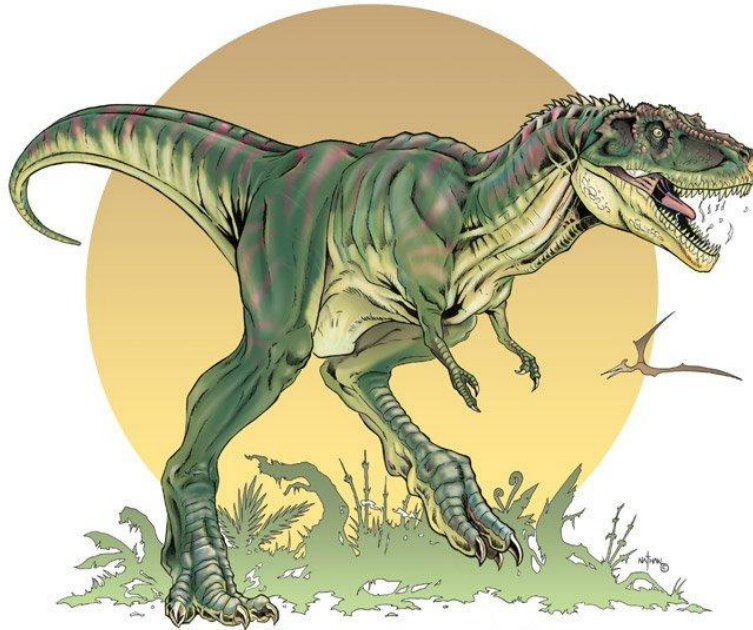


Биомеханика динозавров

(Материал из Википедии – свободной энциклопедии)



Биомеханика динозавров – направление биофизических исследований, целью которого является определение физических характеристик вымерших мезозойских рептилий, способы их передвижения, физические аспекты функционирования физиологических систем. Источником информации для этих исследований являются палеонтологические находки костных останков, отпечатков следов динозавров, а также физические аналогии с ныне живущими представителями животного мира.

К исследованиям в области биомеханики динозавров тесно примыкают исследования живших в более позднее время вымерших гигантских млекопитающих и птиц^[1].

Масса динозавров

Определение массы животного – одна из важнейших биомеханических характеристик, знание которой является отправной точкой для исследования образа жизни и способа передвижения животного. В настоящее время существуют два основных метода определения массы вымерших животных – по объёмным моделям и по поперечным размерам костей конечностей.

Определение массы по объёмным моделям

Исследование ископаемых скелетов позволяет достаточно точно судить о размерах и внешнем виде вымерших животных. Размеры костей с учётом суставных зазоров, которые берутся по аналогии с современными животными, дают размеры тела. Величина костных гребней, предназначенных для прикрепления сухожилий, дают силу и массу мышц. Для большинства известных видов динозавров созданы объёмные модели. Так, коммерчески доступны пластиковые модели в масштабе 1:40, распространяемые Лондонским музеем естественной истории (*Natural History Museum, London*).

Пусть объём модели, измеренный, например, погружением модели в жидкость, составляет V_m , масштабный коэффициент – k , средняя плотность животного – ρ . Тогда массу животного, послужившего прототипом для модели, можно вычислить по формуле

$$M = \rho V_m k^3.$$

Среднюю плотность животного можно принять примерно равной плотности воды, то есть 1000 кг/м³.

Например, для модели брахиозавра масштаба 1:40 объёмом 728 см³ (728×10⁻⁶м³) получим $M = 1000 \times 728 \times 10^{-6} \times 40^3 = 46592 \text{ кг} = 46,6 \text{ т}$.

Определение массы по толщине опорных костей

Как показывают замеры, проведённые на ныне живущих видах, масса животного и толщина опорных костей (плечевой и бедренной кости для четвероногих, бедренной кости для двуногих) связаны примерным соотношением

$$M = 8,4 \times 10^{-5} (C_h + C_f)^{2,73},$$

где M – масса в кг, C_h и C_f – окружность в мм плечевой и бедренной костей соответственно (берётся окружность одной кости примерно в середине её длины).

Полагая, что вымершие рептилии укладываются в эту закономерность, можно по размерам костей оценить массу динозавра.

Например, если для брахиозавра окружность плечевой и бедренной костей составляет соответственно 654 и 730 мм, оценка его массы составит примерно

$$M = 8,4 \cdot 10^{-5} (654 + 730)^{2,73} = 30088 \text{ кг} = 30,1 \text{ т}.$$

Масса различных видов динозавров Масса (в тоннах) некоторых динозавров^[2]

Виды динозавров	Источник информации		
	Кольбер ^[3]	Александр ^[4]	Андерсон ^[5]
Год	1962	1985	1985
Способ	По модели	По модели	По костям
Тероподы			
<i>Allosaurus fragilis</i>	2,3		1,4
<i>Tyrannosaurus rex</i>	7,7	7,4	4,5
Зауроподы			
<i>Diplodocus carnegiei</i>	11,7	18,5	5,8
<i>Apatosaurus louisae</i>	33,5		37,5
<i>Brachiosaurus brancai</i>	87,0	46,6	31,6
Орнитоподы			
<i>Iguanodon henningsi</i>	5,0	5,4	
<i>Anatosaurus copei</i>	3,4		4,0
Стегозавры			
<i>Stegosaurus ungulatus</i>	2,0	3,1	
Цератопсы			
<i>Styracosaurus albertensis</i>	4,1	4,1	
<i>Triceratops prorsus</i>	9,4		

Прим.: интересная закономерность в приблизительно 3-кратном различии массы динозавров (*Brachiosaurus brancai*, *Diplodocus carnegiei*), определяемой по объемной модели и по строению костей, соответствует также приблизительно 3-кратному различию между размерами самых крупных динозавров и самых крупных современных животных (например, из самых высоких это брахиозавр и жираф).

Давление на грунт

Давление динозавра на грунт можно оценить как отношение его веса на площадь опорных поверхностей, то есть ступней ног. Площадь опорных поверхностей можно измерить непосредственно по следам динозавров, которые к настоящему времени найдены в больших количествах в юрских и меловых геологических отложениях. Сравнивая форму отпечатка с формой скелета конечностей различных динозавров, можно определить видовую принадлежность тех или иных следов, а также найти соотношение между площадью следа и линейными размерами костей.

Давление на грунт для некоторых видов динозавров и современных животных^[4]

Вид	Масса M , т	Опорная поверхность S , м ²	Давление $P = Mg/S$, кН/м ²	$Mg/S^{1,5}$, кН/м ³
Апатозавр	35	1,2	290	270
Тираннозавр	7	0,6	120	150
Игуанодон	5	1,4	120	190
Африканский слон	4,5	0,6	70	90
Крупный рогатый скот	0,6	0,04	150	740
Человек	0,07	0,035	20	110

Для сравнения следует отметить, что современные танки, масса которых примерно соответствует массе самых крупных динозавров, создают давление на грунт примерно 200-270 кН/м², при этом давление на грунт при движении танка остаётся примерно постоянным, а динозавры, перемещающие вес тела с одной ноги на другую, создают при ходьбе как минимум вдвое большее давление, чем указано в таблице. Например, у апатозавра пиковое давление на грунт может достигать 580 кН/м² и более. Давление на грунт характеризует риск для животного или техники увязнуть во влажном грунте.

В таблице также указано значение величины $Mg/S^{1,5}$. Считается, что эта величина характеризует риск увязнуть в сухом песке.

Скорость передвижения

Палеонтологические находки следов динозавров позволяют оценить скорости их передвижения^[6]. Принцип расчёта основан на зависимости скорости передвижения от длины шага. Большей длине шага соответствует большая скорость. Следует учитывать, однако, что при одинаковой скорости передвижения животные разных размеров делают шаги разной длины. Чтобы учесть это, в расчётах используют относительную длину шага L^* , которая равна отношению абсолютной длины шага L к длине конечности L_l .

$$L^* = L/L_l.$$

Под длиной шага понимают расстояние между двумя последовательными отпечатками одной и той же ноги. То есть, по обыденным понятиям это соответствует двум шагам. Под

длиной конечности понимают высоту тазобедренного сустава над землёй в нормальной стойке.

Кроме того, следует учитывать, что даже делая шаги одинаковой относительной длины, животные развивают разную скорость. Однако установлено, что при этом оказывается одинаковой относительная скорость, которая определяется выражением

$$V^* = V/(L_l \times g)^{1/2},$$

где V – абсолютная скорость в м/с; g – ускорение свободного падения, равное $9,8 \text{ м/с}^2$.

Расчёты показывают, что для разных видов млекопитающих и птиц относительная скорость пропорциональна относительной длине шага с коэффициентом пропорциональности около 0,65.

$$V^* = 0,65L^*$$

или

$$V = 0,65L(g/L_l)^{1/2} = 2,03L/(L_l)^{1/2}.$$

Например, если спринтер пробегает стометровку за 10 секунд, делая при этом 45 шагов, длина двойного шага составляет 4,5 м, длина ноги при росте 1,8 м – примерно 0,9 м. Относительная длина шага $L^* = 4,5/0,9 = 5$, откуда относительная скорость $V^* = 0,65 \times 5 = 3,25$. Соответствующая абсолютная скорость $V = 9,65 \text{ м/с}$, что очень близко к реальной средней скорости, равной 10 м/с.

Оценка скорости передвижения динозавров по ископаемым следам^[7]

Динозавры	Оценка длины ноги, м	Оценка скорости, м/с
Следы в Дэвенпорт-Рэнч^[8]		
Большие тероподы	2,0	2,2
Малые тероподы	1,0	3,6
Большие зауроподы	3,0	1,0
Малые зауроподы	1,5	1,1
Следы в Винтоне^[9]		
Большие тероподы	2,6	2,0
Малые тероподы	0,13-0,22	3,0-3,5
Орнитоподы	0,14-1,6	4,3-4,8

Самая большая скорость передвижения динозавров зафиксирована по следам, найденным в Техасе^[10] и составляет 12 м/с (43 км/ч). Следы принадлежали двум тероподам с длиной стопы 29 и 38 см, масса большего из них оценивается в 600 кг^[11].

Подвижность

Ископаемые следы, как правило, отражают передвижение динозавров в спокойном состоянии. Отдельный интерес представляет способность динозавров к быстрому бегу в экстремальной ситуации, прыжкам, резкому маневрированию. Обо всём этом можно косвенно судить по прочности костей к динамическим нагрузкам.

Прочность кости по отношению к изгибающим напряжениям можно охарактеризовать величиной^[12]

$$A = Z/Mx,$$

где M – масса животного, x – длина кости, Z – статический момент сечения кости, характеризующий, насколько эффективно кость в данном сечении сопротивляется изгибающим усилиям. В числе прочего эта величина зависит от поперечного сечения кости, от толщины кости в плоскости изгиба, а также от формы сечения. Например, полая труба лучше сопротивляется изгибу, чем сплошной стержень с той же площадью сечения.

Для круглого сечения статический момент вычисляется как

$$Z = \pi R^3/4,$$

где R – радиус сечения кости. Для сечения овальной формы формула принимает вид

$$Z = \pi a^2 b/4,$$

где a – полутолщина кости в плоскости изгиба, b – полутолщина в направлении, перпендикулярном плоскости изгиба.

Величина Z/Mx для костей ног некоторых динозавров и современных животных^[13]

Животные	Масса, т	Величина Z/Mx , м ² /ГН		
		Бедренная кость	Большая берцовая кость	Плечевая кость
Четвероногие				
Африканский слон	2,5	7	9	11
Буйвол	0,5	22	27	21
Диплодок	12–19	3–5		
Апатозавр	34	9	6	14
Трицератопс	6–9	15–21		12–20
Двуногие				
Страус	0,04	44	18	
Человек	0,06	15	15	
Тираннозавр	8	9		

Самое крупное современное животное, способное передвигаться галопом – белый носорог, достигающий массы 3 тонн. Слон не может ни галопировать, ни прыгать, он передвигается своеобразной походкой, сходной с иноходью. Можно предположить, что прыгать и передвигаться галопом могут животные, у которых отношение Z/Mx превышает 10. Из крупных динозавров, представленных в таблице, к таким относится трицератопс. У диплодока отношение Z/Mx в 2-3 раза меньше предельного, поэтому предположительно он мог передвигаться только шагом. У тираннозавра, который по величине Z/Mx примерно соответствует слону, способность к быстрому бегу и прыжкам находится под вопросом. Однако сравнение двуногого тираннозавра с четвероногим слоном может оказаться некорректным. По сравнению с самыми крупными современными двуногими, человеком и страусом, отношение Z/Mx тираннозавра значительно ниже^[14].

[15]

Примечания

1. R. McNeill Alexander *Dynamics of Dinosaurs and other Extinct Giants*. – New York: Columbia University Press, 1989, p. 167.
2. R. McNeill Alexander, 1989, p. 25.
3. Colbert, E. H. *The weights of dinosaurs // American Museum Novitates*. – 1962. – T. 2076. – C. 1-16.
4. Alexander, R. McN. *Mechanics of posture and gait of some large dinosaurs // Zoological Journal of the Linnean Society*. – 1985. – T. 83. – C. 1-25.
5. Anderson, J. F., A. Hall-Martin, D. A. Russell *Long bone circumference and weight in mammals, birds and dinosaurs // Zoological Journal of the Linnean Society*. – 1985. – T. 207. – C. 53-61.
6. R. McNeill Alexander, 1989, pp. 33-42.
7. R. McNeill Alexander, 1989, p. 40.
8. Bird, R. T. *Did brontosaurus ever walk on land? // Natural History*. – New York, 1944. – T. 53. – C. 60-67.
9. Thulborn R. A., Wade M. *Dinosaur trackways in the Winton formation (mid-Cretaceous) of Queensland // Memoirs of the Queensland Museum*. – 1984. – T. 21. – C. 413-517.
10. Farlow, J. O. *Estimates of dinosaur speeds from a new trackway site in Texas // Nature*. – 1981. – T. 294. – C. 747-748.
11. R. McNeill Alexander, 1989, pp. 40-41.
12. R. McNeill Alexander, 1989, pp. 45-50.
13. R. McNeill Alexander, 1989, p. 56.
14. R. McNeill Alexander, 1989, pp. 56-57.
15. Roger S. Seymour, Harvey B. *Lillywhite Hearts, neck posture and metabolic intensity of sauropod dinosaurs // Proc. R. Soc. Lond. B*. – 2000. – T. 267. – C. 1883-1887.