

Р. Г. РУХКЯН

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА БИОМЕХАНИКИ ПРЫЖКОВ КАМЕННОЙ КУНИЦЫ

Исследована биомеханика разных по длине и высоте прыжков каменной куницы. Показаны изменения скоростей и сил, развиваемых животным, а также углов вылета центра тяжести тела в зависимости от величины прыжков. Анализируется кинематика суставов задней конечности.

Для оценки функциональных способностей аппарата движения животных необходимы биомеханические исследования. Однако подобные исследования столь трудоемки, что до сих пор в этом направлении сделано сравнительно немного. Исследования биомеханики прыжков проведены на ограниченных видах животных: кенгуру [4], галаго [7], саранче [6, 8], блохе [5]. Во всех этих работах изучена развиваемая мощность, затраты энергии на один прыжок, перемещение центра тяжести тела и др. Однако в них не рассматриваются такие важные для характеристики работы локомоторного аппарата показатели, как кинематика суставов конечностей, изменение развиваемых сил от характера прыжков и т. д. Эти параметры были нами изучены у некоторых представителей беличьих и куньих при прыжках только в длину [3]. Однако для полной оценки биомеханических показателей необходимо также изучение прыжков в высоту, поскольку всем зверькам зачастую необходимо преодолевать препятствия. Так, каменная куница передвигается по земле прыжками длиной 0,3—0,4 м, а вниз по склону прыжки достигают до 1,5—2 м [2]. Нередко при беге ей приходится преодолевать разные по высоте препятствия (валежник, бурелом, камни и т. д.), совершая прыжок в высоту. По всей вероятности, характер механики движения при этих прыжках окажется разным.

В настоящей работе исследована биомеханика разных по высоте прыжков (30 и 45 см) каменной куницы и дано сравнение биомеханических показателей с максимальными прыжками в длину (1 и 1,6 м) на горизонтальном участке. Поскольку в обоих случаях как длина, так и высота прыжков в основном зависят от работы задних конечностей в стадии опоры, то в предлагаемой работе основное внимание уделяется биомеханике стадии опоры на задние конечности, как наиболее нагруженного момента на протяжении цикла прыжка.

Применяемая нами методика подробно описана ранее [1, 3].

Динамика перемещения центра тяжести тела. Рассматривая модель животного как одну точку, находящуюся в центре его тяжести, можно проанализировать динамику перемещения последней на протяжении

цикла прыжка (рис. 1). Данные по динамике позволяют найти развиваемые животным средние и максимальные силы, скорости в стадии опоры, а также определить углы перемещения и вылета центра тяжести тела к горизонтальной плоскости. Для оценки этих показателей кривая перемещения центра тяжести в стадии опоры делилась на три отрезка, и

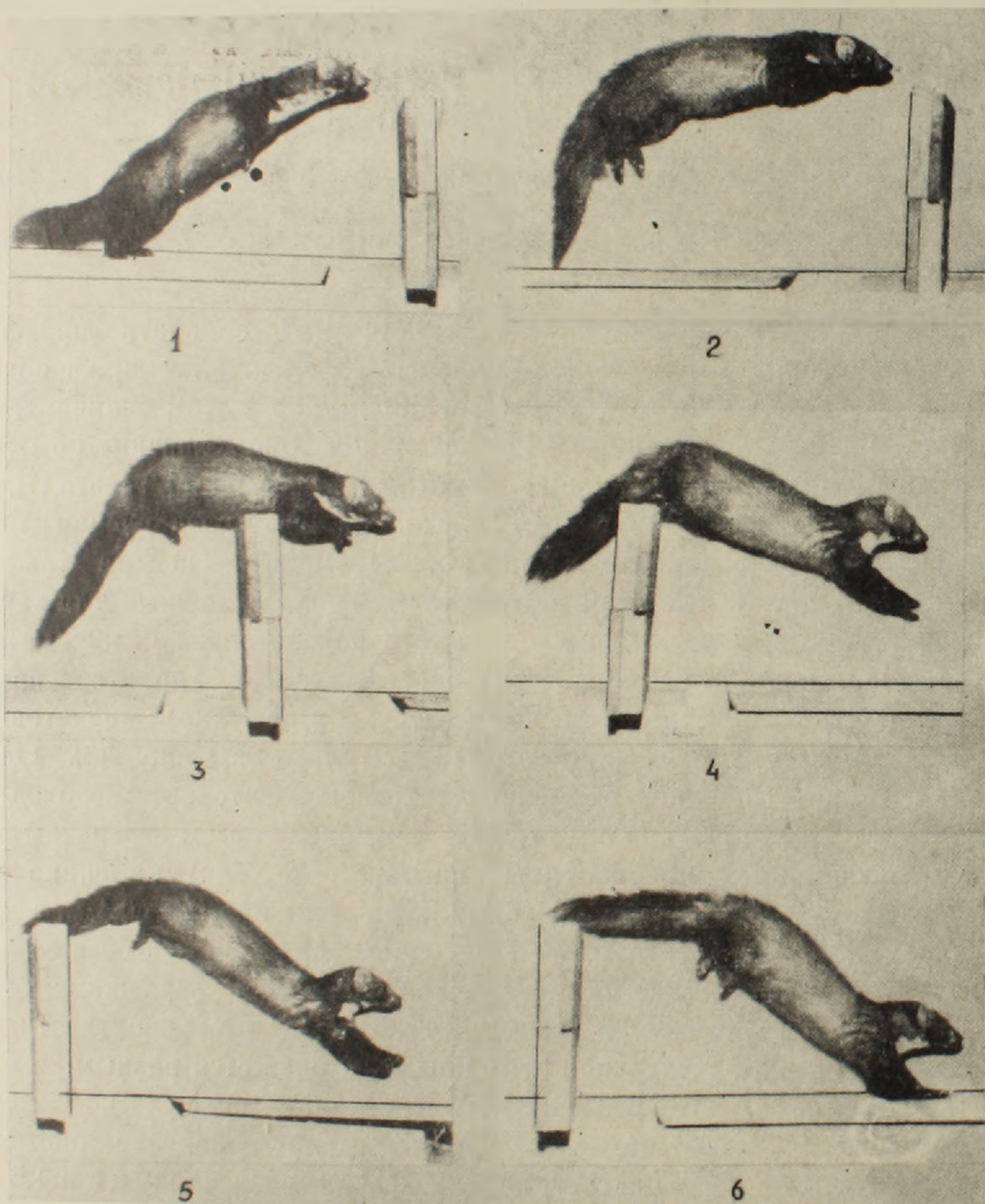


Рис. 1. Последовательные кадры прыжка в высоту каменной куницы.

для каждого из них определялись время, скорость и угол перемещения центра тяжести тела (рис. 2, табл. 1).

Сила, развиваемая животным, определялась по формуле $F = m \sqrt{(a_{гор.})^2 + (a_{верт.})^2}$, где m — масса тела, равная в нашем случае 1 кг, a — ускорение. Для определения ускорения, кроме наращивания скорости, учитывалось изменение угла перемещения центра тяжести

Таблица 1

Параметры стадии опоры при прыжках разной длины и высоты

Параметры		Величина прыжков, м			
		в длину		в высоту	
		1,0	1,6	0,3	0,45
Время, сек	всей стадии	0,050	0,055	0,07	0,06
	III отрезка	0,0128	0,0162	0,02	0,0143
Скорость, м/сек	в I отрезке	5,05	5,22	3,2	4,15
	во II отрезке	5,15	5,33	3,25	4,16
	в III отрезке	5,85	6,05	3,70	4,27
Угол перемещения центра тяжести, °С	в I отрезке	2	6	20	18
	во II отрезке	3	8	21	24
	в III отрезке	6	11	22	30
Сила, кгм/сек ²	средняя	26,7	25,4	15,2	24,3
	максимальная	64	56	29,4	41,5

к горизонтальной плоскости на протяжении стадии опоры. Поэтому отдельно высчитывались горизонтальная и вертикальная составляющие

ускорения: $a_{гор.} = \frac{V_2 \cos \alpha_2 - V_1 \cos \alpha_1}{t}$, $a_{верт.} = \frac{V_2 \sin \alpha_2 - V_1 \sin \alpha_1}{t}$, где

V —скорость, t —время, α —угол перемещения центра тяжести к горизонтали в соответствующих отрезках. Для определения средней силы были взяты параметры первого и последнего отрезков и общее время стадии опоры, а для определения максимальной силы взяты параметры второго и третьего отрезков.

Анализируя данные табл. 1, можно сказать, что с увеличением длины и высоты прыжков возрастает как скорость, развиваемая животным, так и угол вылета центра тяжести тела, причем наибольшее увеличение угла наблюдается при прыжках в высоту. В этих же прыжках, в отличие от прыжков в длину, конечная скорость стадии опоры на задние конечности гораздо меньше. По-видимому, резкое поднятие центра тяжести тела в стадии опоры ограничивает развиваемую скорость. В связи с этим сила, развиваемая животным при прыжках в высоту, меньше таковой при прыжках в длину. Кроме этого, как видно из табл. 1, средние и максимальные силы, развиваемые в стадии опоры на задние конечности, возрастают при увеличении высоты прыжка, а при его удлинении, наоборот, сокращаются. Дело в том, что прыжки как в длину, так и в высоту в исследуемых случаях совершались с разгона, при этом сила, развиваемая животным, зависит от целого ряда причин. Помимо нарастания скорости и изменения угла перемещения центра тяжести тела, важное значение имеют также длина пути, пройденного центром тяжести, и скорость движения. Последняя при удлинении прыжка увеличивается незначительно, поскольку возрастает как длина пути, пройденная

центром тяжести (28,0 и 31,2 см), так и время его перемещения. При увеличении же высоты прыжка скорость увеличивается гораздо больше, так как почти при одинаковом пути (23,6 и 23,8 см) заметно сокращается время стадии опоры на задние конечности (0,07 и 0,06 сек).

Интересно также отметить, что хотя угол шага¹ не меняется (при удлинении прыжка) или даже уменьшается (увеличение высоты прыжка), путь, пройденный центром тяжести в стадии опоры перед прыжком, увеличивается (рис. 2, табл. 2), причем увеличение, заметное для прыжков в длину (на 11,4%) и очень незначительное для прыжков в высоту (на 0,8%).

Как видно из этой таблицы, увеличение длины прыжка не отражается на угле шага, но ведет к изменению наклона угла к горизонтальной плоскости. При увеличении же прыжка в высоту угол шага уменьшается за счет увеличения угла отрыва конечности.

Обобщая полученные данные, нетрудно объяснить причину изменения сил в различных по длине и высоте прыжках. При удлинении прыжка развиваемая кунцеей сила в стадии опоры уменьшается из-за увеличения пути (на 11,4%), тогда как скорость возрастает всего на 3%, а угол перемещения центра тяжести тела к концу стадии опоры—на 83% (табл. 1). При увеличении же высоты прыжка скорость нарастает на 15%, угол перемещения возрастает на 36%, и почти при одинаковом пути соответственно растет и сила.

Кинематика суставов задней конечности. В стадии опоры на задние конечности различают два периода: подготовительный и разгонный. В подготовительном периоде происходит сгибание, а в разгонном—разгибание всех суставов задней конечности. Как показано на графиках (рис. 4), разгонный период для всех суставов наступает одновременно. Раньше всех начинается разгибание тазобедренного, потом голеностопного, а затем и коленного суставов. Чтобы объяснить такую последовательность работы суставов задних конечностей, следует представить животное в движении. С приземлением на задние конечности все их суставы продолжают сгибаться, амортизируя толчок. После короткого подготовительного периода тазобедренный сустав начинает разгибаться первым. В это время центр тяжести тела или перемещается в горизонтальной плоскости, или незначительно приподнимается (прыжки в длину, рис. 2, А, Б). Во время прыжков в высоту, после приземления задних конечностей, центр тяжести тела сразу же начинает перемещаться под большим углом (рис. 2, В, Г). В момент совмещения тазобедренного сустава с голеностопным² начинается разгибание последнего и одновременно увеличивается угол между линией перемещения центра тяжести и горизонтальной плоскостью. Этот угол особенно резко увеличивается, когда коленный сустав включается в разгонный период.

¹ Угол шага образуется двумя прямыми, соединяющими точку опоры с тазобедренным суставом в начале и конце стадии опоры (рис. 3).

² Имеется в виду совмещение их на вертикали.

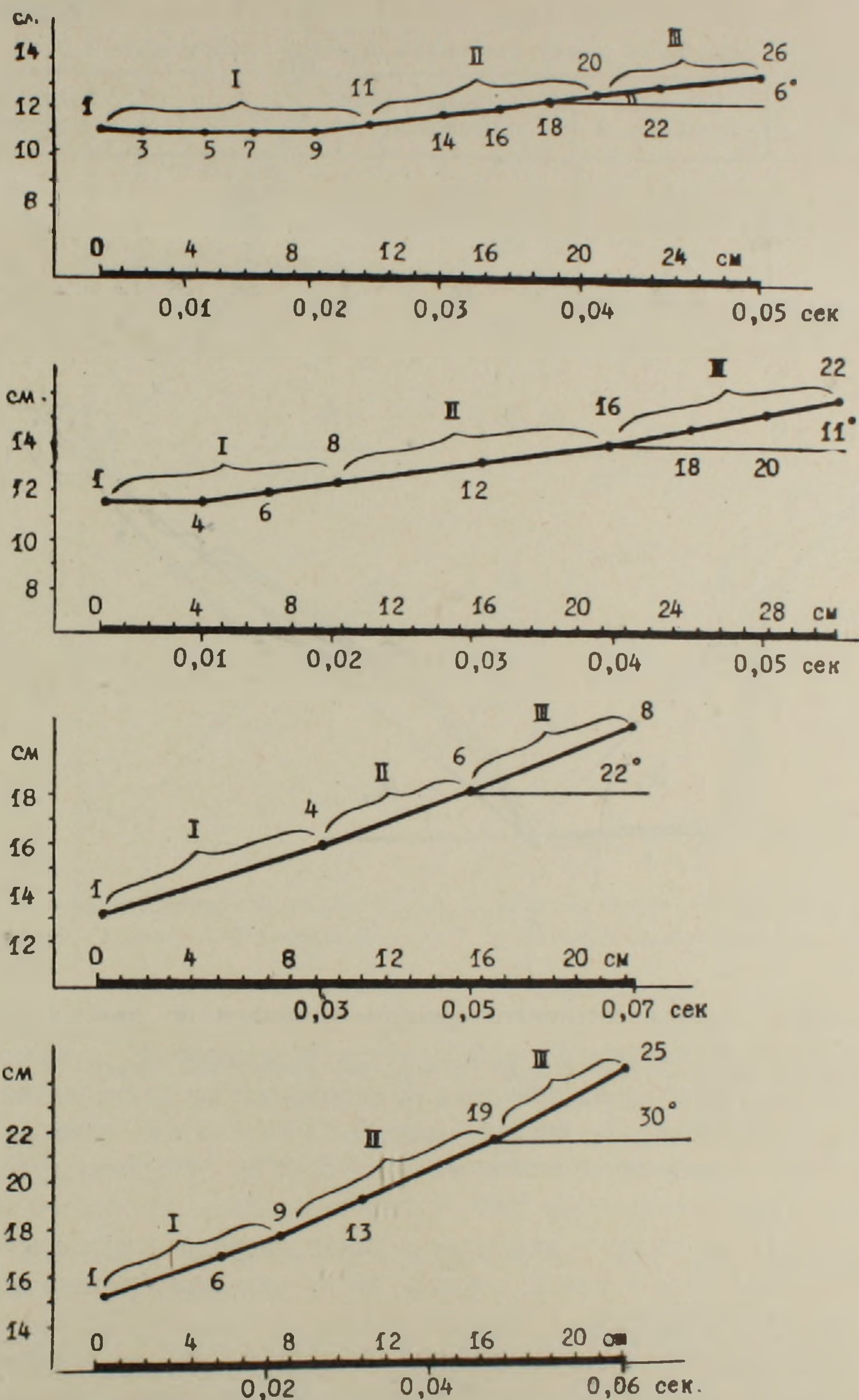


Рис. 2. Траектория перемещения центра тяжести тела на протяжении стадии опоры на задние конечности. Прыжки в длину на 1 м (А) и на 1,6 м (Б). Прыжки в высоту на 0,3 м (В) и на 0,45 м (Г) (на траектории перемещения центра тяжести тела цифрами обозначены номера исследованных кадров). I, II, III—отрезки.

Последовательность работы суставов задней конечности можно объяснить следующим образом. Первым начинает разгибание сустав с большим моментом приложения силы. Таким является тазобедренный

Т а б л и ц а 2

Зависимость между величиной прыжка и углом шага

Прыжки	Величина прыжков, м	Угол приземления конечности	Угол шага	Угол отрыва конечности
В длину	1,0	47	93	40
	1,6	41	93	46
В высоту	0,3	48	72	60
	0,45	48	67	65

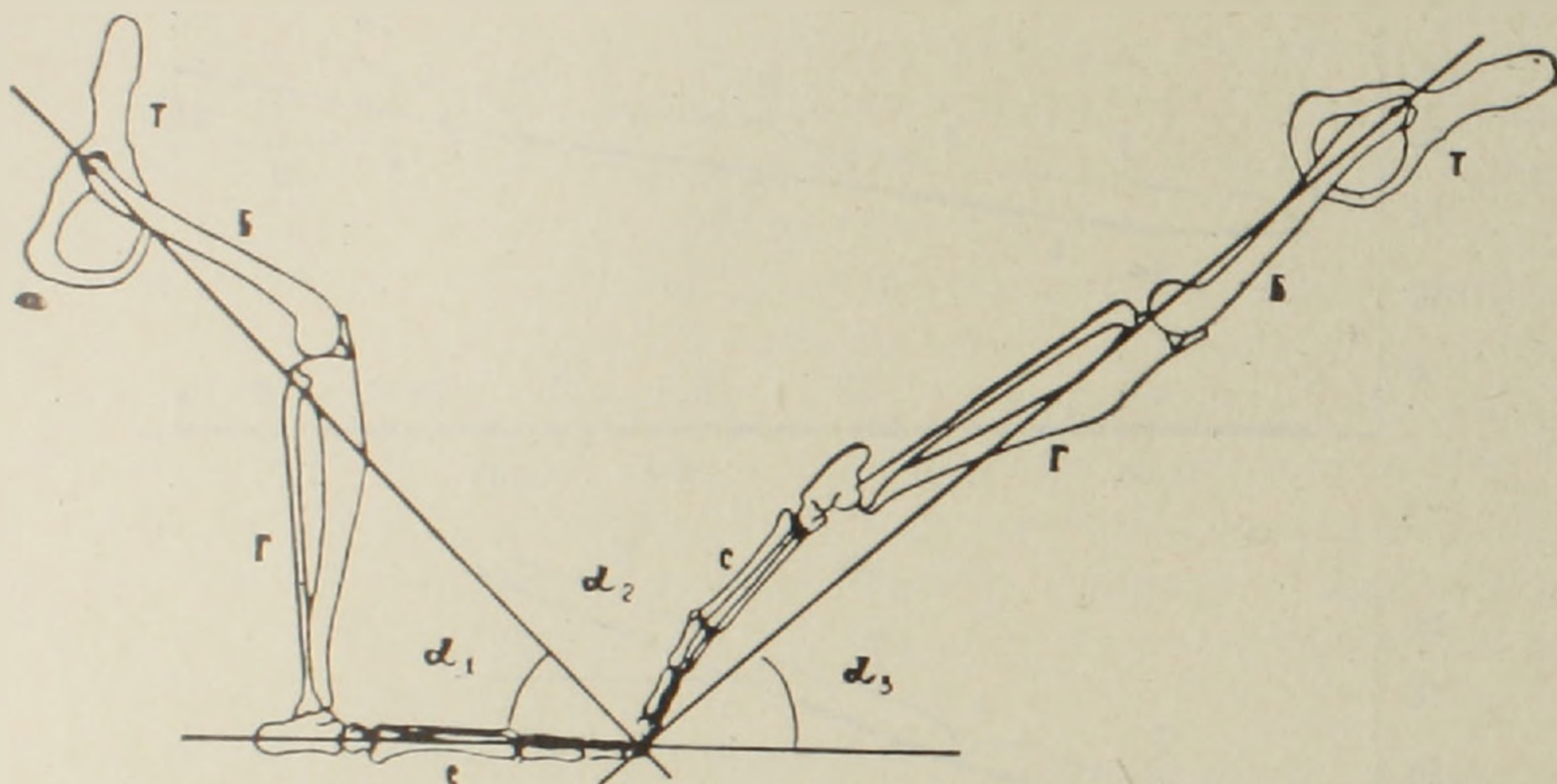


Рис. 3. Определение угла шага. α_1 —угол приземления конечности, α_2 —угол шага, α_3 —угол отрыва конечности. Т—таз, Б—бедро, Г—голень, С—стопа.

сустав, плечо рычага которого длиннее такового в других суставах (рис. 5). Затем включаются в работу суставы, у которых моменты приложения сил относительно невелики. Наибольшее по длине плечо рычага имеет тазобедренный сустав (рис. 5, O_1A), затем голеностопный (рис. 5, O_3B) и, наконец, коленный (рис. 5, O_2B). Последовательность работы суставов напоминает работу переключателя скоростей автомобиля. Сначала включается наиболее мощная первая скорость, чтобы сдвинуть автомобиль с места, а затем, когда уже приобретена инерция, можно увеличить скорость движения.

Так как разгибание суставов происходит не синхронно, следовательно, подготовительный и разгонный периоды стадии опоры для каждого из суставов не будут равными. Соотношение этих периодов резко меняется с увеличением длины и высоты прыжков (табл. 3).

С удлинением прыжка нарастает абсолютное время разгонного периода для всех суставов, тогда как при увеличении высоты прыжка это время сокращается. Это различие связано с изменением общего времени стадии опоры на задние конечности (табл. 1). При удлинении прыжка увеличение этого времени (0,05 и 0,055 сек) приходится на разгонный период, поскольку уменьшается время подготовительного периода. При увеличении же высоты прыжка общее время стадии опоры сокращается

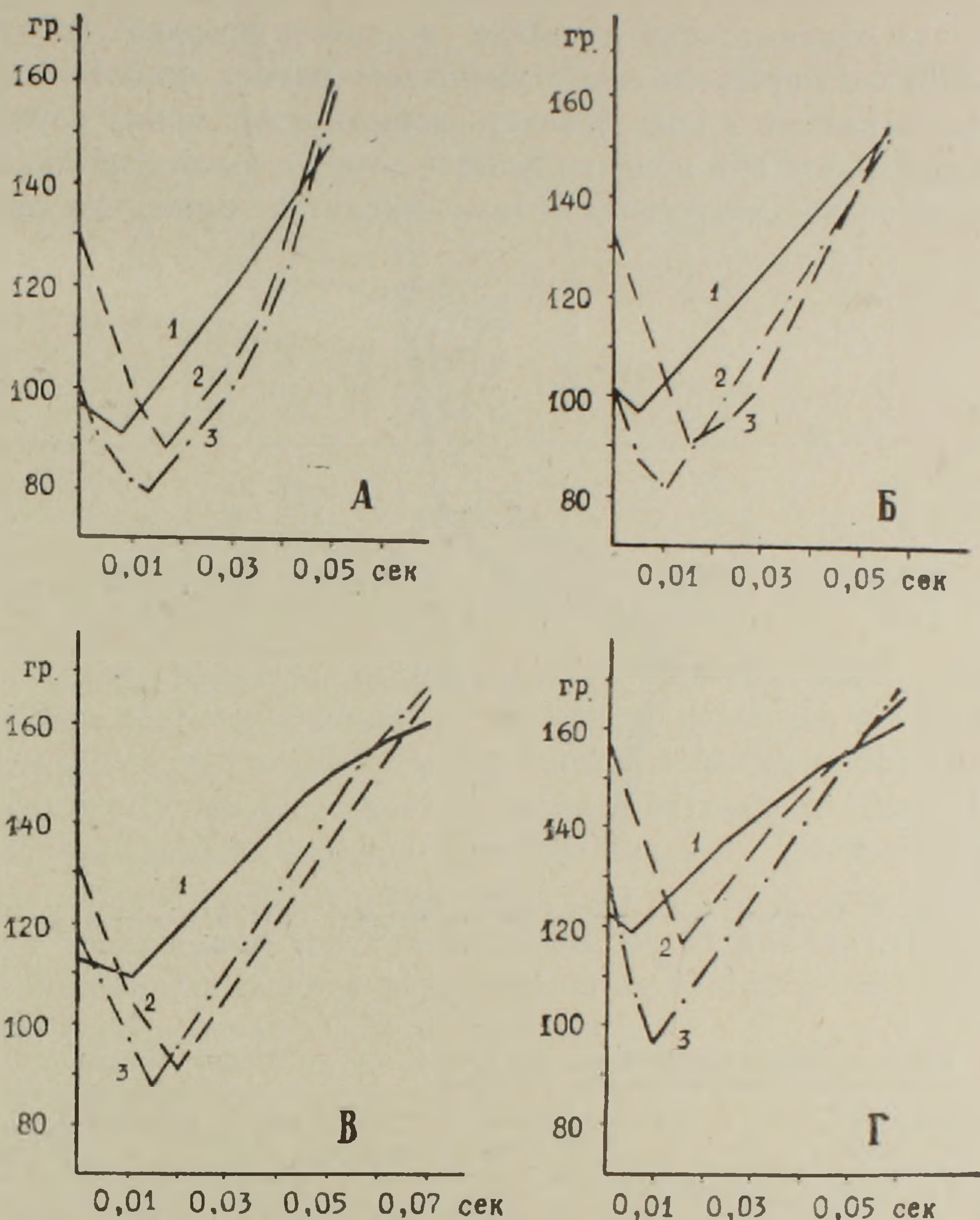


Рис. 4. График кинематики суставов задней конечности каменной куницы. Прыжки в длину на 1 м (А) и на 1,6 м (Б). Прыжки в высоту на 0,3 м (В) и на 0,45 м (Г). 1—тазобедренный, 2—коленный, 3—голеностопный суставы. На оси абсцисс—время стадии опоры в сек, на оси ординат—углы суставов в градусах.

(0,07 и 0,06 сек), что приводит к сокращению, как подготовительного, так и разгонного периодов.

С увеличением прыжков как в длину, так и в высоту размах сгибательно-разгибательных движений во всех суставах уменьшается, причем более резко при увеличении прыжка в высоту (табл. 4).

Поскольку увеличение длины и высоты прыжков ведет к уменьшению размаха сгибательно-разгибательных движений в суставах, следовательно, и в стадии опоры на задние конечности должны наблюдаться соответствующие изменения в режиме работы суставов. Как видно из графика (рис. 4), с увеличением длины и высоты прыжков задние конечности приземляются в более разогнутом положении, а сгибание в их суставах уменьшается. По-видимому, резкое сгибание в суставах в подготовительном периоде затормаживает скорость, приобретенную при беге.

Поэтому при максимальных по длине и высоте прыжках сокращается степень сгибания суставов, что и уменьшает размах сгибательно-разгибательных движений в них. Доказательством этому может служить то обстоятельство, что при максимальных в длину и высоту прыжках в начале стадии опоры центр тяжести тела находится выше, чем при обыч-

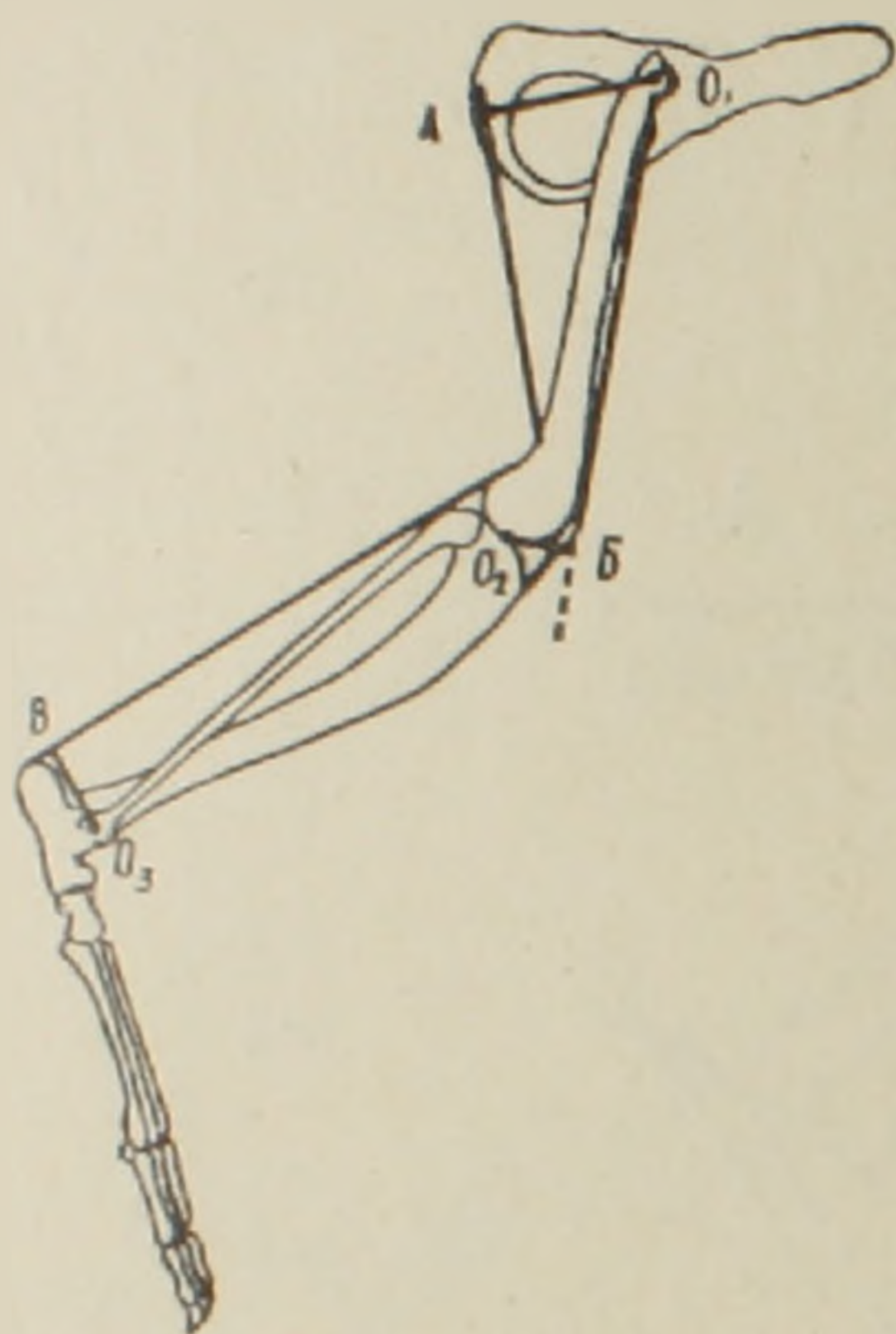


Рис. 5. Моменты приложения сил в суставах задней конечности.

Таблица 3

Длительность периодов стадии опоры при различных прыжках

Прыжки	Величина прыжков, м	Суставы	Время подготовительного периода		Время разгонного периода	
			сек	% к стадии опоры	сек	% к стадии опоры
В длину	1,0	тазобедренный	0,008	16	0,042	84
		коленный	0,017	34	0,033	66
		голеностопный	0,013	26	0,037	74
	1,6	тазобедренный	0,005	9	0,05	91
		коленный	0,015	27	0,04	73
		голеностопный	0,01	18	0,045	82
В высоту	0,3	тазобедренный	0,01	14	0,06	86
		коленный	0,02	28,5	0,05	71,5
		голеностопный	0,015	21,5	0,055	78,5
	0,45	тазобедренный	0,005	8,5	0,055	91,5
		коленный	0,015	25	0,045	75
		голеностопный	0,01	17	0,05	83

ных прыжках. Особенно хорошо это заметно при прыжках в высоту. Уменьшение угла приземления задних конечностей с увеличением прыжка в длину (табл. 2) приводит к сокращению различий в положении центра тяжести при разных в длину прыжках. Так, при увеличении прыжка в высоту разница в положении центра тяжести равна 2 см, а в длину—0,5 см (рис. 2).

Таблица 4

Кинематика суставов задней конечности в стадии опоры при различных прыжках

Прыжки	Величина прыжков, м	Тазобедренный				Коленный				Голеностопный			
		сгибание, г	разгибание, г	размах, г	угловая скорость, радиан/сек	сгибание, г	разгибание, г	размах, г	угловая скорость, радиан/сек	сгибание, г	разгибание, г	размах, г	угловая скорость, радиан/сек
В длину	1,0	90	149	59	24	88	161	73	38	79	157	78	37
	1,6	96	153	57	20	90	154	64	28	81	153	72	28
В высоту	0,3	109	160	51	15	90	165	75	24	87	168	81	26
	0,45	118	162	44	14	116	167	51	20	96	168	72	25

Поскольку увеличение длины и высоты прыжков ведет к изменению соотношения подготовительного и разгонного периодов, а также размаха в суставах задней конечности, то угловая скорость сгибательно-разгибательных движений в суставах не может оставаться без изменений (табл. 4). Из таблицы видно, что в обоих случаях увеличение прыжков приводит к уменьшению угловой скорости в суставах. Это, по-видимому, связано с увеличением крутизны полетов при максимальных по длине и высоте прыжках, поскольку резкое поднятие центра тяжести тела препятствует быстрому разгибанию суставов.

Институт зоологии
АН АрмССР

Поступило 23.II 1973 г.

Ռ. Հ. ՌՈՒԽՅԱՆ

ՔԱՐԱԿԶԱՔՍԻ ՑԱՏԿԵՐԻ ԿԵՆՍԱՄԵԽԱՆԻԿԱՅԻ ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ԳՆԱՀԱՏԱԿԱՆԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հետազոտվել է քարակզաքսի տարբեր երկարության ու բարձրության ցատկերի կենսամեխանիկան: Հոդվածում նշվում են ցատկերի մեծացման հետ կապված կենդանու զարգացրած արագության, ուժի և հրման անկյան փոփոխությունները: Պարզվել է, որ ցատկերի մեծացմանը զուգընթաց փոքրանում է ծալող-տարածող շարժումը հետին վերջավորության հոդերում, որի հետևանքով փոքրանում է և այդ շարժման անկյունային արագությունը: Հրման ժամանակ տարածումը հետին վերջավորության հոդերում կատարվում է որոշակի հաջորդականությամբ: Այն սկսվում է նախ կոնքազդրային, այնուհետև՝ սրունք-թաթային և վերջապես՝ ծնկի հոդերում: Աշխատանքի այսպիսի հաջորդականության դեպքում հրման ուժը հոդերի վրա տնտեսաբար է բաշխվում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гамбарян П. П. Бег млекопитающих. Л., 1972.
2. Новиков Г. А. Бюлл. МОИП. отд. биол., 67, 6, 1956.
3. Рухкян Р. Г. Приспособление к наземному передвижению на примере представителей семейств беличьих и куньих. Автореф. канд. дисс., Ереван, 1971.
4. Badoux D. M. Acta Anat., 62, 1965.
5. Bennet-Clark H. C., Lucey E. C. A. J. exp. Biol., 47, 1967.
6. Brown R. H. J. Nature, London, 214, 1967.
7. Hall-Craggs E. C. B. J. Zool., London, 147, 1965.
8. Hoyle G. Proc. R. Soc., B, 143, 1955.