

Выбор биомеханической модели для прикладного анализа техники физических упражнений

Г.Б. Шацкий, В.Г. Шпак

Учреждение образования «Витебский государственный университет им. П.М. Машерова»

Статья посвящена решению актуальной задачи – повышению доступности объективных методов биомеханического контроля техники физических упражнений. Экспериментально установлено, что при определении некоторых биомеханических характеристик тела человека результаты, полученные с использованием 14-звенной схемы тела в сочетании с усредненной геометрией масс тела, незначительно отличаются от результатов, полученных с использованием 16-звенной схемы и соответствующих ей моделей геометрии масс. Однако применение 16-звенной схемы часто сопряжено с большими техническими и методическими трудностями. Следовательно, 14-звенная схема тела и усредненная геометрия масс тела могут использоваться не только в учебном процессе по биомеханике физических упражнений, но и для прикладного анализа спортивной техники.

Ключевые слова: биомеханическая модель, геометрия масс тела, прикладной биомеханический анализ.

Choice of biomechanical model for the applied analysis of technique of physical exercises

G.B. Shatsky, V.G. Shpak

Educational establishment «Vitebsk State University named after P.M. Masherov»

Article is devoted to the solution of a current problem – to increase the availability of objective methods of biomechanical control of physical exercises technique. It is experimentally established that while defining some biomechanical characteristics of a human body, the results received with the use of the 14-unit scheme of a body in combination with average geometry of body weights, slightly differ from the results received with the use of the 16-unit scheme and corresponding to it models of geometry of weights. However application of the 16-unit scheme is often interfaced with big technical and methodical difficulties. Hence, the 14-unit scheme of a body and averaged geometry of body weights can be used not only in educational process on the biomechanics of physical exercises, but also for the applied analysis of sport technique.

Key words: biomechanical model, geometry of weights, the applied biomechanical analysis.

К биомеханическим методам исследования предъявляются два основных требования: степень точности измерений обязана соответствовать цели исследования; метод и аппаратура не должны влиять на исследуемый процесс, т.е. исказить результат и мешать испытуемому [1]. Этим требованиям отвечают визуальные методы. Однако получить объективную информацию с помощью простого наблюдения очень трудно. При этом более-менее точно оцениваются только граничные фазы, когда направление движения звеньев тела меняется на противоположное [2]. Для точной количественной оценки спортивной техники применяются инструментальные методы, среди которых в последнее время наибольшее распространение получили бесконтактные оптико-электронные компьютеризированные системы. С их помощью определяются координаты опорных точек тела спортсмена, на основе чего рассчитываются кинематические характеристики. Точность измерений при этом может быть очень высокой [3–5].

Геометрию масс тела человека характеризуют массы, моменты инерции, положение центров тяжести (ЦТ) отдельных звеньев тела, их групп, всего тела. Эти показатели могут быть измерены, рассчитаны, определены комбинированными способами [6–7]. Обычная фотография является документом для определения в плоскости съемки координат ЦТ звеньев тела, системы звеньев, ОЦТ тела; моментов силы тяжести и моментов инерции звеньев и всего тела; ориентации осей тела; механических критериев устойчивости тела; условий функционирования скелетной и дыхательной мускулатуры, суставных углов [1]. Для расчета масс-инерционных характеристик при этом используются статистические модели, описывающие зависимость массы, момента инерции, положения ЦТ звена от массы и длины тела, длины и окружности звена. Сообщается [8] о существовании более чем двадцати таких статистических моделей. Но в отечественной научно-методической литературе описаны только две модели распределения массы звена вдоль его продольной оси (по-

ложение ЦТ звена), шесть моделей распределения массы тела между его звеньями и три способа расчета центрального момента инерции звена тела (табл. 1). Они предназначены для исследования 14- и 16-звенной схем тела человека.

При использовании 14-звенной схемы непосредственно на промере определяют положение ЦТ головы и кистей рук, а также положение продольной оси туловища без деления его на сегменты. Положения ЦТ звеньев рассчитывают по длине звеньев на промере. Массы звеньев при этом могут быть рассчитаны по О. Фишеру, Н.А. Берштейну, усредненным данным [9]. Названные модели не учитывают наличия индивидуальных особенностей телосложения. Но именно поэтому при расчете положения ОЦТ тела не требуется знать массу изучаемого объекта – можно использовать значения самих коэффициентов.

16-звенная схема предусматривает деление туловища на сегменты – верхний отдел туловища (ВОТ), средний отдел туловища (СОТ), нижний отдел туловища (НОТ). Если съемка не готовилась специально (проводилась без маркировки объекта), то бывает очень трудно и даже невозможно точно определить на изображении положение анатомических точек, являющихся границами сегментов туловища. При использовании данной схемы тела положение ЦТ звеньев рассчитывают по длине звеньев на промере [6]. Массы звеньев тела могут быть рассчитаны относительно массы тела отдельно для мужчин и для женщин [6; 10], по истинным значениям длины и массы тела [6], по истинным длинам и окружностям звеньев тела [10]. Как видим, последние две модели подразумевают учет особенностей телосложения. Вместе с тем все три модели геометрии масс 16-звенной схемы тела были рассчитаны для одной и той же выборки. Испытуемые: мужчины ($n=100$) – средняя масса тела 73,0 кг, длина тела 1,741 м; женщины ($n=15$) – соответственно 60,2 кг и 1,684 м [10].

Центральный момент инерции (J_0) звена можно определить приближенно по длине звена (l) на изображении и его расчетной массе (m), используя формулы расчета для однородного шара (головы) и цилиндра [11]. Для 16-звенной схемы этот показатель может быть рассчитан по истинной длине и расчетной массе звена [6], либо по истинной длине и окружности звена, погрешность расчета составляет 8–30% [10].

Итак, методы и средства контроля техники физических упражнений продолжают совершенствоваться. Одно из направлений этого

процесса – модернизация методов бесконтактной регистрации биомеханических характеристик тела человека и его движений и автоматизация обработки полученных материалов. При этом желательно, чтобы расчеты производились по опорным точкам тела, без ввода дополнительных данных. В связи с этим возникает вопрос: какую схему тела и модель геометрии масс тела использовать для обработки изображения с тем, чтобы в рамках расчетных методов получить достоверную информацию?

16-звенная схема тела и соответствующие ей модели геометрии масс тела представляются более совершенными. Но их применение для полуавтоматической обработки изображений по координатам опорных точек тела создает значительные организационные и методические затруднения.

В доступной нам научно-методической литературе мы не обнаружили данных о точности определения координат ЦТ звена и ОЦТ тела при использовании 14- и 16-звенной схем тела и различных моделей геометрии масс тела человека.

В связи с этим было проведено данное исследование. Его цель – совершенствование учебно-тренировочного процесса по спортивно-педагогическим дисциплинам.

Задачи: 1. Сравнить результаты определения положения центра тяжести звеньев тела, полученные с использованием 14- и 16-звенной схем тела человека.

2. Сравнить результаты расчета веса звеньев тела, полученные с использованием различных моделей геометрии масс тела.

3. Сравнить результаты расчета суммы центральных моментов инерции звеньев тела человека, полученные различными способами.

4. Оценить точность определения положения ОЦТ тела человека при использовании 14- и 16-звенной схемы тела в сочетании с различными моделями геометрии масс тела.

Материал и методы. Для решения задач исследования использовались антропометрия, расчетные методы определения показателей геометрии масс тела человека, определение положения ОЦТ тела взвешиванием, методы математической статистики.

Антропометрические измерения выполнялись в положении стоя с использованием ростомера и измерительной ленты с точностью до 0,01 м. Измерялась высота над поверхностью опоры (ордината) следующих точек тела: верхушечной, 7-го шейного позвонка, нижегрудинной, пупковой, копчиковой; акромиальной, верхнелучевой, шиловидной, пальцевой; переднеподколенной, верхне- и нижеберцовой;

ЦТ кисти, головы, центра тазобедренного сустава. Измерялась длина стопы. Данные использовались для аналитического представления 14- и 16-звенной схем тела человека [1; 6]. Исследовались схемы в масштабе 1:1.

Для расчета массы и центрального момента инерции звеньев тела по В.Н. Селуянову и Л.Г. Чугуновой [10] измерялись окружности головы, отделов туловища (на уровне их середин), плеча, предплечья, кисти, бедра, голени, стопы.

Масса тела (m) испытуемого, давление на опору доски с испытуемым (R_1) и без него (R_2) измерялись медицинскими весами с точностью до 0,1 кг.

Длины звеньев определялись вычитанием ординат соответствующих опорных точек тела.

Ординаты ЦТ звеньев рассчитывались общепринятым способом [1; 9].

Для сравнения анализируемых схем тела для моделей 1–3 дополнительно рассчитывались положение ЦТ и масса туловища – абсолютная (расчетная), либо сумма относительных масс его отделов.

Абсолютные массы звеньев тела определялись только для тех моделей, которые не оперируют относительными массами звеньев.

Для сравнения среднестатистических моделей геометрии масс тела с моделями, учитывающими антропометрические признаки, для последних рассчитывались относительные массы звеньев тела. Для модели 2 расчет выполнялся относительно измеренной массы тела. Для модели 3 – относительно измеренной и расчетной масс, так как при использовании данной модели различия масс тела доходили до ± 10 кг, при среднем различии 1,06 кг ($p > 0,05$).

Ординаты ОЦТ тела для всех моделей, а также ординаты ЦТ туловища для моделей 1–3 определялись аналитически с использованием теоремы Вариньона [1]. Для моделей 1, 4–6 масса тела испытуемых считалась равной 100 кг [11].

Для оценки точности определения ординаты ОЦТ тела ($Y_{\text{оцт}}$) с применением моделей 1–6 этот показатель определяли также взвешиванием по О. Фишеру [7].

Статистическая обработка данных выполнялась на ПК по стандартным программам. Рассчитывались: средняя арифметическая (\bar{x}), стандартное отклонение (S), средняя ошибка средней арифметической ($S_{\bar{x}}$), коэффициент вариации (V), относительная неточность средней арифметической (ε), 95%-ный доверительный интервал ($\bar{x} \pm US_{\bar{x}}$, $\bar{x} \pm tS_{\bar{x}}$). Достоверность различий (d) определялась с использованием t -критерия Стьюдента для выборок с попарно

связанными результатами. Нормальность распределения исходных данных проверялась с применением W -критерия [12].

Исследование проводилось в январе–марте 2010 г. на базе УО «ВГУ им. П.М. Машерова». В исследовании приняли студенты 2 курса факультета ФК и С. У мужчин ($n=46$) средняя масса тела составила $72,5 \pm 7,5$ кг, длина тела – $1,77 \pm 0,06$ м. У женщин ($n=12$) соответственно $59,1 \pm 6,6$ кг и $1,66 \pm 0,05$ м.

Для удобства мы будем использовать следующие обозначения различных сочетаний схем тела и геометрии масс тела (табл. 1).

Модель 1. 16-звенная схема тела и среднестатистические относительные массы звеньев тела по В.Н. Селуянову [7; 11].

Модель 2. 16-звенная схема и абсолютные массы звеньев, рассчитанные по истинной массе и длине тела [7].

Модель 3. 16-звенная схема и абсолютные массы звеньев, рассчитанные по их истинной длине и окружности [11].

Модель 4. 14-звенная схема тела и среднестатистические относительные массы звеньев тела – усредненные данные [1; 10 и др.].

Модель 5. 14-звенная схема и среднестатистические относительные массы звеньев по Н.А. Бернштейну [10].

Модель 6. 14-звенная схема и среднестатистические относительные массы звеньев по О. Фишеру [10].

Результаты и их обсуждение. Положение ЦТ звеньев на 14- и 16-звенной схеме тела. Простое сравнение относительных радиусов ЦТ звеньев ($R_{\text{цт}}$) для данных схем (табл. 1) показывает, что выбор схемы тела для анализа не влияет только на определение ЦТ стопы у мужчин. Одновременно видно, что абсолютные различия положения ЦТ звеньев не превысили бы 0,004 м, даже будь эти звенья длиной в 1 м. Статистический анализ только подтвердил это, а также помог определить влияние выбора схемы тела на результат определения положения ЦТ головы, кисти, туловища.

Аналитическое исследование показало, что при использовании 16-звенной схемы тела у мужчин и у женщин ЦТ головы и предплечья находятся ниже, а ЦТ остальных звеньев – выше, чем при использовании 14-звенной схемы. Расчет положения ЦТ туловища с использованием различных моделей показал, что у мужчин наиболее высокое его расположение дает применение модели 4, наиболее низкое – модели 2. У женщин соответственно – моделей 4 и 3 (табл. 2).

Таблица 1

Среднестатистические модели геометрии масс тела для 14- и 16-звенной схем тела человека по [1; 6; 7; 9–11]

Показатели		Звено (сегмент) тела												
		голова	туловище	ВОТ	СОТ	НОТ	плечо	предпл.	кисть	бедро	голень	стопа		
Опорные точки 14-звенной схемы тела	проксимальная	фиксированная точка	середина оси плеч	–	–	–	плеч. сустав	локт. сустав	фиксированная точка	тазоб. сустав	коленн. сустав	пяточн. бугор		
	дистальная	середина оси таза	–	–	–	локт. сустав	лучезап. сустав	–	коленн. сустав	голеност. сустав	пальцев. точка			
$R_{цт}$ звена, %		–	44,0	–	–	–	47,0	42,0	–	44,0	42,0	44,0		
m звена, %:	по О. Фишеру		7,06	42,7	–	–	–	3,36	2,28	0,84	11,58	5,27	1,79	
	усредненные данные		7,0	43,0	–	–	–	3,0	2,0	1,0	12,0	5,0	2,0	
	по Н.А. Бернштейну	м	6,72	46,3	–	–	–	2,65	1,82	0,70	12,21	4,65	1,46	
ж		8,12	43,9	–	–	–	2,60	1,82	0,55	12,89	4,34	1,29		
Опорные точки 16-звенной схемы тела	проксимальная	7-й шейный позвонок	–	7-й шейный позвонок	нижнегрудинная	пупковая	акромиальная	лучевидная	шиловидная	переднеподлошная	верхнеберцовая	пяточный бугор		
	дистальная	верхушечная	–	нижнегрудинная	пупковая	копчиковая	лучевидная	шиловид.	пальцевая	верхнеберцовая	нижнеберцовая	пальцевая точка		
$R_{цт}$ звена, %		м	49,98	–	50,66	45,02	35,41	44,98	42,74	36,91	45,49	40,49	44,15	
		ж	48,41	–	50,50	45,12	34,78	44,01	42,58	35,02	46,08	40,30	40,14	
m звена, %		м	6,94	–	15,956	16,327	11,174	2,707	1,615	0,614	14,16	4,330	1,371	
		ж	6,68	–	15,45	14,65	12,47	2,55	1,38	0,56	14,78	4,81	1,29	
Коэффициенты уравнений для расчета														
m звена = $a + b_1x_1 + b_2x_2$, где x_1 – масса тела, кг; x_2 – длина тела, см		a	1,296	–	8,2144	7,181	–7,498	0,250	0,3185	–0,1165	–2,649	–1,592	–0,829	
		b_1	0,0171	–	0,1862	0,2234	0,0974	0,03012	0,01445	0,0036	0,1463	0,03616	0,0077	
		b_2	0,0143	–	–0,0584	–0,0663	0,04896	–0,0027	–0,00114	0,00175	0,0137	0,0121	0,0073	
L звена биомеханич. = K_0L звена антропометрическая		K_0	0,760	–	1,465	1,035	2,035	0,730	1,000	1,000	1,083	1,000	1,000	
m сегмента = K_1LC^2 , где L – длина, C – окружность звена, см		K_1	м	6,37	–	5,72	8,49	3,60	9,67	6,26	5,54	6,64	5,85	6,14
			ж	5,39	–	5,33	8,55	3,49	9,49	6,43	4,56	6,48	6,59	6,35
центрального момента (J_0) звена = K_2mL^2		K_2	м	9,38	–	9,35	12,60	8,92	9,71	7,03	4,86	7,18	8,44	7,13
			ж	8,68	–	9,83	12,54	8,07	9,18	7,59	4,32	7,30	8,58	7,79
Центр. момента звена $J_0 = a + b_1x_1 + b_2x_2$, где x_1 – масса тела, x_2 – длина тела		a	–112,0	–	367,0	263,0	–934,0	–232,0	–67,9	–13,68	–3690	–1152	–97,09	
		b_1	1,43	–	18,3	26,7	11,8	1,526	0,855	0,088	32,02	4,594	0,414	
		b_2	1,73	–	–5,73	–8,0	3,44	1,343	0,376	0,092	19,24	6,815	0,614	

Таблица 2

Различия положения ЦТ звеньев тела, определяемые выбором схемы тела (фон – 14-звенная схема), а также выбором модели геометрии масс тела (для ЦТ туловища)

Звено	Мужчины ($n = 46$)		Женщины ($n = 12$)	
	d , м	t	d , м	t
Голова	–0,030	13,79	–0,030	5,82
Туловище: модель 1 – модель 2	0,002	5,20	0,007	1,55
модель 1 – модель 3	–0,002	0,96	0,013	2,42
модель 1 – модель 4	–0,004	1,73	–0,002	0,33
модель 2 – модель 3	–0,005	1,96	0,006	1,74
модель 2 – модель 4	–0,007	2,65	–0,009	1,12
модель 3 – модель 4	–0,002	0,56	–0,015	1,72
Плечо	0,007	48,21	0,008	10,06
Предплечье	–0,002	11,56	–0,002	7,00
Кисть	0,015	6,75	0,014	3,59
Бедро	0,045	17,27	0,037	9,04
Голень	0,006	8,84	0,006	13,47
Стопа	0,000	0,00	0,012	12,97

Примечание: $t_{0,05(40)} = 2,02$, $t_{0,01(40)} = 2,70$, $t_{0,001(40)} = 3,55$; $t_{0,05(11)} = 2,20$, $t_{0,05(11)} = 3,11$, $t_{0,05(11)} = 4,44$.

Длина и окружность звеньев тела у студентов 2 курса ФФК и С

Звено	Длина звена			Окружность звена		
	$\bar{x} \pm S$, м	V, %	ε	$\bar{x} \pm S$, м	V, %	ε
мужчины, n = 46						
Голова	0,266±0,018	6,9	0,02	0,568±0,019	3,4	0,01
ВОТ	0,233±0,024	10,5	0,03	0,977±0,049	5,0	0,01
СОТ	0,198±0,026	13,4	0,04	0,812±0,048	5,9	0,02
НОТ	0,129±0,028	22,1	0,06	0,914±0,053	5,9	0,02
Плечо	0,326±0,021	6,6	0,02	0,306±0,031	10,1	0,03
Предплечье	0,260±0,022	8,5	0,02	0,261±0,017	6,6	0,02
Кисть	0,194±0,014	7,5	0,02	0,234±0,018	7,5	0,02
Бедро	0,506±0,039	7,7	0,02	0,535±0,034	6,4	0,02
Голень	0,424±0,028	6,6	0,02	0,372±0,026	7,1	0,03
Стопа	0,281±0,010	3,7	0,01	0,293±0,015	5,1	0,01
женщины, n = 12						
Голова	0,256±0,011	4,3	0,02	0,551±0,015	2,8	0,02
ВОТ	0,216±0,031	14,4	0,08	0,883±0,068	7,8	0,04
СОТ	0,186±0,044	23,7	0,13	0,727±0,046	6,3	0,04
НОТ	0,122±0,022	18,2	0,10	0,852±0,075	8,8	0,05
Плечо	0,303±0,017	5,7	0,04	0,268±0,023	8,7	0,05
Предплечье	0,248±0,032	12,7	0,07	0,227±0,018	8,1	0,05
Кисть	0,169±0,014	8,5	0,05	0,201±0,016	8,1	0,05
Бедро	0,473±0,033	7,1	0,04	0,529±0,048	9,1	0,05
Голень	0,391±0,026	6,8	0,04	0,359±0,022	6,1	0,03
Стопа	0,248±0,014	5,5	0,03	0,272±0,017	6,2	0,04

Индивидуальные особенности телосложения, учитываемые при расчете массы звена. Стремясь учитывать эти особенности, В.Н. Селуянов (1979, 1989) перешел от учета только массы тела к одновременному учету его массы и длины, а затем к учету размеров звеньев тела.

То есть первый способ представляется наименее совершенным, второй – более, третий – наиболее совершенным. Но второй и третий способы достаточно громоздки, а третий, кроме того, требует выполнения большого числа прямых измерений. В своей последней работе по данному вопросу [10] автор предлагает использовать первый или третий способы расчета массы тела. Следовательно, совершенство третьего способа не очевидно. В связи с этим мы определили разброс некоторых антропометрических признаков для 16-звенной схемы тела (табл. 3). Расчеты показали, что мужская и женская выборки были однородными по длине тела ($V=2,9-3,3\%$) и неоднородными по массе тела ($V=10,9-11,2\%$).

Анализ размеров звеньев тела показал, что у мужчин и у женщин наиболее вариативна длина сегментов туловища. У мужчин также существенно варьировала окружность плеча, а у женщин – длина предплечья. Другие внутригрупповые различия размеров звеньев тела были

несущественными, о чем говорят значения коэффициента вариации и относительной неточности средней арифметической.

Относительные массы звеньев тела в различных моделях. Анализ средних значений относительных масс звеньев тела показал, что в целом наиболее близкие результаты получаются при использовании моделей 1, 2 и 5 (табл. 4). Это объясняет отказ В.Н. Селуянова от применения модели 2 в пользу более простой модели 1.

Обращает на себя внимание то, что при использовании модели 3 получены достаточно однородные значения относительной массы туловища и индивидуально весьма различные значения масс остальных звеньев тела. Это при том, что исходные данные для расчета масс сегментов туловища были подвержены, а остальных звеньев не были подвержены значительным индивидуальным колебаниям.

Для нас особый интерес представляла сопоставимость результатов, полученных с применением моделей 2–3 и модели 4. Анализ с использованием 95%-ных доверительных интервалов показал, что у мужчин выбор модели теоретически не влияет на результат при расчете массы головы, туловища, бедра и стопы. Массы предплечья и голени, рассчитанные по модели 4, будут больше на 0,4–0,6%, кисти – на 0,1–0,4%.

Таблица 4

Относительные массы звеньев тела (%) у студентов 2 курса ФФК и С

Мо- дель	Показатель	Звено							
		голова	туловище	плечо	предпл.	кисть	бедро	голень	стопа
мужчины, $n = 46$									
1	\bar{x}	6,94	43,46	2,71	1,62	0,61	14,17	4,33	1,37
2	\bar{x}	6,82	43,19	2,70	1,60	0,62	14,35	4,37	1,40
	V	7,62	1,7	1,2	1,7	3,8	1,1	1,7	3,9
	$\bar{x}+US\bar{x}$	7,01	43,47	2,71	1,61	0,63	14,41	4,40	1,42
	$\bar{x}-US\bar{x}$	6,62	42,92	2,69	1,59	0,61	14,29	4,34	1,39
3	\bar{x}	7,22	43,91	2,86	1,46	0,79	12,55	4,51	1,95
	V	11,8	8,5	20,0	11,1	21,7	42,6	10,3	11,0
	$\bar{x}+US\bar{x}$	7,47	45,33	3,08	1,51	0,86	14,09	4,64	2,02
	$\bar{x}-US\bar{x}$	6,98	42,49	2,64	1,41	0,73	11,0	4,37	1,89
3.1	\bar{x}	7,13	43,28	2,82	1,44	0,76	13,55	4,45	1,93
	V	11,7	6,3	19,4	11,9	28,3	9,10	11,0	10,8
	$\bar{x}+US\bar{x}$	7,37	44,32	3,03	1,49	0,84	14,02	4,64	2,01
	$\bar{x}-US\bar{x}$	6,88	42,23	2,61	1,39	0,68	13,08	4,27	1,85
4	x	7,00	43,00	3,00	2,00	1,00	12,00	5,00	2,00
5	\bar{x}	6,72	46,30	2,65	1,82	0,70	12,21	4,65	1,46
6	\bar{x}	7,06	42,70	3,36	2,28	0,84	11,58	5,27	1,79
женщины, $n = 12$									
1	\bar{x}	6,68	42,57	2,55	1,38	0,56	14,78	4,81	1,29
2	\bar{x}	7,92	42,65	2,67	1,67	0,66	14,00	4,34	1,43
	V	7,3	2,4	1,6	1,9	5,1	1,02	2,7	6,2
	$\bar{x}+tS\bar{x}$	8,29	43,31	2,70	1,70	0,68	14,09	4,41	1,49
	$\bar{x}-tS\bar{x}$	7,55	41,99	2,64	1,65	0,64	13,91	4,26	1,37
3	\bar{x}	7,17	42,06	2,56	1,39	0,54	15,74	6,55	2,40
	V	13,0	7,6	12,7	13,4	23,9	11,3	12,2	23,7
	$\bar{x}+tS\bar{x}$	7,70	44,07	2,76	1,51	0,62	16,87	7,05	2,76
	$\bar{x}-tS\bar{x}$	6,64	40,04	2,35	1,27	0,46	14,61	6,04	2,04
3.1	\bar{x}	6,58	39,33	2,40	1,30	0,51	14,71	6,12	2,23
	V	12,8	4,6	14,5	13,5	28,1	8,8	10,6	20,5
	$\bar{x}+tS\bar{x}$	7,12	40,49	2,62	1,41	0,60	15,53	6,53	2,52
	$\bar{x}-tS\bar{x}$	6,05	38,17	2,18	1,19	0,42	13,88	5,71	1,94
4	x	7,00	43,00	3,00	2,00	1,00	12,00	5,00	2,00
5	\bar{x}	8,12	43,90	2,60	1,82	0,55	12,89	4,34	1,29
6	\bar{x}	7,06	42,7	3,36	2,28	0,84	11,58	5,27	1,79

Примечание: модель 3.1 – массы звеньев определены относительно расчетной массы тела.

У женщин выбор модели не повлиял на результаты расчета массы головы, туловища, голени, стопы. Использование модели 4 дало более высокие значения масс плеча, предплечья – на 0,3–0,8% и кисти – на 0,3–0,6%, менее высокие значения массы бедра – на 1,9–3,7%.

Сумма центральных моментов инерции звеньев тела. Полный момент инерции тела человека складывается из момента инерции тела относительно внешней оси, суммы моментов инерции звеньев тела – относительно ОЦТ тела и суммы центральных моментов инерции звеньев тела. При использовании 14- и 16-звенной

схем расчет первых двух составляющих выполняется одним и тем же способом. При изменении позы тела величины этих показателей изменяются пропорционально изменению квадратов соответствующих радиусов инерции. Центральный момент инерции звена при этом практически не изменяется [11]. Отсюда следует, что сумма центральных моментов инерции звеньев тела может быть рассчитана один раз для анализа серии изображений, а также то, что величина данного показателя практически не влияет на динамику полного момента инерции тела.

Разность ординат ОЦТ тела (d , м; t -Ст.), полученных с использованием различных биомеханических моделей

Фон	Реакция					
	$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 2	$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 3	$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 4	$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 5	$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 6	$Y_{\text{ОЦТ}}$ измер.
мужчины, $n = 46$						
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 1	-0,006; 5,73	-0,011; 4,08	-0,020; 10,45	-0,003; 2,04	-0,016; 10,15	-0,011; 1,88
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 2		-0,023; 1,74	-0,032; 1,74	-0,015; 0,82	-0,028; 0,51	-0,023; 1,27
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 3			-0,010; 3,56	0,007; 2,64	-0,006; 2,06	-0,019; 1,00
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 4				0,017; 16,8	0,004; 4,13	0,009; 1,63
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 5					-0,013; 50,08	-0,008; 1,30
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 6						0,005; 0,86
женщины, $n = 12$						
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 1	0,009; 2,37	-0,041; 3,97	-0,010; 3,41	-0,005; 1,55	-0,006; 1,82	0,016; 0,96
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 2		-0,041; 4,53	-0,020; 4,32	-0,004; 0,96	-0,015; 3,23	-0,007; 0,47
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 3			0,030; 2,95	0,045; 4,43	0,035; 3,42	0,056; 5,68
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 4				0,015; 73,2	0,005; 30,0	0,026; 1,60
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 5					-0,010; 54,96	0,011; 0,67
$Y_{\text{ОЦТ}}$ МОД. 6						0,021; 1,30

Примечание: $t_{0,05(40)} = 2,02$, $t_{0,01(40)} = 2,70$, $t_{0,001(40)} = 3,55$; $t_{0,05(11)} = 2,20$, $t_{0,05(11)} = 3,11$, $t_{0,05(11)} = 4,44$.

Несмотря на последнее обстоятельство, мы сравнили суммы центральных моментов инерции тела, рассчитанных приближенным способом для модели 4 и по антропометрическим признакам для других моделей. Выяснилось, что первый способ дает большие результаты, чем второй и третий – в среднем в 5–6 раз ($p < 0,001$). Результаты, полученные вторым [10] и третьим [6] способами, различались незначительно – до $0,3 \text{ кгм}^2$ ($p > 0,05$).

Точность определения положения ОЦТ тела с использованием различных моделей. Выше было показано, что использование различных моделей для биомеханического анализа изображения дает различные сочетания масс звеньев тела и координат их ЦТ. Очевидно, что это влияет на результат аналитического определения положения ОЦТ тела.

Мы сравнили ординаты ОЦТ тела ($Y_{\text{ОЦТ}}$), рассчитанные с использованием моделей 1–6, между собой, а также с ординатами ОЦТ тела, полученными взвешиванием по О. Фишеру (табл. 5).

Видно, что результат расчета положения ОЦТ тела существенно зависит от выбора модели для исследования. Вместе с тем, часто расчетные ординаты ОЦТ тела недостоверно отличаются от измеренных. Исключение составляет применение модели 3 у женщин, которое дало результаты меньше истинных в среднем на $0,056 \text{ м}$ ($p < 0,001$). В порядке возрастания показателя и увеличения погрешности расчета модели можно расположить относительно

значения ОЦТ тела, полученного прямым измерением, следующим образом. У мужчин: $2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow Y_{\text{ОЦТ}}$ измеренный $\leftarrow 6 \leftarrow 4$; у женщин: $2 \rightarrow Y_{\text{ОЦТ}}$ измеренный $\leftarrow 5 \leftarrow 1 \leftarrow 6 \leftarrow 4 \leftarrow 3$.

Заключение. Для расчета положения ЦТ звеньев тела 14- и 16-звенная схемы тела могут применяться с одинаковым успехом. Полученные при этом результаты различаются достоверно, но на очень малые величины (до $0,01 \text{ м}$ при расчетах в масштабе 1:1). С уменьшением масштаба изображения различия становятся исчезающе малыми.

Для количественного анализа спортивной техники массы звеньев тела могут определяться по усредненной модели геометрии масс тела. При этом следует учитывать, что по сравнению с другими моделями использование данной модели дает завышенные, в среднем на $0,5\%$, значения относительных масс предплечья, кисти и голени у мужчин; плеча, предплечья, кисти у женщин, а также заниженные на 3% значения относительной массы бедра у женщин.

Динамику центрального момента инерции тела можно оценивать по изменениям моментов инерции звеньев тела относительно его ОЦТ. Приближенный расчет центральных моментов инерции звеньев тела дает результаты в 5–6 раз большие, чем расчет по В.Н. Селуянову (1979, 1989). Суммы центральных моментов инерции звеньев, рассчитанные двумя способами по В.Н. Селуянову, различаются несущественно.

Использование 14-звенной схемы тела

и усредненной модели геометрии масс для расчета положения ОЦТ тела дает результаты, близкие к истинным. В масштабе 1:1 различия ординат ОЦТ тела, полученных расчетным путем и путем измерения, составили в среднем 0,009 м у мужчин и 0,026 м у женщин ($p > 0,05$).

При осуществлении прикладного анализа спортивной техники 14-звенная схема тела в сочетании с усредненной моделью геометрии масс тела обладает рядом преимуществ по сравнению с 16-звенной схемой в сочетании с другими моделями геометрии масс тела:

– координаты ЦТ, а также массы звеньев тела, рассчитанные с применением модели 4 не намного и, как правило, несущественно отличаются от полученных с использованием более сложных моделей, требующих выполнения антропометрических измерений;

– положение ОЦТ тела, рассчитанное с использованием модели 4, недостоверно отличается от положения ОЦТ тела, определенного взвешиванием по О. Фишеру;

– модель 4 учитывает меньше опорных точек тела и их значительно проще определять на изображении, даже если объект не был маркирован.

ЛИТЕРАТУРА

1. Практикум по биомеханике: пособие для ИФК / под ред. И.М. Козлова. – М.: Физкультура и спорт, 1980. – 106 с.
2. Джалилов, А. Техника спринта глазами тренера / А. Джалилов [и др.] // Легкая атлетика. – 1989. – № 11. – С. 8–9.
3. Сучилин, Н.Г. Педагогико-биомеханический анализ техники спортивных движений на основе программно-аппаратного видеокомплекса / Н.Г. Сучилин, Л.Я. Аркаев, В.С. Савельев // Теория и практика физической культуры. – 1996. – № 4. – С. 12–20.
4. Буданова, Е.А. Основы биомеханического анализа спортивных движений на примере оценки техники бега с барьерами / Е.А. Буданова // Вестн. Кемеров. гос. ун-та. – Выпуск 4(36). – Кемерово, 2008. – С. 109–111.
5. Санникова, Н.И. Методика определения биомеханических показателей с использованием персонального компьютера / Н.И. Санникова // Теория и практика физической культуры. – 2001. – № 4. – С. 58–59.
6. Донской, Д.Д. Биомеханика: учеб. для ИФК / Д.Д. Донской, В.М. Зацюрский. – М.: Физкультура и спорт, 1979. – 264 с.
7. Каймин, М.А. Расчетно-графические работы по биомеханике и технике движений в легкой атлетике: метод. разраб. / М.А. Каймин. – М.: ГЦОЛИФК, 1981. – 50 с.
8. Зацюрский, В.М. Биомеханика двигательного аппарата человека / В.М. Зацюрский, А.С. Аруин, В.Н. Селуянов. – М.: Физкультура и спорт, 1981. – 143 с.
9. Донской, Д.Д. Биомеханика с основами спортивной техники: учеб. для ИФК / Д.Д. Донской. – М.: Физкультура и спорт, 1971. – 188 с.
10. Селуянов, В.Н. Расчет масс-инерционных характеристик тела спортсменов методом геометрического моделирования / В.Н. Селуянов, Л.Г. Чугунова // Теория и практика физической культуры. – 1989. – № 2. – С. 38–39.
11. Сотский, Н.Б. Практикум по биомеханике спортивных движений / Н.Б. Сотский, В.Г. Киселев. – Минск: АФВ и С, 1997. – 52 с.
12. Масальгин, Н.А. Математико-статистические методы в спорте / Н.А. Масальгин. – М.: Физкультура и спорт, 1974. – 151 с.

Поступила в редакцию 25.05.2011. Принята в печать 30.06.2011

Адрес для корреспонденции: 210022, г. Витебск, ул. Чкалова, д. 22, корп. 2, кв. 9, e-mail: shatskygr@male.ru – Шацкий Г.Б.