

Михаил Юрьевич Замятин

Тьютор лаборатории по работе с одаренными детьми МФТИ,
член центральной предметно-методической комиссии по физике,
почетный работник общего образования РФ



Определяем вес

Скажи мне что такое вес, и я скажу кто ты.
Конфуций (из неписанного)

Путаницы с *весом* много. С детства мы часто употребляем это слово в быту, обычно подразумевая под ним массу.

– Какой вес колбасы? – Четыреста грамм.

– Что написано на упаковке сахара? – Вес нетто 900 г.

– Балерина набрала вес.

– У борцов разные весовые категории.

Затем в школе, в 7-м классе, вдруг обнаруживается, что *вес* – это сила и измеряется он не в килограммах, а в ньютонах.

Но это полбеда. Бытовые термины не обязаны строго соответствовать определениям, используемым в науке. Примеров таких расхождений много. Слово *работа* в быту может означать место, где взрослые люди проводят будние дни. Работа может быть и умственная, и творческая. Известно, что работа – не волк... и т.д. В физике же – это скалярное произведение силы на перемещение ее точки приложения. Похожая история с энергией, импульсом, зарядом и т.д.

Главная проблема *веса* не в этом, а в том, что даже в физике у него нет

простого и внятного определения. Пожалуй, ни одна величина не имеет в разных учебниках и справочниках столько неудачных и не универсальных определений, из-за чего часто возникают недоразумения. В разных задачах авторы трактуют *вес* по-своему, и порой трудно понять, что именно они хотят от решающего.

В англоязычной литературе *весом (weight)* нередко называют силу тяжести. Так же, увы, иногда поступают и в отечественной теоретической физике.

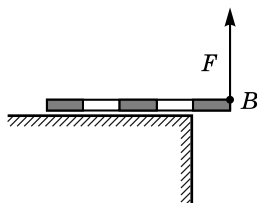
Приведем несколько заданий, в которых ответ зависит от того какой смысл авторы вкладывают в слово *вес*.

Пример 1

На краю стола лежит однородный рычаг, свешиваясь на пятую часть длины (см. рисунок). К его краю прикладывают силу $F = 20$ Н и рычаг начинает подниматься. Определите **вес** рычага.

Пример 2

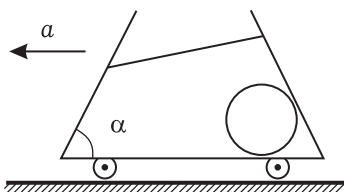
Мягкую пружину «слинки» удерживают сверху так, что ее нижний виток находится на высоте h над по-



лом. Длина недеформированной пружины равна l_0 , а длина пружины, растянутой силой собственного веса, равна l . Пружину отпускают. Через какое время она упадет на пол?

Пример 3

В движущемся с ускорением коническом сосуде с жидкостью покоится шарик. Куда направлен **вес** шарика?

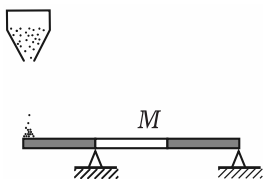


Пример 4

Чему равна масса свинцового груза, если он **весит** 600 Н?

Пример 5

Как будет изменяться **вес** рычага по мере добавления на него песка?



Пример 6

При надавливании пальцем на кусок колбасы, лежащий на чаше весов, показания весов увеличиваются. **Вес** колбасы от этого становится больше?

Прокомментируем эти примеры несколько позже, а пока постараемся разобраться с «классическими» определениями веса, которые предлагаются в одобренных Министерством образования школьных учебниках, тиражируемых из года в год.

Самое неудачное определение:

1. Вес – это сила с которой тело действует на горизонтальную опору или вертикальный подвес из-за притяжения к Земле.

Тут плохо все. Что же получается?

- Если тело находится на поверхности наклоненной под углом $0,1^\circ$ к горизонту, то веса у него уже нет?

- Как быть, если тело подвешено на нити, но при этом касается опоры (в определении присутствует слово *или*)?

- На Марсе или на Луне тогда тело невесомо?

- Если тело давит на потолок в лифте, движущимся с большим ускорением, направленным виз. Это вес или не вес? Воздействие на потолок возникает совсем не из-за притяжения к Земле.

- Парящий в небе воздушный шар или поезд на магнитной подушке невесомы? Рядом с ними нет никаких опор и подвесов.

Подобные ситуации можно перечислять долго. Ни к одной из них приведенное выше определение не применимо, или применимо с кучей оговорок и уточнений. Но что это тогда за определение, если его каждый раз надо подгонять под условие?

В некоторых учебниках авторы идут на уступки и часть требований выбрасывают. А в некоторых наоборот начинают требовать что-то еще, например, неподвижность опоры, или самого тела, от чего область при-

менения, введенной так физической величины, только сужается.

В учебнике для 7 класса С.В. Громов, Н.А. Родина, Просвещение 2002 читаем:

2. Весом тела называют силу, с которой оно давит на горизонтальную опору или растягивает вертикальный подвес.

Тут пропало упоминание про Землю, это хорошо, но осталась горизонтальность опоры.

Самый популярный школьный учебник по физике для 7 класса А.В.Перышкин, Дрофа 2013:

3. Вес тела – это сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле действует на опору или подвес.

Пропало требование горизонтальности, зато осталась Земля.

Видно, что авторы понимают неполноценность своих формулировок и пытаются сделать их универсальнее, но подобными полумерами всех проблем им решить не удастся. Плохо, что в такого рода определениях отсутствует конкретизация, должны ли учитываться иные внешние силы кроме сил реакций подвеса и опор. Не оговорено, обязательна ли роль самих опор/подвесов и что делать если их несколько. Неоправданно заужена область применимости определения странными ограничениями – Землей, горизонтальностью и т.п. Ничего не сказано про вес движущихся тел.

Забегая вперед, обозначим свою позицию. В механике понятие вес совершенно лишнее. Задачи можно решать, используя только классические силы понятной природы (нормальной реакции опоры, трения, натяжения нити, Архимеда, Кулона, Лоренца и т.п.) и силы, возникающие между телами в соответствии с тре-

тым законом Ньютона. Использование *веса* во многом связано с привычкой и языковыми традициями. Слово *вес* простое и часто употребляемое, но для науки это термин устаревший, пережиток прошлого.

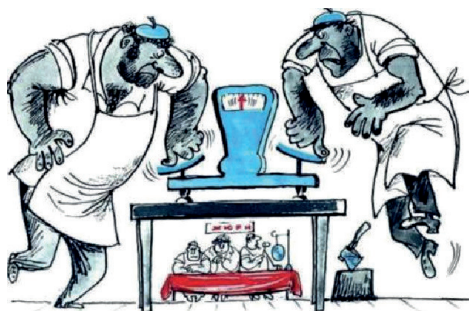
Исторически вес возник в качестве некоторой объективной характеристики для сравнения количества или размера товара на рынке. К примеру, на чашах рычажных весов можно было взвесить две рыбины и понять за какую из них в результате надо платить больше и на сколько. Взвешивание могло производиться и на пружинных весах (безмене). Как раз для таких ситуаций и применимы школьные определения веса. Чаша весов **горизонтальна**, пружина безмена (подвес) **вертикальна**. Рыба и весы **неподвижны**. Сам вес пропорционален массе рыбы, т.е. величине, определяющей притяжение рыбы к **Земле**.

Вскоре, однако, стало понятно, что при взвешивании возникают проблемы, из-за которых масса не всегда соответствует показаниям весов. Например, рыба вдруг начинает дергаться, при этом показания весов беспорядочно изменяются. Изменяются они и в случае если весы вместе с рыбой начнут ускоренное движение, например, вверх или вниз. Тот, кто попадал в воздушные ямы на самолете или ездил в скоростных лифтах знает, что тело, находящееся в такой системе, то слабее, то сильнее давит на кресло или на пол лифта.

Как поступить, если рыба очень тяжелая и на одном безмене взвесить ее не получается? Можно воспользоваться сразу двумя безменами, а затем сложить их показания, т.е. подвесов или опор может быть несколько.

Но и это не все. При обычном взвешивании рыбы выталкивающая сила воздуха особой роли не играет, но если ту же рыбу взвешивать в воде, то результат окажется совсем иным. Понятно, что на рынке никто так делать не станет. Но тем не менее появляется дополнительная возможность повлиять на вес.

Похожая проблема возникает, при взвешивании не рыбы, а куска железа, если хитрый продавец снизу под чашей расположит магнит, притягивающий кусок. Весы покажут больше чем надо. Обмануть покупателя можно и слегка надавив на чашу весов пальцем. Опять же показания весов вырастут, но это никак не связано с увеличением массы тела.



Примерно так эволюционировал вес. Изначально это была простая и понятная величина, но по мере накопления опыта, становилось все более очевидно, что в каждом новом случае для нее необходимы уточнения, оговорки и поправки.

Конечно, проще всего совсем отказаться от такого «капризного» термина. Но задачи со словом *вес* все еще встречаются. Существует понятие невесомости. И даже в законах физики до сих пор могут использоваться словосочетания типа «вес вытесненной воды».

Универсальное определение веса

Можно ли подобрать для веса общее определение, применимое как в самых простых ситуациях, так и в случаях, когда примитивное толкование буксует? Определение, которое было бы лаконичным, без излишней конкретизации позволяющее применять термин *вес* во всех проблемных ситуациях.

Оставляя за кадром вопрос – *зачем вообще нужен вес*, постараемся понять где эта величина больше всего востребована, и ради чего имеет смысл ее «спасать».

Вес выглядит естественно, пожалуй, только в случаях с перегрузками и невесомостью тел, находящихся в ускоренно движущихся системах. С середины 20-го века термин *невесомость* прочно вошел в обиход. Все знают, что космонавт на орбите теряет вес, перестает на что-то давить, свободно «плавать» в пространстве, а при старте ракеты наоборот – он испытывает перегрузку. С перегрузками сталкивается летчик при разгоне и торможении самолета или на виражах.

Очевидно, что в этих ситуациях, гравитационное взаимодействие – явно не основное, что определяет направление и величину сил, с которыми тела действуют на окружение, поэтому в определение веса фразу «вследствие притяжения к Земле» включать точно не стоит.

Надо отказаться и от всевозможных *горизонтальных* опор или *неподвижных* тел, так как это ограничивает область применения определения.

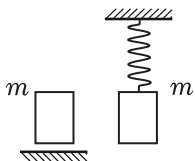
Исторически **вес** всегда считался силой, с которой тело действует на окружающие тела. Сохраним эту идею, но окружение будем понимать

в самом широком смысле, а не только в виде опоры или подвеса. В вес включим все силы, как на контактирующие с телом отдельные объекты, так и на сплошную жидкую или газообразную среду и поля, с которыми тело взаимодействует. Но! Сделаем одно исключение, не будем включать в вес гравитационное взаимодействие тела с Землей (или каким-либо другим/другими большими космическими объектами, оказывающем на тело существенное влияние). В противном случае для всех покоящихся тел вес окажется равным нулю.

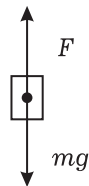
Итак, что получается? **Вес – это результирующая сила, с которой тело действует на окружающие объекты за вычетом гравитационного взаимодействия с планетой.** Или иначе, с учетом третьего закона Ньютона, **вес равен взятой с обратным знаком результирующей всех сил, действующих на тело со стороны окружения, без учета гравитации.**

Посмотрим, как будет работать такое определение в разных ситуациях, нужно ли его уточнять еще и можно ли получить для веса простую формулу.

Тело массой m , покоится на чаше весов или на пружине. Чему равен вес тела?



В первом примере роль силы F играет сила нормальной реакции опоры, а во втором – сила упругости пружины.

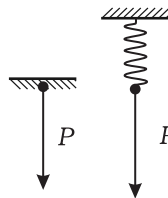


Так как тело находится в равновесии, то второй закон Ньютона принимает вид:

$$0 = \vec{F} + m\vec{g}.$$

Но по третьему закону Ньютона на опору и пружину действует сила P , противоположная по направлению силе F и равная ей по модулю.

$$\vec{P} = -\vec{F} \quad (*)$$



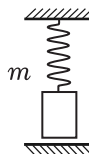
Так получается «классическое» равенство:

$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

Запомним эту формулу (*). Справа в нее входят «все» внешние силы кроме силы тяжести, но со знаком минус.

Начнем понемногу усложнять.

Пусть теперь тело «и стоит и висит», т.е. часть нагрузки берет на себя пружина, а часть опоры.

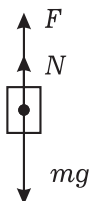


В равновесии на такое тело теперь действуют три силы, и второй закон Ньютона можно записать так:

$$0 = \vec{F} + \vec{N} + m\vec{g},$$

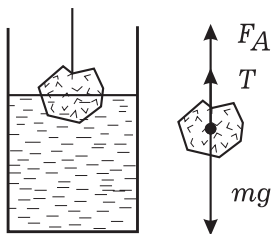
откуда, следуя логике, что вес — это суммарная сила, с которой тело действует на окружение, получим:

$$\vec{P} = -\vec{F} - \vec{N} = -(\vec{F} + \vec{N}) = m\vec{g}.$$



Опять вес оказался равным сумме всех внешних сил кроме силы тяжести, взятой с обратным знаком. И в итоге он остался равен самой силе тяжести. Т.е. наше определение для случаев, когда у тела несколько опор или несколько подвесов дает прежний результат.

Поместим тело в стакан с жидкостью, продолжая удерживать его на нити.



Запишем второй закон Ньютона.

$$0 = \vec{F}_A + \vec{T} + m\vec{g}.$$

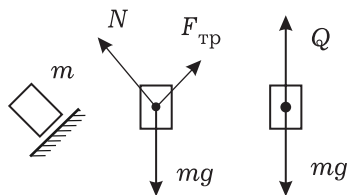
Если под весом опять понимать сумму сил, которыми тело действует на окружение (в данном случае и на жидкость), получим:

$$\vec{P} = -\vec{F}_A - \vec{T} = -(\vec{F}_A + \vec{T}) = m\vec{g}.$$

Пока все логично, хотя если сузить понятие веса до силы, дей-

ствующей только на нить, то в этом примере появится нестыковка. Так свободно плавающее тело вообще окажется в состоянии невесомости, что странно.

Рассмотрим тело, покоящееся на шероховатой наклонной плоскости.



Равновесие объясняется либо действием трех сил — тяжести, нормальной реакции опоры и трения, либо двух сил — тяжести и полной реакции опоры Q .

$$0 = \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} + m\vec{g}$$

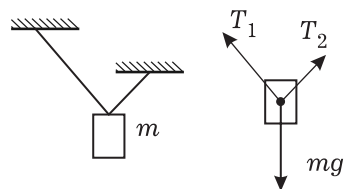
или

$$0 = \vec{Q} + m\vec{g}.$$

Но и в том и в другом случае

$$\vec{P} = -\vec{F}_{\text{тр}} - \vec{N} = -(\vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N}) = m\vec{g}.$$

Аналогичным будет результат для тела, подвешенного на не вертикальных нитях.



Иными словами, с нашим определением веса, для тел, находящихся в равновесии, всегда будет получаться один и тот же ответ:

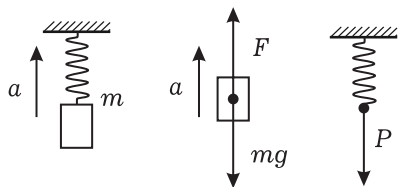
$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

Кому и насколько нужна такая величина – непонятно. С точки зрения характеристики рыбы, это может и хорошо. Правда теряет смысл популярный вопрос – что больше весит 1 кг гвоздей или 1 кг пуха? Зато очевидно, что всевозможные ограничения в виде вертикальных нитей и горизонтальных опор в «школьных» определениях совершенно лишние.

Пока мы рассматривали тела, покоящиеся в выбранной нами системе отсчета. Их равномерное движение не сильно изменит ситуацию, так как всегда мы можем пересечь в сопутствующую инерциальную систему отсчета и тем самым сделать тело неподвижным.

Что же изменится, если наш объект начнет двигаться с ускорением относительно инерциальной системы отсчета, или будет покоиться в неинерциальной системе отсчета?

Груз на пружине поднимается с ускорением a , направленным вверх.



Как и прежде вес – это сила, с которой тело действует на окружение, в данном случае – на пружину. Второй закон Ньютона теперь выглядит так:

$$m\vec{a} = \vec{F} + m\vec{g},$$

откуда

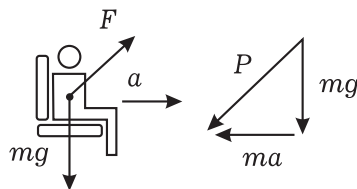
$$\vec{P} = -\vec{F} = m\vec{g} - m\vec{a}.$$

Наконец-то, вес не равен mg и появилась возможность говорить о

перегрузках. Если вектор ускорения a , как в данном примере, направлен вверх, то вес тела увеличивается $P = m(g + a)$. Если же вектор ускорения направлен вниз, то вес уменьшается и становится равен $P = m(g - a)$, а при $a = g$ он вообще обращается в ноль. Наступает невесомость. Этот результат мы и хотели получить.

Теперь ситуация чуть сложнее.

Пассажир массой m сидит в кресле разгоняющегося с горизонтальным ускорением a самолета. Чему равен его вес?



Обозначим силу реакции кресла за F . Тогда в уравнениях второго закона Ньютона ничего не изменится.

$$m\vec{a} = \vec{F} + m\vec{g},$$

Откуда

$$\vec{P} = -\vec{F} = m\vec{g} - m\vec{a}.$$

Разность векторов g и a теперь придется искать с помощью векторного треугольника. По модулю вес равен $P = m\sqrt{g^2 + a^2}$, т.е. пассажир испытывает перегрузку.

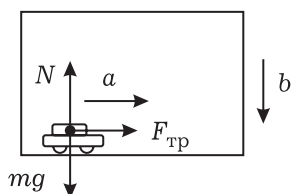
В более общем случае, если векторы g и a направлены под произвольным углом, вместо теоремы Пифагора придется применить теорему косинусов.

Несложно заметить, что любое дальнейшее усложнение и введение дополнительных сил не изменит конечной формулы веса тела, покоящегося в движущейся с ускорением

ем системе отсчета. Если мы будем пользоваться нашим определением, всякий раз будет возникать комбинация $\vec{P} = m\vec{g} - m\vec{a}$.

В завершение рассмотрим случай ускоренного движения тела в неинерциальной системе отсчета.

Игрушечный автомобиль массой m движется с ускорением a относительно пола лифта, который в свою очередь опускается с ускорением b , направленным вниз.



Для нахождения веса можно либо рассчитать ускорение автомобиля в инерциальной системе отсчета, либо рассмотреть его движение в системе отсчета лифта, введя силу инерции $-m\vec{b}$, направленную вверх. В любом случае получим уравнение:

$$m\vec{a} = \vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}} - m\vec{b},$$

откуда

$$\begin{aligned}\vec{P} &= -(\vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}}) = m\vec{g} - m\vec{a} - m\vec{b} = \\ &= m\vec{g} - m(\vec{a} + \vec{b}) = m\vec{g} - m\vec{a}_0,\end{aligned}$$

где a_0 – ускорение автомобиля в инерциальной системе отсчета.

Таким образом конструкция $\vec{P} = m\vec{g} - m\vec{a}$, где под a понимается ускорение тела относительно инерциальной системы отсчета, вполне может служить универсальной формулой для нахождения веса в любой ситуации.

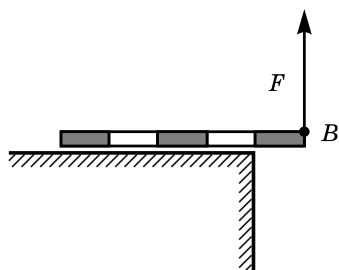
Так как в формуле два слагаемых, то вес обуславливается двумя

факторами – это гравитация и ускоренное движение тела.

Вернемся к примерам 1–6. Попробуем понять что в них не так, и сможет ли в этих случаях наше определение.

Пример 1

На краю стола лежит однородный рычаг, свешиваясь на пятую часть длины (см. рисунок). К его краю прикладывают силу $F = 20$ Н и рычаг начинает подниматься. Определите вес рычага.



Так как движение рычага медленное (неускоренное), то его вес равен mg . Найти эту силу можно применив правило моментов относительно точки опоры. Разумеется, в данном примере вес не равен силе, действующей на опору. Часть веса приходится на того, кто прикладывает силу F .

Пример 2

Мягкую пружину «слинки» удерживают сверху так, что ее нижний виток находится на высоте h над полом. Длина недеформированной пружины равна l_0 , а длина пружины, растянутой силой собственного веса, равна l . Пружину отпускают. Через какое время она упадет на пол?

Здесь вес упомянут явно в бытовом смысле. Особенно странно он выглядит вместе со словом «соб-

ственного». При любых трактовках вес – сила с которой объект действует на окружение, но не на себя.

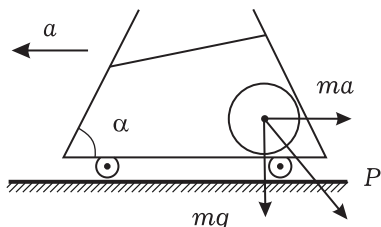
Пример 3

В движущемся с ускорением коническом сосуде с жидкостью покоится шарик. Куда направлен вес шарика?

В соответствии с формулой

$$\vec{P} = m\vec{g} - m\vec{a},$$

направление веса диктуется разностью векторов $m\vec{g}$ и $m\vec{a}$. См. рисунок.



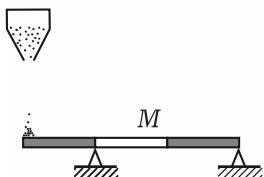
Пример 4

Чему равна масса свинцового груза, если он весит 600 Н?

Масса груза, если он не ускоряется, в соответствии с формулой $\vec{P} = m\vec{g}$, равна 60 кг и не зависит от способа его фиксации.

Пример 5

Как будет изменяться **вес** рычага по мере добавления на него песка?



Пример 6

При надавливании пальцем на кусок колбасы, лежащий на чаше весов, показания весов увеличиваются. **Вес** колбасы от этого становится больше?

В двух последних примерах вес рычага и колбасы не изменяется и равен $\vec{P} = m\vec{g}$, несмотря на кажущееся увеличение сил, действующих на опоры. В качестве компенсации возникают силы, действующие вверх со стороны рычага на песок, а со стороны колбасы на палец.

Итог

- Вес – сила без использования которой задачи хорошо решаются.
- Определения этой силы в школьных учебниках – неудачные.
- Чтобы применять термины *негрузка* и *невесомость* проще всего определять вес как результирующую силу, с которой тело действует на окружающие тела, за вычетом гравитационного взаимодействия, или, что еще проще, пользоваться формулой $\vec{P} = m\vec{g} - m\vec{a}$, понимая под $\vec{a}$ – ускорение тела в инерциальной системе отсчета.

В заключение обратим внимание на несколько тонкостей.

Если астрономических тел, оказывающих сравнимое гравитационное воздействие на исследуемое тело несколько (например, Земля, Солнце и Луна сразу), то при расчете веса их влияние следует объединять, вводя, например, эффективное ускорение свободного падения $g_{эф}$.

Кстати, тело, помещенное внутри уединенной массивной однородной сферы (например, в центрально сим-

метричную сферическую полость планеты) будет находиться в невесомости в любой точке этого внутреннего пространства.

Известно, что не всегда действие нескольких сил можно свести

к действию одной силы. Например, у «пары сил» равнодействующей нет. В таком случае и вес надо рассматривать как систему распределенных сил. Но это экзотическая ситуация.

Авторы выражают благодарность преподавателю физики из г. Пенза А.Власову, за идею подобного подхода к трактовке веса, сформулированную во многих его публикациях.

НОВОСТИ

Российская сборная завоевала восемь медалей на Азиатской олимпиаде по физике

Восемь школьников из Москвы, Подмосковья, Санкт-Петербурга и Республики Мордовия завоевали три золотые, три серебряные и две бронзовые медали на Азиатской олимпиаде по физике (APhO 2022). Олимпиада проходила в дистанционном формате с участием более 20 стран мира.

Страной-организатором APhO 2022 выступила Индия. Состязание проходит по правилам Международной физической олимпиады: один теоретический тур и один экспериментальный, оба длительностью по пять часов. В этом году они традиционно прошли на площадке МФТИ.

В 2022 году золотые медали получили:

- Максим Пермяков (Республиканский лицей для одаренных детей, Республика Мордовия);
- Олег Калашников (Физтех-лицей имени П. Л. Капицы, Московская область);
- Вадим Ерин (Физтех-лицей имени П. Л. Капицы, Московская область).

Серебряных медалей удостоены:

- Даниил Рынкевич (школа Центра педагогического мастерства, Москва);
- Илья Гладышев («Вторая школа», Москва);
- Данияр Тухватулин (Физтех-лицей имени П. Л. Капицы, Московская область).

Бронзовые медали завоевали:

- Владимир Савинцев (Физтех-лицей имени П. Л. Капицы, Московская область);
- Максимилиан Тимофеев (Президентский физико-математический лицей № 239, Санкт-Петербург).

Руководителями сборной и наблюдателями выступили директор по довузовской подготовке Московского физико-технического института (МФТИ) Виталий Шевченко,

тьюторы учебно-методической лаборатории по работе с одаренными детьми МФТИ Арсений Пикалов, Юрий Скаков и Фёдор Цыбров, студенты МФТИ, призеры международных олимпиад Фёдор Оксаниченко и Максим Покровский.

Поздравляем наших школьников! Сборная России благодарит всех, кто помогает добиваться высоких результатов на олимпиадах и достойно представлять нашу страну.

