

## Лекция № 2

# **БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА**



# План лекции

- 1. Рекомендуемая литература
- 2. Понятие о биомеханическом анализе
- 3. Классификация биомеханических характеристик движений человека
- 4. Кинематические характеристики движений человека
- 5. Динамические характеристики движений человека

# Рекомендуемая литература

1. Донской Д.Д., Зациорский В.М. Биомеханика: учебник для институтов физ. культуры.- М.: Физкультура и спорт, 1979. - 264 с.
2. Кичайкина Н.Б. , Козлов И.М., Самсонова А.В. Биомеханика.- СПб.: СПбГУФК им. П.Ф. Лесгафта, 2008. - 160 с.

# Понятие о биомеханическом анализе

Биомеханический анализ движений человека всегда начинается с определения различных характеристик движущегося тела. Этими характеристиками могут быть различные **механические характеристики** (например, перемещение, скорость, ускорение) и **биологические характеристики** (сила тяги мышцы, время суммарной электрической активности мышцы и т.д.). Некоторые из этих характеристик определяются экспериментально, а остальные – расчетным путем. В биомеханике наиболее широко используются механические характеристики движущегося тела.

# Классификация биомеханических характеристик движений человека

**Биомеханические характеристики движений человека** – это показатели и соотношения, используемые для количественного описания и анализа двигательной деятельности человека.

Биомеханические характеристики делятся на:

- **Механические** (количественные показатели механического состояния тела человека или его движения).
- **Биологические** (количественные показатели, характеризующие длину, плечо силы и скорость сокращения мышц, а также длительность их активности).

Исследуя движения человека, измеряют количественные показатели механического состояния тела человека или его движения, а также движения звеньев тела, то есть регистрируют механические характеристики движений.

**Механические характеристики** движений человека – это показатели и соотношения, используемые для количественного описания и анализа двигательной деятельности человека. Они **делятся на две группы:**

- **кинематические** (описывают внешнюю картину движений);
- **динамические** (несут информацию о причинах возникновения и изменения движений, а также показывают, как меняются виды энергии при движениях и происходит сам процесс изменения энергии).

# Кинематические характеристики движений человека

Кинематические характеристики движений человека делятся на следующие группы:

- **Пространственные** (координаты тела, перемещение тела, траектория тела).
- **Временные** (длительность движения, темп движений, ритм движений).
- **Пространственно-временные** (скорость тела, ускорение тела).

# Пространственные характеристики

Если моделировать тело человека в виде точки, то его положение в пространстве будут характеризовать следующие **пространственные характеристики**:

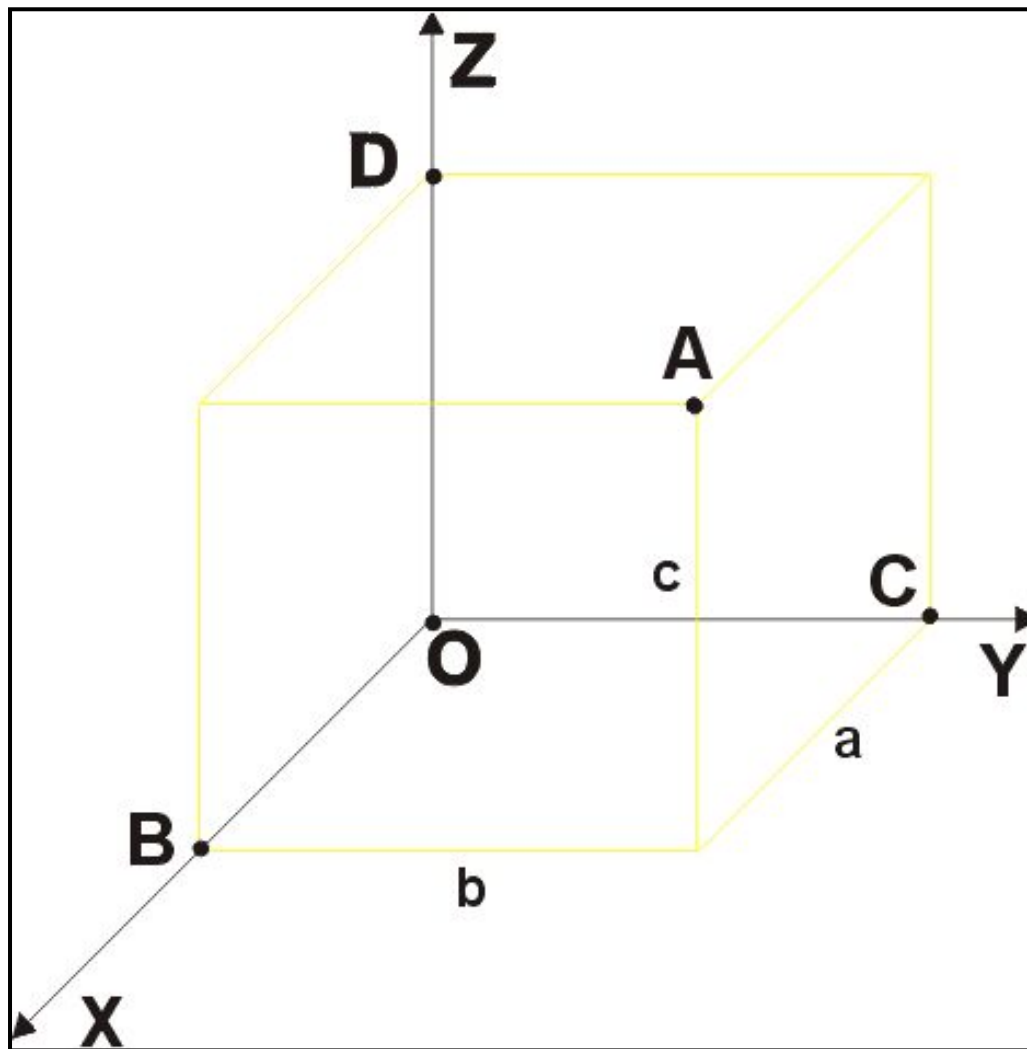
- **координаты точки (тела);**
- **траектория точки (тела);**
- **перемещение точки (тела).**

Координаты тела – это пространственная мера местоположения тела относительно системы отсчета.

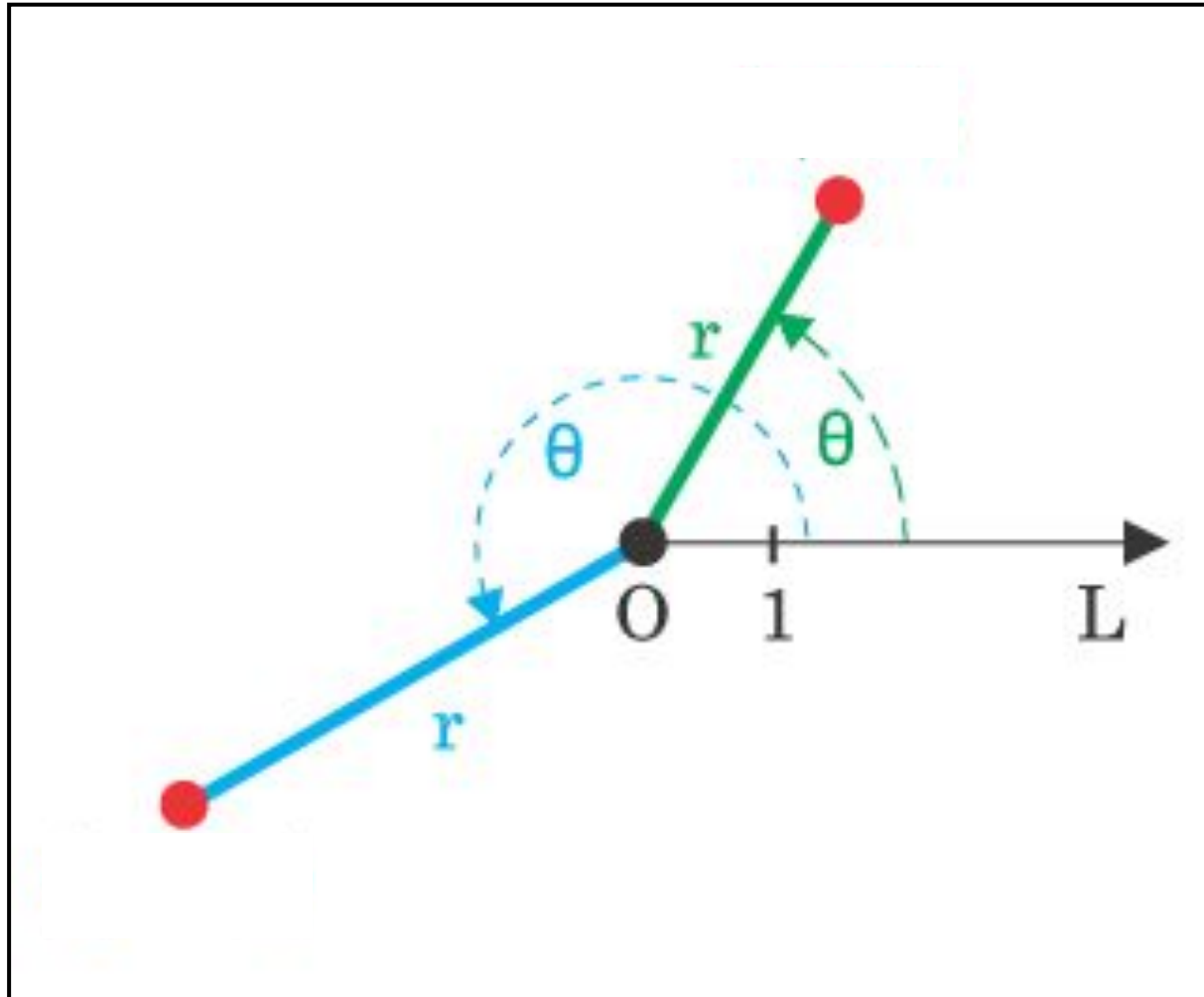
Положение тела в пространстве может быть описано с помощью **декартовых** и **полярных** координат. Для определения положения точки на плоскости в декартовой системе координат достаточно двух линейных координат:  $x$  и  $y$ , в пространстве – трех:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .



# Декартовы координаты



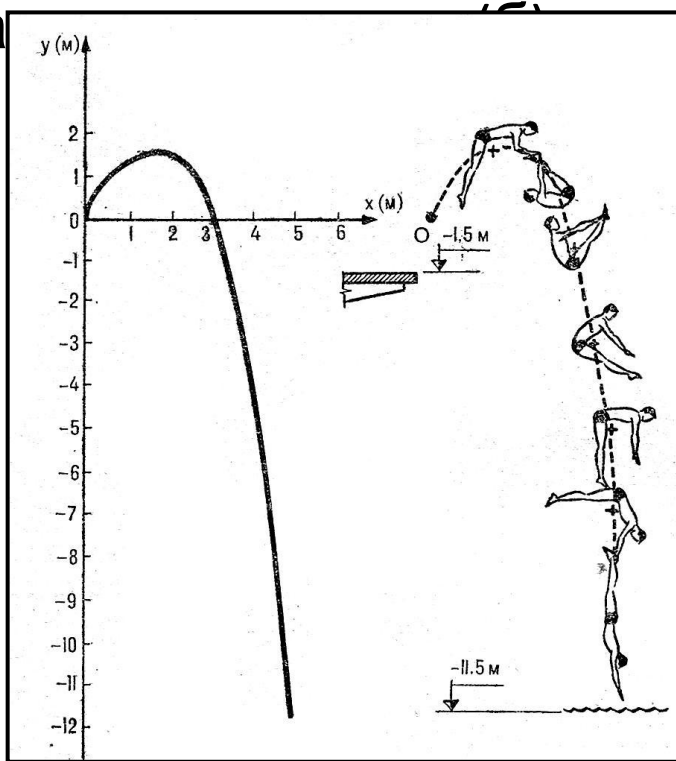
# Полярные координаты



**Траектория точки (тела)** – это геометрическое место положений движущегося тела в рассматриваемой системе координат.

Путь – физическая величина (скалярная), численно равная длине траектории точки или тела.

Траектория движения может быть задана **графическим** (а) и **аналитическим** (б) способами:

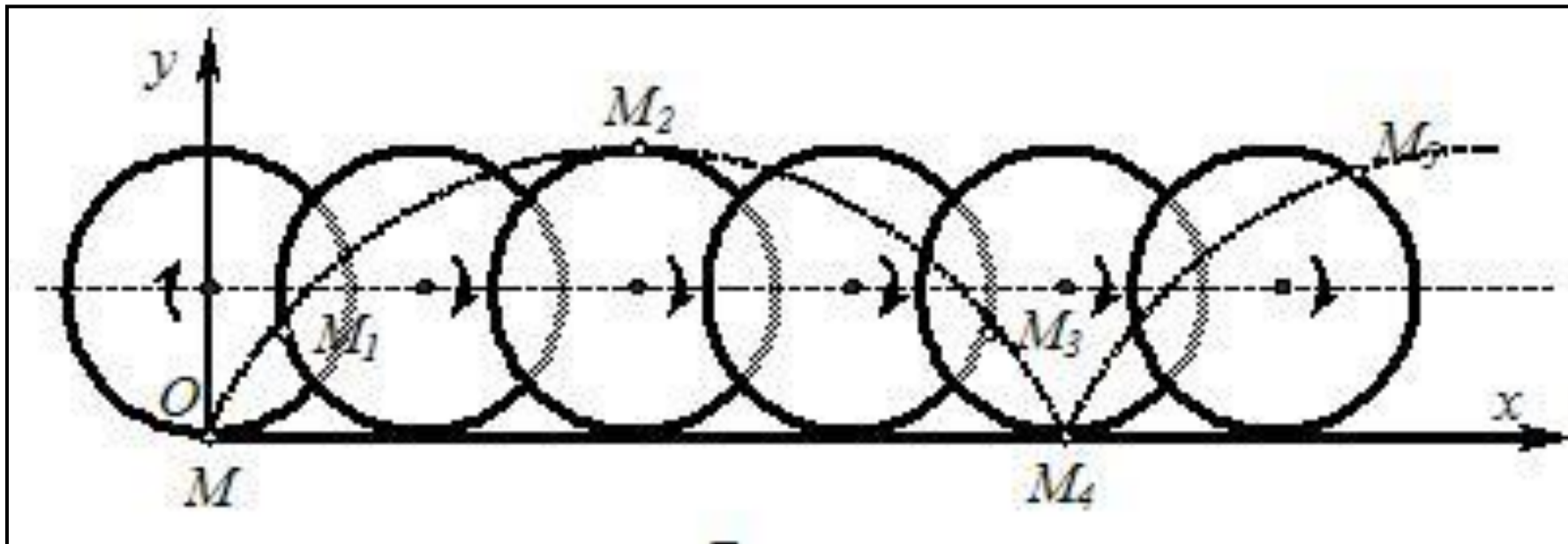


а

$$y = 2x - \frac{2}{3}x^2$$

б

В разных системах отсчета траектории движения точки различны

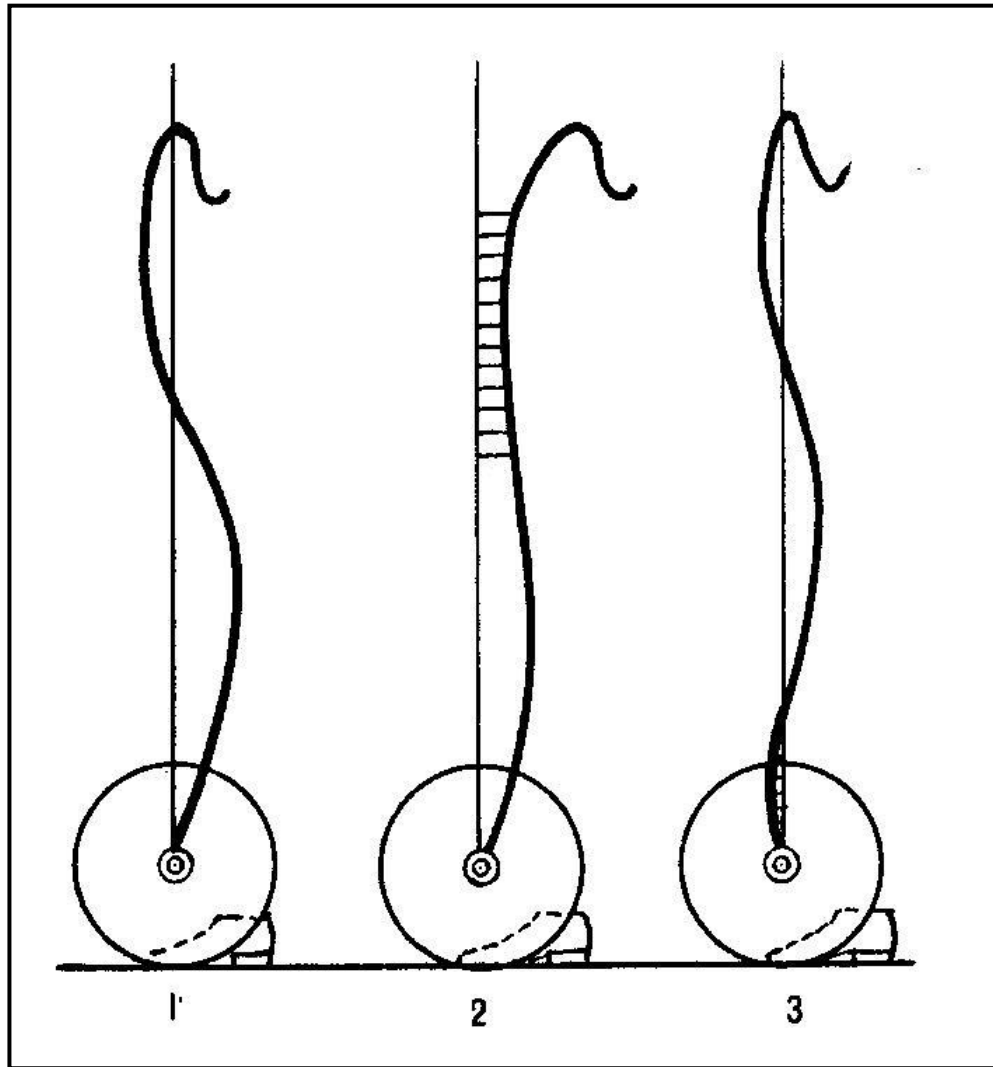


Траектория движения особых точек может являться критерием спортивного мастерства:

- ОЦМТ (общий центр масс тела);
- Центры суставов;
- ОЦМ спортивного снаряда (например, штанги).

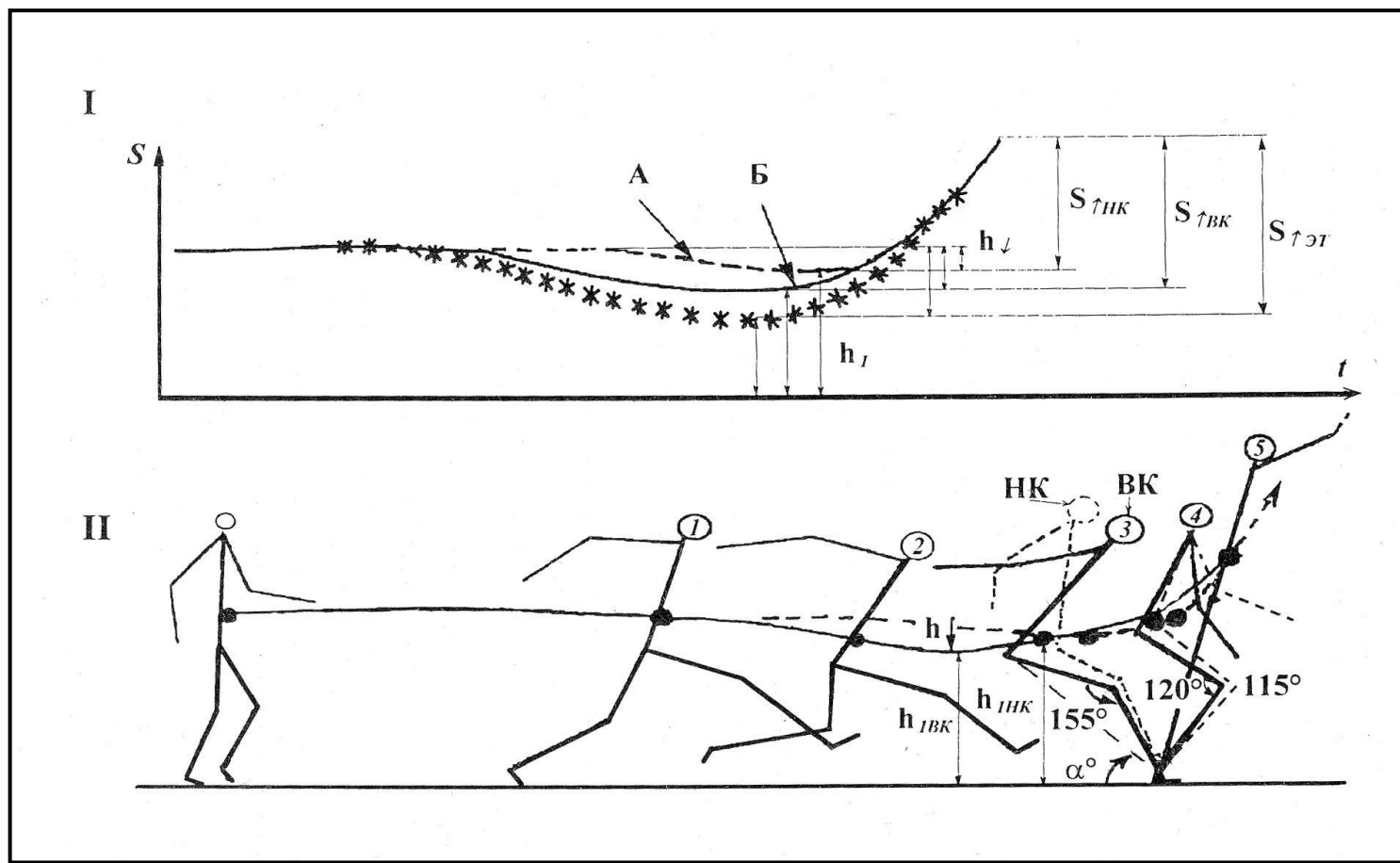
*Пример 1.* Траектория движения ОЦМ штанги при выполнении тяжелоатлетического упражнения.

В тяжелой атлетике одним из критериев мастерства является траектория движения штанги. На практике встречаются различные варианты траектории штанги. Считается, что ширина «коридора», в котором заключена траектория движения штанги, не должна превышать 12 см.



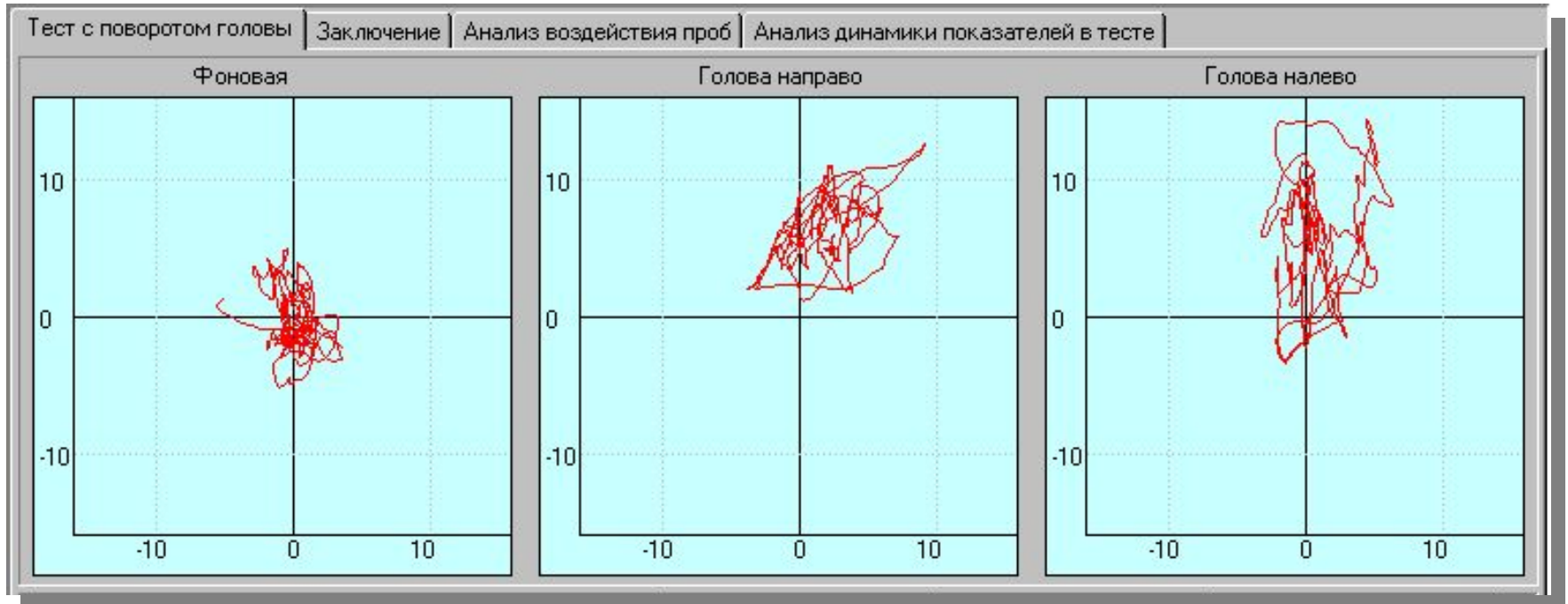
Оптимальная (1) и нерациональные (2 и 3) траектории движения штанги при выполнении тяжелоатлетических упражнений

Пример 2. Траектория движения ОЦМ тела спортсменов при выполнении нападающего удара в волейболе.



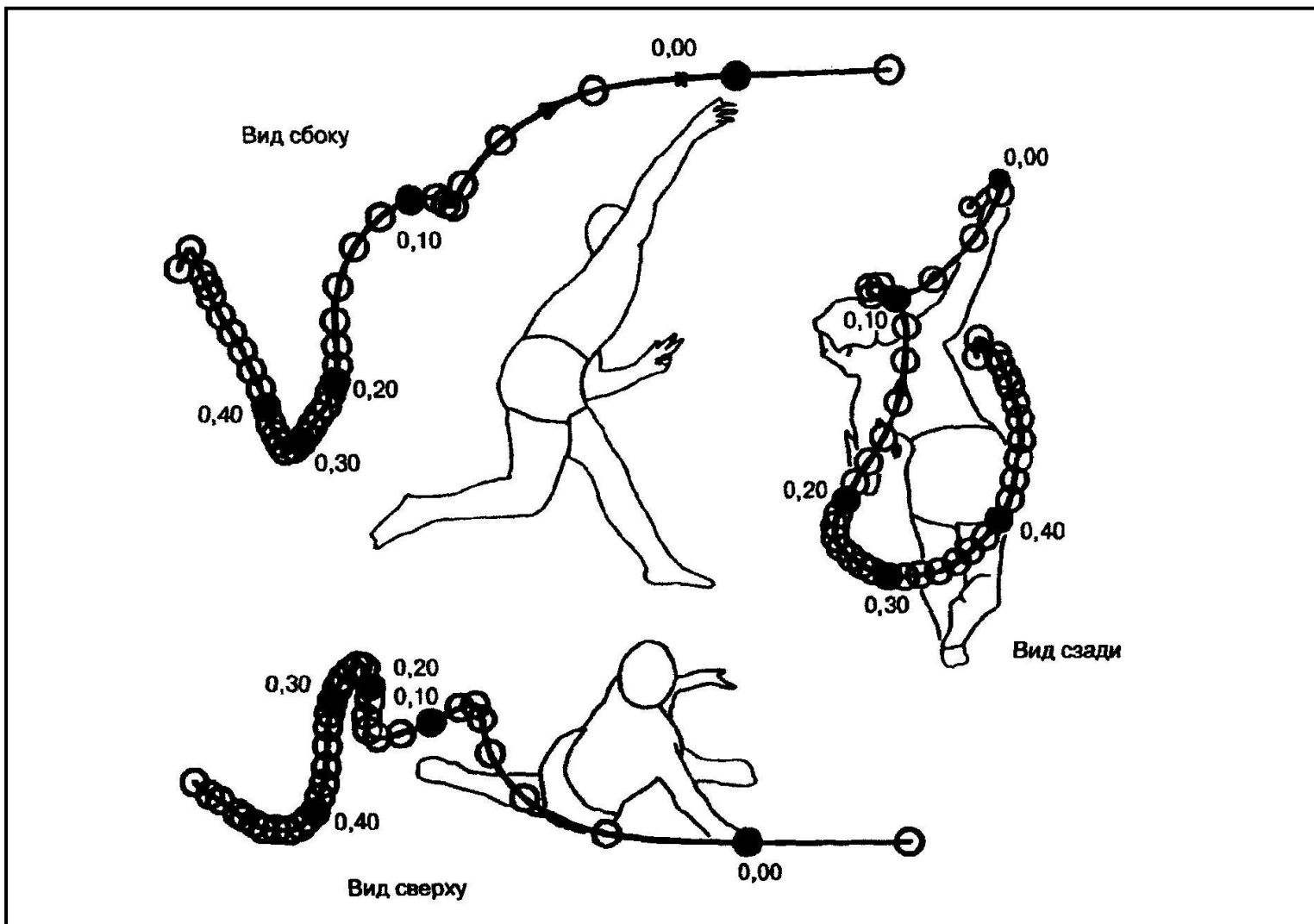
Низкая (А) и высокая (Б) квалификации; (\*\*\*) - эталон техники

*Пример 3.* Траектория движения ОЦМ в плоскости опоры (стабилометрическая методика).





Пример 4. Траектории мяча при броске в трех плоскостях (Adwater, 1977).



**Перемещение точки (тела)** - пространственная мера изменения местоположения точки в данной системе отсчета. Это вектор ( $\Delta r$ ), соединяющий начальное положение точки (тела) с его конечным положением. При прямолинейном движении перемещение совпадает с траекторией. При криволинейном – не совпадает.

В качестве примера можно рассмотреть перемещение штанги. А.В. Самсоновой с сотрудниками изучалось влияние «моста» на характеристики движения штанги. Авторами установлено, что «сведение лопаток» позволяет уменьшить значение модуля перемещения штанги из положения «штанга на вытянутых руках» в положение «штанга на груди» на 2,5 см, а «мост» — на 6,7 см. Применение технических приемов позволяет уменьшить механическую работу по подъему штанги массой 144 кг на 43,7 Дж и 88,8 Дж соответственно.



Перемещение штанги из положения «штанга на вытянутых руках» в положение «штанга на груди» (А.В. Самсонова с соавт., 2016)

# Временные характеристики

Временные характеристики раскрывают движение во времени. К временным характеристикам относятся:

- **длительность движения;**
- **темп движений;**
- **ритм движений.**

**Длительность движения** – это временная мера, которая измеряется разностью моментов времени окончания и начала движения.

$$\Delta t = t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}$$

*Пример.*

В легкой атлетике длительность движения является классификационным признаком. Различают: спринтерские дистанции (до 1 минуты), средние дистанции (1-5 минут) – это дистанции от 800 до 1500 м; стайерские дистанции (15-30 минут); марафонские дистанции (более часа).

Фаза – это часть движения, в течение которой решается самостоятельная двигательная задача. Например, в беге существуют фаза опоры и фаза полета. Каждая из этих фаз характеризуется определенной длительностью.

**Темп движений** определяется количеством движений в единицу времени (частота движений). Эта характеристика применяется для повторных (циклических движений). Темп движений – величина, обратная длительности движений. Чем больше длительность движений, тем ниже темп. При педалировании в максимальном темпе спортсмен выполняет три цикла в секунду, при беге – 2,8 циклов в секунду, при беге на коньках – 1,8 циклов в секунду.

В атлетизме темп выполнения силовых упражнений существенно влияет на гипертрофию скелетных мышц. Установлено, что эксцентрические упражнения, выполняемые в высоком темпе, оказывают большее повреждающее действие на мышцы по сравнению с умеренным темпом. Вследствие этого степень гипертрофии мышц при выполнении силовых упражнений в высоком темпе будет больше.

**Ритм движений** – временная мера соотношения частей (фаз) движения.

*Пример.* В беге отношение фазы опоры к фазе полета характеризует ритм движений бегуна ( $t_{оп}/t_{пол}$ ). Это отношение называется ритмическим коэффициентом. У детей 5-6 лет ритмический коэффициент равен двум, то есть фаза опоры значительно превышает фазу полета. У взрослых мужчин 20-29 лет это значение ритмического коэффициента равно 1,4. У сильнейших спринтеров этот показатель равен 0,8.

Во многих видах спорта, например, толкании ядра, барьерном беге ритм является важнейшим критерием технического мастерства спортсмена.

# Возрастные изменения кинематических характеристик в беге на скорость у лиц мужского пола – спортсменов

(В. К. Бадяев, 2000)

возраст, лет	n	скорость бега, м/с	длительность опоры, мс	длительность полета, мс	ритмический коэффициент	длина шага, см
5-6	25	4,0±0,8	160±40	80±40	2,0	100±20
7-8	25	4,8±0,9	160±30	90±30	1,8	120±30
9-10	25	5,0±0,9	160±30	90±30	1,8	120±30
11-12	50	6,8±1,0	130±20	110±20	1,2	160±20
13-14	50	7,7±1,1	123±17	112±18	1,1	180±30
15-16	50	7,7±0,9	120±20	120±22	1,0	180±20
17-19	50	8,4±1,1	120±18	110±20	1,1	190±20
20-29	50	6,2±0,7	150±20	110±40	1,4	160±30
30-39	50	5,8±1,0	160±20	120±40	1,4	160±30
40-49	50	5,3±0,9	160±40	110±40	1,5	150±30
55-65	25	4,5±1,3	180±50	110±50	1,6	130±40

# Пространственно-временные характеристики

К пространственно-временным характеристикам относят:

- скорость точки (тела);
- ускорение точки (тела).

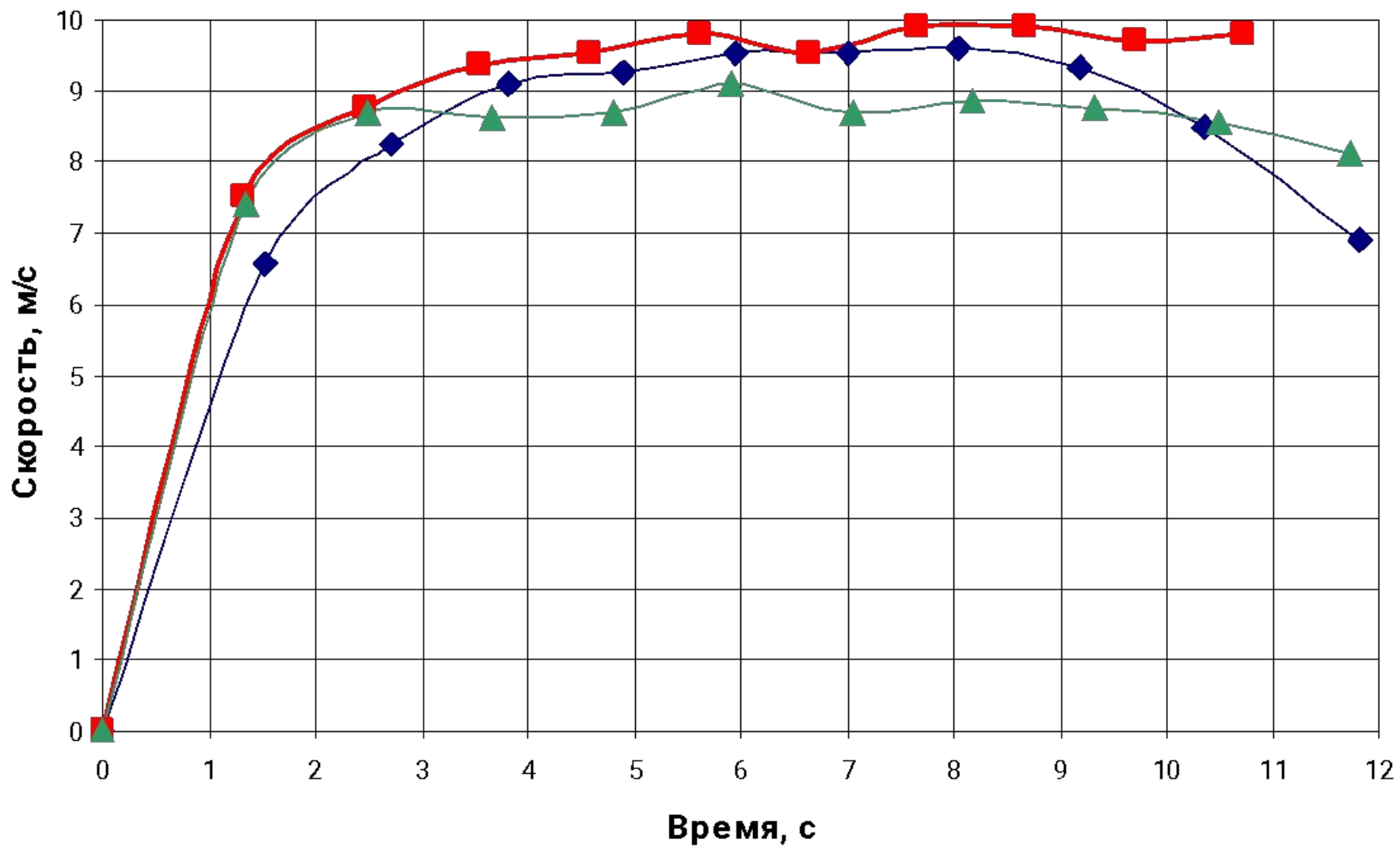
*Поступательное движение*

**Скорость тела** ( $V$ ) – это векторная величина, определяющая быстроту и направление изменения положения тела в пространстве с течением времени. Скорость измеряется отношением перемещения ( $\Delta r$ ) к затраченному времени  $V = \Delta r / \Delta t$  (мгновенная скорость  $V = dr/dt$ ).

Во многих видах спорта скорость движения человека или снаряда является критерием спортивного мастерства.



### Зависимость $V(t)$



—◆— Ряшко И. —■— Алиев Х. —▲— Золотарева Е.

**Ускорение тела** ( $a$ ) – это вектор, характеризующий быстроту и направление изменения скорости тела  $a = \Delta v / \Delta t$  ( $a = dv/dt$ ).

Ускорение может являться одним из критериев спортивного мастерства спортсмена. Способность быстро набирать скорость, то есть развивать большое ускорение, характеризует спортсменов высокой квалификации.

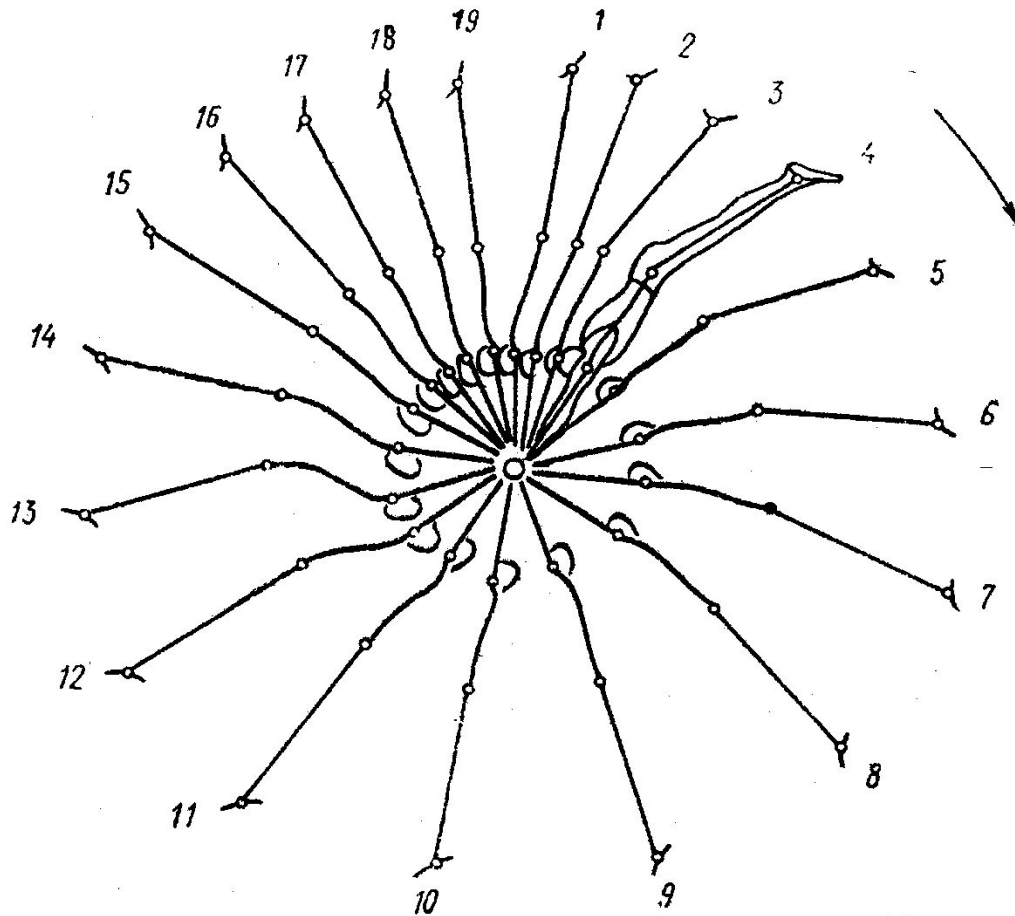
### *Вращательное движение*

Мерой изменения положения тела при вращательном движении является угол поворота  $\phi$ . **Угловая скорость** измеряется отношением угла поворота  $\Delta\phi$  к затраченному времени  $\Delta t$

$\omega = \Delta\phi / \Delta t$  (мгновенная угловая скорость  $\omega = d\phi/dt$ ). **Угловое ускорение**  $\varepsilon = \Delta\omega / \Delta t$  ( $\varepsilon = d\omega/dt$ ).

При вращательном движении тела разные его точки имеют одинаковые угловые скорости и различные линейные скорости.  $V = \omega r$ . Таким образом, линейные скорости точек вращающегося тела пропорциональны их расстояниям от

# Большой оборот на перекладине



При выполнении гимнастом большого оборота на перекладине линейная скорость точки, расположенной в области тазобедренного сустава, составляет 10,8 м/с, а точки, расположенной в области голеностопного сустава

Частота 24 к/сек 18,0 м/с.  
М 1:40

# Динамические характеристики движений человека

Скорость движений человека и движимых им тел изменяются под действием сил. Чтобы раскрыть механизм движений (причины их возникновения и направленность их изменений) исследуют **динамические характеристики**. К ним относятся:

- **инерционные характеристики** (особенности тела человека и движимых им тел);
- **силовые характеристики** (особенности взаимодействия звеньев тела и других тел);
- **энергетические** (характеристики состояния систем).

## Инерционные характеристики

Разные тела изменяют скорость под действием сил по-разному. Это свойство тел называется инертностью. Инертность – свойство физических тел, от которого зависит величина получаемых ускорений при их взаимодействии. **К инерционным характеристикам относятся:**

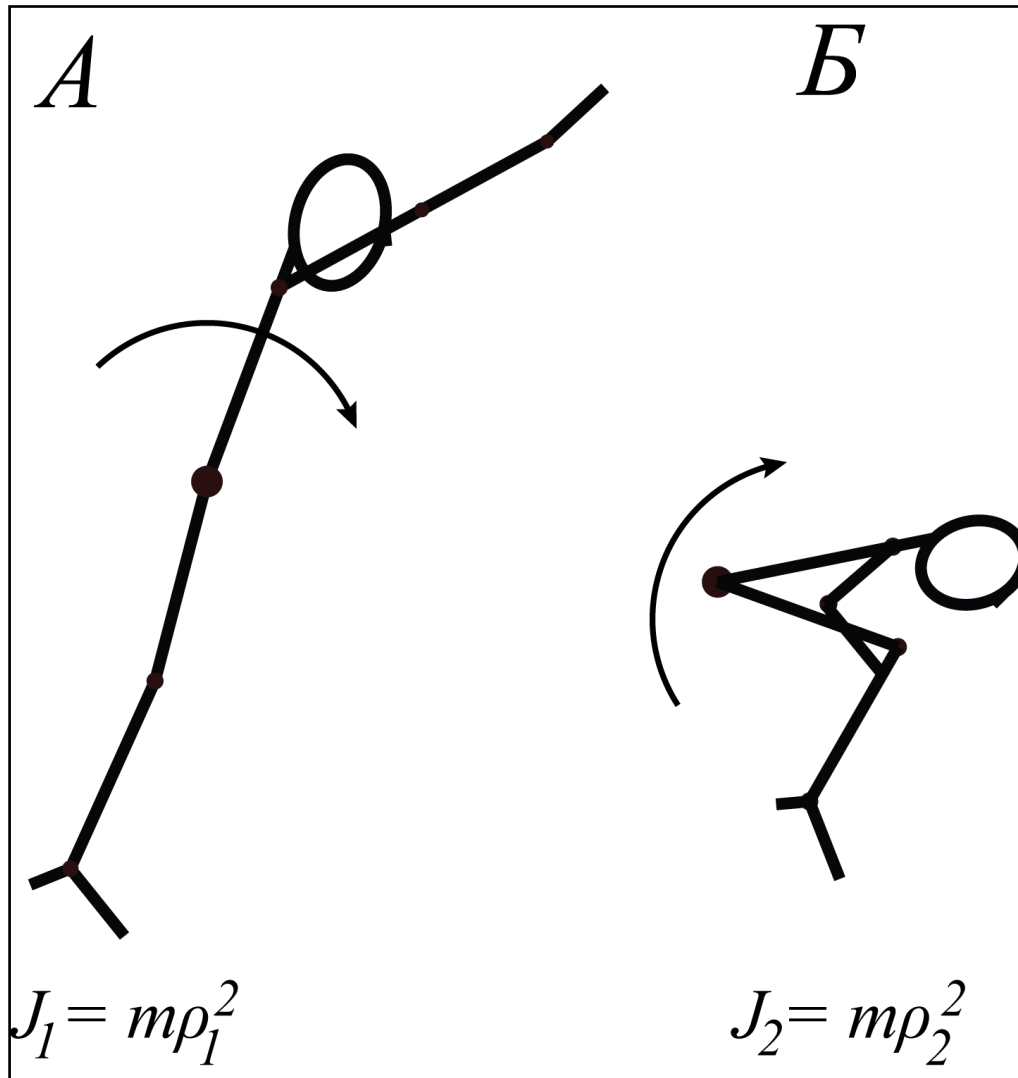
- **масса тела;**
- **момент инерции тела.**

**Масса тела** ( $m$ ) – мера инертности тела при *поступательном движении*. Она зависит от количества вещества данного тела. Масса тела измеряется отношением величины приложенной силы ( $F$ ) к вызываемому ею ускорению ( $a$ ):  $m = F/a$ .

**Момент инерции тела** ( $J$ ) – мера инертности твердого тела при *вращательном движении*. Он зависит от распределения массы относительно оси вращения и определяется по формуле:

$$J = \sum m_i \rho_i^2,$$

где:  $J$  – момент инерции;  $m_i$  – масса  $i$ -го элемента тела;  $\rho_i$  – расстояние  $i$ -го элемента до оси вращения.



Моменты инерции тела при выполнении сальто вперед прогнувшись (А) и сальто вперед в группировке (Б)

# Силловые характеристики

Изменение скорости движения тел происходит под действием сил. Силловые характеристики раскрывают связь действия силы с изменением движений. **К силловым характеристикам при поступательном движении относятся:**

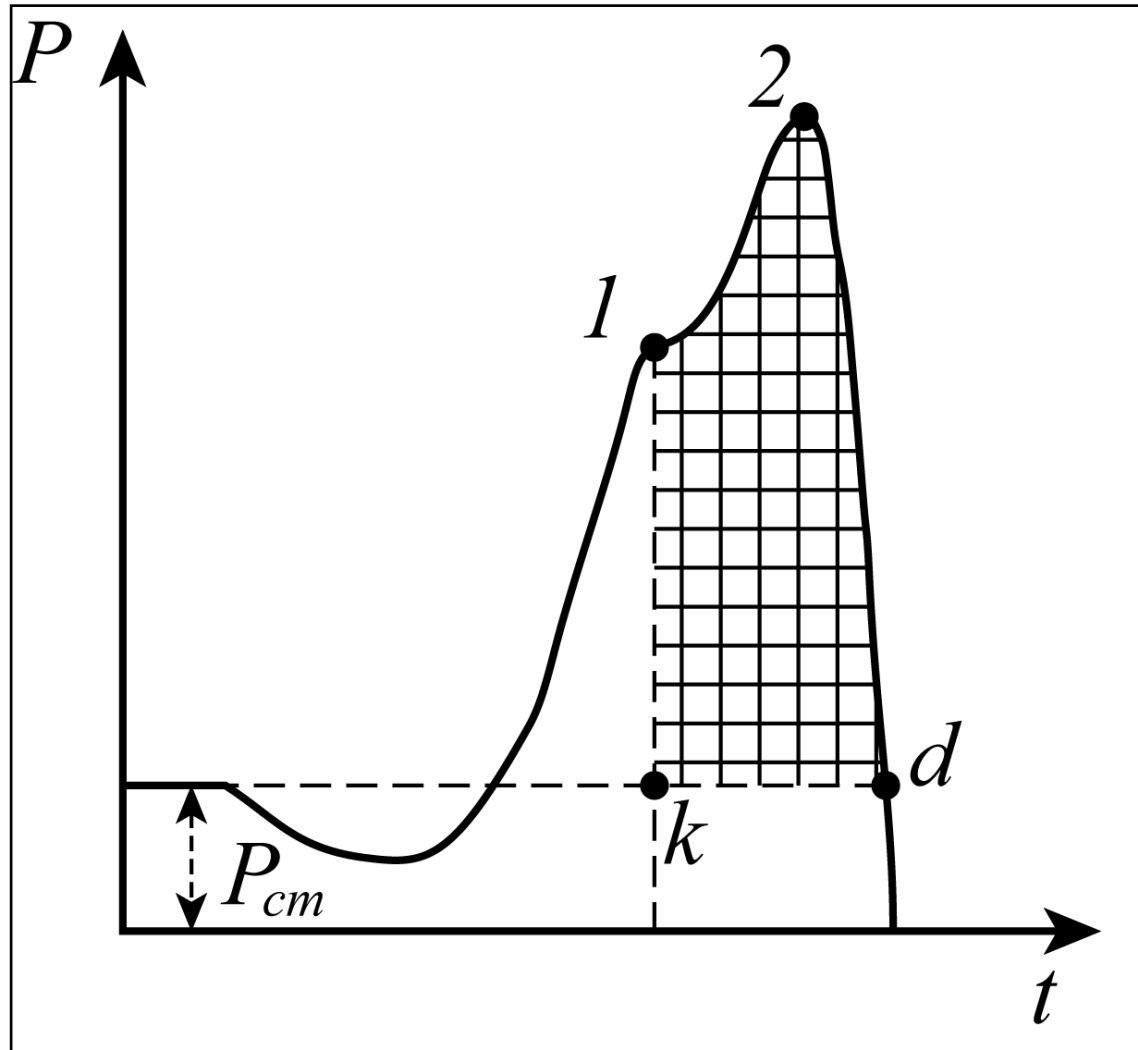
- **сила;**
- **импульс силы;**
- **импульс тела (количество движения).**

**Сила** ( $F$ ) – мера взаимодействия между телами. Она определяется формулой 2 закона динамики Ньютона:  $F_{\text{рез}} = ma$ , где  $m$  – масса тела;  $a$  – ускорение.

**Импульс силы** ( $S$ ) – мера воздействия силы на тело за промежуток времени. **Эта механическая характеристика равна произведению силы ( $F$ ) на промежуток времени ( $\Delta t$ ):**

$$S = F\Delta t \quad (S = \int_1^d F_y(t) dt).$$

Например, при отталкивании значение импульса силы не зависит от формы кривой «сила-время», а определяется только площадью под ней.



Импульс силы отталкивания  
(заштрихованная площадь) при  
взаимодействии с опорой



**Импульс тела** (количество движения,  $Q$ ) – векторная величина, характеризующая способность движения передаваться другому телу. Как и скорость, импульс тела направлен по касательной к траектории движения. Он **определяется по формуле:**

$$Q = mV.$$

При взаимодействии тел их импульсы могут быть переданы от одного тела к другому. Например, в результате взаимодействия тела человека с опорой изменяется импульс тела. Чем больший импульс приобретает тело человека в результате взаимодействия с опорой, тем выше или дальше будет прыжок.

**К силовым характеристикам при вращательном движении относятся:**

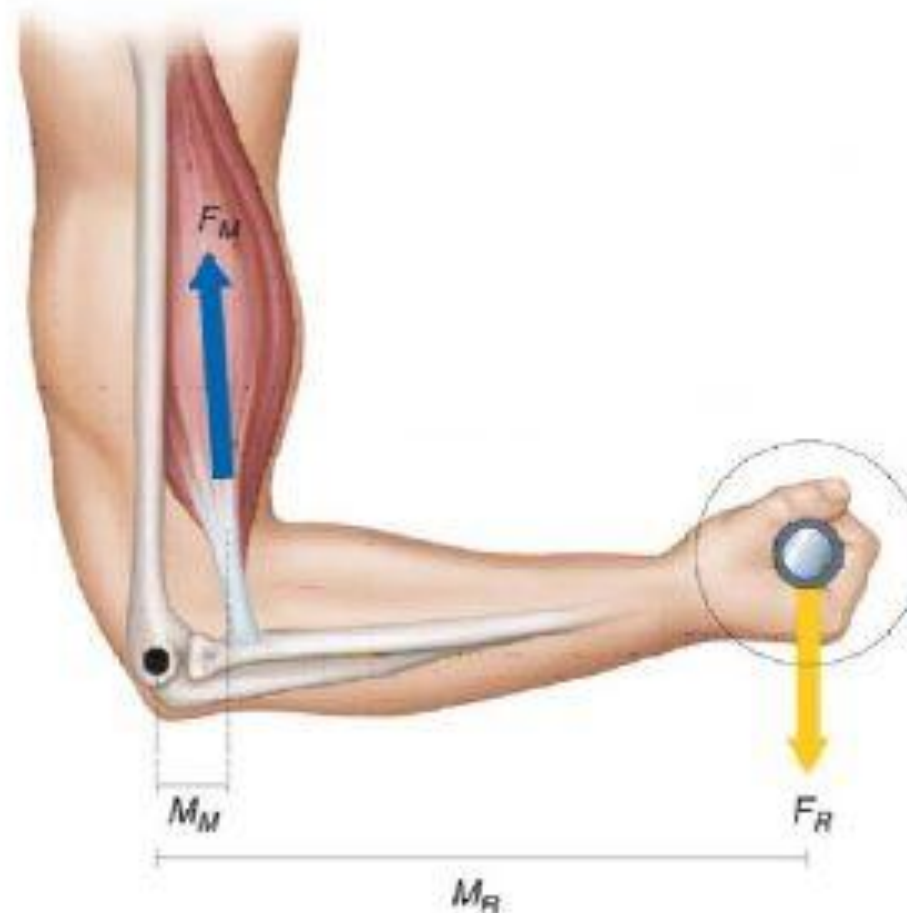
- **момент силы;**
- **импульс момента силы;**

**Момент силы** (M) – векторная величина, мера механического действия одного тела на другое при вращательном движении. Момент силы **определяется по формуле:  $M = Fh$** , где  $h$  – плечо силы.

**Плечо силы** – перпендикуляр, опущенный из оси вращения на линию действия силы.

Костные звенья в организме человека представляют собой рычаги. При этом результат действия мышцы определяется не столько развиваемой ею силой, сколько моментом силы. Особенностью строения опорно-двигательного аппарата человека является небольшие значения плеч сил тяги мышц. В то же время внешняя сила, например, сила тяжести, имеет большое плечо. Поэтому для противодействия большим внешним моментам сил мышцы должны развивать большую силу тяги.

Момент силы считают положительным, если сила вызывает поворот тела против часовой стрелки, и отрицательным, при повороте тела по часовой стрелке



Сила тяжести гантели создает отрицательный момент силы, так как стремится повернуть предплечье в локтевом суставе по часовой стрелке. Сила тяги мышц-сгибателей предплечья создает положительный момент, так как стремится повернуть предплечье в локтевом суставе против часовой стрелки.

**Импульс момента силы** ( $S_M$ ) – мера воздействия момента силы ( $M$ ) относительно данной оси ( $Z$ ) за промежуток времени:

$$S_z = \int_{t_1}^{t_2} M(F) dt$$

**Кинетический момент** ( $K$ ) - векторная величина, мера вращательного движения тела, характеризующая его способность передаваться другому телу в виде механического движения. Кинетический момент определяется по формуле:  $K = J\omega$ , где  $J$  – момент инерции,  $\omega$  - угловая скорость. Кинетический момент при вращательном движении является аналогом импульса тела (количества движения) при поступательном движении.

*Пример.* При выполнении прыжка в воду после выполнения отталкивания от мостика, кинетический момент тела человека ( $K$ ) остается неизменным. Поэтому если уменьшить момент инерции ( $J$ ), то есть произвести группировку, увеличивается угловая скорость  $\omega$ . Перед входом в воду,<sup>36</sup> спортсмен увеличивает момент инерции (выпрямляется)

# Энергетические характеристики

К энергетическим характеристикам относятся:

- **работа силы;**
- **мощность;**
- **механическая энергия.**

Для характеристики действия, оказываемого силой на тело при некотором его перемещении, вводится понятие работы силы.

**Работа силы** ( $A$ ) – это мера действия силы на некотором участке перемещения тела под действием этой силы. Работу производит только та сила, которая вызывает изменение скорости по величине. Работа положительна, если тело ускоряет движение. **Численно работа силы равна произведению силы на путь.** Работа произвольной силы вдоль заданной траектории задается следующей формулой:

$$A = \int_{S_1}^{S_2} F_V dS$$

Работа силы тяжести равна произведению модуля силы на вертикальное перемещение точки ее приложения:  $A_{\text{тяж}} = F_{\text{тяж}} h_{\text{тяж}}$ . Работа силы тяжести не зависит от вида траектории, по которой перемещается точка, а зависит лишь от координат тела. Работа упругой силы равна половине произведения жесткости ( $k$ ) на квадрат удлинения пружины ( $\Delta l$ ):  $A_{\text{упр}} = 1/2 k\Delta l^2$ .

*Пример.* Для того, чтобы поднять груз силового тренажера, массой  $m = 20$  кг на высоту  $h = 0,5$  м нужно совершить работу ( $A$ ), равную:  $A = mgh = 20 \times 9,8 \times 0,5 = 100$  Дж. Если этот груз спортсмен поднимает за тренировку 30 раз, то сделанная им работа будет равна:  $A = 100 \times 30 = 3000$  Дж.

**Мощность** ( $N$ ) – физическая величина, численно равная совершенной работе в единицу времени:  $N = A/\Delta t$  ( $dA/dt$ ).

*Пример.* Если работу по поднятию груза тренажера равную 3000 Дж выполнить за 10 минут, мощность работы будет равна 5 Вт:  $N_{10} = 3000/600 = 5$  Вт. Если эту же работу выполнить за 5 минут мощность работы будет составлять:  $N$

**Механическая энергия** ( $E$ ) - энергия тела, обусловленная его механическим состоянием. Механическое состояние тела определяется его координатами и скоростью. В каждом механическом состоянии тело обладает определенным запасом энергии.

Когда мы говорим о механической энергии, то представляем себе запас возможной, но еще не совершенной работы. Если тело совершает работу за счет механической энергии, то его механическая энергия уменьшается на величину совершенной работы. Механическую энергию можно передать от одного тела к другому только путем совершения работы. **Различают два вида механической энергии: потенциальную и кинетическую.**

**Потенциальная энергия** системы тел – энергия взаимодействия тел системы, обусловленная их взаимным расположением в пространстве. Потенциальной энергией всегда обладает система тел (по крайней мере двух). Потенциальная энергия тела в поле силы тяжести зависит

*Пример.* Штанга массой  $m=100$  кг, поднятая на высоту  $h = 2$  м, обладает потенциальной энергией:  $E_{\text{тяж}} = mgh = 100 \times 9,8 \times 2 = 2000$  Дж.

**Кинетическая энергия** тела при поступательном движении – скалярная величина, равная половине произведения массы тела на квадрат его скорости:  $E = mV^2/2$ . Кинетическая энергия при вращательном движении – скалярная величина, равная произведению момента инерции тела на квадрат его угловой скорости:  $E = J \omega^2/2$ .