

Лекция 19. Проявление сил инерции на Земле

Содержание

1. Сила Кориолиса
2. Маятник Фуко
3. Проявление силы Кориолиса
4. Невесомость и перегрузки

Сила Кориолиса

Если тело движется относительно **вращающейся** системы отсчета, то на него помимо центробежной силы инерции действует **еще одна сила инерции**, которая зависит от относительной скорости движения тела \vec{v}' и от угловой скорости вращения системы отсчета $\vec{\omega}$.

Этот вид сил инерции был открыт впервые французским физиком и инженером **Кориолисом**.

Такую силу инерции называли **кориолисовой силой**.

Для выяснения причин, которые вызывают возникновение **силы Кориолиса**, рассмотрим следующий **опыт**.

Над горизонтальной платформой в **виде диска**, которая может вращаться вокруг вертикальной оси, установим неподвижно небольшой **наклонный желоб**, с которого **скатывается шарик** (конец желоба находится над центром диска). Рис.1.

Сила трения при движении шарика по платформе ничтожно **мала**.

Таким образом, после скатывания с желоба шарик будет двигаться по радиусу неподвижного диска с постоянной скоростью \vec{v}' в направлении точки M .

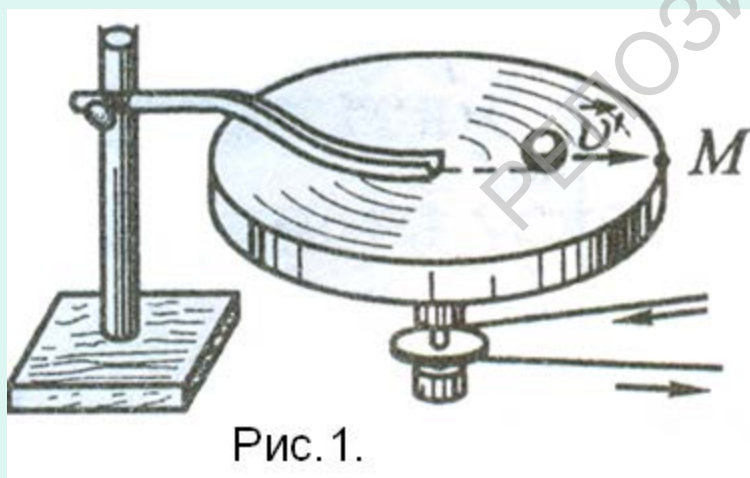


Рис. 1.

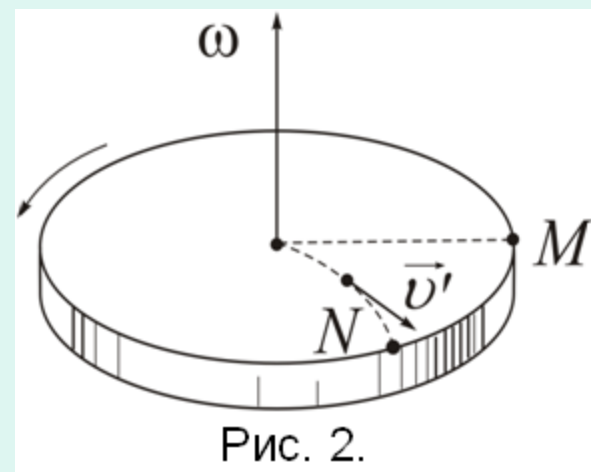


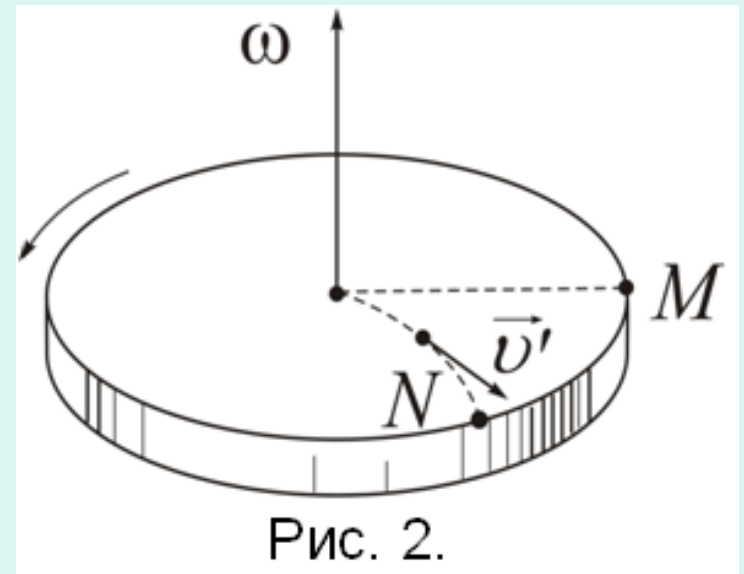
Рис. 2.

Если же **диск** привести в **равномерное вращение**, то относительно диска движение шарика будет криволинейным с возрастающей скоростью.

Как видно из рис.2, **шарик отклонится** от первоначального положения и придет в точку N , положение которой зависит от **начальной скорости** шарика (при постоянной угловой скорости вращения диска).

Рассмотрим теперь **движение шарика** относительно наблюдателя, который находится на диске (во вращающейся **неинерциальной** системе отсчета).

Как показал эксперимент, траектория движения шарика относительно поверхности диска является **криволинейной**.



Тот факт, что движение шарика во **вращающейся** системе отсчета оказывается **криволинейным**, свидетельствует о существовании **некой силы**.

Так как обычные силы взаимодействия, направленные указанным образом, на тело не действуют, то остается предположить **действие силы инерции**.

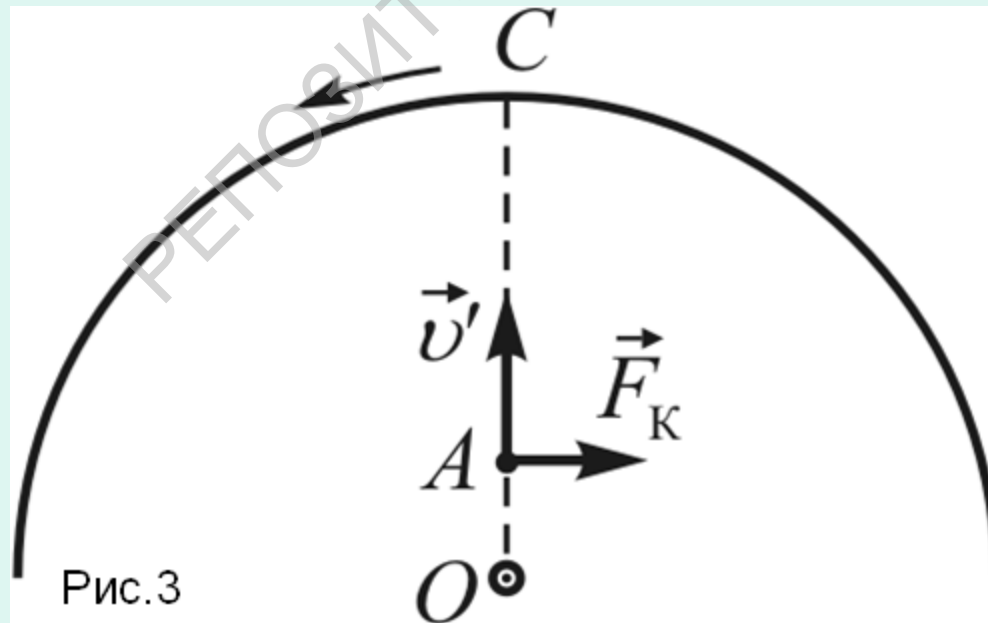
Очевидно, что **эта сила инерции** не является центробежной, которая будучи направленной по радиусу от центра вращения, не может вызвать наблюдающееся на опыте изменение относительной скорости тела, движущегося вдоль радиуса.

Возникающая в рассматриваемом случае сила инерции называется **кориолисовой силой**

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

и представляет собой ещё одну силу инерции, появляющуюся лишь тогда, когда тело движется во вращающейся системе отсчета.

В соответствии с формулой направление кориолисовой силы \vec{F}_K и векторов \vec{v}' и $\vec{\omega}$ для рассматриваемого нами случая отображено на рисунке 3.



В общем случае тело может двигаться с относительной скоростью, направленной под произвольным углом α к оси вращения.

Разложим вектор скорости \vec{v}' на две составляющие: \vec{v}'_{\perp} , которая лежит в плоскости, перпендикулярной оси вращения, и \vec{v}'_{\parallel} , параллельную оси вращения (Рис.4).

Составляющая \vec{v}'_{\parallel} не изменяет

переносной скорости тела,

потому что угол между \vec{v}'_{\parallel}

и $\vec{\omega}$ равен нулю.

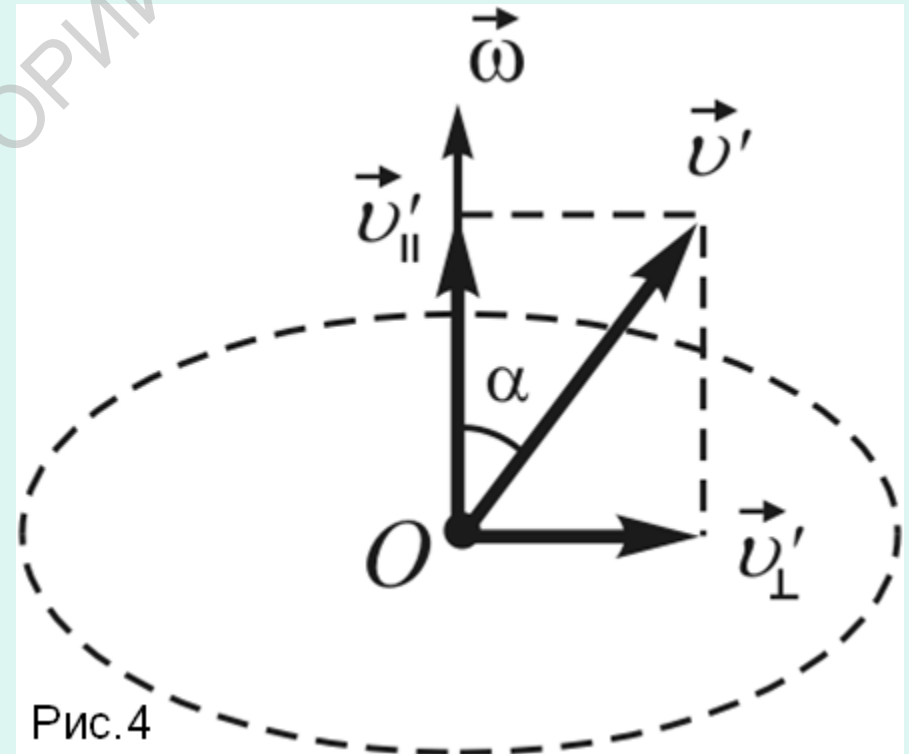
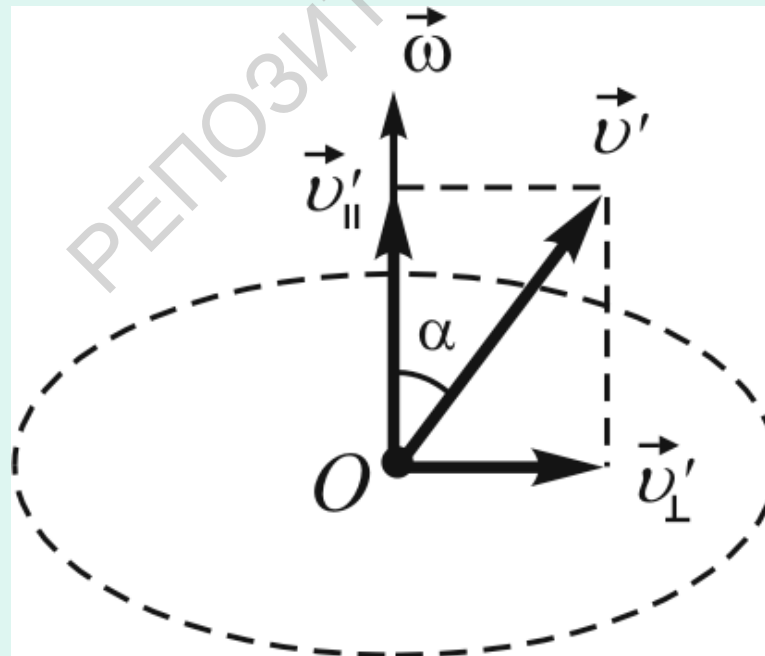


Рис.4

Поэтому сила Кориолиса обусловлена лишь составляющей $v'_{\perp} = v' \sin \alpha$

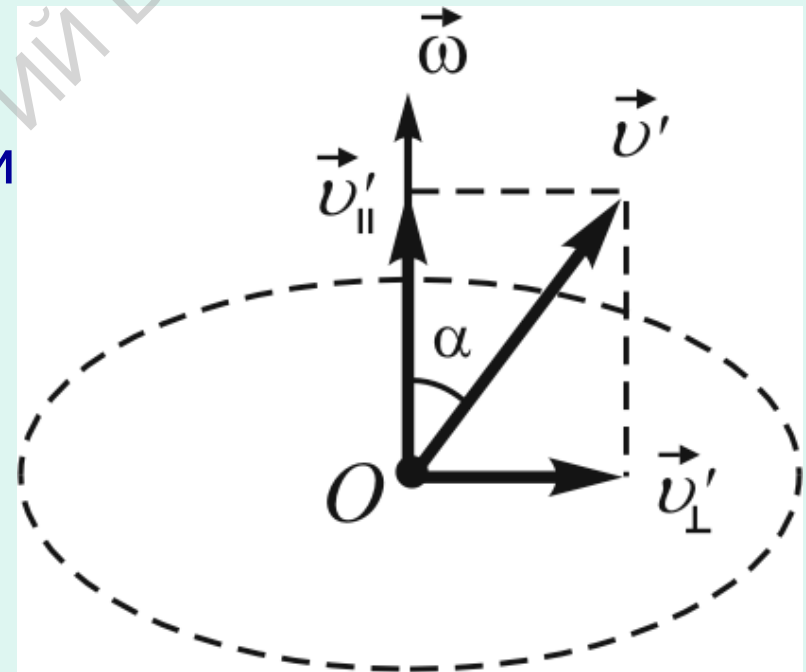
$$F_K = 2mv'\omega \sin \alpha$$

Таким образом, вектор силы Кориолиса во всех случаях перпендикулярен вектору относительной скорости \vec{v}' и вектору угловой скорости $\vec{\omega}$ вращения системы отсчета и определяется формулой $\vec{F}_K = 2m[\vec{v}', \vec{\omega}]$.



Кориолисова сила \vec{F}_K направлена перпендикулярно плоскости, содержащей векторы \vec{v}' и $\vec{\omega}$, таким образом, что если сопоставить направление поворота буравчика от вектора \vec{v}' к вектору $\vec{\omega}$ (в направлении наименьшего угла), то направление силы \vec{F}_K определится направлением поступательного движения буравчика.

Таким образом, в соответствии с приведенными выше рассуждениями, сила Кориолиса проявляется при движении по поверхности земного шара благодаря суточному вращению Земли.



Маятник Фуко

Французский физик-экспериментатор **Фуко** (1819—1868), наблюдая за колебаниями специально сконструированного маятника, в **1851 г.** экспериментально доказал, что система координат, связанная с Солнцем, инерциальна, а **Земля совершает суточное вращение вокруг своей оси.**

Этот маятник, состоящий из подвеса длиной 67 м и железного шара массой 28 кг, названный **маятником Фуко**, был сконструирован в парижском Пантеоне.

В настоящее время известно около 20 действующих конструкций маятника Фуко.

В Республике Беларусь маятник Фуко специальной конструкции в виде четырехгранной застекленной пирамиды установлен в Белорусском государственном педагогическом университете им. М. Танка (2002г.).

Шар из алюминиевого сплава массой 27 кг, подвешенный на стальной проволоке длиной 6,35 м колеблется с амплитудой 1,25 м и периодом 5,5 с.

Верхний конец проволоки закреплен в кардановом подвесе, установленном в вершине пирамиды.

Внутри шара расположен постоянный магнит из редкоземельного материала, а в основании пирамиды электромагнитная система, служащая для восполнения потерь энергии при колебаниях.

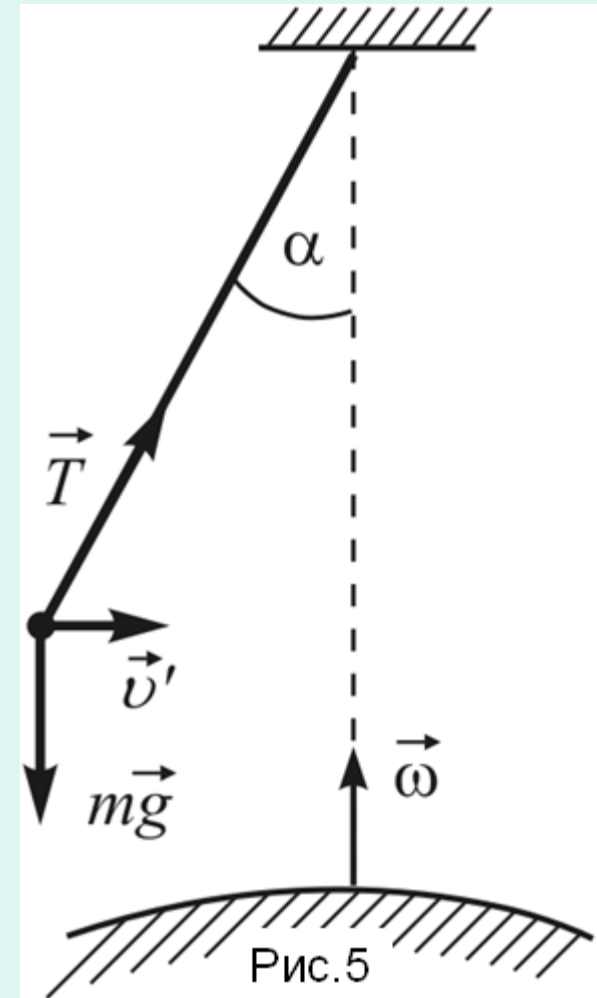


На географической широте Минска ($\varphi = 54^\circ$) за сутки пирамида поворачивается относительно плоскости качаний маятника на угол, равный 290° .

Для простоты рассуждений рассмотрим случай, когда маятник Фуко находится на **Северном полюсе**.

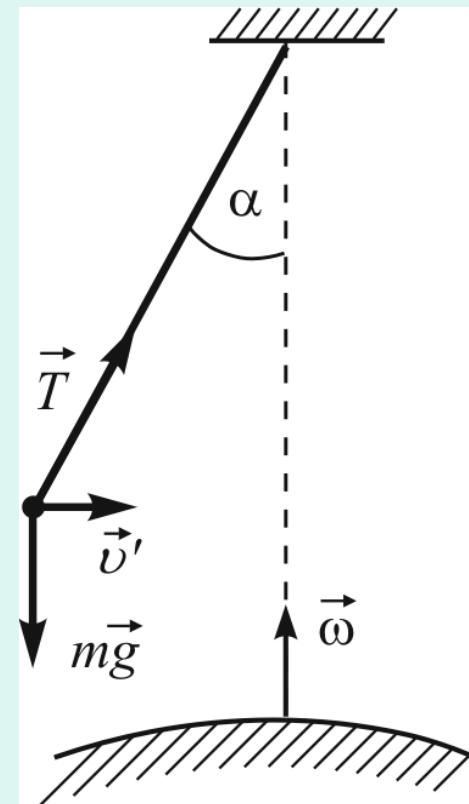
В системе отсчета, связанной с Землей, поворот плоскости качаний маятника объясняется **действием силы Кориолиса**.

На полюсе скорость \vec{v}' маятника при большой длине его подвеса можно считать перпендикулярной вектору угловой скорости вращения Земли $\vec{\omega}$ (рис.5).

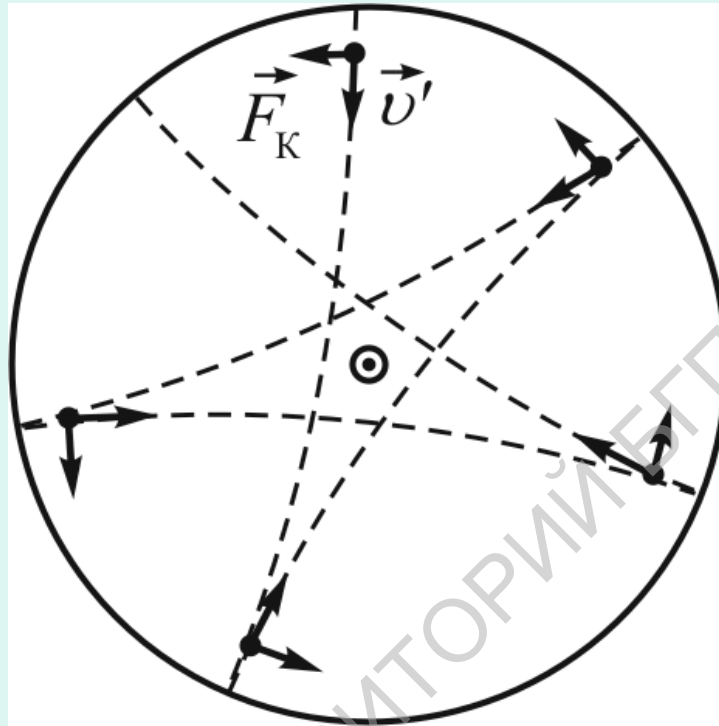


Сила Кориолиса в соответствии с формулой $\vec{F}_K = 2m[\vec{v}', \vec{\omega}]$ перпендикулярна плоскости качаний маятника и **по правилу буравчика** направлена **вправо** по отношению к относительной скорости движения маятника. Для изображенного на рисунке случая перпендикулярно плоскости рисунка вперед.

Поскольку **сила Кориолиса** никакой другой силой **не уравнивается**, то в результате ее действия и происходит поворот плоскости качаний маятника.



Траектория движения маятника будет иметь вид розетки.

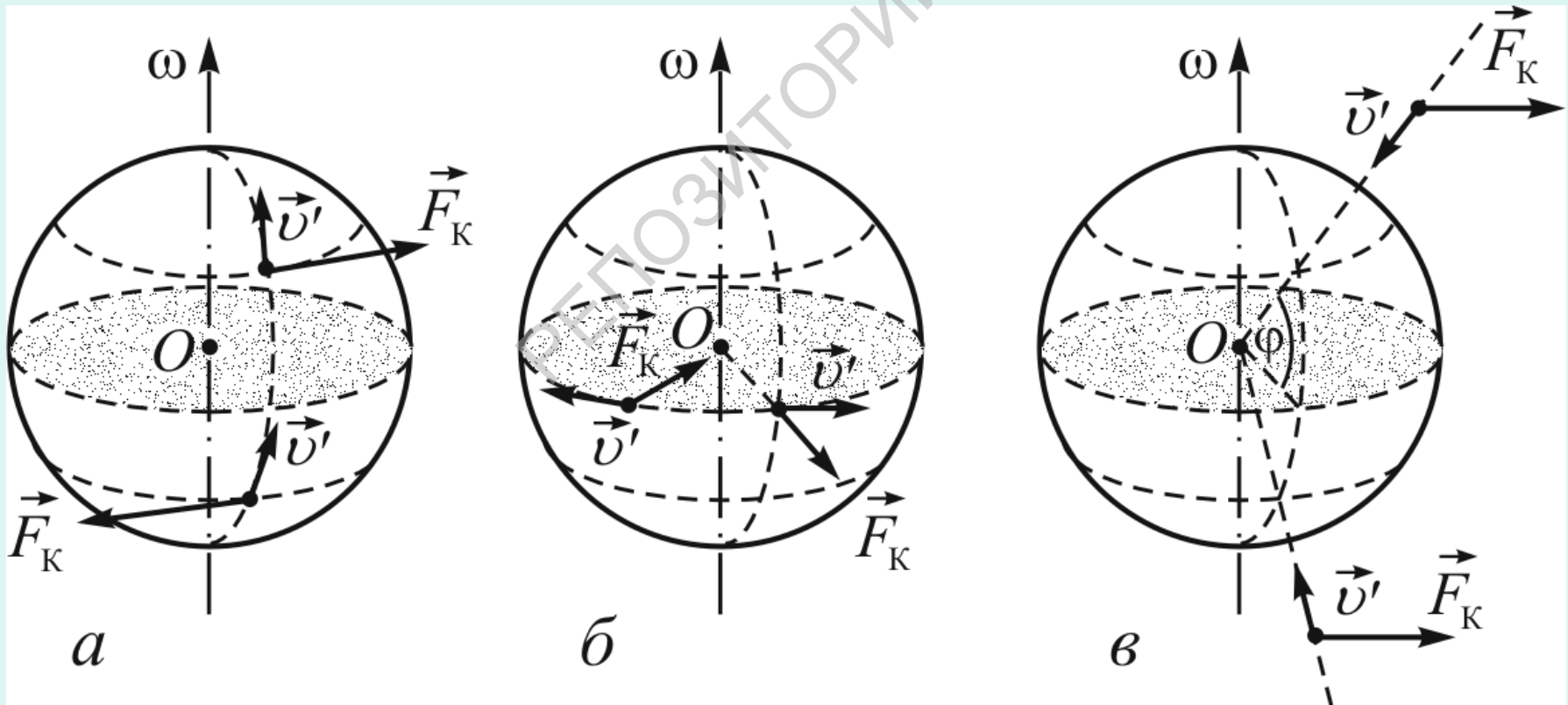


Если маятник установлен на некоторой широте φ , то в этом случае его плоскость качаний повернется за сутки на угол $2\pi \sin \varphi$.

Таким образом, опыт с маятником Фуко экспериментально подтверждает, что система отсчета, связанная с Землей, является неинерциальной системой отсчета.

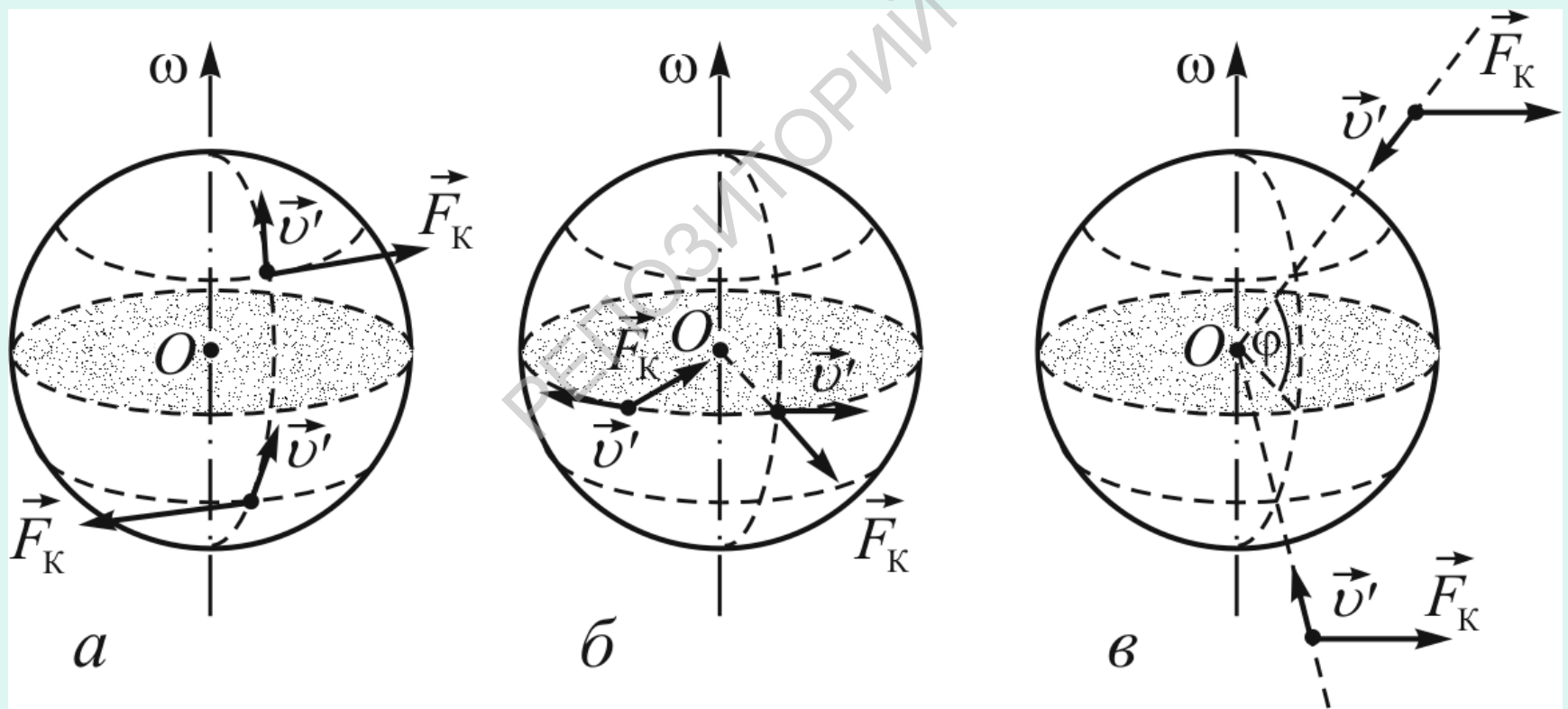
Проявление силы Кориолиса

Сила Кориолиса $\vec{F}_K = 2m[\vec{v}', \vec{\omega}]$, которая действует на тело, движущееся с относительной скоростью \vec{v}' вдоль меридиана, направлена по отношению к этой скорости **вправо** в северном полушарии и **влево** — в южном (рис. *a*).



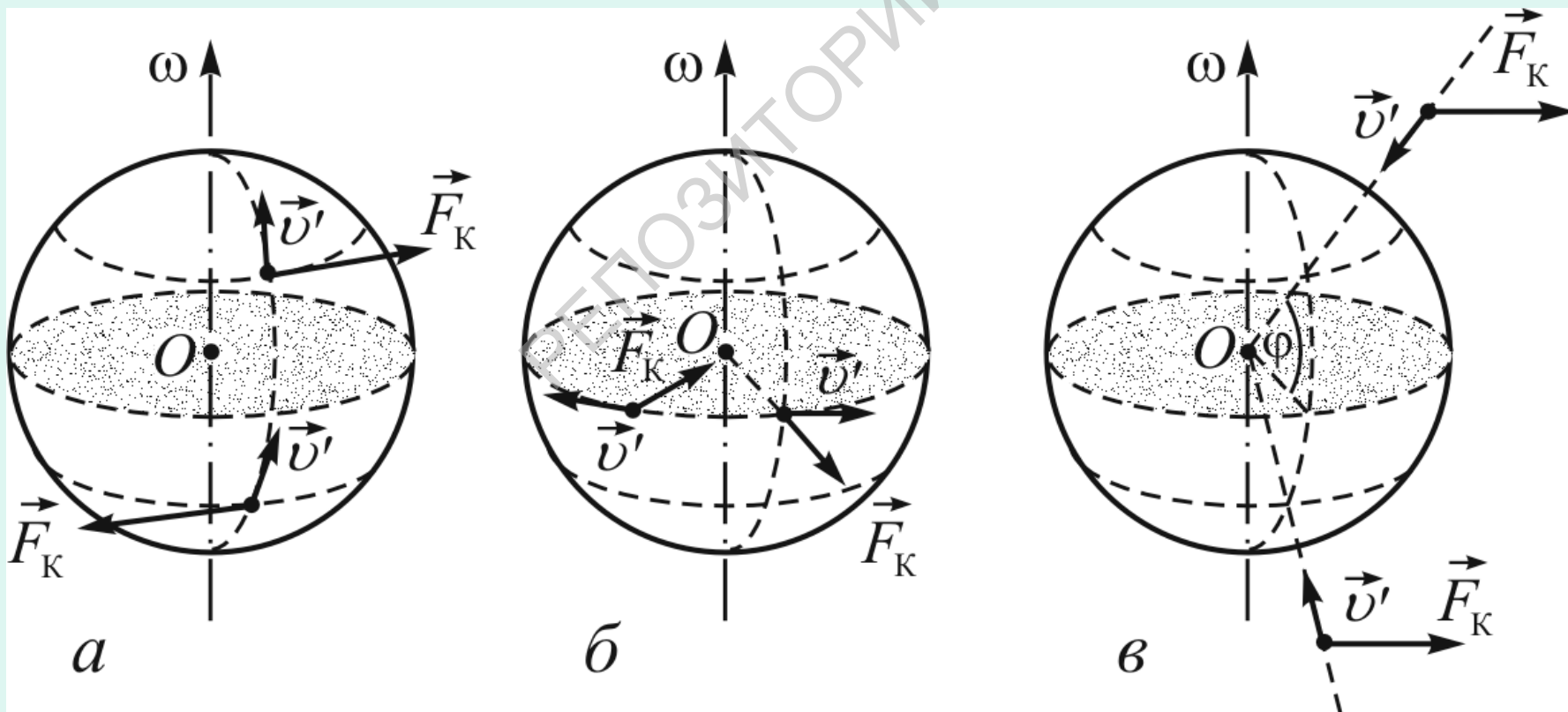
Если тело движется в **плоскости экватора** с запада на восток, то сила Кориолиса $\vec{F}_K = 2m[\vec{v}', \vec{\omega}]$

направлена вертикально **вверх**, при движении тела с востока на запад она направлена вертикально **вниз** (рис. б).



Сила Кориолиса $\vec{F}_K = 2m[\vec{v}', \vec{\omega}]$ равна нулю, если тело движется на экваторе в плоскости меридиана, потому что векторы $\vec{\omega}$ и \vec{v}' параллельны.

Примером влияния сил Кориолиса на движение тел у поверхности земного шара является также отклонение свободно падающих тел к востоку (рис. в).



Большую **роль** играют кориолисовы силы в **метеорологических явлениях**.

Так, отклоняющее влияние кориолисовой силы **заставляет мощное океаническое течение** Гольфстрим, выходящее из Мексиканского залива через Флоридский пролив в направлении, близком к меридианному, отойти от берегов Америки, пересечь Атлантический океан и выйти в Баренцево море у берегов Скандинавии.

Действием **кориолисовых сил** объясняется и **направление ветров-пассатов**.

При движении тел на Земле проявление кориолисовых сил **не очень заметно**, поскольку в обычных условиях малы и скорости движения тел, и угловая скорость вращения Земли.

Продолжительное действие кориолисовых сил объясняет тот факт, что **правый** берег рек в северном полушарии всегда более **крутой**, чем левый, в южном полушарии более крутой — левый берег (**закон Бера**).

Сила Кориолиса прижимает воду к правому берегу, и она подмывает его.

Поскольку сила Кориолиса, как отмечалось ранее, в северном полушарии всегда направлена в правую сторону от направления движения тела, то этим и объясняется преждевременный **износ правого рельса** на двухколейной железной дороге.

В научно-популярной литературе можно встретить информацию о том, что перелетные **птицы** при сезонной миграции **сохраняют выбранный курс** полета благодаря влиянию на них кориолисовой силы.

Невесомость и перегрузки

Как известно, **весом тела** называют **силу \vec{G}** , с которой это тело, находящееся в гравитационном поле Земли, действует на неподвижные относительно него **опору** или **подвес**, препятствующие свободному падению тела.

В отличие от силы тяжести, обусловленной гравитационным взаимодействием и приложенной к телу, **вес тела** — это сила упругости, которая приложена к опоре или подвесу и обусловлена **электромагнитным взаимодействием**.

Пусть внутри кабины лифта находится неподвижное относительно нее тело массой m .

Движение тела будем рассматривать относительно инерциальной системы отсчета.

Допустим, что лифт движется вниз с ускорением \vec{a} .

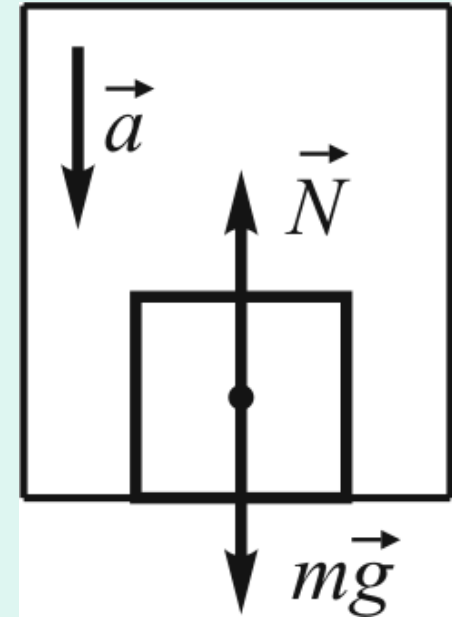
На тело действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила реакции опоры \vec{N} .

В соответствии со вторым законом Ньютона

$$m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$$

Спроецируем это уравнение на направление движения лифта:

$$mg - N = ma, \quad \text{или} \quad m(g - a) = N.$$



$$m(g - a) = N$$

Из последнего соотношения видно, что при движении по вертикали с ускорением $a < g$, направленным **вниз**, сила реакции опоры N уменьшается с возрастанием ускорения a , следовательно, **вес тела меньше**, чем его сила тяжести.

Очевидно, что при $a = g$ сила реакции опоры, а значит и **вес тела**, будут равны **нулю**. В этом случае наступает состояние невесомости.

Тело в состоянии невесомости не оказывает **давление на кабину лифта**, потому что ускорения движения тела и лифта одинаковы и равны ускорению свободного падения.

Состояние тела, при котором его вес больше силы тяжести, называют перегрузкой.

При движении по вертикали состояние перегрузки возникает, когда тело вместе с опорой движется с ускорением, направленным вверх.

В этом случае $G' = m(g + a)$

Иногда под перегрузкой понимают отношение

$$n = \frac{G'}{mg} = \frac{m(g + a)}{mg} = 1 + \frac{a}{g}$$

В состоянии невесомости исчезают деформации тел и обусловленные ими силы.

Так, тела перестают давить на подставки, а если тело приподнять, то оно будет находиться в таком состоянии («висеть в воздухе»); жидкость, налитая в сосуд, не будет вытекать через отверстие в дне сосуда.

Если телу относительно корабля сообщить начальную скорость, то оно будет двигаться в этом направлении равномерно и прямолинейно.

В этом состоянии космонавту не требуется прилагать мышечных усилий для перемещения внутри корабля, для удержания тела в определенном положении, отсутствуют деформация и давление частей тела космонавта друг на друга и т. д.

Ускорения, сообщаемые космическому кораблю силой тяги реактивного двигателя ракеты-носителя и сопротивлением атмосферы на участках выхода на орбиту и спуска на Землю, **резко возрастают**.

В системе отсчета, связанной с космическим кораблем, **возникают силы инерции**, которые в 9—10 раз превышают силу земного тяготения.

При движении на этих участках траектории тело космонавта испытывает **большие перегрузки** — сильное давление частей тела и внутренних органов друг на друга, давление крови на стенки сердца и сосудов и т. д.