

# СИЛЫ В МЕХАНИКЕ

---

- 1. Виды и категории сил в природе
  - 2. Сила тяжести и вес тела
  - 3. Упругие силы
  - 4. Силы трения
  - 5. Силы инерции
  - 5.1. Уравнения Ньютона для неинерциальной системы отсчета
  - 5.2. Центробежная и центроостремительная силы
  - 5.3. Сила Кориолиса
-

# Виды и категории сил в природе

---

- Одно из простейших определений силы: *влияние одного тела (или поля) на другое, вызывающее ускорение – это сила.*
  - Однако, спор вокруг определения силы не закончен до сих пор – это обусловлено трудностью объединения в одном определении сил, различных по своей природе и характеру проявления. В настоящее время, различают четыре типа сил или взаимодействий: *гравитационные; электромагнитные; сильные* (ответственное за связь частиц в ядрах) и *слабые* (ответственное за распад частиц).
-

# Виды и категории сил в природе

---

- *Гравитационные и электромагнитные силы нельзя свести к другим, более простым силам, поэтому их называют фундаментальными. Законы фундаментальных сил просты и выражаются точными формулами. Для примера можно привести формулу гравитационной силы взаимодействия двух материальных точек, имеющих массы*

$$m_1 \text{ и } m_2 : F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

---

# Виды и категории сил в природе

---

- В качестве второго примера можно привести формулу для определения силы электростатического взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$  :

$$F = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

- Для других сил, например, для упругих сил и сил трения можно получить лишь приближенные, эмпирические формулы.
-

# Сила тяжести и вес тела

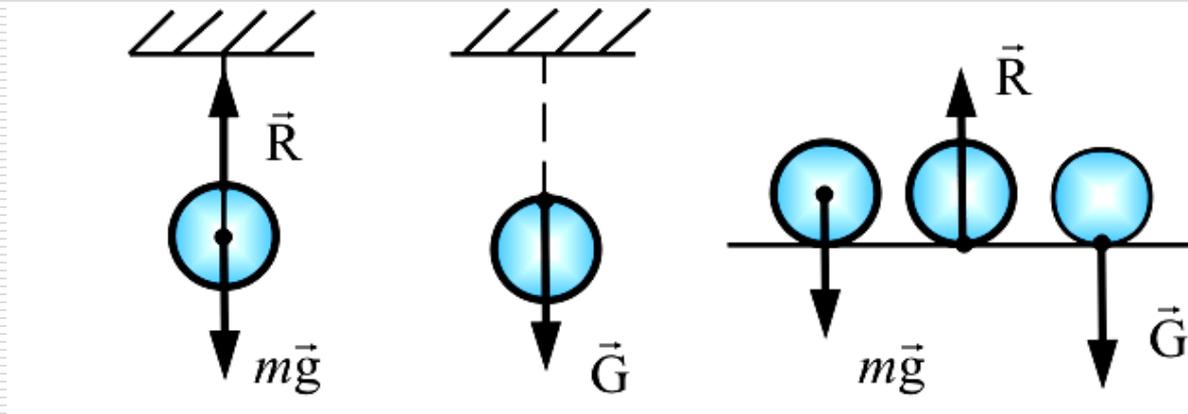
---

- Одна из фундаментальных сил – сила гравитации проявляется на Земле в виде **силы тяжести** – *силы, с которой все тела притягиваются к Земле.*
  - Вблизи поверхности Земли все тела падают с одинаковым ускорением – **ускорением свободного падения  $g$** . Отсюда вытекает, что в системе отсчета, связанной с Землей, на всякое тело действует сила тяжести .
  - Она приблизительно равна силе гравитационного притяжения к Земле (различие между силой тяжести и гравитационной силой обусловлено тем, что система отсчета, связанная с Землей, не вполне инерциальная).
-

# Сила тяжести и вес тела

---

- Если подвесить тело (рисунок) или положить его на опору, то сила тяжести уравновесится силой – которую называют реакцией опоры или подвеса.



# Сила тяжести и вес тела

---

- По третьему закону Ньютона тело действует на подвес или опору с силой  $\vec{G}$ , которая называется **весом тела**. Итак, **вес тела** – это сила, с которой тело в состоянии покоя действует на подвес или опору, вследствие гравитационного притяжения к Земле.
-

# Сила тяжести и вес тела

---

- То есть *вес и сила тяжести равны друг другу, но приложены к разным точкам: вес к подвесу или опоре, сила тяжести – к самому телу.* Это равенство справедливо, если подвес (опора) и тело покоятся относительно Земли (или двигаются равномерно, прямолинейно).
-

# Сила тяжести и вес тела

---

- Если имеет место движение с ускорением, то справедливо соотношение:

$$G = mg \pm ma = m(g \pm a).$$

- Т.е. вес тела может быть меньше силы тяжести, больше силы тяжести или равен нулю (невесомость).
-

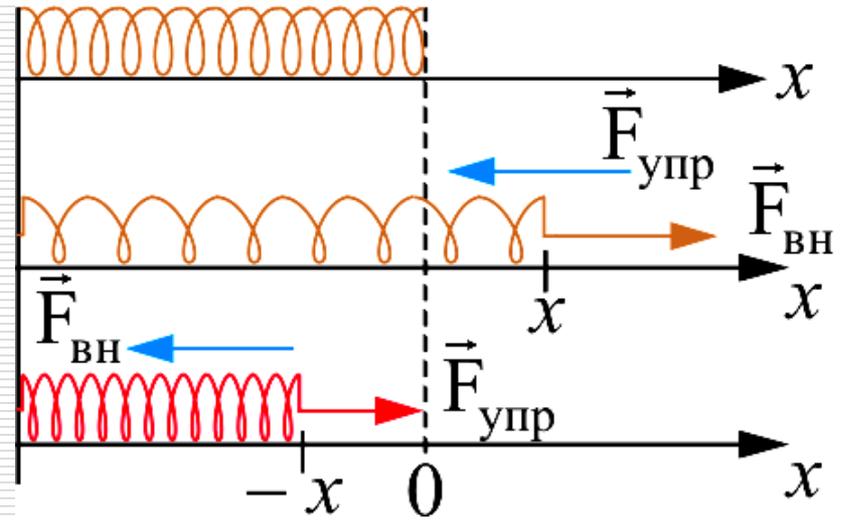
# Упругие силы

---

- **Электромагнитные силы в механике проявляют себя как упругие силы и силы трения.**
  - Под действием внешних сил возникают **деформации** (т.е. изменение размеров и формы) тел. Если после прекращения действия внешних сил восстанавливаются прежние форма и размеры тела, то деформация называется **упругой**. Деформация имеет упругий характер в случае, если внешняя сила не превосходит определенного значения, которая называется **пределом упругости**. При превышении этого предела деформация становится **пластичной или неупругой**, т.е. первоначальные размеры и форма тела полностью не восстанавливаются.
-

# Упругие силы

- Рассмотрим упругие деформации.
- В деформированном теле (рисунок) возникают упругие силы, уравновешивающие внешние силы. Под действием *внешней силы* –  $F_{вн}$ . пружина получает *удлинение*  $x$ , в результате в ней возникает *упругая сила* –  $F_{упр}$ , уравновешивающая  $F_{вн}$ .



# Упругие силы

---

- Упругие силы возникают во всей деформированной пружине. Любая часть пружины действует на другую часть с силой упругости  $F_{упр}$ .
- *Удлинение пружины пропорционально внешней силе и определяется **законом Гука**:*

$$x = \frac{1}{k} F_{вн.},$$

---

# Упругие силы

---

- Так как упругая сила отличается от внешней только знаком, т.е.  $F_{\text{упр.}} = -F_{\text{вн.}}$ , то закон Гука можно записать в виде:

$$x = -\frac{1}{k} F_{\text{упр.}}$$

---

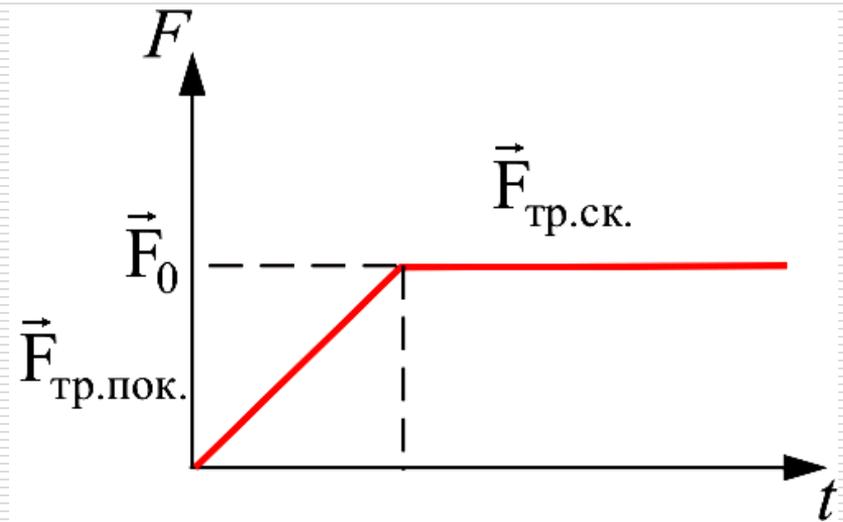
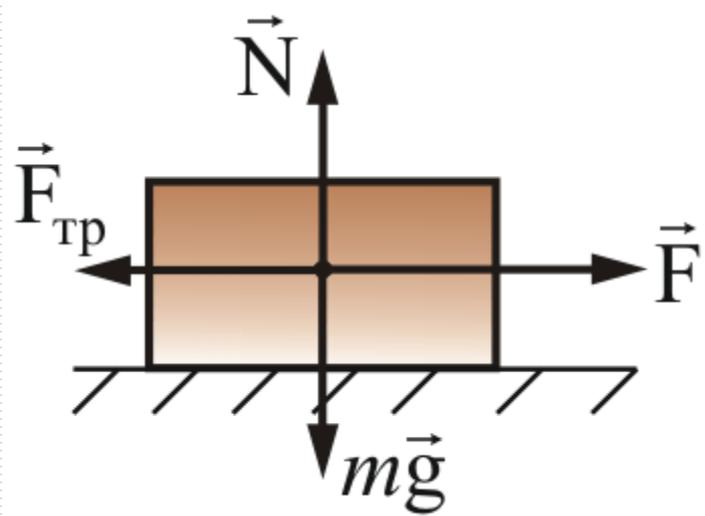
# Силы трения

---

- Трение подразделяется на *внешнее и внутреннее*.
  - **Внешнее трение** возникает при относительном перемещении двух соприкасающихся твердых тел (трение скольжения или трение покоя).
  - **Внутреннее трение** наблюдается при относительном перемещении частей одного и того же сплошного тела (например, жидкость или газ).
  - Различают **сухое и жидкое** (или **вязкое**) трение.
  - **Сухое трение** возникает между поверхностями твердых тел в отсутствии смазки.
  - **Жидким (вязким)** называется трение между твердым телом и жидкой или газообразной средой или ее слоями.
  - Сухое трение, в свою очередь, подразделяется на **трение скольжения** и **трение качения**.
  - Рассмотрим законы сухого трения (рисунок).
-

# Силы трения

---



# Силы трения

---

- Подействуем на тело, лежащее на неподвижной плоскости внешней силой  $\vec{F}$  постепенно увеличивая ее модуль. Вначале брусок будет оставаться неподвижным, значит внешняя сила  $\vec{F}$  уравнивается некоторой силой  $\vec{F}_{\text{тр.}}$  направленной по касательной к трущейся поверхности, противоположной силе  $\vec{F}$ . В этом случае  $\vec{F}_{\text{тр.}}$  – и есть *сила трения покоя*.
  - Когда модуль внешней силы, а следовательно, и модуль силы трения покоя превысит значение  $F_0$ , тело начнет скользить по опоре – трение покоя  $F_{\text{тр.пок.}}$  сменится трением скольжения  $F_{\text{тр.ск.}}$  (рисунок на предыдущем слайде).
-

# Силы трения

---

- Установлено, что максимальная **сила трения покоя** не зависит от площади соприкосновения тел и приблизительно пропорциональна модулю силы нормального давления  $N$

$$F_0 = \mu_0 N,$$

- $\mu_0$  – **коэффициент трения покоя** – зависит от природы и состояния трущихся поверхностей.
  - Аналогично и для **силы трения скольжения**:  $F_{\text{тр.}} = \mu N$
-

# Силы трения

---

- **Трение качения** возникает между шарообразным телом и поверхностью, по которой оно катится. Сила трения качения подчиняется тем же законам, что и скольжения, но коэффициент трения  $\mu$  здесь значительно меньше.
-

# Силы инерции

## Уравнение Ньютона для неинерциальных систем отсчета

---

- Законы инерции выполняются в инерциальной системе отсчета. А как описать движение тела в неинерциальной системе?
  - Рассмотрим пример: вы стоите в троллейбусе спокойно. Вдруг троллейбус резко трогается, и вы невольно отклонитесь назад. Что произошло? Кто вас толкнул?
-

# Силы инерции

## Уравнение Ньютона для неинерциальных систем отсчета

---

- С точки зрения наблюдателя на Земле (в инерциальной системе отсчета), в тот момент, когда троллейбус тронулся, вы остались стоять на месте – в соответствии с первым законом Ньютона.
  - С точки зрения сидящего в троллейбусе – вы начали двигаться назад, как если бы кто-нибудь вас толкнул. На самом деле, никто не толкнул, просто ваши ноги, связанные силами трения с троллейбусом «поехали» вперед из-под вас и вам пришлось падать назад.
-

# Силы инерции

## Уравнение Ньютона для неинерциальных систем отсчета

---

- Можно описать ваше движение в инерционной системе отсчета. Но это не всегда просто, так как обязательно нужно вводить силы, действующие со стороны **связей**. А они могут быть самыми разными и ведут себя по разному – нет единого подхода к их описанию.
  - А можно и в неинерциальной системе воспользоваться законами Ньютона, если ввести **силы инерции**. Они **фиктивны**. Нет тела или поля под действием которого вы начали двигаться в троллейбусе. **Силы инерции вводят специально, чтобы воспользоваться уравнениями Ньютона в неинерциальной системе.**
  - **Силы инерции обусловлены не взаимодействием тел, а свойствами самих неинерциальных систем отсчета. На силы инерции законы Ньютона не распространяются.**
-

# Силы инерции

## Уравнение Ньютона для неинерциальных систем отсчета

---

- *Уравнение Ньютона для неинерциальной системы отсчета:*

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{\text{ин}}$$

*где  $\vec{a}'$  - ускорение тела относительно неинерциальной системы;  $\vec{F}_{\text{ин}}$  – фиктивная сила, обусловленная свойствами системы отсчета, необходимая нам для того, чтобы иметь возможность описывать движения тел в неинерциальных системах отсчета с помощью уравнений Ньютона.*

---

# Силы инерции

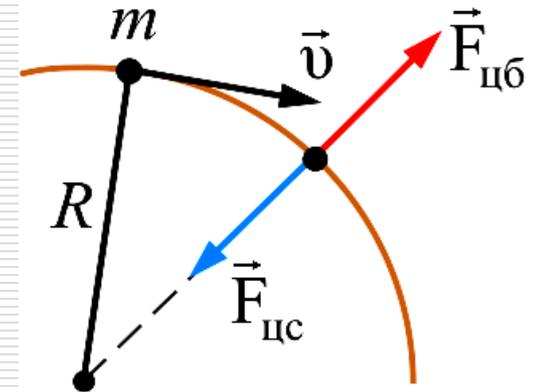
## Уравнение Ньютона для неинерциальных систем отсчета

---

- Силы инерции инвариантны относительно перехода из одной системы отсчета в другую.
  - Они не подчиняются закону действия и противодействия.
  - Движения тела под действием сил инерции аналогично движению во внешнем силовом поле.
  - Силы инерции всегда являются внешним по отношению к любому движению системы материальных тел.
-

# Центростремительная и центробежная силы

- Рассмотрим вращение камня массой  $m$  на веревке (рисунок)
- В каждый момент времени камень должен был бы двигаться прямолинейно по касательной к окружности. Однако он связан с осью вращения веревкой. Веревка растягивается, появляется упругая сила, действующая на камень, направленная вдоль веревки к центру вращения. Это и есть **центростремительная сила** (при вращении Земли вокруг оси в качестве центростремительной силы выступает сила гравитации).



# Центростремительная и центробежная силы

---

- **Центростремительная сила** определяется

формулой:  $\vec{F}_{\text{цс}} = m\vec{a}_{\text{цс}}$ , или  $F_{\text{цс}} = m \frac{v^2}{R}$ .

- **Центростремительная сила** возникла в результате действия камня на веревку, т.е. это сила, приложенная к телу – **сила инерции второго рода**. Она фиктивна – ее нет.
  - Сила, же приложенная к связи и направленная по радиусу от центра называется **центробежной**.
-

# Центростремительная и центробежная силы

---

- Помните, что *центростремительная сила* приложена к вращающему телу, а *центробежная сила* – к СВЯЗИ.
  - Центробежная сила – *сила инерции первого рода*. Центробежной силы, приложенной к вращающемуся телу, не существует.
-

# Центростремительная и центробежная силы

---

- С точки зрения наблюдателя, связанного с неинерциальной системой отсчета, он не приближается к центру, хотя видит, что  $F_{цс}$  действует (об этом можно судить по показанию пружинного динамометра).

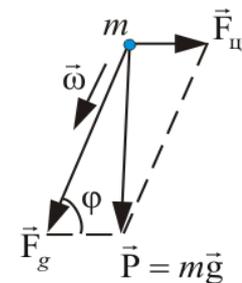
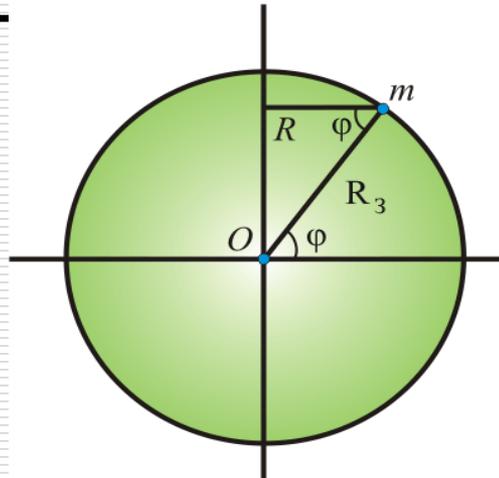
Следовательно, с точки зрения наблюдателя, в неинерциальной системе есть сила, уравновешивающая  $F_{цс}$ , равная ей по величине и противоположная по направлению:

$$F_{цб} = -m \frac{v^2}{R},$$

---

# Центростремительная и центробежная силы

- Земля вращается вокруг своей оси, т.о. с Землей можно связать неинерциальную систему  $o'$



- Вследствие этого ускорение свободного падения  $g$  различно на экваторе, полюсах и на различных широтах.

# Центробежная сила и ускорение свободного падения на Земле

---

- На любое тело, находящееся на поверхности Земли, действует **центробежная сила** и **сила**

$$\vec{F}_{\text{цб}} \quad \vec{F}_g$$

- **Сила тяжести** есть результат сложения ЭТИХ сил:

$$\vec{P} = m\vec{g} = \vec{F}_g + \vec{F}_{\text{цб}}$$

- Поэтому ускорение свободного падения зависит от широты точки на Земле ( угла  $\varphi$  ).
  - Направлено **g** точно к центру только на полюсе и на экваторе.
-

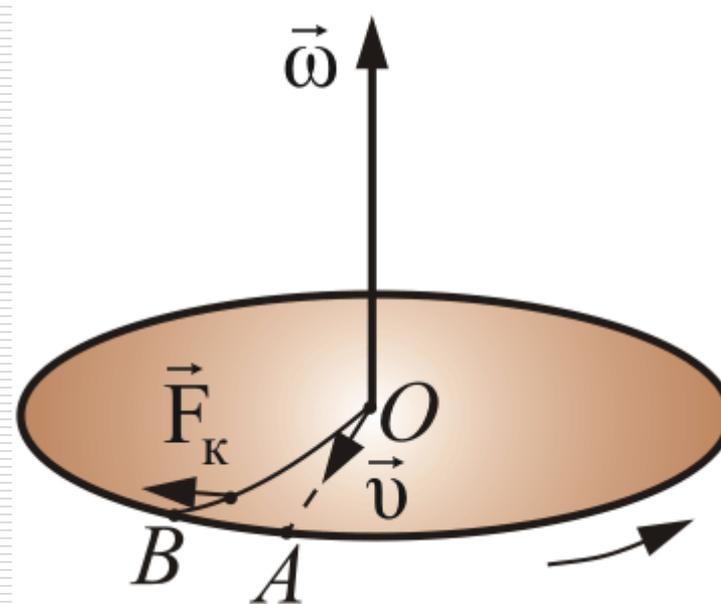
# Сила Кориолиса

---

- При движении тела относительно вращающейся системы отсчета, кроме **центростремительной и центробежной силы**, появляется еще одна сила, называемая ***силой Кориолиса или кориолисовой силой инерции***.
  - Появление **кориолисовой силы** можно обнаружить на следующем примере. Возьмем горизонтально расположенный диск, который может вращаться вокруг вертикальной оси. Прочертим на диске радиальную прямую **OA** (рисунок).
-

# Сила Кориолиса

---



# Сила Кориолиса

---

- Запустим в направлении от  $O$  к  $A$  шарик со скоростью  $\vec{v}$ . Если диск не вращается, шарик должен катиться вдоль  $OA$ . Если же диск привести во вращение в направлении, указанном стрелкой, то шарик будет катиться по кривой  $OB$ , причем его скорость относительно диска, быстро изменяет свое направление.
- Следовательно, по отношению к вращающейся системе отсчета шарик ведет себя так, как если бы на него действовала сила перпендикулярная направлению движения шарика.
- Эта сила и есть сила **Кориолиса**. Она определяется следующим выражением:

$$\vec{F}_K = 2m[\vec{v}, \vec{\omega}]$$

---

# Сила Кориолиса

---

- Таким образом, сила Кориолиса возникает всегда в случае, когда тело изменяет свое положение по отношению к вращающейся системе отсчета. Она максимальна, когда угол между вектором угловой скорости вращающейся системы отсчета и вектором скорости тела равен  $90^\circ$ .
-

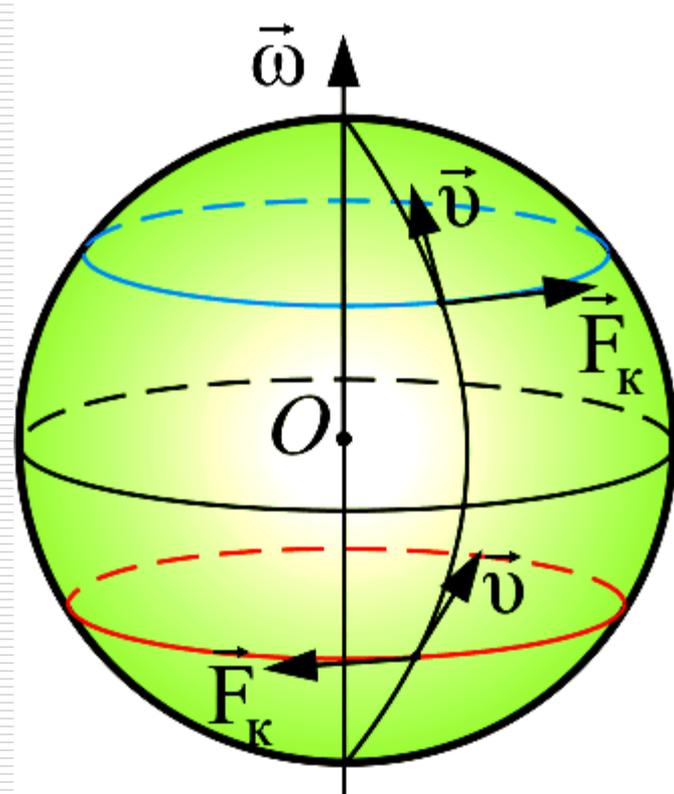
# Примеры проявления силы Кориолиса

---

- Например, **при свободном падении тел** на них действует **кориолисова сила**, обуславливающая отклонение к востоку от линии отвеса. Эта сила максимальна на экваторе и обращается в нуль на полюсах. **Летящий снаряд** также испытывает отклонения, обусловленные **кориолисовыми силами** инерции. Например, при выстреле из орудия, направленного на север, снаряд будет отклоняться к востоку в северном полушарии и к западу – в южном. При стрельбе вдоль экватора силы Кориолиса будут прижимать снаряд к Земле, если выстрел произведен в восточном направлении.
-

# Примеры проявления силы Кориолиса

- **Сила Кориолиса, действует на тело, движущееся вдоль меридиана в северном полушарии вправо и в южном – влево (рисунок).**
- **Это приводит к тому, что у рек подмывается всегда правый берег в северном полушарии и левый – в южном. Эти же причины объясняют неодинаковый износ рельсов при двухколейном движении.**



# Примеры проявления силы Кориолиса

- Силы Кориолиса проявляются и при качаниях маятника (маятник Фуко). Для простоты предположим, что маятник расположен на полюсе. На северном полюсе сила Кориолиса будет направлена вправо по ходу маятника. В итоге траектория движения маятника будет иметь вид розетки. Как следует из рисунка, плоскость качаний маятника поворачивается относительно земли в направлении часовой стрелки, причем за сутки она совершает один оборот. Относительно гелиоцентрической системы отсчета дело обстоит так: плоскость качаний остается неизменной, а Земля поворачивается относительно нее, делая за сутки один оборот.
- Таким образом, вращение плоскости качаний маятника Фуко дает непосредственное доказательство вращения Земли вокруг своей оси.

