: дыхание, добавочное сопротивление, компенсаторная реакция, адаптация, постральные особенности.

Введение. Спонтанная вентиляция легких у человека осуществляется с участием двух морфологически, функционально и регуляторно автономных мышечных групп – диафрагмы и межреберных. В связи с этим принято условно выделять торакальный (грудной) и абдоминальный (брюшной) компоненты системы дыхания как относительно самостоятельные части дыхательного аппарата, включающие центральный дыхательный механизм, эффекторы, афферентное звено [6; 10; 15; 14; 18]. Экспериментально доказано, что при спонтанном дыхании автономные механизмы саморегуляции на основании информации от механорецепторов дыхательного аппарата устанавливают энергетически оптимальное соотношение между глубиной и частотой дыхания [4], а также между торакальными и абдоминальными вкладами в дыхательный объем [11]. При вертикальном положении тела торакальный и абдоминальный компоненты аппарата дыхания, как правило, вносят практически одинаковые вклады в дыхательный объем. При горизонтальном положении больший вклад в объем вентиляции легких приходится на абдоминальный компонент. Причинами этих различий является изменение характера сопротивления, которое приходится преодолевать дыхательным мышцам в тех или иных условиях [2; 4; 7; 11].

При некоторых видах профессиональной деятельности, а также при респираторной патологии, вызванной нарушением бронхиальной

проходимости, дыхательные мышцы при осуществлении дыхательных движений вынуждены преодолевать дополнительное (добавочное) сопротивление, что априори должно сказываться на паттерне дыхания. Характерно, что при дыхании с добавочным инспираторно-экспираторным сопротивлением (в вертикальном положении) на фоне снижения частоты глубина дыхания компенсаторно увеличивается только за счет увеличения торакального вклада в дыхательный объем, абдоминальный вклад при этом практически не меняется [15].

Цель исследования – изучение особенностей реакций торакального и абдоминального компонентов системы дыхания человека на добавочное инспираторно-экспираторное сопротивление, обусловленных положением тела в пространстве.

Материал и методика. В исследовании в качестве испытуемых приняли участие 10 практически здоровых мужчин 18–25 лет, привычных к экспериментальной обстановке.

В первой серии в вертикальном положении (стоя) и во второй в горизонтальном положении (лежа на спине) испытуемые дышали через приспособление с дыхательным отверстием диаметром 3 мм, что обеспечивало колебания внутриротового давления в положении стоя от -114–168 мм вод. ст. на вдохе до +85–123 мм вод. ст. на выдохе и в положении лежа от -75–105 мм рт. ст. на вдохе до +62–86 мм рт. ст. на выдохе, в зависимости от индивидуальной объемной скорости вдоха и выдоха. Испытуемые дышали с добавочным сопротивлением на протяжении 6 мин. Данные величины сопротивления дыханию и время экспозиции были выбраны опытным путем с тем расчетом, чтобы исключить возможность существенного утомления дыхательных мышц, что могло бы сказаться на характере автономной регуляции дыхания в этих условиях.

С целью определения функционального состояния дыхательного аппарата непосредственно перед функциональной пробой и сразу после ее окончания с помощью пружинного манометра трижды определялись максимальные статические усилия дыхательных мышц при имитации вдоха ($P_{\max\text{вдох}}$, мм рт. ст.) и выдоха ($P_{\max\text{выдох}}$, мм рт. ст.); и с помощью пневмогазоанализатора MasterSkreen Capno (Германия) – форсированная жизненная емкость легких (FVC, л/с).

Для регистрации параметров вентиляции легких использовался автоматизированный метод безмасочной пневмографии [10]. Учитывались минутный объем вентиляции легких (\dot{V} , л/мин), его торакальная ($Th\dot{V}$, л/мин) и абдоминальная ($Ab\dot{V}$, л/мин) составляющие; объем вдоха (V_{TI} , мл), его торакальная (ThV_{TI} , мл) и абдоминальная (AbV_{TI} , мл) составляющие; частота дыхания (f , цикл/мин); время вдоха (T_I , с); время выдоха (T_E , с); время постэкспираторной паузы (T_P , с); объемная скорость вдоха (\bar{V}_I , мл/с),

объемная скорость торакальной ($\overline{Th \dot{V}_I}$, мл/с) и абдоминальной ($\overline{Ab \dot{V}_I}$, мл/с) составляющих вдоха; объемная скорость выдоха ($\overline{\dot{V}_E}$, мл/с), объемная скорость торакальной ($\overline{Th \dot{V}_E}$, мл/с) и абдоминальной ($\overline{Ab \dot{V}_E}$, мл/с) составляющих выдоха. Кроме того, регистрировались показатели газообмена – парциальное давление CO_2 в альвеолярном воздухе (P_aCO_2) – посредством малоинерционного капнографа ГУМ-2 и оксигенация артериальной крови (SaO_2) – посредством оксигемометра 057 с ушным фотометрическим датчиком.

Достоверность различий параметров оценивалась с использованием критерия Стьюдента для независимых и для сопряженных рядов, достоверность коэффициентов корреляции [9].

Результаты и обсуждение. Анализ результатов исследования (табл. 1–3, рис. 1–8) позволил выявить следующее.

Исходно силовые, объемно-скоростные параметры, характеризующие функциональное состояние дыхательного аппарата, а также объемные, скоростные и временные показатели спонтанного дыхания оказались близкими среднестатистическим [16] с выраженными поструральными особенностями [11].

Таблица 1

Силовые и скоростные параметры функционального состояния дыхательного аппарата до и после функциональной пробы – дыхание с добавочным инспираторно-экспираторным сопротивлением в положении стоя (1) и лежа (2) ($M \pm m$)

Параметры		До функциональной пробы	После функциональной пробы	$P <$
P_{\max} вдох, мм рт. ст.	1	84±5	86±5	–
	2	83±5	82±6	–
P_{\max} выдох, мм рт. ст.	1	105±9	105±8	–
	2	99±7	104±6	–
FVC, л	1	4,99±0,21	4,91±0,19	–
	2	4,75±0,20	4,84±0,22	–

Так, в вертикальном положении (стоя) торакальный компонент аппарата дыхания обеспечивает несколько больший вклад, чем абдоминальный, в объем вентиляции легких (\dot{V}) ($r=0,84$ при $P<0,01$) с выраженной положительной корреляционной зависимостью скорости вдоха и выдоха ($r=0,81$ и $0,84$ при $P<0,01$), дыхательного объема ($r=0,95$ при $P<0,01$) от торакальных их составляющих при отсутствии достоверных корреляций с абдоминальными составляющими скоростных и объемных параметров дыхания.

В положении лежа преобладающим становится вклад абдоминального компонента в объем вентиляции легких.

Таблица 2

Сравнительная характеристика динамики временных и скоростных параметров вентиляции легких в условиях дыхания с добавочным инспираторно-экспираторным сопротивлением в положении стоя (1) и лежа (2) ($M \pm m$)

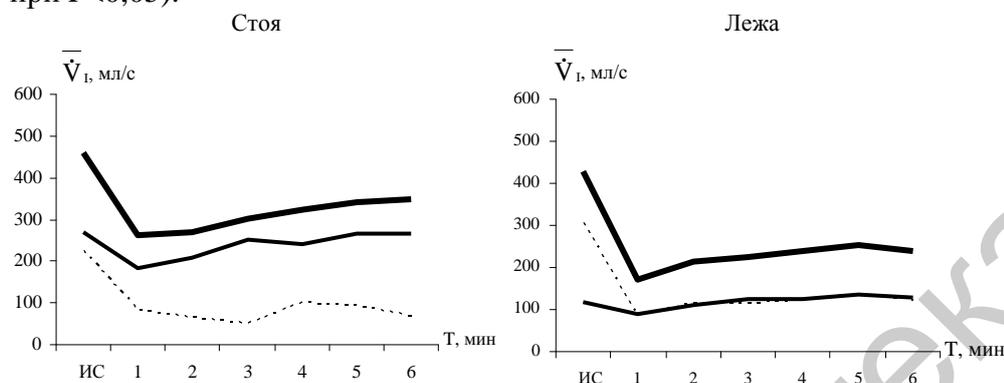
Параметры		Спонтанное дыхание	Дыхание с добавочным сопротивлением											
			1-я минута		2-я минута		3-я минута		4-я минута		5-я минута		6-я минута	
				P<		P<		P<		P<		P<		P<
\bar{V}_I , мл/с	1	460±50	262±30	0,05	270±27	0,01	303±39	0,05	323±69	0,01	343±56	0,05	350±48	0,01
	2	429±68	173±22**	0,01	213±28*	0,01	226±26*	0,01	239±30*	0,01	252±34*	0,05	241±29*	0,01
Th \bar{V}_I , м/с	1	270±48	184±27	–	208±29	0,01	253±41	–	267±47	–	266±39	–	267±43	–
	2	119±26**	88±17**	0,01	111±25**	–	126±21**	–	124±21*	–	134±21*	–	129±21*	–
Ab \bar{V}_I , мл/с	1	228±30	82±21	0,01	65±16	0,01	51±10	0,01	101±50	0,01	92±48	0,01	67±13	0,01
	2	308±46*	87±20	0,01	113±15**	0,01	116±22**	0,01	121±18	0,01	136±32*	0,01	122±22**	0,01
\bar{V}_E , мл/с	1	459±42	231±22	0,01	239±23	0,01	259±33	0,01	287±40	0,01	324±56	0,05	295±48	0,01
	2	357±39*	200±19	0,01	223±23*	0,01	223±33	0,01	250±31	0,05	239±24*	0,05	257±33	0,01
Th \bar{V}_E , мл/с	1	281±51	158±24	0,01	184±29	0,01	220±37	–	222±34	–	253±49	–	254±48	0,05
	2	94±25**	103±20*	–	123±25*	–	146±28*	–	143±28*	–	143±23*	–	142±24*	0,05
Ab \bar{V}_E , мл/с	1	209±23	76±15	0,01	60±9	0,01	42±9	0,01	64±18	0,01	77±22	0,01	51±9	0,01
	2	278±34*	97±14	0,01	111±16**	0,01	98±15**	0,01	115±16**	0,01	123±22*	0,01	110±15**	0,01
T _I , с	1	1,88±0,19	7,21±1,50	0,01	7,39±1,61	0,01	6,81±1,33	0,01	6,21±1,14	0,01	6,06±1,08	0,01	6,00±1,47	0,01
	2	1,68±0,15	7,30±1,37	0,01	6,90±1,38	0,01	6,52±1,35	0,01	6,65±1,45	0,01	7,16±2,18	0,01	6,44±1,81	0,01
T _E , с	1	1,91±0,16	7,69±1,32	0,01	7,53±1,30	0,01	7,95±1,63	0,01	6,83±1,39	0,01	6,55±1,31	0,01	6,21±1,17	0,01
	2	1,94±0,15	6,64±1,19	0,01	6,50±1,29	0,01	6,44±1,39	0,01	5,74±0,97	0,01	6,46±1,40	0,01	5,70±1,29	0,01
T _P , с	1	0,26±0,04	0,22±0,07	–	0,33±0,07	–	0,15±0,03	–	0,20±0,03	–	0,20±0,04	–	0,16±0,04	–
	2	0,31±0,06	0,33±0,08	–	0,25±0,07	–	0,23±0,06	–	0,27±0,08	–	0,24±0,04	–	0,23±0,06	–
f, цикл/мин	1	15,7±1,3	5,9±1,7	0,01	5,5±1,2	0,01	5,8±1,3	0,01	6,4±1,5	0,01	6,6±1,6	0,01	6,9±1,5	0,01
	2	15,9±1,1	6,0±1,4	0,01	6,0±1,2	0,01	6,1±1,2	0,01	6,5±1,3	0,01	6,5±1,3	0,01	6,8±1,2	0,01

Примечание. На данной и следующей таблицах степень достоверности различий параметров в положении стоя и лежа: * – P<0,05, ** P<0,01.

Сравнительная характеристика динамики параметров газообмена и вентиляции легких в условиях дыхания с добавочным инспираторно-экспираторным сопротивлением в положении стоя (1) и лежа (2) ($M \pm m$)

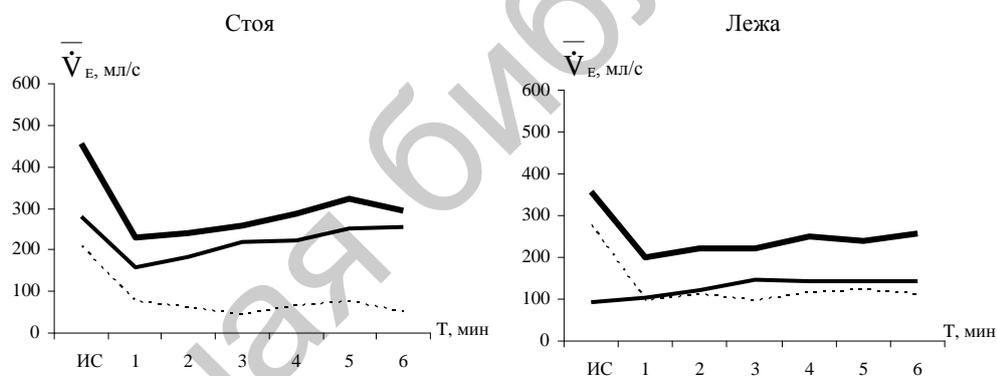
Параметры		Спонтанное дыхание	Дыхание с добавочным сопротивлением											
			1-я минута		2-я минута		3-я минута		4-я минута		5-я минута		6-я минута	
				P<		P<		P<		P<		P<		P<
V _T , мл	1	816±67	1668±319	0,05	1727±318	0,01	1872±380	0,05	1882±359	0,01	1812±311	0,01	1695±269	0,01
	2	679±81	1234±258	0,05	1425±323	0,05	1437±369	0,01	1474±339	0,05	1582±388	0,05	1368±257	0,05
ThV _T , мл	1	455±85	1247±345	0,05	1351±327	0,01	1569±376	0,01	1554±372	0,01	1495±324	0,01	1350±250	0,01
	2	178±36**	641±157*	0,01	797±262*	0,01	828±293*	0,01	830±266*	0,01	904±271*	0,01	755±171*	0,01
ThV _T /V _T (%)	1	52,2±5,8	68,7±6,4	0,05	75,4±6,6	0,05	81,1±4,9	0,01	80,2±6,0	0,01	82,5±6,9	0,01	79,6±4,8	0,01
	2	26,2±4,3**	52,5±10,2	0,05	55,9±7,8*	0,01	57,6±7,4*	0,01	56,3±5,8*	0,01	57,1±6,7*	0,01	55,2±5,4*	0,01
Ab V _T , мл	1	361±29	421±103	–	375±88	–	303±75	–	328±75	–	318±97	–	345±79	–
	2	501±66**	586±158	–	628±101*	–	609±117*	–	644±104*	–	678±160*	–	613±131*	–
Ab V _T /V _T (%)	1	47,5±5,8	31,3±6,4	0,05	24,6±6,6	0,05	18,9±4,9	0,01	19,8±6,0	0,01	17,5±6,9	0,01	20,4±4,8	0,01
	2	73,8±4,3**	47,5±10,2*	0,05	44,1±7,8**	0,01	42,4±7,4**	0,01	43,7±5,8*	0,01	42,9±6,7*	0,01	44,8±5,4*	0,01
f, цикл/мин	1	15,7±1,3	5,9±1,7	0,01	5,5±1,2	0,01	5,8±1,3	0,01	6,4±1,5	0,01	6,6±1,6	0,01	6,9±1,5	0,01
	2	15,9±1,1	6,0±1,4	0,01	6,0±1,2	0,01	6,1±1,2	0,01	6,5±1,3	0,01	6,5±1,3	0,01	6,8±1,2	0,01
V̇, л/мин	1	12,5±1,1	7,0±0,6	0,01	7,4±0,6	0,01	8,1±1,0	0,05	10,1±2,1	0,05	9,8±1,5	0,05	9,4±1,1	0,05
	2	10,5±1,1*	5,1±0,6*	0,01	6,3±0,7	0,01	6,4±0,7	0,01	7,0±0,8*	0,01	7,2±0,8*	0,05	7,2±0,8*	0,05
Th V̇, л/мин	1	6,8±1,2	4,9±0,7	–	5,5±0,8	–	6,7±1,0	–	7,8±1,7	–	7,6±1,3	–	7,6±1,2	–
	2	2,8±0,6**	2,6±0,4**	–	3,2±0,7*	–	3,5±0,6**	–	3,7±0,6**	–	3,8±0,6**	–	3,9±0,6**	–
Ab V̇, л/мин	1	5,7±0,6	2,0±0,4	0,01	1,8±0,4	0,01	1,3±0,2	0,01	2,3±0,8	0,01	2,1±0,9	0,01	1,7±0,2	0,01
	2	7,7±0,9*	2,4±0,5	0,01	3,0±0,3*	0,01	2,8±0,4*	0,01	3,3±0,3	0,01	3,3±0,6	0,01	3,3±0,5*	0,01
S _A O ₂ , %	1	96,0±0,0	94,0±0,5	0,01	92,7±0,7	0,01	92,2±1,0	0,01	91,7±1,4	0,01	91,1±1,6	0,01	90,1±2,4	0,01
	2	96,0±0,0	94,4±0,5	–	94,0±0,7	0,05	93,8±0,5	0,05	93,4±0,5	0,05	93,0±0,6	0,01	92,8±0,7	0,01
P _A CO ₂ , мм рт. ст.	1	30,5±2,6	40,5±2,2	0,01	42,5±2,2	0,01	44,7±1,8	0,01	42,6±2,4	0,01	43,4±1,8	0,01	43,2±2,9	0,01
	2	32,8±2,4	44,6±2,5	0,01	45,4±2,2	0,01	45,6±2,1	0,01	45,5±2,0	0,01	46,0±2,0	0,01	45,8±2,1	0,01

Об этом свидетельствует высокая степень корреляционной зависимости объема вентиляции (\dot{V}) ($r=0,84$ при $P<0,01$), скорости вдоха (\bar{V}_I) и выдоха (\bar{V}_E) ($P=0,94$ при $P<0,01$ и $0,66$ при $P<0,05$), дыхательного объема (V_T) ($r=0,90$ при $P<0,01$) от абдоминальных их составляющих при наличии несколько менее выраженной корреляционной зависимости скоростных и объемных параметров от их торакальных составляющих (соответственно $r=0,60$; $0,66$; $0,76$; $0,60$ при $P<0,05$).



Р и с . 1. Сравнительная характеристика динамики объемной скорости вдоха в условиях дыхания с добавочным сопротивлением в положении стоя и лежа:

жирная линия – скорость вдоха; тонкая – скорость торакальной ($Th \bar{V}_I$),
штриховая – скорость абдоминальной ($Ab \bar{V}_I$) составляющих вдоха,
по оси ординат – скорость вдоха (\bar{V}_I), мл/с;
по оси абсцисс – исходное состояние (ИС), Т (1–6) – время экспозиции, мин



Р и с . 2. Сравнительная характеристика динамики объемной скорости выдоха в условиях дыхания с добавочным сопротивлением в положении стоя и лежа:

жирная линия – скорость выдоха, тонкая – скорость торакальной ($Th \bar{V}_I$),
штриховая – скорость абдоминальной ($Ab \bar{V}_I$) составляющих выдоха,
по оси ординат – скорость выдоха (\bar{V}_I), мл/с;
по оси абсцисс – исходное состояние (ИС), Т (1–6) – время экспозиции, мин

Временная структура дыхательного цикла в том и другом случае соответствует литературным данным для спонтанного дыхания: вдох несколько короче выдоха, у всех испытуемых отмечалась постэкспираторная пауза [3; 4; 10].

В вертикальном положении переключение испытуемых на дыхание с добавочным сопротивлением сразу сопровождается существенным снижением объемной скорости вдоха (\bar{V}_I) и выдоха (\bar{V}_E), в основном, за счет уменьшения скорости абдоминальных ($Ab\bar{V}_I$ и $Ab\bar{V}_E$) их составляющих. Уменьшение скорости торакальной составляющей вдоха ($Th\bar{V}_I$) значительно менее выражено и статистически недостоверно. В этих условиях, как и в исходном состоянии, скорость вдоха (\bar{V}_I) и выдоха (\bar{V}_E) корреляционно зависит только от скорости торакальных дыхательных движений ($r=0,75$ и $0,82$ при $P<0,01$). В результате трехкратного увеличения времени вдоха (T_I) и выдоха (T_E) существенно уменьшается частота дыхания (f). Уменьшение частоты дыхания испытуемых сопровождается увеличением дыхательного объема (V_T) – только за счет торакальной его составляющей (ThV_T) ($r=0,96$ при $P<0,01$). Увеличение абдоминальной составляющей дыхательного объема (AbV_T) при этом значительно менее выражено, что приводит к статистически достоверному увеличению торакального вклада ($ThV_T, \%$) в дыхательный объем и уменьшению абдоминального ($AbV_T, \%$).

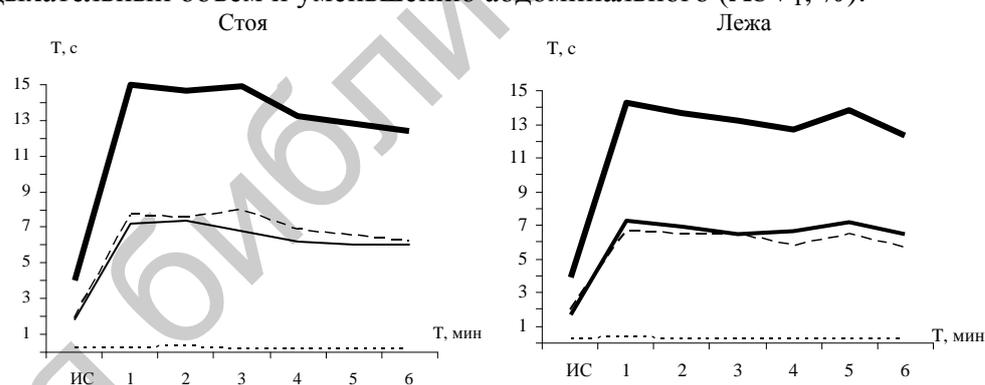
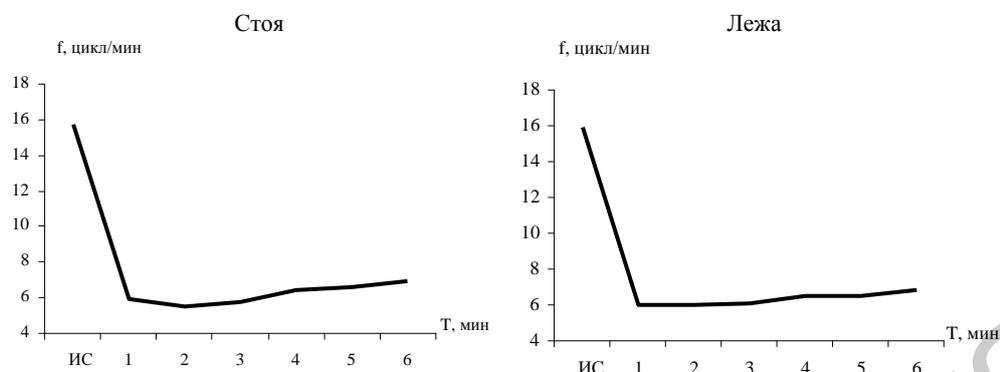


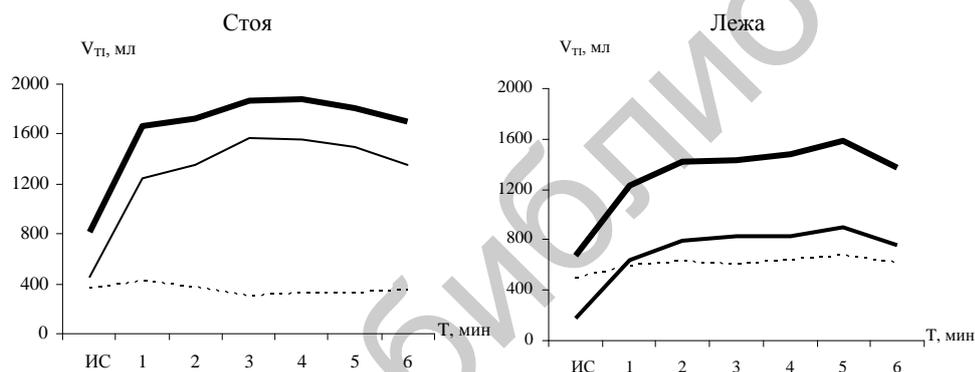
Рис. 3. Сравнительная характеристика динамики временных параметров дыхательного цикла в условиях дыхания с добавочным сопротивлением в положении стоя и лежа: жирные линии – время дыхательного цикла, тонкие – время вдоха, штриховые – время выдоха, пунктирные – время постэкспираторной паузы, по оси ординат – время (Т), с; по оси абсцисс – исходное состояние (ИС), Т (1–6) – время экспозиции, мин

Значительное увеличение глубины дыхания на 1-й мин функциональной пробы не компенсирует более существенное уменьшение его частоты, вследствие чего минутный объем вентиляции

легких (\dot{V}) уменьшается за счет абдоминальной его составляющей ($Ab \dot{V}$) при выраженной корреляционной зависимости объема вентиляции от его торакальной составляющей ($Th \dot{V}$) ($r=0,82$ при $P<0,01$).



Р и с . 4 . Сравнительная характеристика динамики частоты дыхания в условиях дыхания с добавочным инспираторно-экспираторным сопротивлением в положении стоя и лежа: по оси ординат – частота дыхания (f), цикл/мин, по оси абсцисс – исходное состояние (ИС), Т (1–6) – время экспозиции, мин



Р и с . 5 . Сравнительная характеристика динамики дыхательного объема в условиях дыхания с добавочным сопротивлением в положении стоя и лежа: жирные линии – дыхательный объем, тонкие – торакальная, штриховые – абдоминальная его составляющие, по оси ординат – дыхательный объем (V_T), мл, по оси абсцисс – исходное состояние (ИС), Т (1–6) – время экспозиции, мин

В горизонтальном положении дыхание с добавочным инспираторно-экспираторным сопротивлением сопровождается аналогичной, как и в вертикальном положении, реакцией. При этом снижение объемной скорости вдоха (\bar{V}_I) и выдоха (\bar{V}_E) еще более выражено, чем в вертикальном положении, опять-таки за счет

уменьшения абдоминальных ($Ab \bar{V}_I$ и $Ab \bar{V}_E$) их составляющих, что подтверждается уменьшением корреляционной зависимости между ними (соответственно, $r=0,72$ при $P<0,05$ и $0,14$ при $P>0,05$). Скорость торакальных составляющих вдоха ($Th \bar{V}_I$) и выдоха ($Th \bar{V}_E$) при этом практически не изменяется. Дыхание становится столь же редким, но менее глубоким, чем в положении стоя. Дыхательный объем (V_T) увеличивается в значительно большей степени за счет торакальной его составляющей ($Th V_T$) ($r=0,81$ при $P<0,01$). Увеличение абдоминальной составляющей дыхательного объема ($Ab V_T$) при этом значительно менее выражено. В данном случае увеличение глубины дыхания не компенсирует более существенного уменьшения его частоты (f), и в результате минутный объем вентиляции (\dot{V}) уменьшается в большей степени, чем в положении стоя, только за счет уменьшения абдоминальной ($Ab \dot{V}$) его составляющей. Торакальная составляющая ($Th \dot{V}$) минутного объема дыхания практически не изменяется.

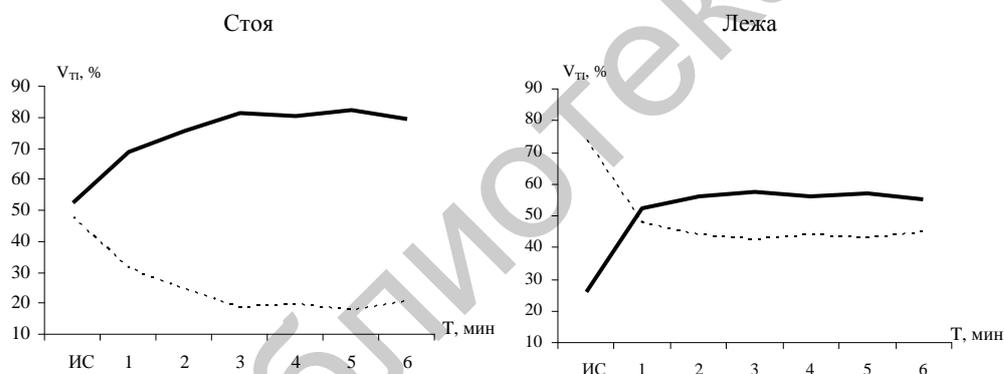


Рис. 6. Сравнительная характеристика динамики торакального и абдоминального вкладов в дыхательный объем (%) в условиях дыхания с добавочным сопротивлением в положении стоя и лежа: сплошная линия – торакальный, штриховая – абдоминальный вклад в дыхательный объем (%), по оси абсцисс – исходное состояние (ИС), Т (1–6) – время экспозиции, мин

Отмеченная в обоих случаях гиповентиляция на фоне усиленной работы инспираторных и экспираторных мышц, преодолевающих добавочное сопротивление, сопровождается тенденцией к снижению оксигенации артериальной крови (SaO_2) и увеличению парциального давления двуокиси углерода в альвеолярном воздухе ($PaCO_2$), несколько более выраженному в положении лежа.

В процессе дыхания с добавочным сопротивлением в вертикальном положении (к 6-й мин) объемная скорость вдоха (\bar{V}_I) у испытуемых постепенно увеличивается, относительно 1-й минуты, в основном за счет увеличения скорости торакальной составляющей

вдоха (\overline{V}_{I}) ($r=0,88$ при $P<0,01$), но не достигает исходных величин. Объемная скорость нагруженного выдоха (\overline{V}_{E}) при этом увеличивается также за счет увеличения скорости торакальной составляющей выдоха (\overline{V}_{E}^{T}) ($r=0,98$ при $P<0,01$). Время вдоха (T_I) и выдоха (T_E) несколько уменьшается. В результате частота дыхания (f) имеет тенденцию к увеличению, но остается значительно меньше исходной. Глубина дыхания в процессе функциональной пробы практически не меняется на фоне увеличения торакального вклада в дыхательный объем (ThV_T) ($r=0,96$ при $P<0,01$) и уменьшения абдоминального (AbV_T). На всем протяжении функциональной пробы минутный объем вентиляции легких (\dot{V}) остается существенно меньше исходных величин с тенденцией к некоторому увеличению при высокой положительной корреляционной зависимости от торакального вклада ($Th \dot{V}$) ($r=0,97$ при $P<0,01$).

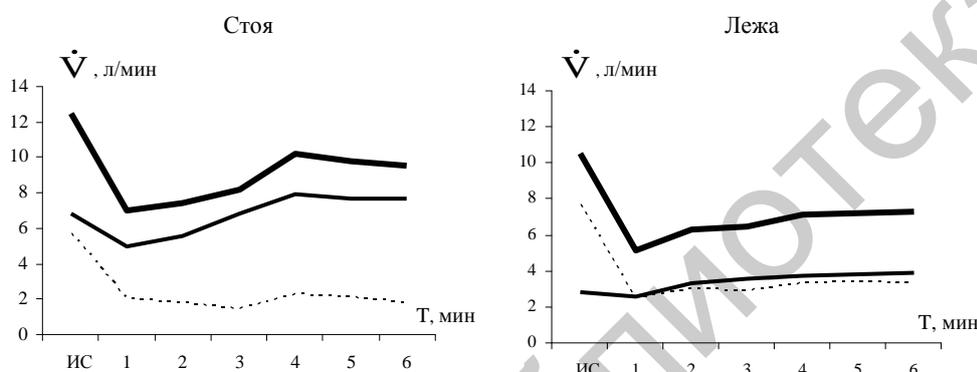
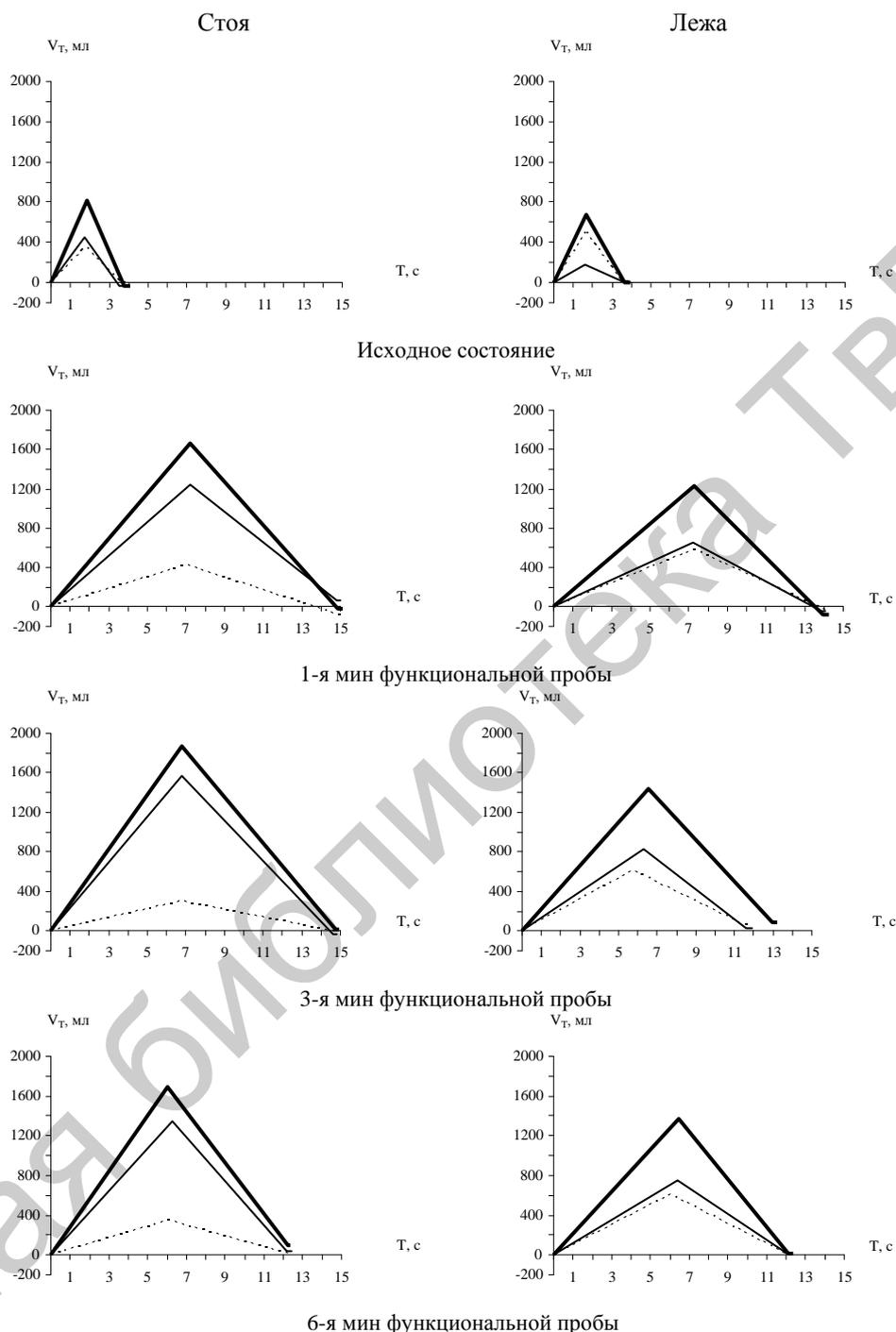


Рис. 7. Сравнительная характеристика динамики минутного объема вентиляции легких в условиях дыхания с добавочным сопротивлением в положении стоя и лежа: жирные линии – минутный объем дыхания, тонкая – торакальная, штриховая – абдоминальная его составляющие, по оси ординат – минутный объем вентиляции (\dot{V}) л/мин, по оси абсцисс – исходное состояние (ИС), Т (1–6) – время экспозиции, мин

В процессе дыхания с добавочным сопротивлением в положении лежа (к 6-й мин) объемная скорость вдоха (\overline{V}_{I}) относительно 1-й минуты увеличивается в гораздо меньшей степени, чем в положении стоя за счет тенденции к синхронному увеличению скорости торакальной ($Th \overline{V}_{I}$) и абдоминальной ($Ab \overline{V}_{I}$) составляющих вдоха, и также не достигает исходных величин. При этом отмечается увеличение корреляционной зависимости скорости вдоха от скорости торакальной ($r=0,78$, $P<0,05$) и абдоминальной ($r=0,72$, $P<0,05$) его составляющих.



Р и с . 8. Изменения объемно-временной структуры дыхательного цикла в условиях дыхания с добавочным сопротивлением в положении стоя и лежа: жирная линия – дыхательный цикл, тонкая – торакальная, штриховая – абдоминальная его составляющие, по оси ординат – дыхательный объем, мл; по оси абсцисс – время, с

Объемная скорость нагруженного выдоха (\bar{V}_E) при этом увеличивается в той же степени, что и в вертикальном положении. Частота дыхания (f) при этом остается значительно меньше исходной. Величина дыхательного объема (V_T) в процессе дыхания с добавочным сопротивлением практически не меняется с некоторой тенденцией к уменьшению при положительной корреляционной зависимости от торакальной (ThV_T) ($r=0,89$ при $P<0,01$) и абдоминальной (AbV_T) ($r=0,80$ при $P<0,01$) его составляющих. На всем протяжении функциональной пробы минутный объем вентиляции легких (\dot{V}), как и в положении стоя, остается существенно меньше исходных величин с тенденцией к некоторому увеличению при положительной корреляционной зависимости от торакальной ($Th\dot{V}$) ($r=0,81$ при $P<0,01$) и абдоминальной ($Ab\dot{V}$) ($r=0,70$ при $P<0,05$) его составляющих.

При этом в обоих случаях тенденция к снижению оксигенации артериальной крови и увеличению парциального давления CO_2 в альвеолярном газе сохраняется.

Сразу после окончания функциональных проб с дыханием при добавочном сопротивлении показатели статических усилий дыхательных мышц на вдохе и на выдохе, а также параметры форсированного выдоха испытуемых практически не изменяются, что свидетельствовало об отсутствии утомления дыхательных мышц и нарушений бронхиальной проходимости.

Заключение. В положении стоя при спонтанной вентиляции легких испытуемых в равной степени используются торакальный и абдоминальный компоненты дыхательного аппарата, в горизонтальном положении вентиляция легких осуществляется в большей степени за счет абдоминального вклада в дыхательный объем, что согласуется с данными, полученными ранее [11; 13]. По всей вероятности, причинами различий между соотношениями торакальных и абдоминальных вкладов в дыхательный объем в вертикальном и горизонтальном положениях тела является различие характера сопротивления дыханию вследствие изменения баланса упругих и эластических сил, связанные с направлением силы тяжести, действующей на органы грудной и брюшной полостей, а также разная степень пространственного ограничения их подвижности относительно друг друга [2; 4; 11; 14]. Не исключено влияние на соотношение торакальных и абдоминальных вкладов в дыхательный объем при различных положениях тела и гравитационного перераспределения крови (и других жидкостей) в органах грудной и брюшной полостей, что также может сказываться на характере сопротивления дыханию [5; 8; 16].

При вертикальном положении тела испытуемых начальная реакция системы дыхания на добавочное инспираторно-экспираторное сопротивление воздушному потоку (компенсаторное увеличение глубины на фоне уменьшения частоты дыхания) и кратковременная

адаптация к этому воздействию осуществляется в основном за счет торакального компонента системы дыхания, эффекторами которого являются межреберные мышцы с хорошо развитым проприоцептивным аппаратом, обеспечивающим эффективную обратную связь.

По мнению Н.П. Александровой [2; 15], обоснованному результатами исследований на животных, механизм компенсаторной реакции межреберных мышц на добавочное сопротивление воздушному потоку может быть следующим: увеличение сопротивления дыханию ограничивает укорочение экстрафузальных волокон; в результате происходит рассогласование между длиной экстра- и интрафузальных волокон, что усиливает γ -афферентную активность веретен, которая вызывает добавочное увеличение α -мотонейронной активности, а соответственно, и силы сокращений межреберных мышц.

Поведение абдоминального компонента системы дыхания, эффекторами которого являются диафрагма и экспираторные мышцы брюшного пресса с плохо развитым проприоцептивным аппаратом [7], неспособным обеспечить эффективную обратную связь, в этих условиях практически не меняется – исходная величина абдоминального вклада в дыхательный объем сохраняется на протяжении всей функциональной пробы с добавочным сопротивлением.

При горизонтальном положении тела испытуемых в условиях дыхания с добавочным инспираторно-экспираторным сопротивлением увеличение дыхательного объема осуществляется, как и в вертикальном положении, за счет торакальной его составляющей. Однако вентиляцию легких в этих условиях в равной степени обеспечивают торакальный и абдоминальный компоненты системы дыхания, поскольку более значительный исходный абдоминальный вклад в дыхательный объем, соответствующий данному положению тела, сохраняется на всем протяжении функциональной пробы с добавочным сопротивлением.

Таким образом, при добавочном инспираторно-экспираторном сопротивлении автономные механизмы регуляции дыхания на основании афферентной информации о механическом состоянии дыхательного аппарата четко координируют работу межреберных мышц (с учетом постуральных особенностей поведения диафрагмы) и тем самым обеспечивают оптимальный для конкретных условий объем вентиляции легких, в результате чего предотвращаются серьезные нарушения газового гомеостаза организма. Следует отметить аналогичность постуральных особенностей поведения торакального и абдоминального компонентов системы дыхания в условиях добавочного инспираторно-экспираторного сопротивления и при произвольном (заданном) увеличении спонтанного дыхательного объема [12]. Это позволяет допустить участие в адаптации системы дыхания к добавочному сопротивлению и механизмов произвольного управления дыхательными движениями.

Список литературы

1. *Александрова Н.П.* Координация дыхательных мышц в реализации компенсаторных реакций дыхательной системы // Вопросы экспериментальной и клинической физиологии дыхания. Тверь, 2007. С. 3–15.
2. *Баранов В.М.* Газоэнергообмен человека в космическом полете и модельных исследованиях. М.: Наука, 1993. 126 с.
3. *Блохин И.П.* Фазовый анализ дыхательного акта // Физиол. журн. СССР. 1980. Т. 65, № 12. С. 1783–1789.
4. *Бреслав И.С.* Паттерны дыхания. Л.: Наука, 1984. 208 с.
5. *Дворецкий Д.П.* Вентиляция, кровообращение и газообмен в легких // Физиология дыхания. Основы современной физиологии. СПб.: Наука, 1994. С. 197–257.
6. *Дьяченко А.И., Миняев В.И., Миняева А.В.* Методы исследования торакального и абдоминального компонентов системы дыхания в вентиляции легких // Вестн. Твер. гос. ун-та. Сер. Биология и экология. 2007. Вып. 6, № 22 (50). С. 15–21.
7. *Исаев Г.Г.* Физиология дыхательных мышц // Физиология дыхания. Основы современной физиологии. СПб.: Наука, 1994. С. 178–196.
8. *Котов А.Н., Миняев В.И., Миняева А.В., Тихонов А.М., Баранов В.М.* Зависимость соотношений торакальных и абдоминальных составляющих параметров дыхания от положения тела относительно вектора гравитации // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2002. Т. 36, № 1. С. 16–20.
9. *Лакин Г.Ф.* Биометрия. М.: Высшая школа, 1973. 342 с.
10. *Миняев В.И., Гречишкин Р.М., Миняева А.В., Мухин И.А., Селянкина Л.А.* Особенности реакций брюшного и грудного компонентов дыхания на прогрессирующую гиперкапнию // Физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 1993. Т. 79, № 12. С. 74–78.
11. *Миняев В.И., Миняева А.В.* Зависимость соотношения и степени использования торакального и абдоминального дыхательных резервов от положения // Физиология человека. 1998. Т. 24, № 5. С. 11–15.
12. *Миняев В.И., Давыдов В.Г.* Роль торакального и абдоминального компонентов системы дыхания при гипервентиляции на фоне хеморецепторной стимуляции различной интенсивности // Физиология человека. 2000. Т. 26, № 4. С. 83–87.
13. *Миняев В.И., Золотухина Я.Г.* Особенности реакций торакального и абдоминального компонентов системы дыхания на добавочное резистивное сопротивление // Вестн. Твер. гос. ун-та. Сер. Биология и экология. 2009. Вып. 12, № 6. С. 10–16.
14. *Миняев В.И., Визирь Я.Г., Давыдов В.Г., Калашикова Р.А., Маркова К.Б., Миняева А.В., Морозов Г.И., Петушков М.Н., Саакян С.А., Чапоров В.Н., Шляпников М.Ф.* Особенности регуляции дыхания и произвольного управления дыхательными движениями при различных функциональных нагрузках // Вопросы экспериментальной и клинической физиологии дыхания. Тверь, 2007. С. 139–149.
15. *Миняев В.И., Миняева А.В., Морозов Г.И., Маркова К.Б., Петушков М.Н., Золотухина Я.Г., Дуля Е.А., Некрасова С.Б., Орехова А.В., Фокина Е.В.*

- Роль торакального и абдоминального компонентов дыхательного аппарата в компенсаторной реакции и адаптации дыхания к добавочному сопротивлению // Вестн. Твер. гос. ун-та. Сер. Биология и экология. 2010. Вып. 17, № 16. С. 16–25.
16. *Уест Дж.* Основы физиологии дыхания. М.: Мир, 1988. 198 с.
17. *Aleksandrova N.P., Isaev G.G., Goloubeva E.V.* Mechanisms of genioglossus responses to inspiratory resistive load in rabbits // *Acta Physiol. Scand.* 2002. Vol. 175, № 3. P. 253–260.
18. *Konno K., Mead J.* Measurement of the separate volume changes of rib cage and abdomen during breathing // *J. Appl. Physiol.* 1967. Vol. 22, № 3. P. 407–422.

POSTURAL FEATURES OF RESPIRATORY REACTION TO ADDITIONAL RESISTANCE

**A.V. Minyaeva, G.I. Morozov, M.N. Petushkov, Y.G. Zolotukhina,
R.A. Kalashnikova, K.G. Kichatov, D.E. Lyudogovskaya, N.O. Orlova,
V.I. Minyaev**
Tver State University, Tver

Об авторах:

МИНЯЕВА Арина Владимировна – кандидат биологических наук, доцент кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ГОУ ВПО «Тверской государственный университет», e-mail: physiol@tversu.ru

МОРОЗОВ Глеб Игоревич – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ГОУ ВПО «Тверской государственный университет», e-mail: physiol@tversu.ru

ПЕТУШКОВ Михаил Николаевич – кандидат биологических наук, доцент кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ГОУ ВПО «Тверской государственный университет», e-mail: physiol@tversu.ru

ЗОЛОТУХИНА Яна Георгиевна – аспирант кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ГОУ ВПО «Тверской государственный университет», e-mail: physiol@tversu.ru

КАЛАШНИКОВА Римма Алексеевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ГОУ ВПО «Тверской государственный университет», e-mail: physiol@tversu.ru

КИЧАТОВ Кирилл Германович – аспирант кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ГОУ ВПО «Тверской государственный университет», e-mail: physiol@tversu.ru

ЛЮДОГОВСКАЯ Дарья Евгеньевна – аспирант кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ГОУ ВПО «Тверской государственный университет», e-mail: physiol@tversu.ru

ОРЛОВА Надежда Олеговна – аспирант кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ГОУ ВПО «Тверской государственный университет», e-mail: physiol@tversu.ru

МИНЯЕВ Владимир Иванович – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой анатомии и физиологии человека и животных, ГОУ ВПО «Тверской государственный университет», e-mail: physiol@tversu.ru