

A window in a wooden cabin with a bright sun visible outside, overlaid with the text "Шаровая молния". The window is framed by light-colored curtains and a wooden sill. The sun is a bright yellow circle in the center of the window, partially obscured by the text. The background outside the window shows a dark, forested landscape.

# Шаровая молния

# Как выглядит шаровая молния

Уже из самого названия следует, что эта молния имеет форму **шара**. Но ее форма всего лишь близка к шару; молния может вытягиваться, принимая форму **эллипсоида** или **груши**, ее поверхность может колыхаться.



Шаровая молния светится - иногда тускло, а иногда достаточно ярко. Яркость света шаровой молнии сравнивают с яркостью света **100-ваттной лампочки**. Чаще всего (примерно в 60% случаев) шаровая молния имеет **желтый, оранжевый** или **красноватый** цвет. В 20% случаев - это белый шар, в 20% - синий, голубой. Иногда цвет молнии изменяется в процессе наблюдения. Перед угасанием молнии внутри нее могут возникать **темные области** в виде пятен, каналов, нитей.



Как правило, шаровая молния имеет **достаточно четкую поверхность**, отграничивающую вещество молнии от окружающей ее воздушной среды. Это типичная граница раздела двух **разных фаз**. Наличие такой границы говорит о том, что вещество молнии находится в особом фазовом состоянии. В отдельных случаях на поверхности молнии начинают плясать **язычки пламени**, из нее выбрасываются снопы **искр**.

Диаметр шаровых молний находится в диапазоне от долей сантиметра до нескольких метров. Чаще всего встречаются молнии диаметром **15...30 см**.

Обычно шаровая молния **движется бесшумно**. Но может издавать шипение или жужжание - особенно когда она искрит.

# Поведение шаровой молнии

Шаровая молния может двигаться по весьма причудливой траектории. Вместе с тем в ее движении обнаруживаются определенные закономерности:

1. Возникнув где-то вверху, в тучах, она **опускается поближе к поверхности земли**.
2. Оказавшись у поверхности земли, она движется далее **почти горизонтально**, обычно повторяя рельеф местности.
3. Молния, как правило, **обходит проводящие ток объекты** и, в частности, людей.
4. Молния обнаруживает явное "желание" **проникать внутрь помещений**.

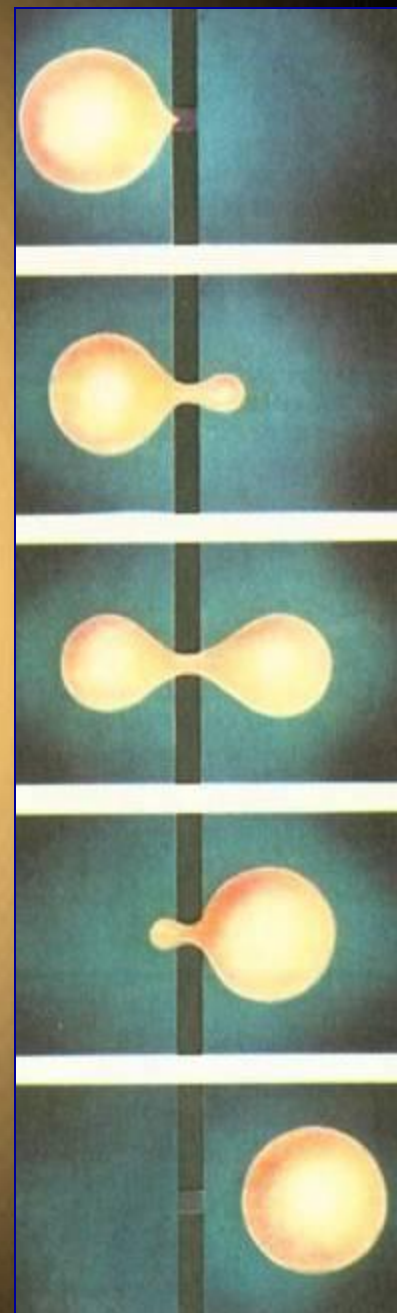
Когда молния плавает над поверхностью земли (обычно на высоте метра или несколько больше), она напоминает тело, находящееся в состоянии невесомости. По-видимому, вещество молнии имеет почти такую же плотность, что и воздух. Точнее, молния **немного тяжелее воздуха** - недаром она, в конечном счете, всегда стремится опуститься вниз. Ее плотность составляет  $(1...2) \times 10^{-3} \text{ г/см}^3$ . Разницу между силой тяжести и выталкивающей силой компенсируют конвекционные воздушные потоки, а так же сила, с которой действует на молнию атмосферное электрическое поле.



Во время грозы земля и объекты на ней заряжаются **положительно**, значит, шаровая молния, обходящая объекты и копирующая рельеф, также заряжена **положительно**. Если, однако, встречается предмет, заряженный отрицательно, молния притянется к нему и скорее всего взорвется. С течением времени заряд в молнии может измениться, и тогда меняется характер ее движения. Одним словом, шаровая молния очень **чутко реагирует на электрическое поле** вблизи поверхности земли, на заряд, имеющийся на объектах, которые оказываются на ее пути. Так, молния стремится переместиться в те области пространства, где напряженность поля меньше; этим можно объяснить частое появление шаровых молний **внутри помещений**.

Вызывает удивление способность шаровой молнии проникать в помещение **сквозь щели и отверстия**, размеры которых намного меньше размеров самой молнии. Так, молния диаметром 40 см может пройти сквозь отверстие диаметром всего в несколько миллиметров. Проходя сквозь малое отверстие, молния очень сильно **деформируется**, ее вещество как бы переливается через отверстие. Еще более удивительна способность молнии после прохождения сквозь отверстие **восстанавливать свою шаровую форму**.

Следует обратить внимание на способность шаровой молнии сохранять форму шара, так как это явно указывает на наличие **поверхностного натяжения у вещества молнии**.



Скорость движения шаровой молнии невелика - **1...10 м/с**. За ней нетрудно следить. Внутри помещений молния может на некоторое время даже **останавливаться**, зависая над полом.

Живет шаровая молния примерно от **10 с до 1 мин**. Меньше живут очень маленькие молнии (диаметром порядка сантиметра и меньше) и очень большие (диаметром около метра и больше). Наиболее долго живут молнии диаметром **10...40 см**. Существуют три разных **способа прекращения существования молнии**:

- Чаще всего (в 55% случаев) молния **взрывается**.
- В 30% случаев молния спокойно **угасает** (из-за нехватки запаса энергии, накопленной в ней).
- В 15% случаев внутри молнии развиваются неустойчивости, и она **распадается на части**.

Маленькие молнии обычно угасают ("сгорают"); большие чаще всего **распадаются на части**.



# Энергия шаровой молнии

Оценить минимальное количество энергии в шаровой молнии можно по тем последствиям, которые она оставляет после своего исчезновения. Воспользуемся сообщением одного из наблюдателей: "Она оплавил участок батареи диаметром 6 мм, оставив лунку глубиной 2 мм." Значит, молния испарила около 0,45 г железа. Для этого требуется энергия, равная **4 кДж**.

Вот еще одно из наблюдений шаровой молнии: "Молния диаметром 30 см взорвалась около водопроводного крана. Этот кран представлял собой трубу диаметром 3 см и высотой 80 см. После взрыва труба оказалась скрученной и была покрыта окалиной, хотя и не накалилась докрасна." Чтобы скрутить железную трубу, надо разогреть некоторый ее участок до достаточно высокой температуры. В то же время, как указывает наблюдатель, труба не накалилась докрасна. Поэтому можно предположить, что молния нагрела участок трубы, скажем, на **600 К**. Длину этого участка будем полагать приблизительно равной диаметру трубы.



# Задача

## Дано:

- длина трубы  $l=5$  см
- наружный радиус трубы  $R=1,5$  см
- внутренний  $r=1,2$  см
- удельная теплоемкость железа
- плотность железа  $\rho=7,8 \text{ г/см}^3$   
 $c=0,46 \text{ Дж/(г}\cdot\text{К)}$

## Найти:

Энергию  $W$ , которая требуется для нагревания  $\Delta T$  участка железной трубы.

## Решение:

1. Согласно условию задачи, надо нагреть участок трубы длиной  $l$ , т.е. нагреть массу железа:
2. Используя  $m = \rho(\pi R^2 - \pi r^2)l$  числовые значения величин, получаем  $m=100$  г
3. Отсюда находим искомую энергию:  $W=cm\Delta T=4,2 \times 10^4$  Дж = 42 кДж.

## Ответ:

$$W=cm\Delta T=4,2 \times 10^4 \text{ Дж} = 42 \text{ кДж.}$$

В одном из писем сообщалось, что шаровая молния диаметром 30 см расщепила торчащую из воды деревянную причальную сваю диаметром 30 см вдоль волокон на длинные щепки. Воспользуемся этим сообщением для оценки энергии молнии.

Дано:

- радиус сваи  $r=0,15$  м
- длина участка сваи, в пределах которого образуется пар,  $l=0,2$  м
- предел прочности дерева, соответствующий его расщеплению вдоль волокон,  $p_0=3106$  Па
- начальная температура воды  $T_1=20$  °С
- удельная теплоемкость воды  $c=4,19$  Дж/(гК)
- удельная теплота парообразования  $\lambda=2,26$  кДж/г
- коэффициент пористости дерева принять равным  $0,1$
- разрывающий сваю пар занимает объем пор

$$V = \alpha \pi r^2 l$$

Найти:

Энергию  $W$ , необходимую для разрыва волокон сваи паром.

Решение:

1. В этом объеме при температуре кипения воды  $T=380$  К необходимо обеспечить давление водных паров, равное  $p_0$ , для чего надо нагреть до температуры кипения и испарить некоторое количество молей воды.
2. Обозначим это количество молей через  $x$ .
3. Чтобы найти его, воспользуемся уравнением Менделеева - Клапейрона для идеального газа: , где  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $R=8.31$  Дж/(мольК).  
$$x = \alpha \pi r^2 l \frac{p_0}{RT}$$
4. Учитывая, что  $V=\alpha \pi r^2 l$ , получаем
5. Используя числовые значения величин, находим  $x=1,35$  моль.
6. Молекулярный вес воды равен  $18$ ; значит, один моль воды имеет массу  $18$  г.
7. Искомую энергию  $W$  рассчитываем по формуле:  
$$W = \mu x (\lambda + c \Delta T)$$
, где  $\mu=18$  г/моль,  $\Delta T=100-20=80$  К.
1. Подставляя числовые значения, находим  $W=63$  кДж.

Ответ:

$W=63$  кДж.

Принимая во внимание результаты рассмотренных задач, можно заключить, что энергия, запасенная в шаровой молнии диаметром 25 см, находится в пределах примерно 100 кДж. Такая оценка представляется вполне правдоподобной; она согласуется с результатами, получаемыми на основе большого количества наблюдений шаровой молнии. Если энергия молнии 100 кДж, а ее диаметр 25 см, то, следовательно, плотность энергии оказывается порядка  $10 \text{ Дж/см}^3$ . В общем случае можно считать, что энергия шаровой молнии принимает значения от нескольких килоджоулей до нескольких сотен килоджоулей, а плотность энергии лежит в пределах примерно от 1 до  $10 \text{ Дж/см}^3$ .

# Опасна ли шаровая молния?

В принципе, конечно, она опасна. Вообще же встречи с естественной шаровой молнией, как правило, заканчиваются без трагических последствий. Она может **оплавить небольшой участок металла, согнуть не слишком толстую трубу, расщепить бревно.**

Чаще всего шаровая молния **обходит человека стороной.** Многих наблюдателей удивляет тот факт, что даже на близком расстоянии они не ощущали тепла от молнии. В отдельных случаях даже прямое прикосновение молнии не причиняло никакого вреда; в других случаях такое прикосновение давало ожоги, хотя и болезненные, но отнюдь не смертельные. Следовательно, температура на поверхности молнии невысока. Внутри шаровой молнии температура выше, чем на ее поверхности, однако, вряд ли она превышает  $300...400^{\circ}\text{C}$ .



# Когда возникает шаровая молния?

В подавляющем большинстве случаев (более 90%) шаровая молния возникает в **период грозовой активности**, когда наблюдаются обычные молнии и когда напряженность атмосферного поля особенно велика. Но есть отдельные сообщения о появлении шаровой молнии в **ясную погоду**.

Вопрос о том, как возникает шаровая молния, является, пожалуй, наиболее сложным и неясным. К сожалению, не так уж много людей оказались свидетелями ее возникновения. В большинстве своем наблюдатели утверждают, что шаровая молния возникла либо **сразу после разряда**, либо **перед разрядом обычной молнии**, что бывает реже.



Как именно рождается шаровая молния при разряде обычной молнии? На этот счет ничего определенного сказать пока нельзя. Имеются лишь разные предположения. Можно, например, предположить, что шаровая молния возникает

- в момент, когда спускающийся из тучи ступенчатый лидер встречается в нескольких десятках метров над землей со встречным лидером.
- в месте особенно резкого излома обычной молнии или в том месте, где произошло ее раздвоение.
- из земли или воды в том месте, которое было только что поражено обычной молнией.
- при электрическом разряде между тучами.

Понятно, что во всех этих случаях шаровая молния образуется **за счет энергии разряда обычной молнии.**



# Физическая природа шаровой молнии

В настоящее время мы не имеем каких-либо веских доводов считать, что в основе всех "шаровых молний" лежит **общий физический механизм**.

Все гипотезы, касающиеся физической природы шаровой молнии, можно разделить на две группы.

- гипотезы, согласно которым шаровая молния **непрерывно получает энергию извне**.
- гипотезы, согласно которым шаровая молния после своего возникновения становится **самостоятельно существующим объектом**.

Поэтому сосредоточим внимание на гипотезе, согласно которой шаровая молния состоит из **положительных и отрицательных ионов**. Ионы образуются за счет энергии разряда линейной молнии. Затраченная на их образование энергия как раз и определяет запас энергии шаровой молнии. Она высвобождается при рекомбинации ионов. Благодаря электростатическим (кулоновским) силам, действующим между ионами, объем, заполненный ионами, будет обладать поверхностным натяжением, что и определяет устойчивую шаровидную форму молнии.

# Задача

## Дано:

- ионы заполняют объем сферы радиусом  $r=10 \text{ см}$
- плотность ионного газа  $n=10^{19} \text{ см}^{-3}$
- если энергия ионизации есть  $u=8 \text{ эВ}$

## Решение:

1. В единице рассматриваемого объема запасена энергия  $ni$ .
2. Умножив ее на объем шара  $\frac{4}{3}\pi r^3$ , находим искомую энергию?
3. Подставив числовые значения  $W = \frac{4}{3}\pi r^3 ni$  величин (учтем при этом, что  $u=1,28 \times 10^{-18} \text{ Дж}$ ), получим  $W=52 \text{ кДж}$ .

## Найти:

Энергию  $W$ , запасенную в объеме сферы.

## Ответ:

$W=52 \text{ кДж}$ .

Эта энергия вполне согласуется со сделанными ранее оценками энергии шаровой молнии соответствующих размеров. Однако, равномерно перемешанные по объему молнии ионы будут быстро рекомбинировать. Задержка рекомбинации может быть связана с разделением в пространстве ионов разного знака.



Имеется сфера, заполненная газом из нейтральных атомов. Предположим, что из каждого атома ушел один электрон и поместился на поверхности сферы, а оставшиеся положительные ионы сосредоточились в центре сферы. Чему равна сила притяжения между электронами и ионами?

Дано:

- сфера радиусом  $r=1 \text{ см}$
- плотность нейтральных атомов  $n=10^{19} \text{ см}^{-3}$

Решение:

1. Обозначим через  $V$  объем сферы.
2. После разделения зарядов на поверхности сферы и в ее центре сосредоточатся заряды разного знака, каждый из которых по модулю равен  $q=Vne$ , где  $e$  - абсолютное значение заряда электрона;  $e=1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$ .
3. Сферическая симметрия совокупности разделенных зарядов позволяет для определения искомой силы  $F$  воспользоваться законом Кулона  $F = \frac{kq^2}{r^2}$ , где  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$
4. Поскольку  $V = \frac{4}{3}\pi r^3 = 4 \text{ см}^3$ , то, следовательно,  $q=4 \times 10^{19} e$ .
5. Подставляем числовые значения, при этом надо взять  $r=0,01 \text{ м}$ .
6. В итоге получаем  $F=410^{15} \text{ Н}$ .

Найти:

Силу притяжения  $F$  между электронами и ионами.

Ответ:

$F=410^{15} \text{ Н}$ .

Итак, предположение о возможном пространственном разделении ионов разного знака внутри шаровой молнии надо исключить. Что может затормозить рекомбинацию равномерно "перемешанных" по объему сферы ионов? Возможный ответ на этот вопрос дает так называемая **кластерная гипотеза**.

**Кластер** - это положительный или отрицательный ион, окруженный своеобразной "шубой" из нейтральных молекул. Если ион окружен молекулами воды, его называют **гидратированным**. Молекулы воды в силу своей полярности удерживаются вблизи ионов силами электростатического притяжения.

Два гидратированных иона разных знаков объединились в нейтральный комплекс. Вот из таких комплексов и состоит вещество шаровой молнии. Таким образом, предполагается, что в шаровой молнии каждый ион окружен "шубой" из молекул воды. Эта "шуба" мешает ионам сблизиться непосредственно друг с другом и тем самым существенно замедляет рекомбинацию ионов.

Если количество рекомбинаций за единицу времени в единице объема не слишком велико, шаровая молния ведет себя спокойно. Выделяющаяся при рекомбинации энергия преобразуется в энергию светового излучения и частично передается окружающей среде через теплообмен. Когда же число рекомбинаций становится чрезмерно большим, выделяющаяся энергия не успевает отводиться из молнии - и тогда быстро растет температура, дружно рушатся оболочки ионов-кластеров, рекомбинация резко усиливается - происходит взрыв.



# Попытки лабораторного воспроизведения

Нет ни одного случая искусственного получения шаровой молнии подобной природной в лабораторных условиях.

Прежде всего, поскольку в появлении шаровых молний прослеживается явная связь с другими проявлениями атмосферного электричества (например, обычной молнией), то большинство опытов проводилось по следующей схеме: создавался газовый разряд (а свечение газового разряда — вещь известная), и затем искались условия, когда светящийся разряд мог бы существовать в виде сферического тела.

Исследователи могли получать кратковременные газовые разряды сферической формы, жившие максимум несколько секунд. Однако остаётся открытым вопрос о связи этих разрядов с той шаровой молнией, которая встречается в природе.



# Интересный факт

На Земле одновременно существуют от 100 до 1000 шаровых молний, но вероятность увидеть шаровую молнию хотя бы раз в жизни составляет всего 0,01%.



