

К.А. Шошенко

Лекции по экологической физиологии

Лекция 4

Структура мышц и механизм их сокращения

Стоимость мышечной работы

Спортивные тренировки

Различают

гладкие и поперечно-полосатые мышцы.

Первые состоят из мелких клеток (миоцитов),

вторые образованы длинными

(иногда равными длине мышцы) волокнами

диаметром от нескольких до сотен микрон.

**Скелетное мышечное волокно образовалось
по время онтогенеза при слиянии миоцитов.**

**Гладкая мускулатура находится
в стенках полых органов
(желчный, мочевой пузыри,
пищеварительный тракт)
и в различных проводящих трубках,
в том числе в стенках кровеносных
и лимфатических сосудов.**

**Эти мышцы медленно сокращаются,
обеспечивая форму органа и
перемещение в нем содержимого.**

**Масса этих мышц небольшая
и потребность в кислороде невелика.**

**Масса поперечно-полосатых (скелетных) мышц
у взрослых позвоночных,
в том числе у теплокровных.**

составляет около 40% обезжиренной Мт.

**Есть виды позвоночных
(зимнеспящие, морские),
у которых масса жира может достигать
и превышать половину Мт.**

**У таких животных
относительная масса всех органов,
в том числе и скелетной мускулатуры
будет ниже в два и более раза.**

У человека около 600 поперечно-полосатых мышц от очень маленьких, например, глазных, до самых больших – четырехглавой бедра.

Функцию каждой скелетной мышцы определяют:

- 1. положение мест ее прикрепления,**
- 2. положение волокон в мышце (косое, продольное),**
- 3. волоконный состав мышцы.**

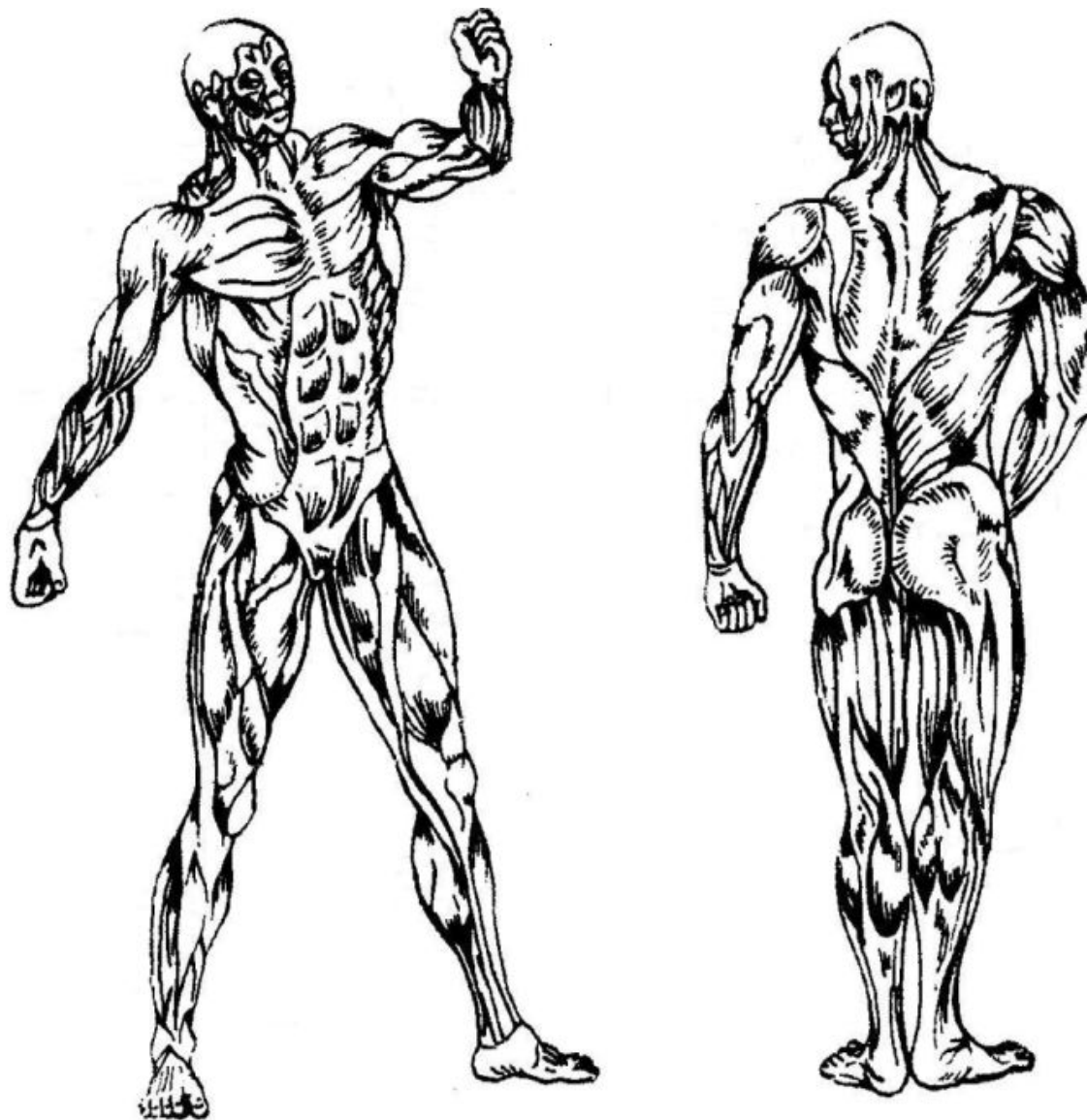


Рис. 28. Расположение мышц у человека-атлета [39]

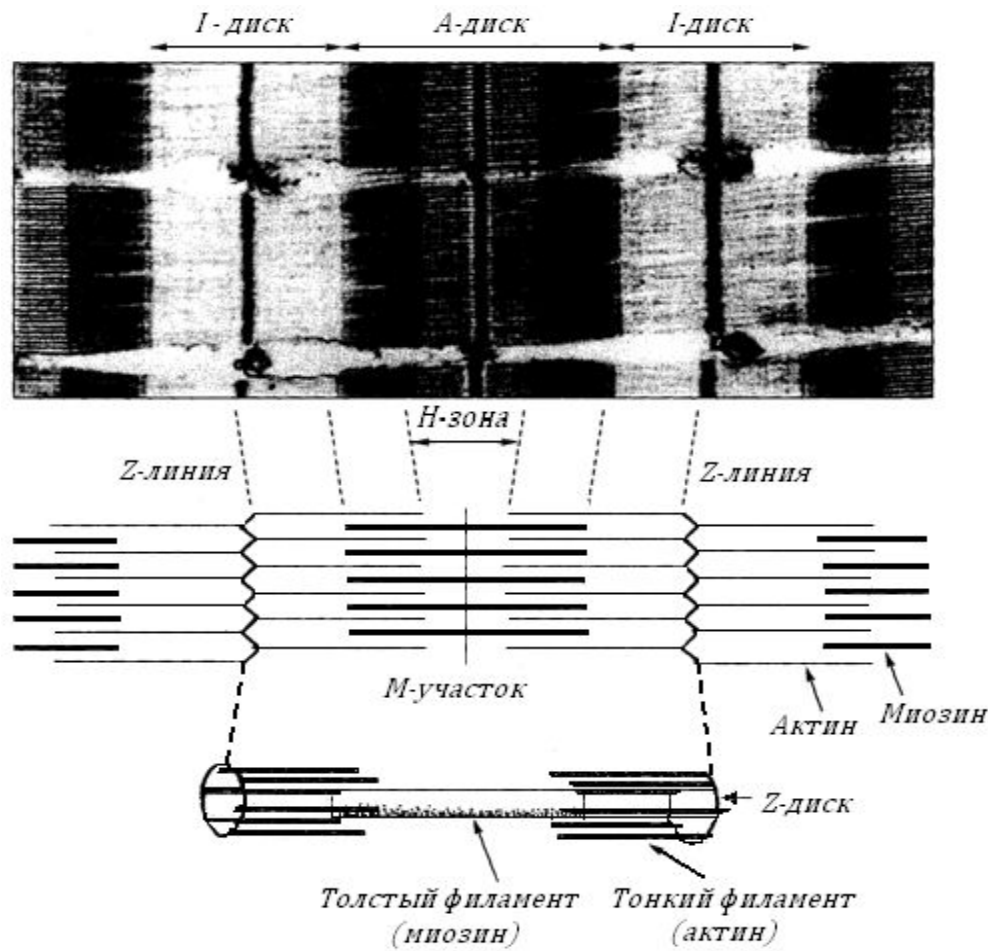


Рис. 29. Схема миофибрилл мышечного волокна (Huxley, 1972), по: [31].

На продольном срезе волокна видна его поперечная полосатость. Она обусловлена тем, что миофибриллы - волокна (их диаметр до 1-2 мкм) состоят из толстых и тонких нитей, образованных волокнистыми белками и лежащими в волокне строго параллельно.

Толстая нить (диаметр 15-17 нм) состоит из белка миозина, а окружающие ее тонкие (6 нм) нити образованы белком актином.

В светлом участке миофибриллы (I-диск) располагаются только тонкие актиновые нити, а в темном (А-диск) - толстые миозиновые нити, одни 6-ю актиновыми нитями.

Через участок тонких нитей проходит мембрана (линия Z), связывающая эти нити с наружной мембраной волокна – сарколеммой.

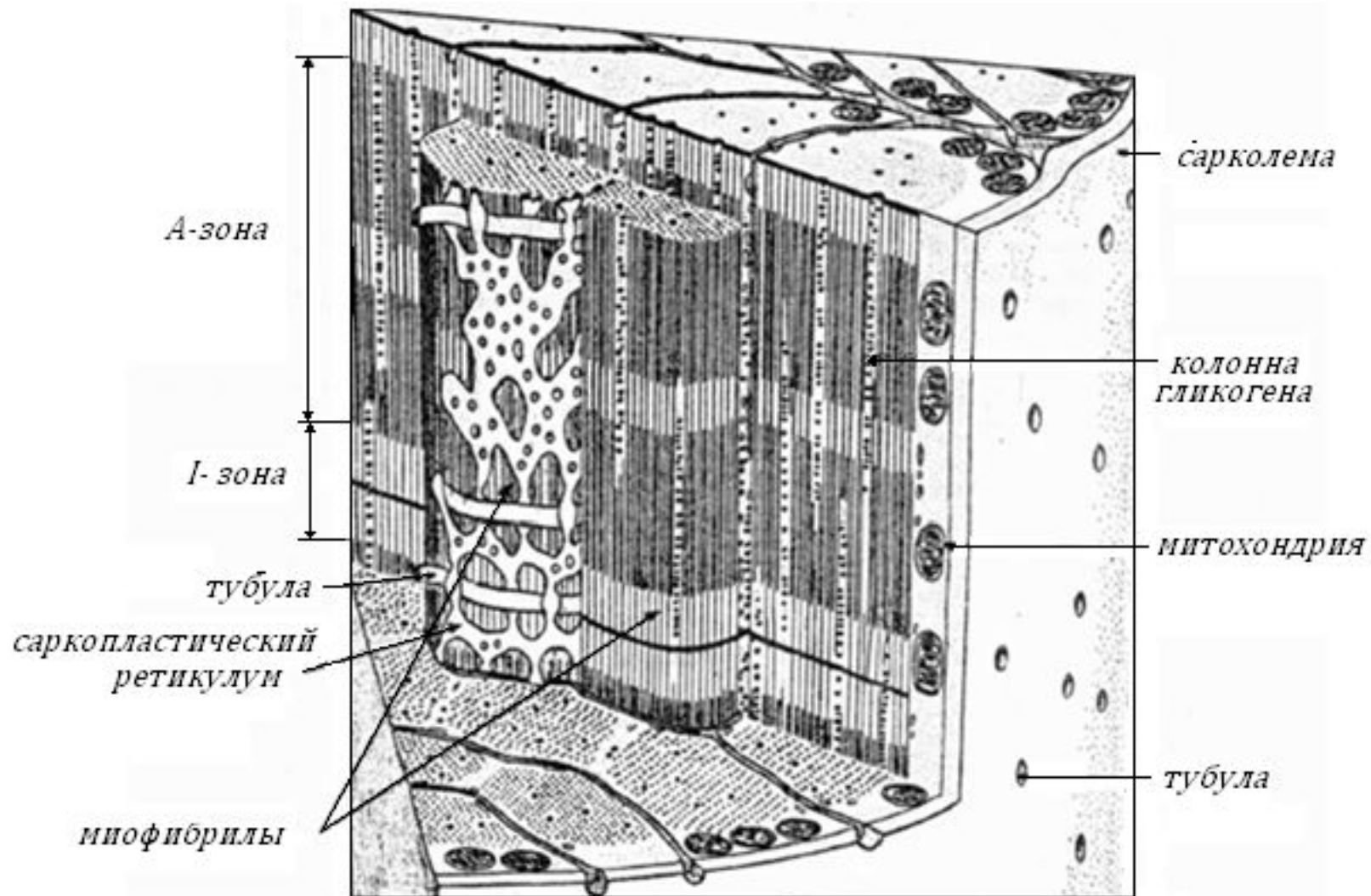


Рис. 30. Схематическое строение мышечного волокна (Hoyle, 1970), по: [98].

Основные структуры мышечного волокна

Сократительные:

миофибриллы, состоящие из нитей актина и миозина (они располагаются в определенном порядке вдоль волокна).

Передающие возбуждение:

система разветвленных трубок и цистерн, (Т-система образована двухслойной мембраной и соединена с сарколеммой).

Продуцирующие энергию для сокращения:

(митохондрии, расположенные вдоль миофибрилл).

При сокращении мышечного волокна

- * Возбуждение по нерву приходит на его концевую пластинку на волокне, где образуется ацетилхолин.**
- * Возникает деполяризация мембраны волокна и появляется потенциал действия.**
- * Электрический ток распространяется по Т-системе, высвобождая из ее цистерн кальций.**
- * Кальций вызывает энерго - зависимое эластическое скручивание нитей актина и миозина и втягивание нитей актина вдоль нитей миозина.**
- * После расслабления приходит следующий нервный импульс, и все процессы повторяются.**

**Переносчиком энергии
окисляемых в Мх питательных веществ,
к актомиозину служит креатин – вещество,
легко проникающее через мембрану Мх.**

В Мх:

**АТФ + креатин → АДФ + креатинфосфат
(креатинфосфат направляется к актомиозину).**

Вблизи актомиозина:

**креатинфосфат + АДФ → АТФ + креатин
(креатин направляется в Мх).**

**АТФ → АДФ + Фосфат + 8.7 ккал
(энергия используется для сокращения)**

У теплокровных максимальная мышечная работа обеспечена фосфатными связями АТФ, образованными, в основном, за счет окисления; лишь на первых секундах работы участвует анаэробный гликолиз.

У холоднокровных заметное участие в энергообеспечении мышечного сокращения принимает анаэробный гликолиз.

Считают, что переход от холоднокровных к теплокровным позвоночным обусловлен необходимостью быстрых движений. Это потребовало большей выработки полезной энергии и высокой скорости аэробного синтеза АТФ.

Таблица 11.
Образование АТФ (мкМ/г Мт) при 5-минутной
максимальной мышечной активности
(Bennett, Ruben, 1979), по: [55].

Животное	Мт, г	Аэробное	Анаэробное	Общее
Кенгуровая крыса	35	<u>98</u>	9	107
Ящерица	13	24	22	46

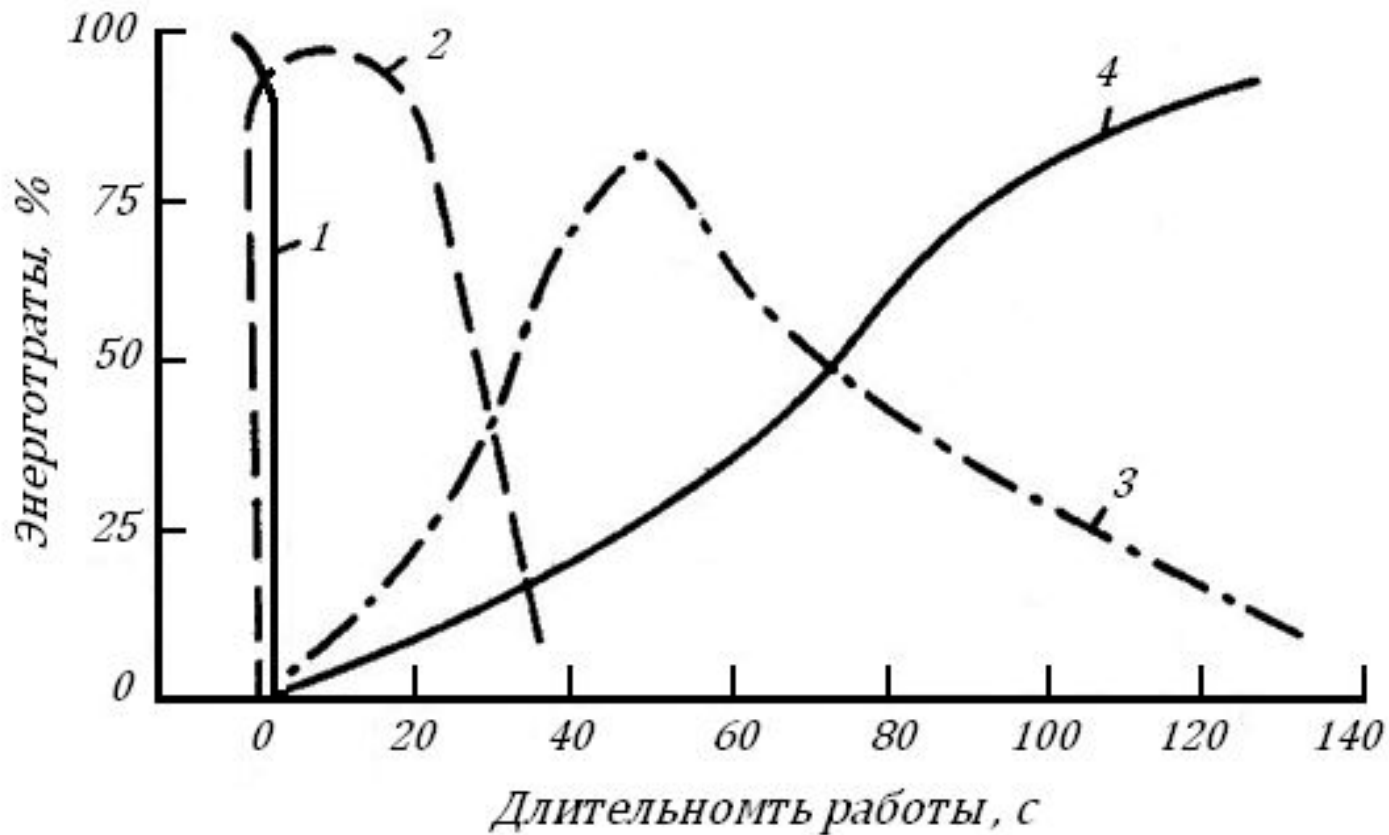


Рис. 31. Участие различных источников энергии в энергообеспечении мышечной деятельности в зависимости от ее длительности у теплокровного (Keul et al., 1969), по: [83].

По оси абсцисс – длительность работы, по оси ординат – доля в энергообеспечении: 1. расщепление АТФ, 2. распад креатинфосфата, 3. гликолиз, 4. аэробное окисление.

**У позвоночных различают
два крайних типа мышечных волокон:**

**быстрые, способные к тетаническому сокращению
и работе в долг (белые волокна)**

**и медленные тонические
с высокой потребностью в кислороде
(красные волокна).**

**Между ними располагаются
промежуточные типы
с разным набором свойств.**

Таблица 12. Биохимические и физиологические параметры двух типов мышечных волокон, [82, 83]

Параметры волокна	Белые быстрые	Красные медленные
Ритм сокращений в 1 с	30-50	10-15
Коллаген, мг/г	51	14
Гликоген, ммоль/кг	28	24
Миоглобин, г/кг	4.0	8.7
Нейтральный жир, мэкв/г	6.9	34
Свободные жирные кислоты, мэкв/г	0.077	0.265
Цитохром а, нМ/г	1.1	7.5
Активность, мМ□г⁻¹□мин⁻¹, АТФ-азы цитохромоксидазы *	107 1.8	32 3.9

***Активность цитохромоксидазы оценивалась по числу мМ индовенолового синего.**

**Таблица 13. Концентрация фосфора, мМ Р/кг,
в мышцах различных животных [83]**

Речной рак	13	Лягушка	11
Кузнечик	13	Черепаша	11
Саранча	12	Мышь	12
Навозный жук	12	Собака	11

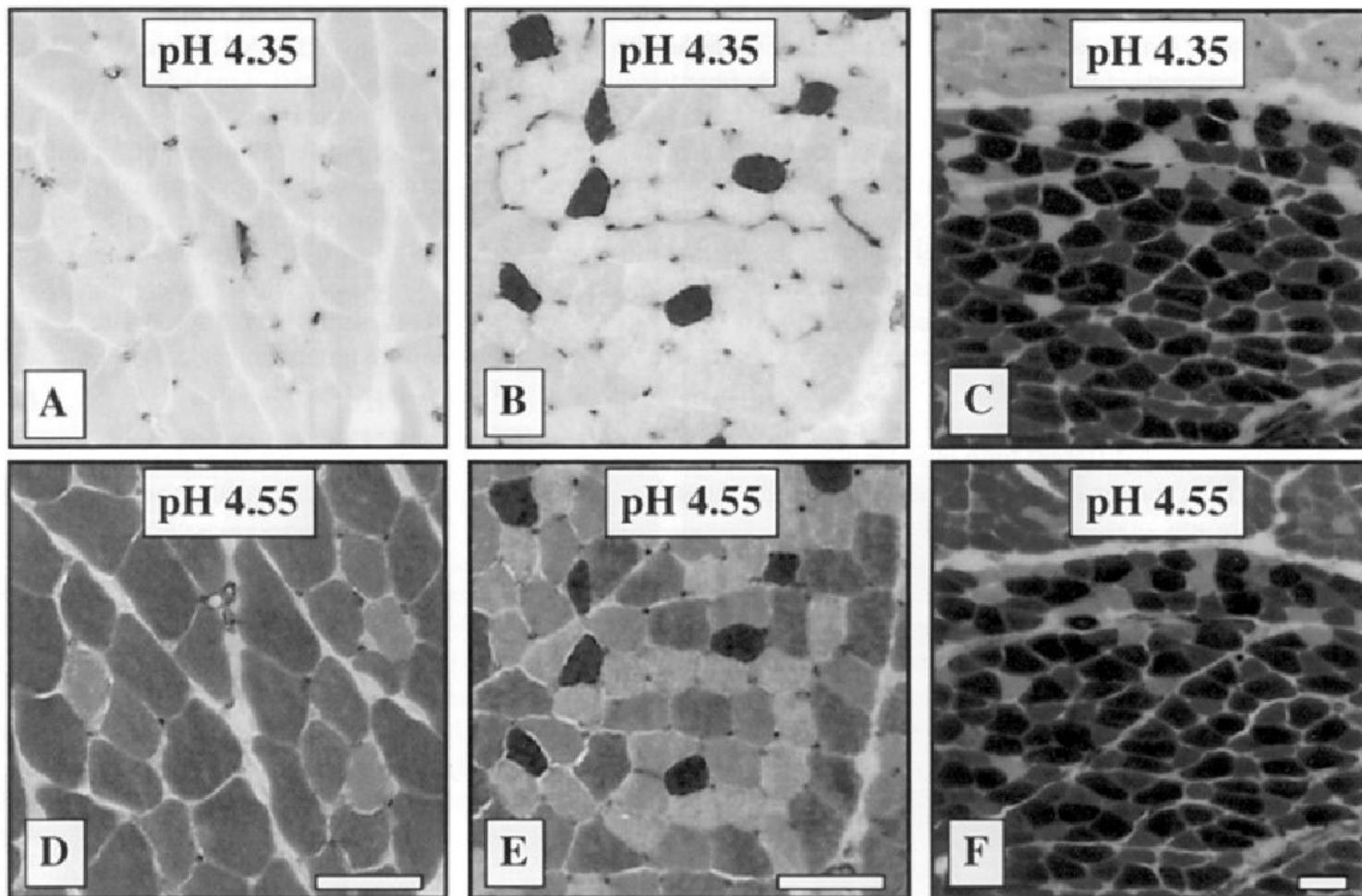


Рис.32. Поперечный срез двуглавой (А, D), икроножной (В, Е) и полусухожильной (С, F) мышц морской свинки [88]

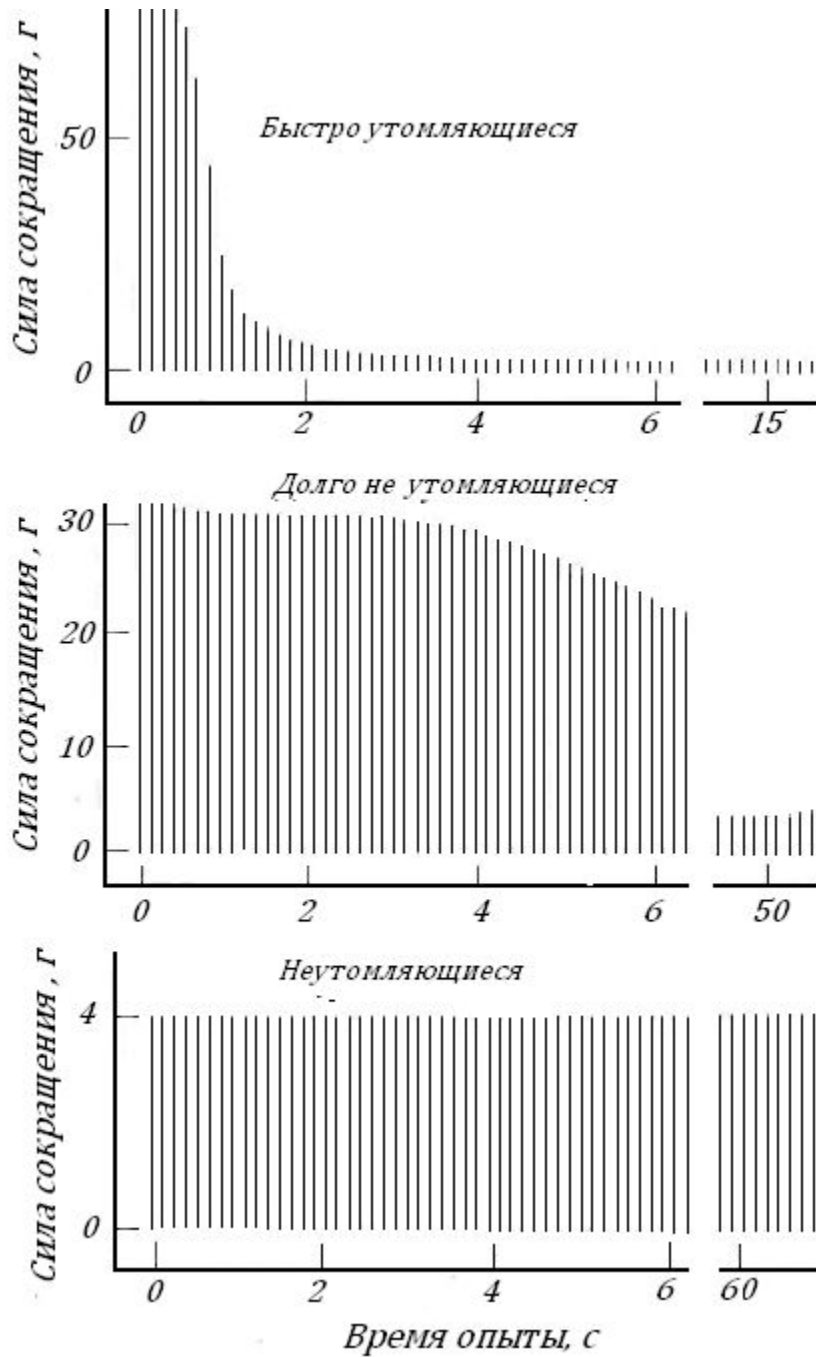


Рис. 33. Характер сокращения икроножной мышцы кошки при электрическом раздражении разных мотонейронов в спинном мозге (Burke et al., 1971), по: [72].

•
**Разные виды животных,
используя разную волоконную структуру мышц,
приспосабливают свою двигательную активность
к среде обитания.**

***У мелких теплокровных* с их высокими тепловыми потерями
мышцы состоят преимущественно из красных волокон
с высокими кислородным запросом и теплопродукцией.**

***Крупные теплокровные* могут производить
быстрые сильные, но сравнительно кратковременные
движения (иногда с кислородным долгом).**

**Однако им также необходима
красная постоянно работающая тоническая мускулатура,
поддерживающая форму их тела.**

**У мелких теплокровных
по сравнению с более крупными
не только выше БМ,
но и существенно выше
стоимость проведенной ими
одинаковой по величине работы.**

**Эта стоимость пропорциональна,
в среднем, $Mt^{0,67}$.**

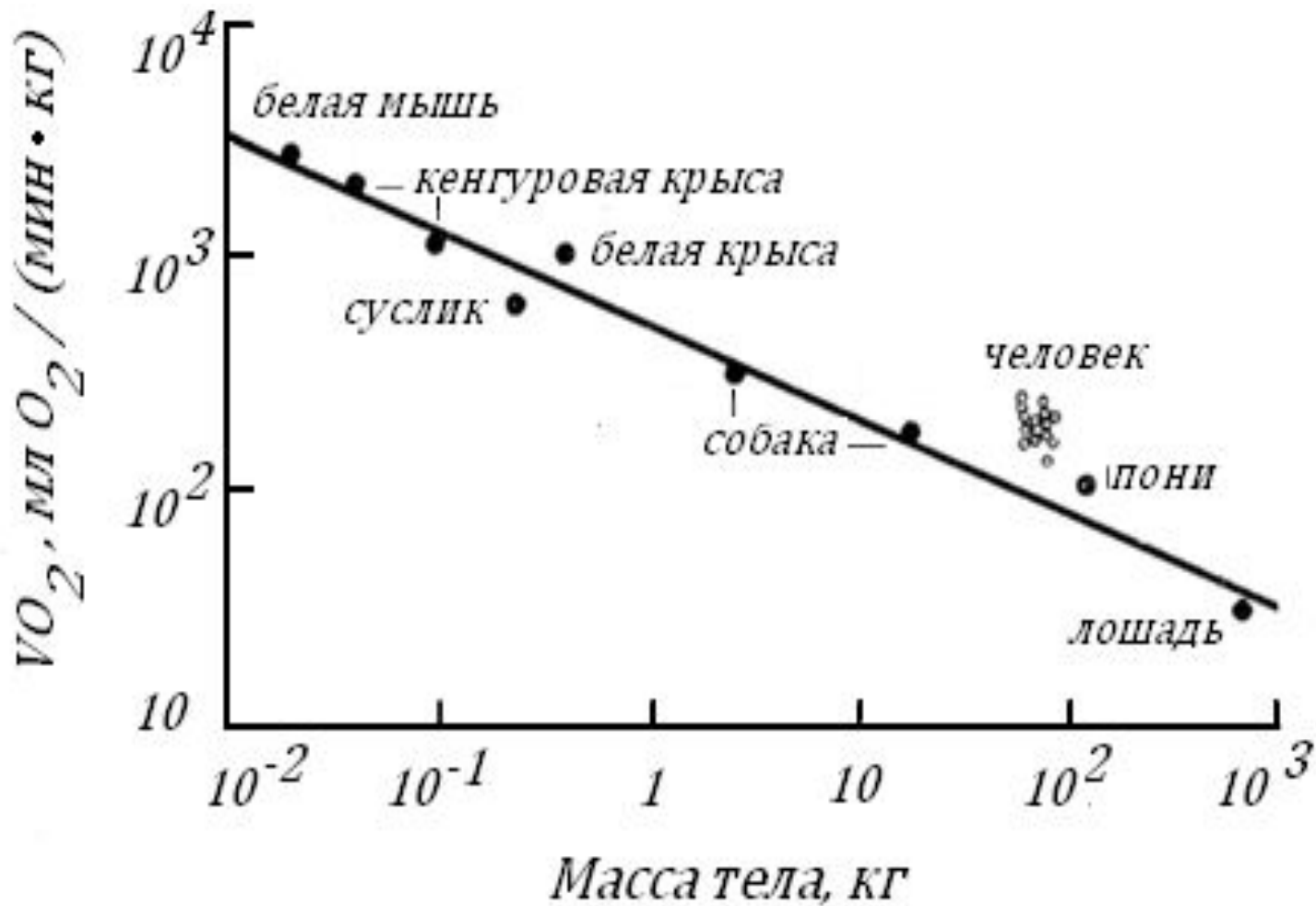


Рис. 34. Цена бега с перемещением 1 кг Мт на расстояние 1 км, выраженная в мл O_2 (Taylor et al., 1970), по: [73].

Затраты энергии при разных видах передвижения с произвольной скоростью - полет в воздухе, плавание в воде, бег и ходьба по земле – также зависят от Мт. Они меньше при плавании и больше при беге или ходьбе

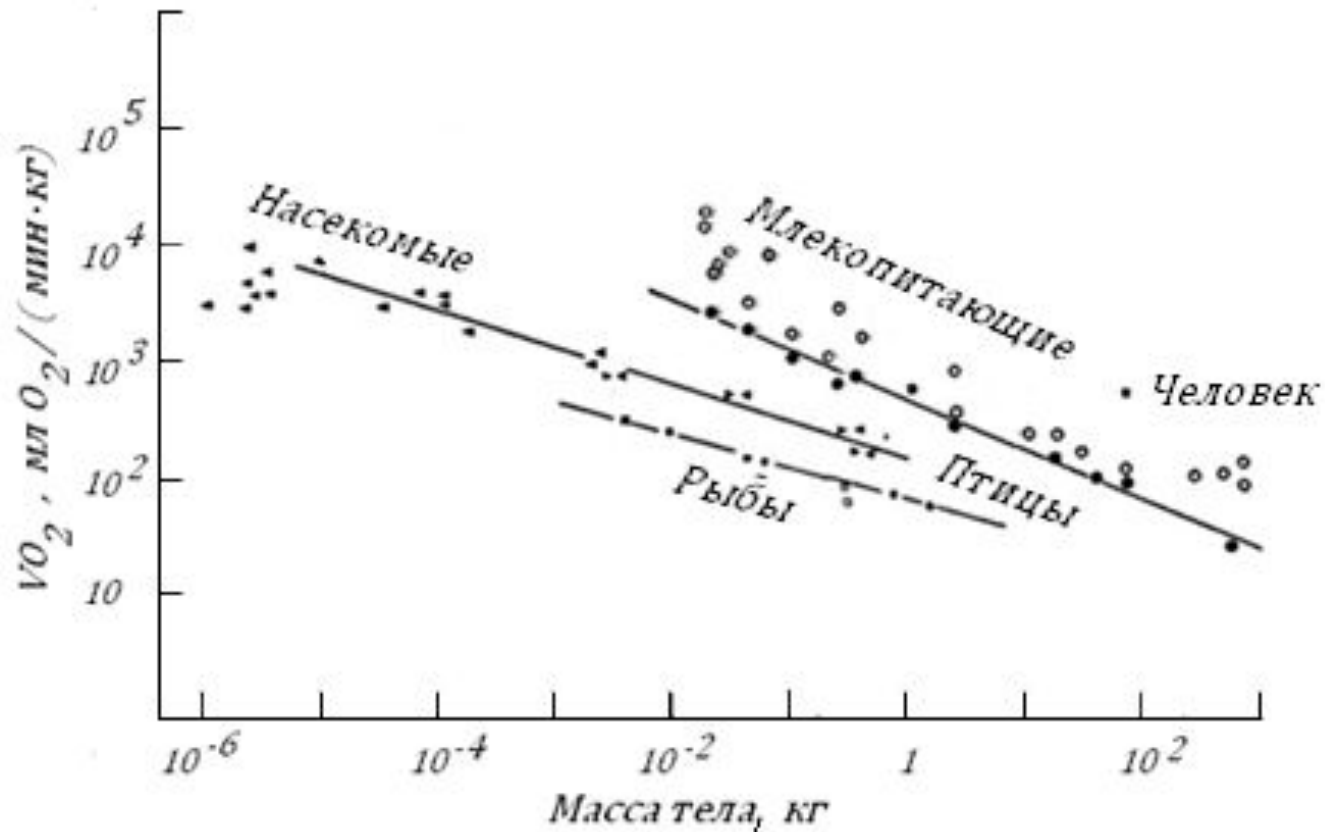


Рис. 35. Сравнение энергетических затрат на перемещение массы тела в 1 кг на 1 км при беге, полете и плавании [70].

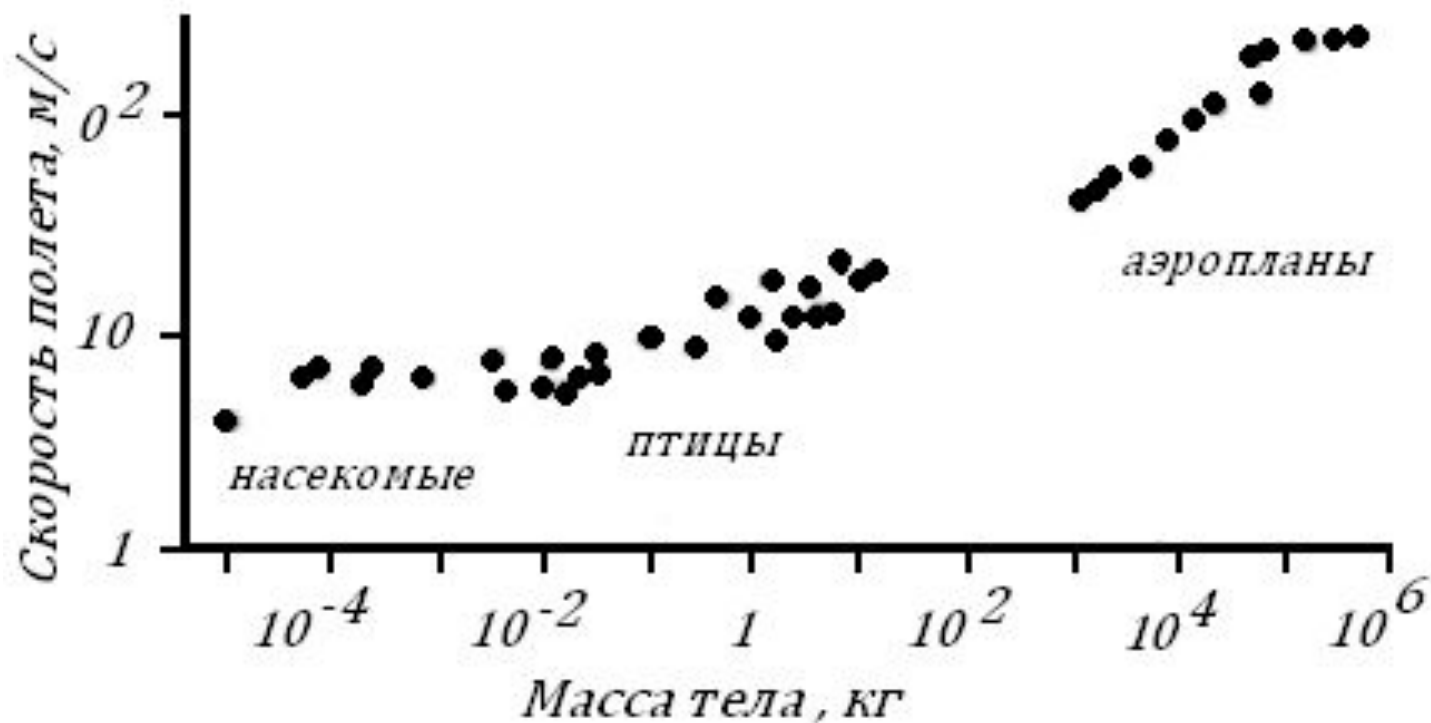


Рис. 36. Скорость полета насекомых, птиц и аэропланов с разной массой тела [84].

**Таблица 14. Уравнения для цены бега как функции массы тела (г),
полученными различными исследователями [73]**

Число видов	Уравнение цены, мл O₂ • г⁻¹ • км⁻¹	Цена при Мт 1 кг, л O₂ • км⁻¹
7 (млекопитающие)	8.46 • Мт^{-0.40}	0.53
8 (пресмыкающие)	5.9 • Мт^{-0.33}	0.60
7 (птицы)	2.45 • Мт^{-0.20}	0.62
22 (млекопитающие)	6.35 • Мт^{-0.34}	0.61
52 (млекопитающие, птицы, пресмыкающие)	5.01 • Мт^{-0.32}	0.55
69 (млекопитающие, птицы, пресмыкающие)	3.89 • Мт^{-0.28}	0.56
72 (млекопитающие, птицы, пресмыкающие, муравьи)	8.61 • Мт^{-0.35}	0.75
62 (млекопитающие, птицы)	4.73 • Мт^{-0.32}	0.53

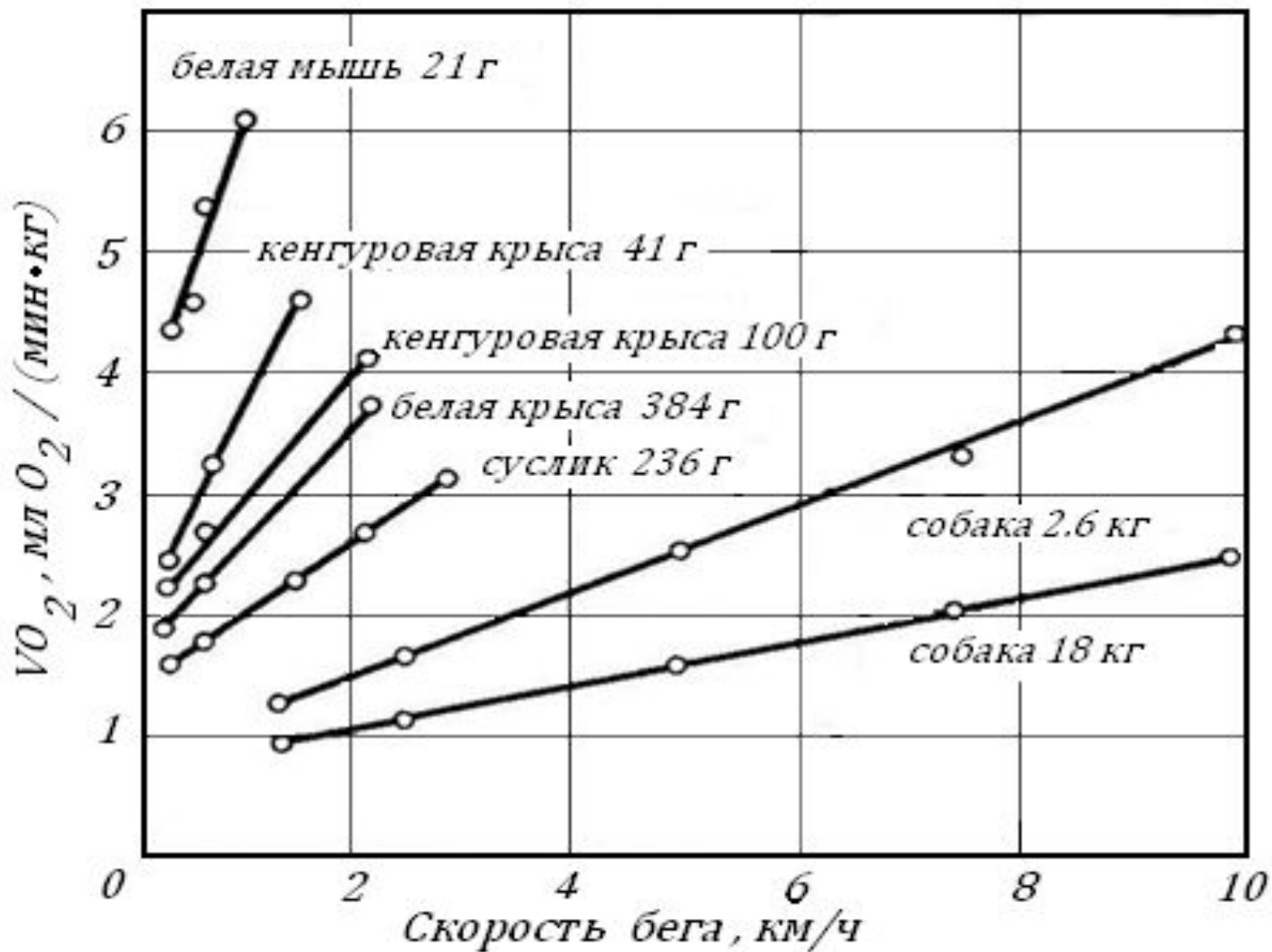


Рис. 37. Зависимость потребности в кислороде от скорости бега у млекопитающих с разной массой тела, (Taylor et al., 1970), по: [71].

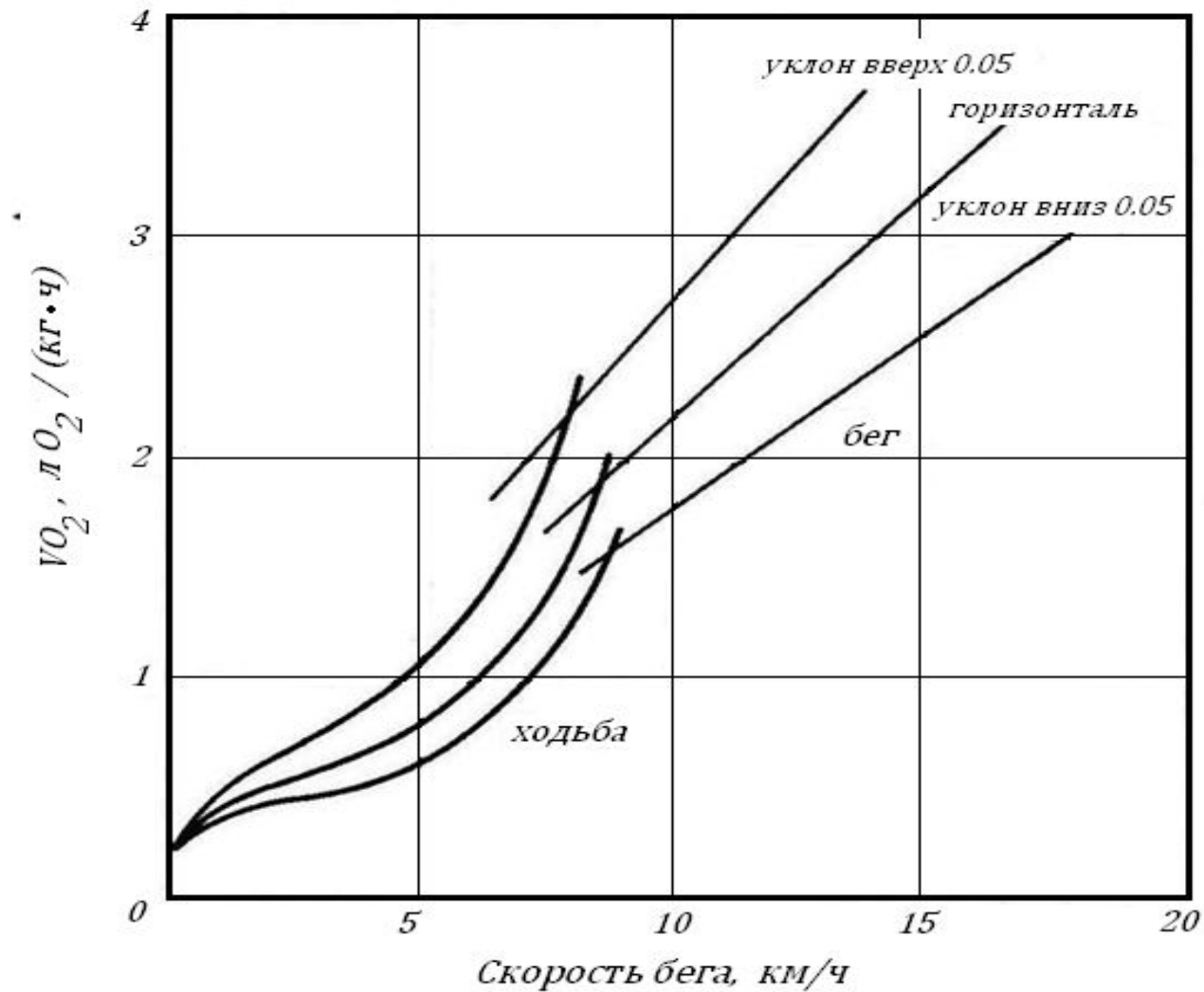


Рис. 38. Затраты энергии у человека при ходьбе и беге по ровному месту, со спуском и подъемом (Margaria et al., 1963), по: [71].

Таблица. 15. Прирост морфо-функциональных показателей в скелетных мышцах, % к уровню нетренированного животного (*-достоверные различия) [56]

Показатель	Вид упражнения		
	на выносливость	скоростные	силовые
Масса мышц, % МТ	9	32	39
Толщина волокон	0	24	30
Плотность Мх	60	30	-
Белки миофибрилл	7	63	68
Миоглобин	40	58	53
Гликоген	80	70	38
Ферменты гликолиза	0-9	25-30	-
Ферменты окисления	50 - 230	50 - 100	-
АТФ	0	0	0
Креатинфосфат	80	70	38

*Тренировки увеличивают
максимальные пределы*

**скорости потребления кислорода и энергии,
наибольшего объема внешнего дыхания и МОК.**

**При этом расход энергии в покое
остается без заметных изменений**

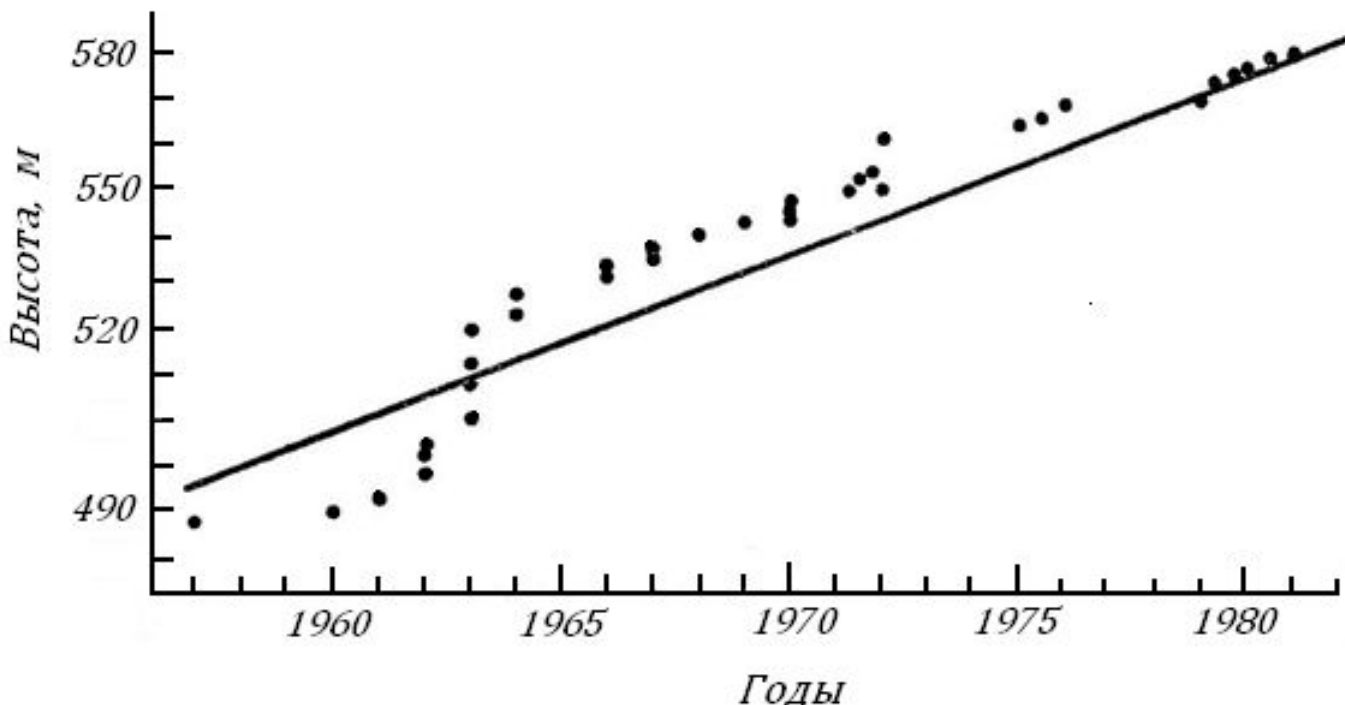
Таблица 16. Сравнение физиологических показателей у двух мужчин в возрасте 25 лет с массой тела 70 кг при интенсивной тренировке на выносливость и без нее [62]

Показатель	Нетренированные	Тренированные
Частота пульса, мин⁻¹, в покое лежа	80	40
максимальная	180	180
Ударный объем сердца, мл, в покое	70	140
максимальный	100	190
Сердечный выброс, л/мин, в покое	5.6	5.6
максимальный	18	35
Объем сердца, мл	700	1400
Масса сердца, г	300	500
Объем дыхания максимальный, л/мин	100	200
Потребление O₂ максимальное, л/мин	2.8	5.2
Объем крови, л	5.6	5.9

Ученые могут выявить потенциальные возможности человека выполнять физические упражнения и прогнозировать возможные результаты.

Так, по изменению высоты прыжков с шестом за 1957-82 гг считалось, что 6-метровая высота будет преодолена мужчинами к концу 80-х годов [45].

В 1994 г С. Бубка достиг рекордной высоты в 6 м 14 см, которая не превышена и поныне.



Согласно легенде в 490 г до н. э. греческий воин пробежал, не останавливаясь, от местечка Марафон до Афин (около 40 км), и, возвестив о победе греков над персами, упал и умер.

На первых олимпийских играх в 1896 г грек С. Луис преодолел марафонскую дистанцию (42 км и 125 м) за 2 ч 58 мин и 50 с.

В 2008 г эфиоп Х. Гебреселассие достиг существующего в настоящее время рекорда на этой дистанции – 2 ч 3 мин и 59 с.

**Достижения далеко не по всем видам спорта быстро растут.
Те, в которых техническое оснащение отсутствует,
и все зависит только от самого человека,
достижений ждут десятилетиями или они почти отсутствуют.**

**Это касается, например, бега на 100 м.
За 73 г рекорд в беге на эту дистанцию
изменился только на 0.44 с:**

Д. Оуэнс (США)	1936 г	10.2 с	1999 г	9.79 с	
	1956 г	10.1 с	2002 г	9.78 с	
	1960 г	10.0 с	2005 г	9.77 с	
	1968 г	9.86 с	2006 г	9.76 с	
	1994 г	9.85 с	2007 г	9.72 с	
	1996 г	9.84 с	2009 г	9.58 с	У. Болт (Ямайка)

**После прекращения
интенсивных тренировок,
длящихся в течении 5 мес,
возвращение к исходному уровню
происходит для**

**скоростных движений
через 4-6 мес,**

мышечной силы – через 18 мес,

выносливости - через 2-3 года.

Задача 3.

Найти цену передвижения на 1 км: в мл O_2 и ккал

всего животного и на 1 кг Мт

мыши 10 г, человека 60 кг и слона 3 т.

$$\text{Цена. мл } O_2/\text{км} = 7.7 \cdot \text{Мт}^{0.68} \text{ (г)}$$

$$1 \text{ ккал} = 208 \text{ мл } O_2$$

$\text{Мт}^{0.68}$	для 10 г	4.79 г
	для 60 кг	1 775 г
	для 3 т	25 377 г

Решение задачи 13.

В мл O₂/км: Мышь 36.9 или 3688/кг

Человек 13668 или 228/кг

Слон 195403 или 65/кг

В ккал/км: Мышь 0.18 или 18/ кг

Человек 66 или 1.1/кг

Слон 939 или 0.31/кг