



Летняя школа учителей химии в МГУ

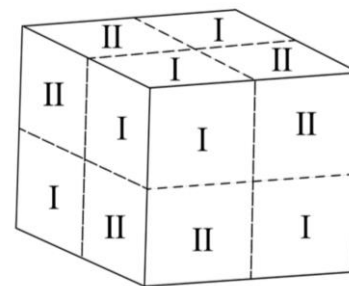
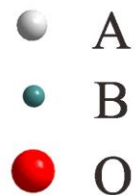
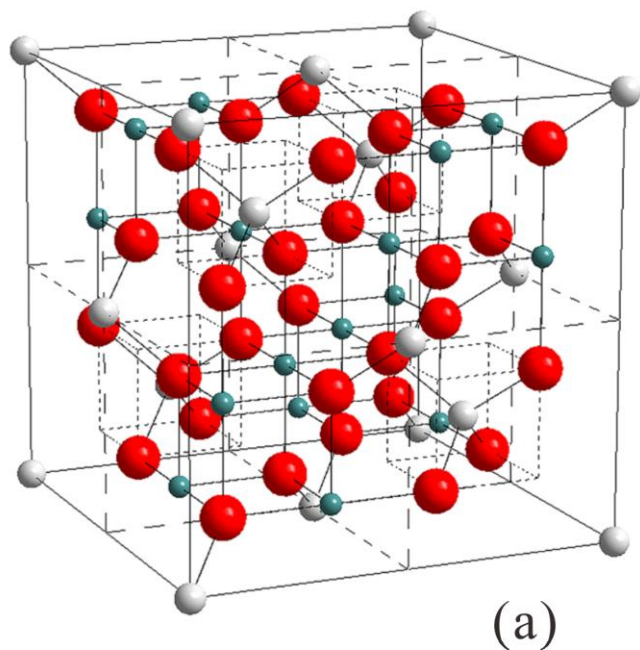
# **Химия и математика: как решать задачи по кристаллохимии**

Максим Сергеевич Лиханов

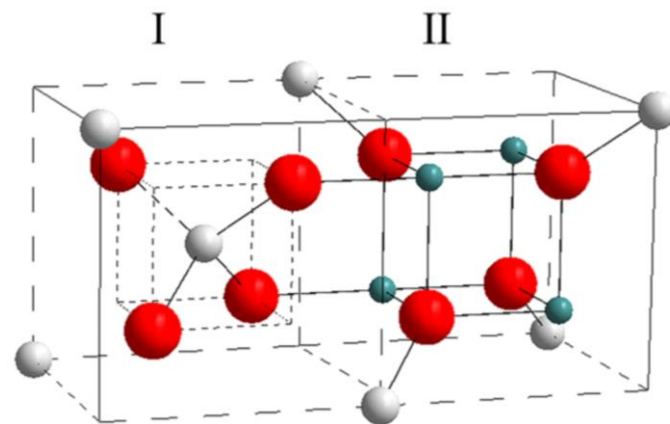
27 июня 2024

# Задача МХО-2022

Типичная черная глазурь состоит из железосодержащих оксидов со структурой шпинели. Шпинели имеют общую формулу  $AB_2O_4$  и представляют собой кубическую плотнейшую упаковку ионов  $O^{2-}$ , в которой катионы А занимают  $1/8$  часть тетраэдрических пустот, а катионы В -  $1/2$  октаэдрических, как показано на рисунке элементарной ячейки.



(b)

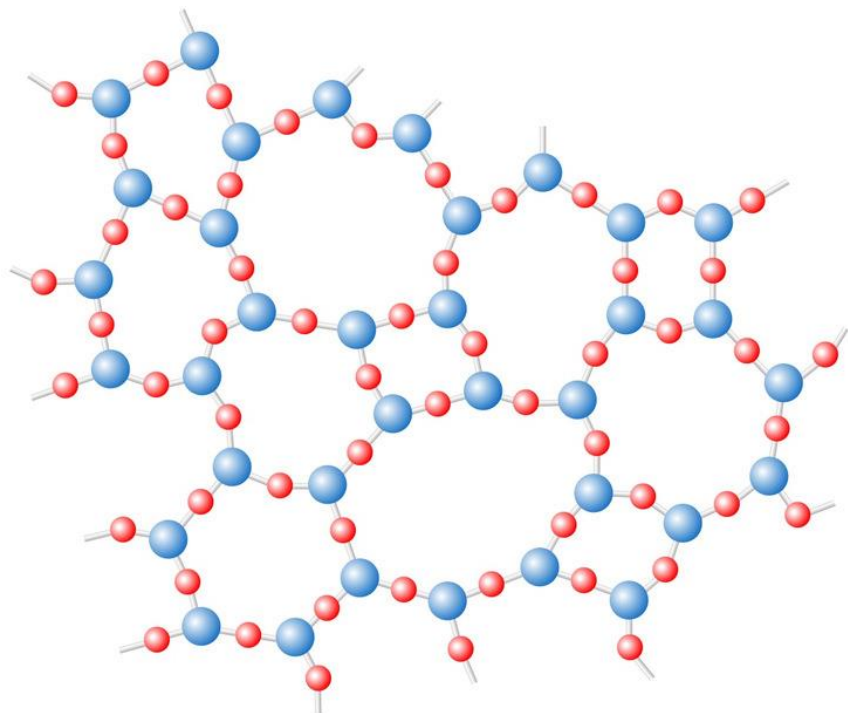


(c)

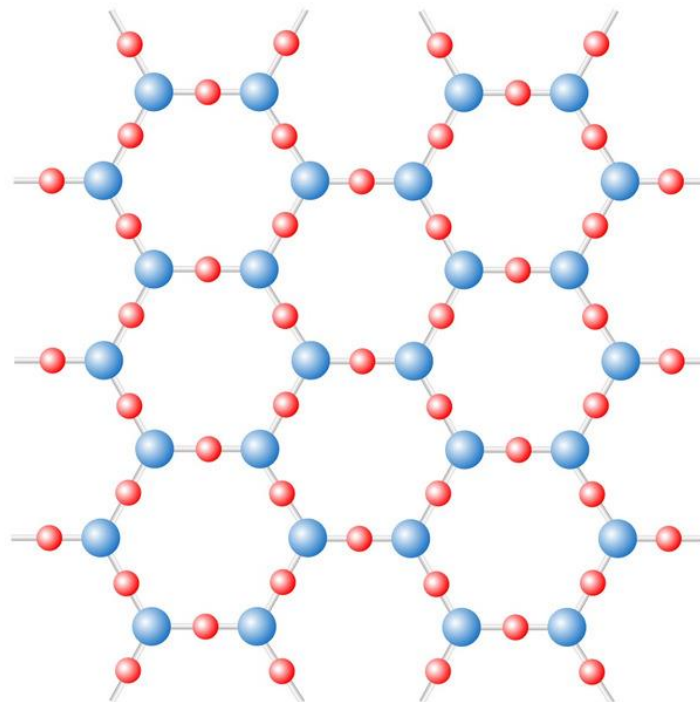
# Кристаллы и **не**кристаллы?



# Кристаллическое и аморфное состояние



Боратное стекло

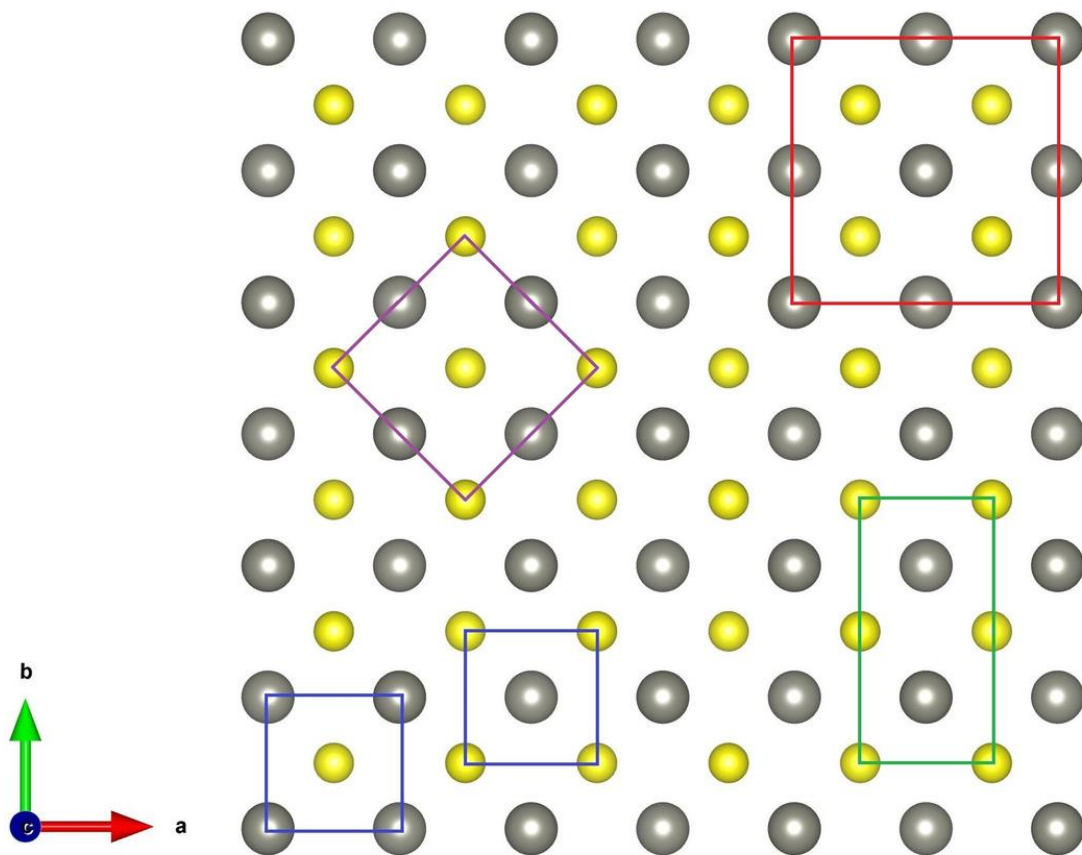


Оксид бора

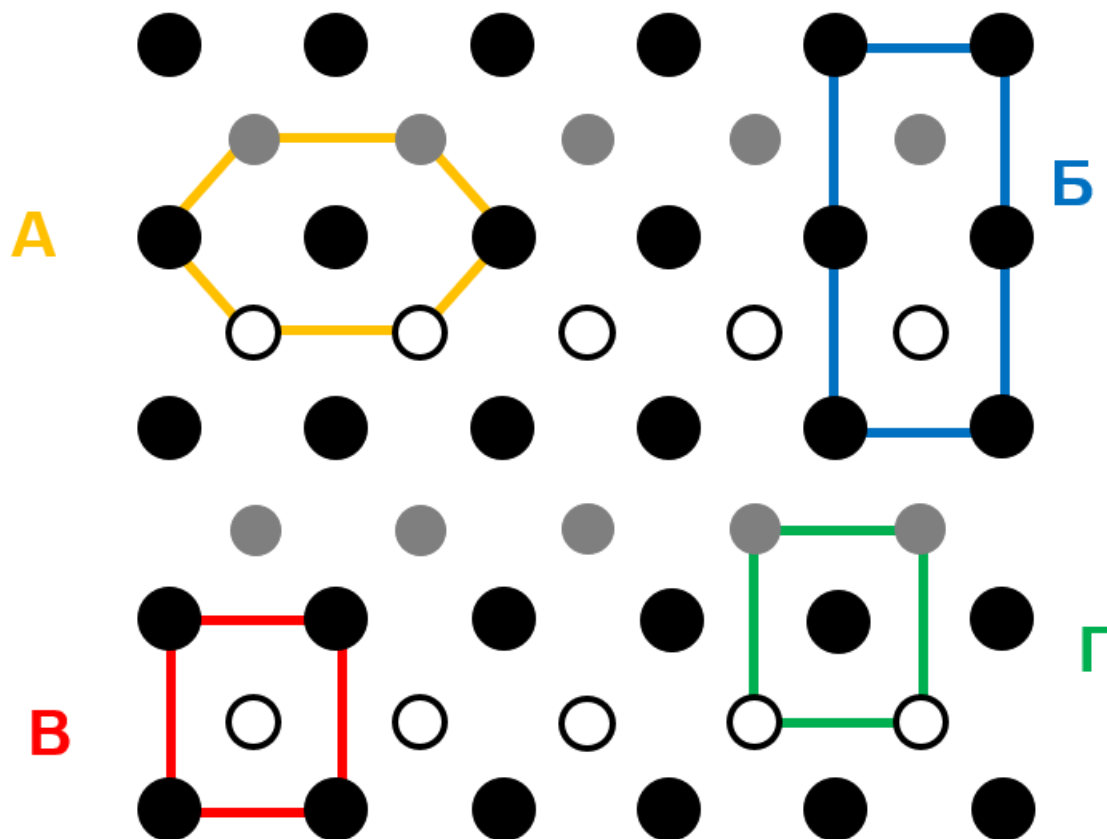


# Элементарная ячейка

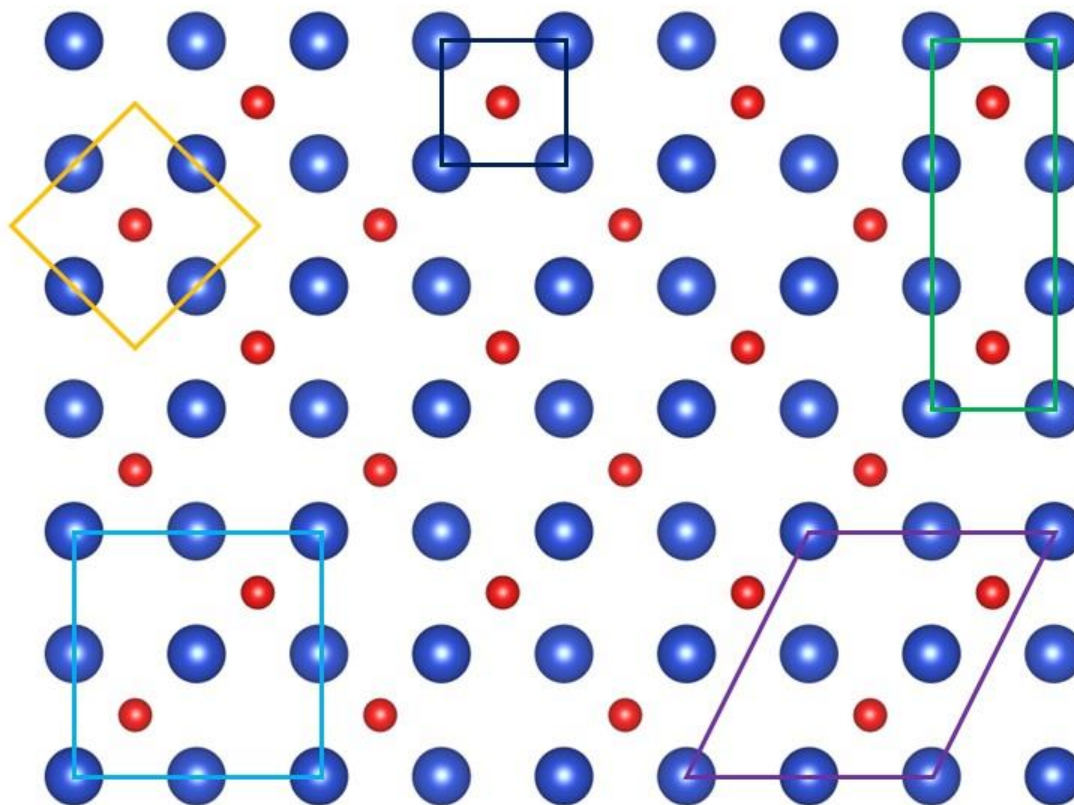
ЭЯ – это фрагмент кристаллической решетки, размножением которого путём параллельного переноса вдоль направлений ребер этого фрагмента можно получить всю структуру. ЭЯ имеет форму параллелограмма на плоскости или параллелепипеда в пространстве, обладающий **минимальным объемом** (площадью) и **максимальным количеством прямых углов**.



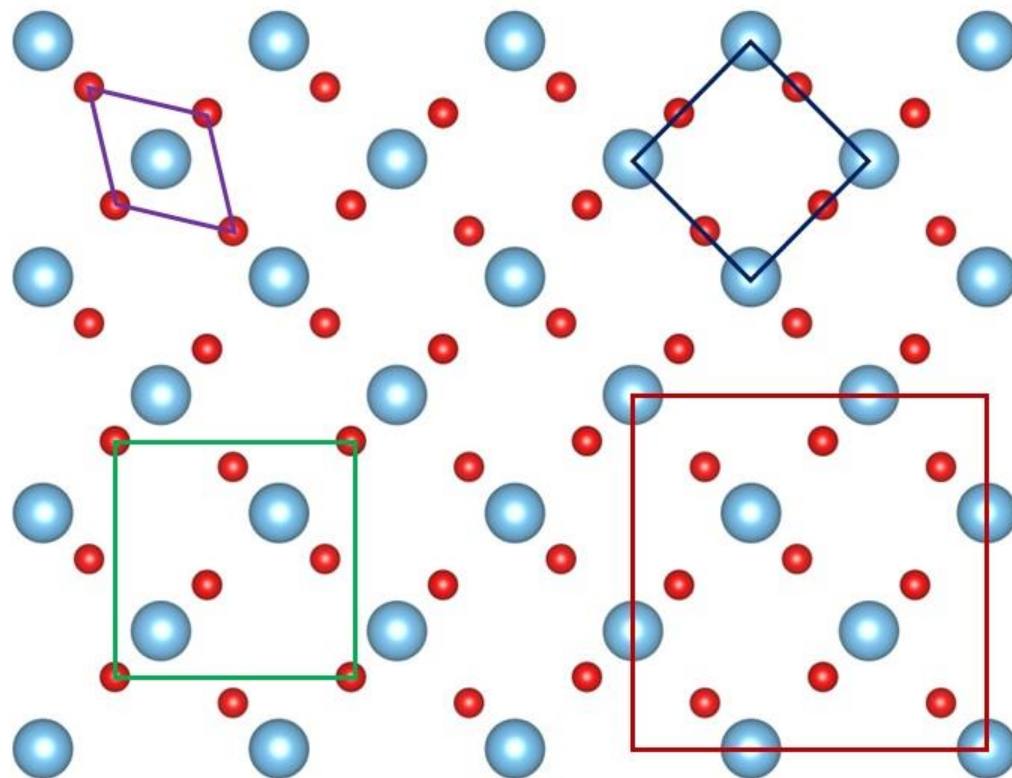
**Задание.** На приведённых фрагментах кристаллической структуры на плоскости выберите верный способ выбора элементарной ячейки.



**Задание.** На приведённых фрагментах кристаллической структуры на плоскости выберите верный способ выбора элементарной ячейки.

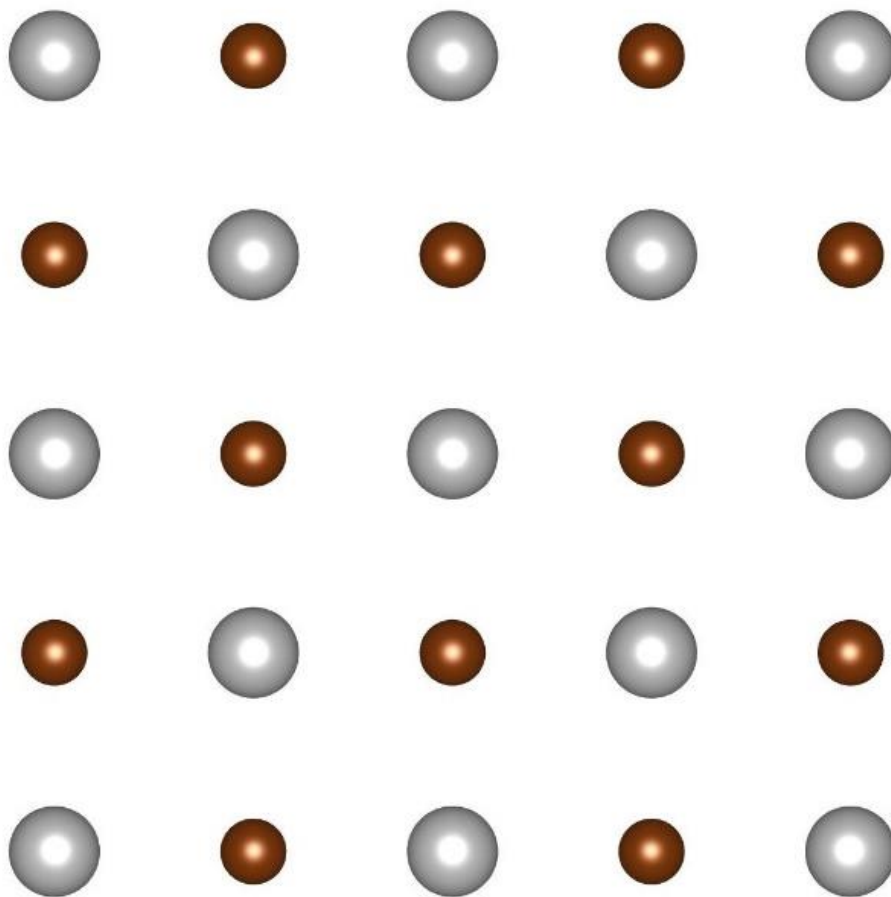


**Задание.** На приведённых фрагментах кристаллической структуры на плоскости выберите верный способ выбора элементарной ячейки.

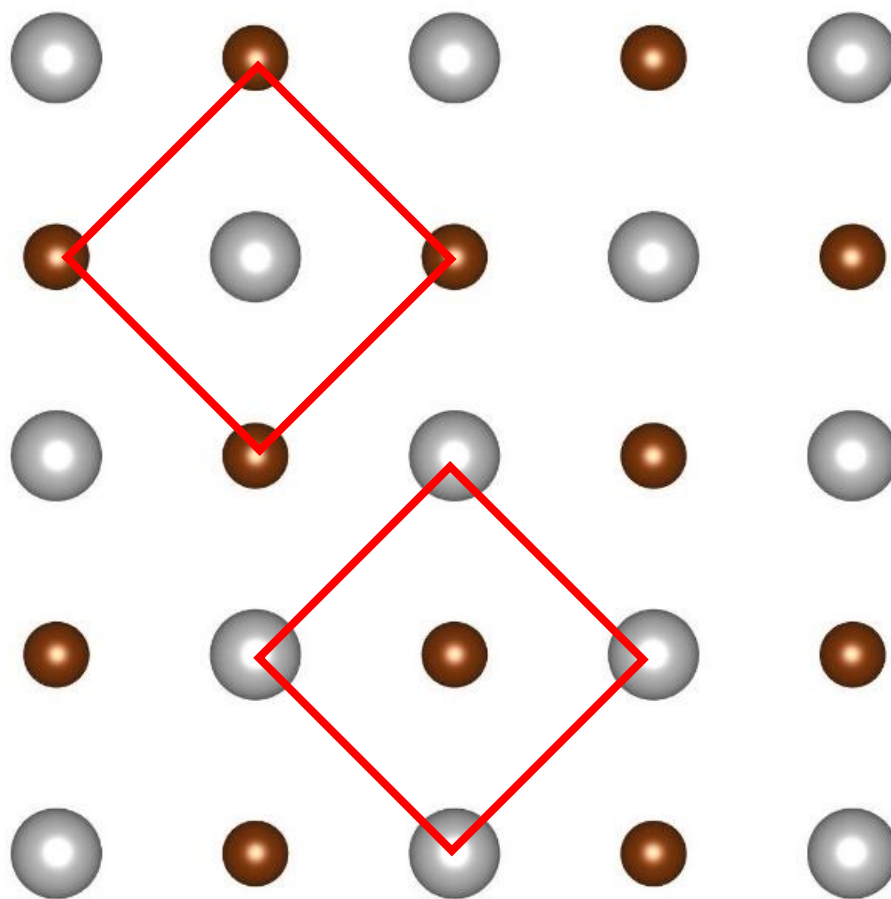




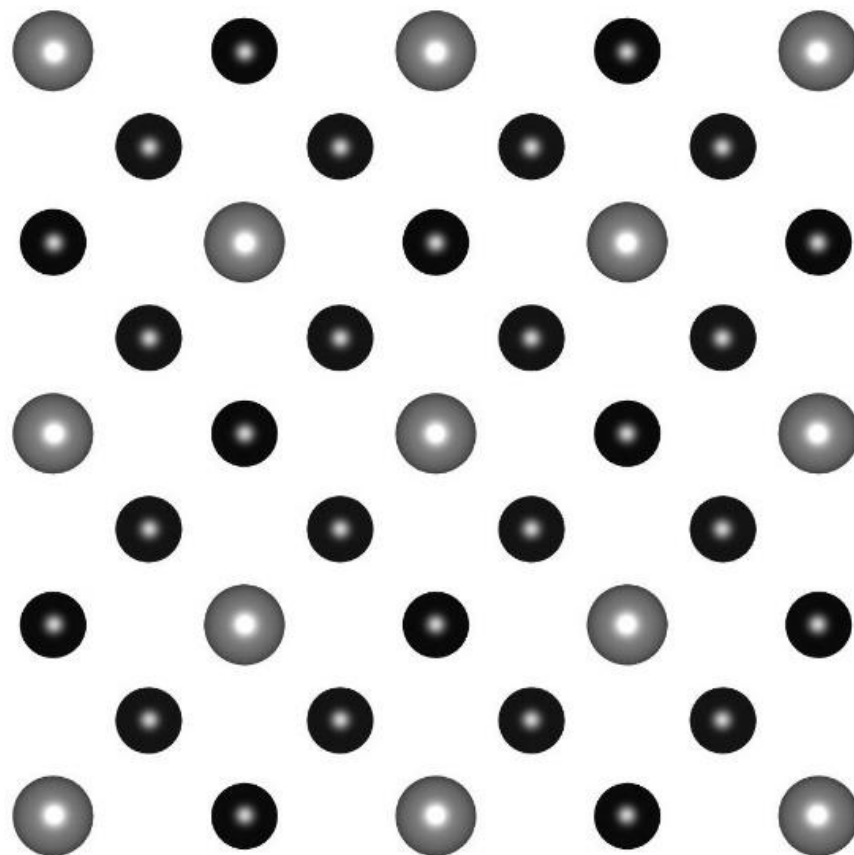
**Задание.** Среди приведенных на плоскости наборов атомов выберите элементарную ячейку.



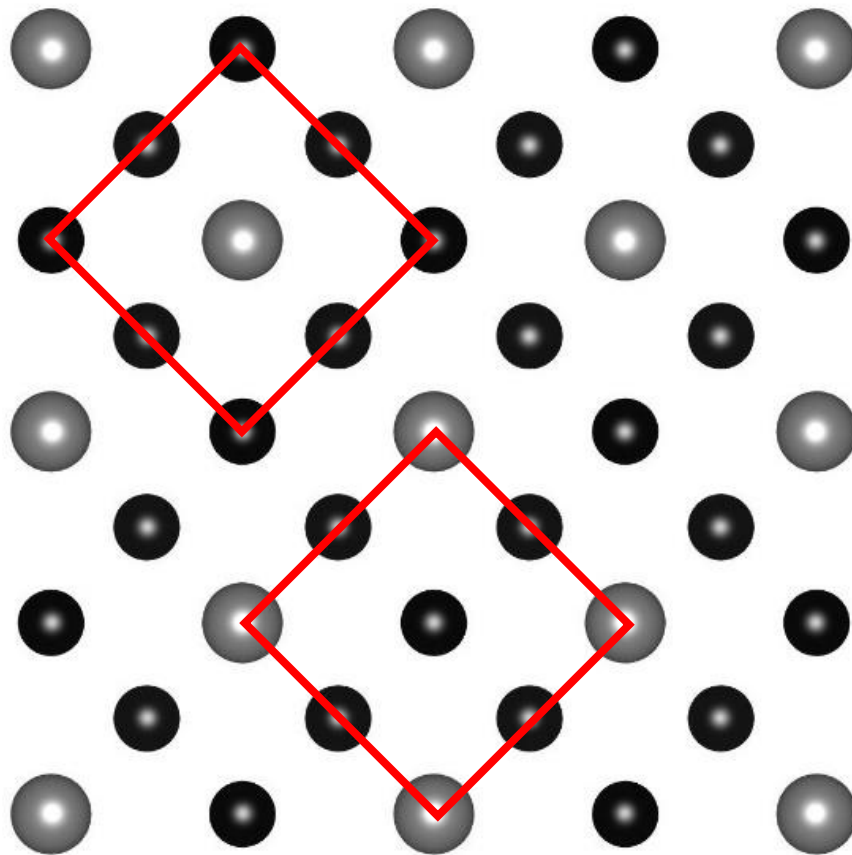
**Задание.** Среди приведенных на плоскости наборов атомов выберите элементарную ячейку.



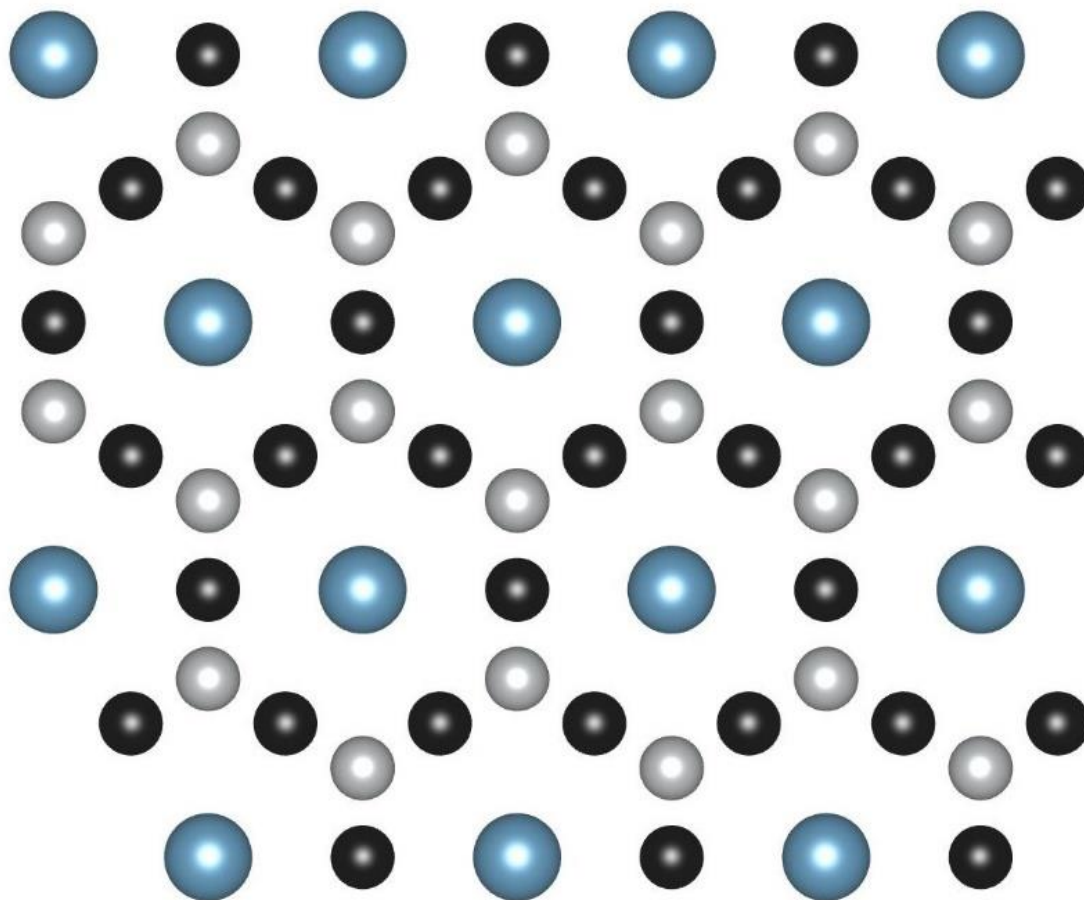
**Задание.** Среди приведенных на плоскости наборов атомов выберите элементарную ячейку.



**Задание.** Среди приведенных на плоскости наборов атомов выберите элементарную ячейку.

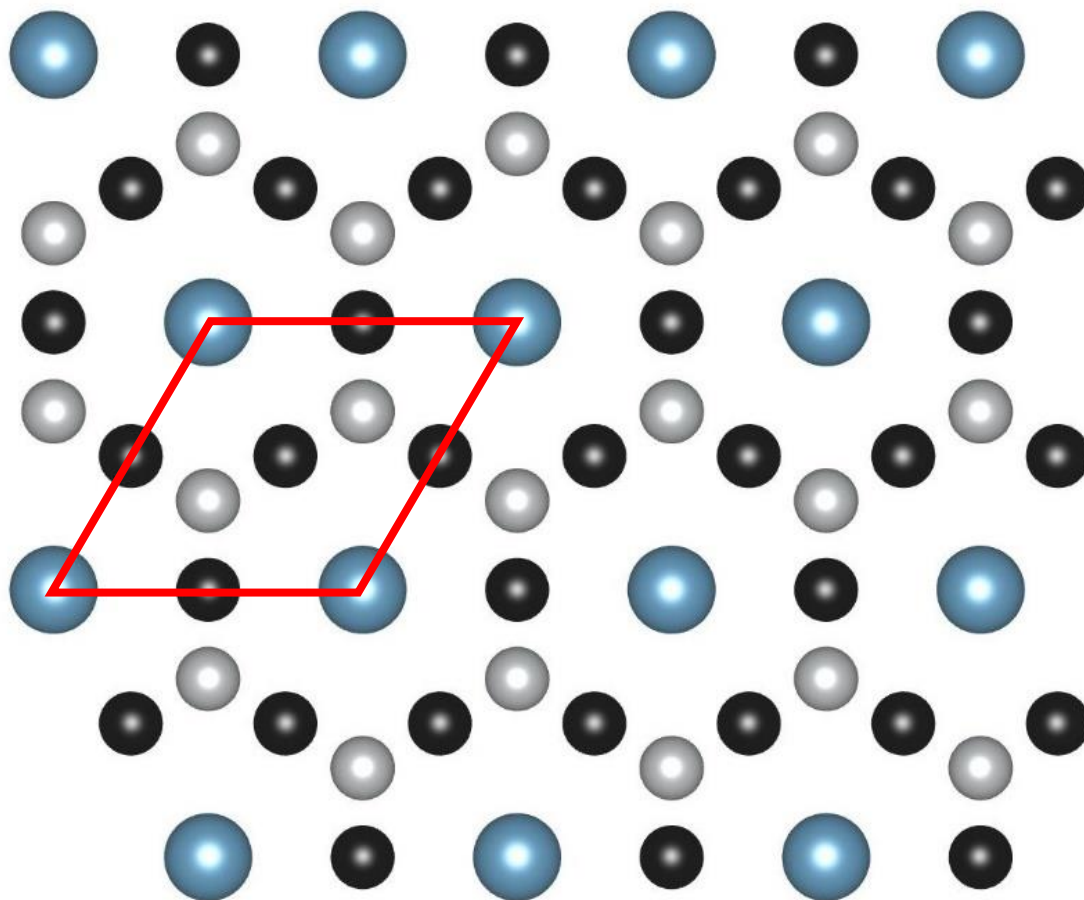


**Задание.** Среди приведенных на плоскости наборов атомов выберите элементарную ячейку.

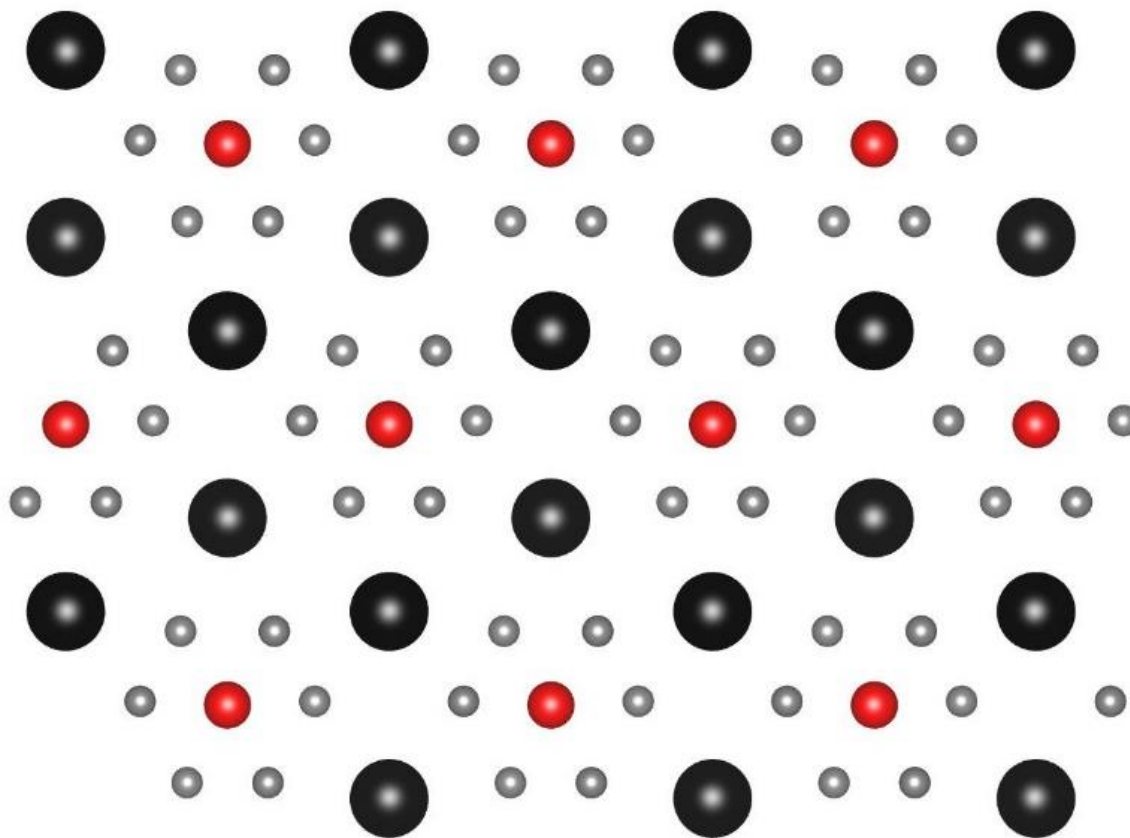




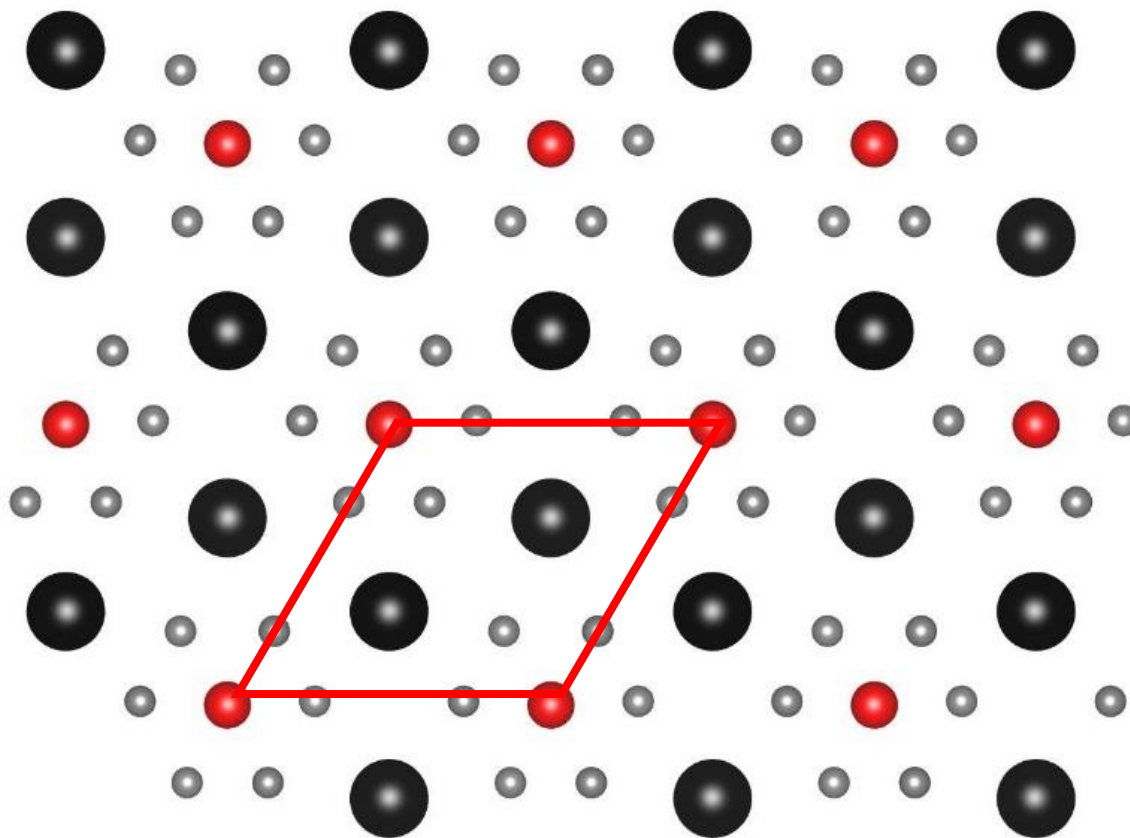
**Задание.** Среди приведенных на плоскости наборов атомов выберите элементарную ячейку.



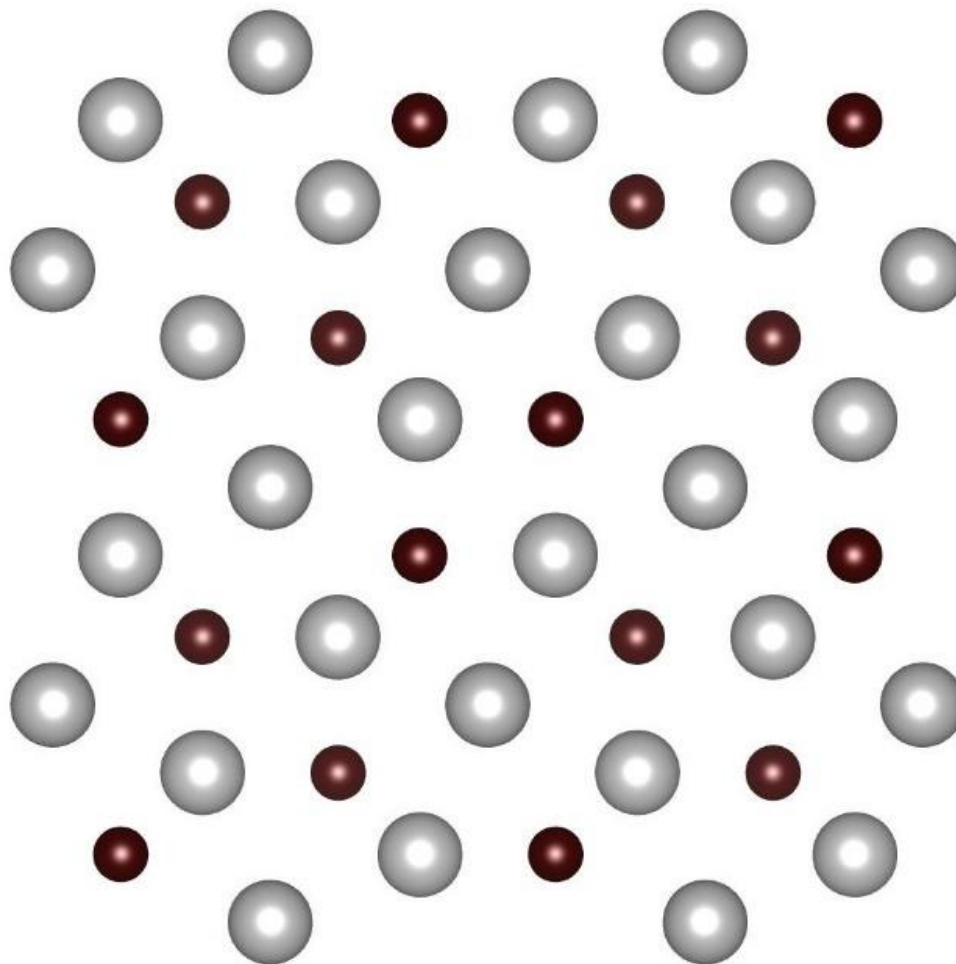
**Задание.** Среди приведенных на плоскости наборов атомов выберите элементарную ячейку.



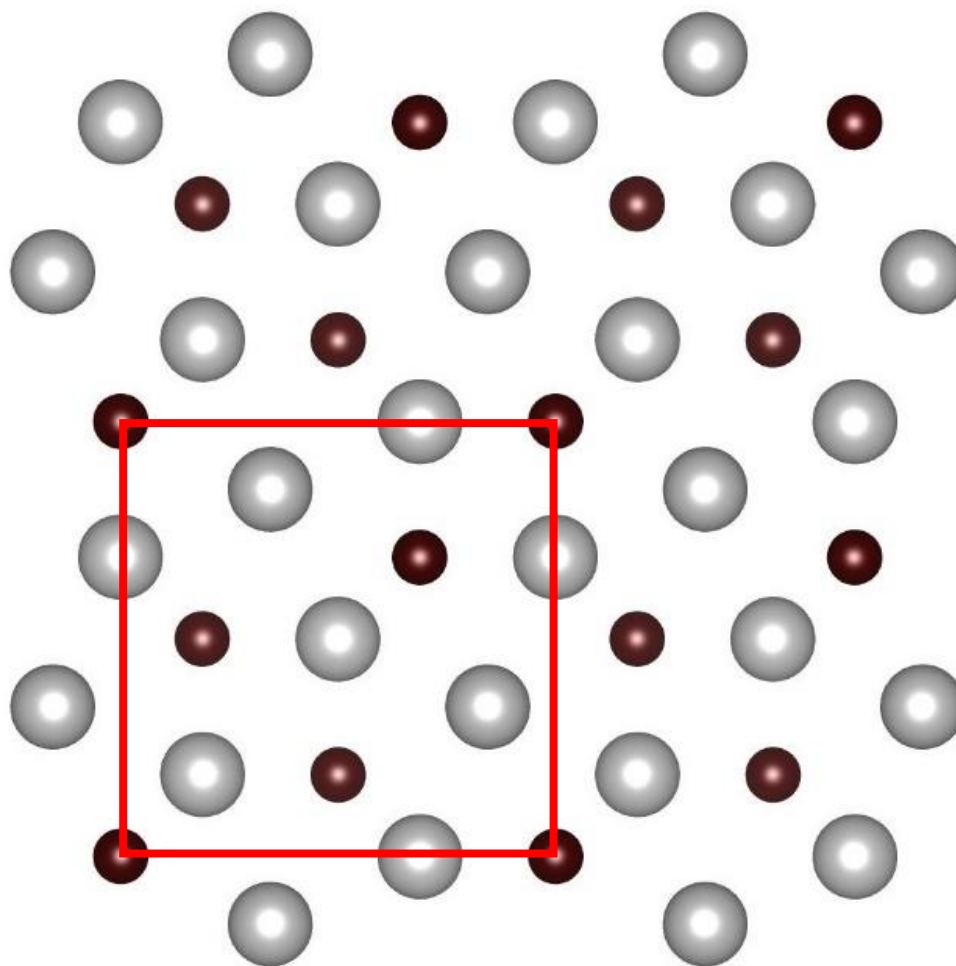
**Задание.** Среди приведенных на плоскости наборов атомов выберите элементарную ячейку.



**Задание.** Среди приведенных на плоскости наборов атомов выберите элементарную ячейку.

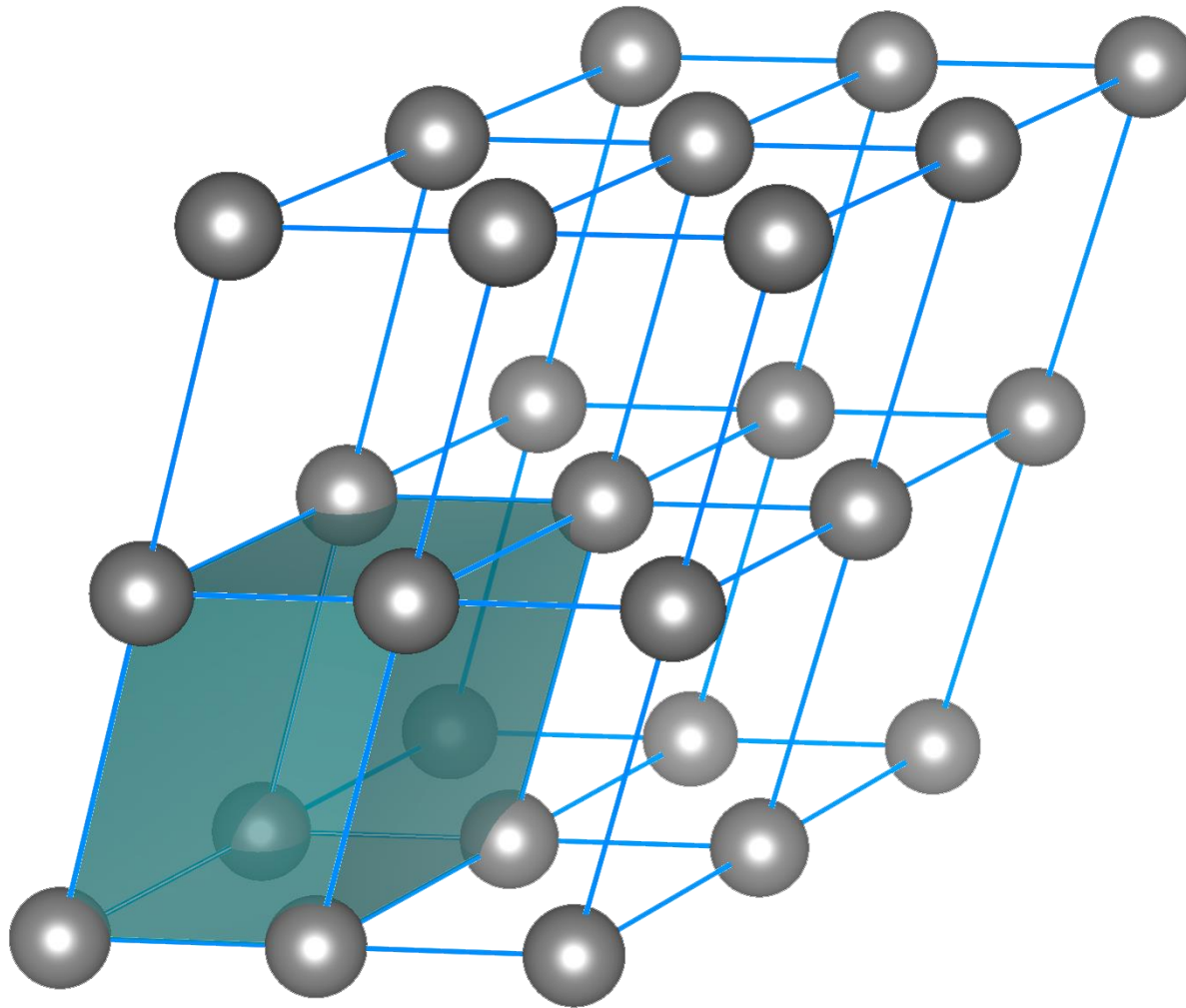


**Задание.** Среди приведенных на плоскости наборов атомов выберите элементарную ячейку.



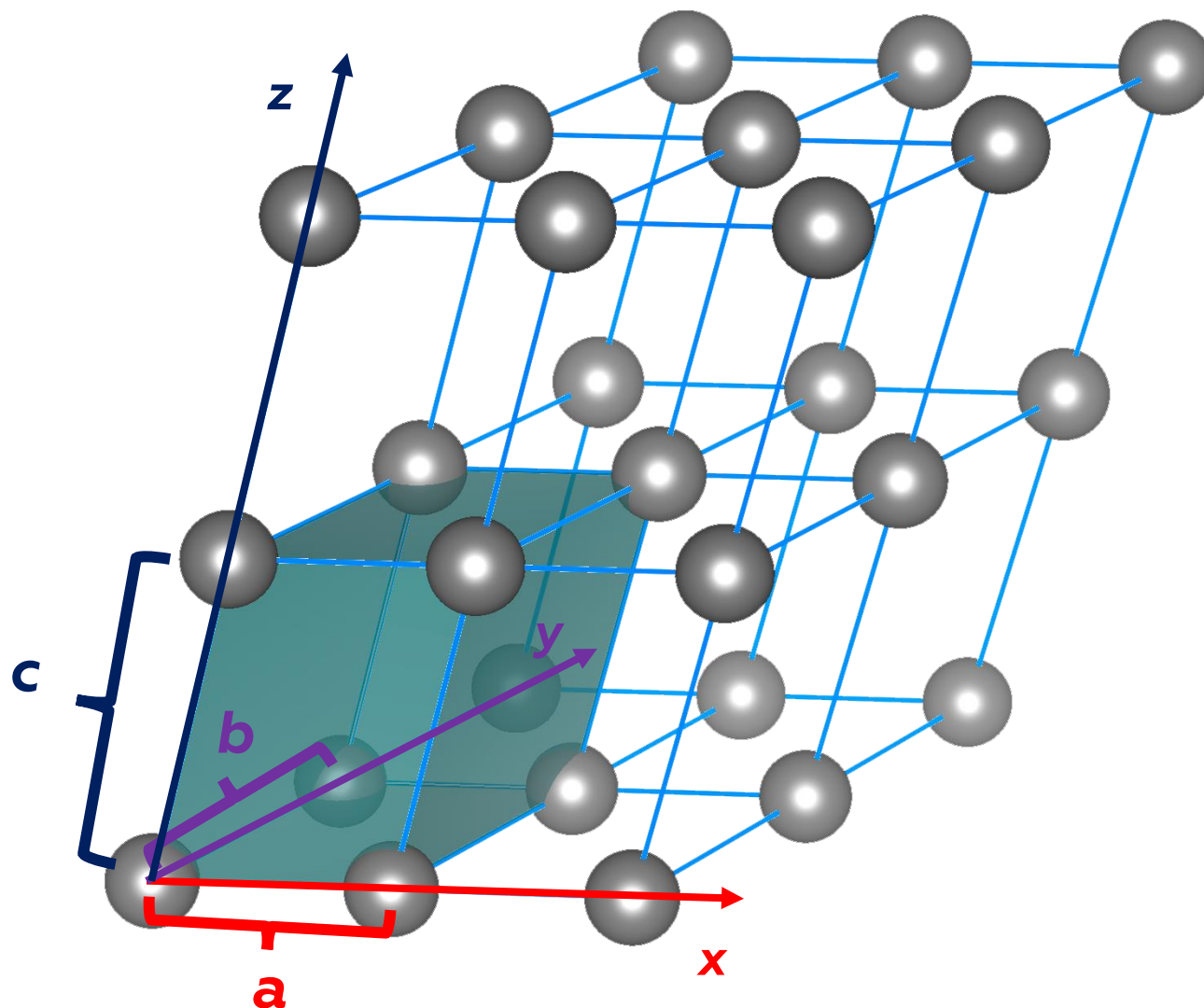


# Элементарная ячейка



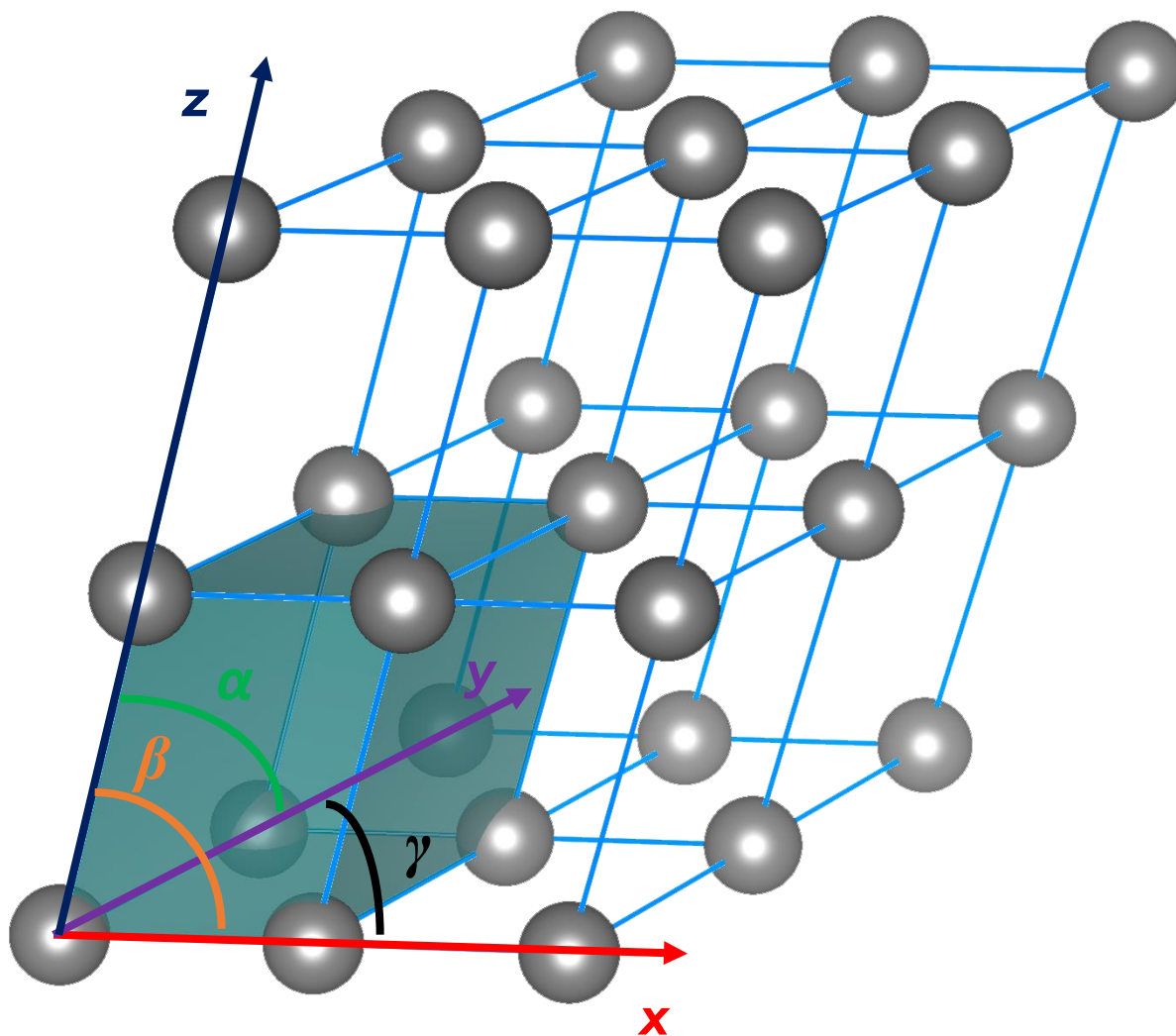
# Параметры элементарной ячейки

$a$ ,  $b$  и  $c$  – длины ребер параллелограмма

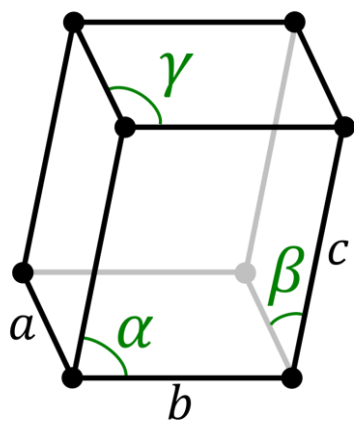


# Параметры элементарной ячейки

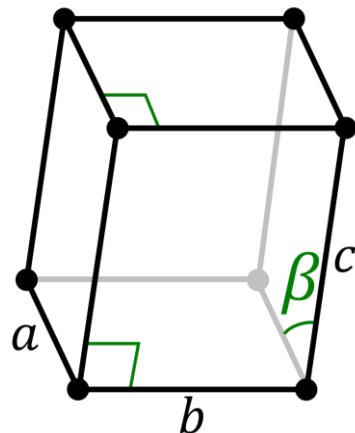
$\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – углы между ребрами параллелограмма



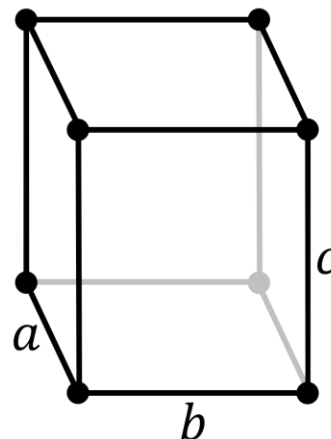
# Какие бывают элементарные ячейки?



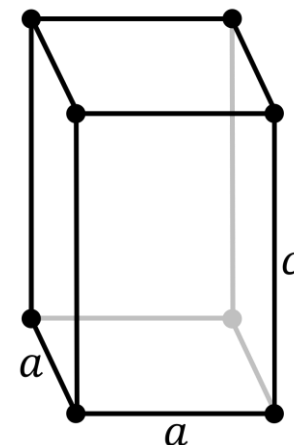
Триклинная



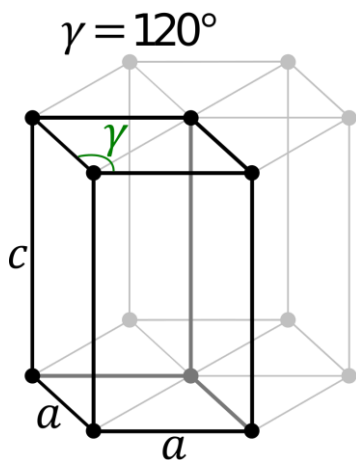
Моноклинная



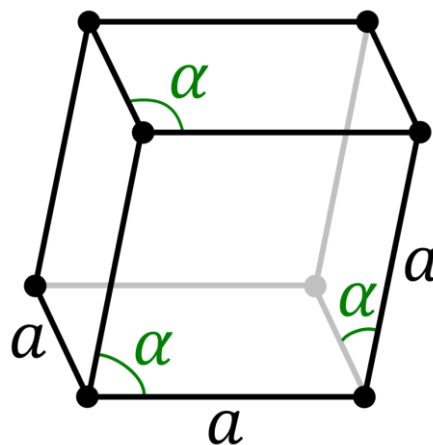
Ромбическая



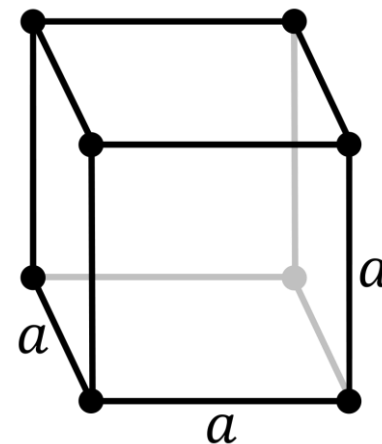
Тетрагональная



Гексагональная

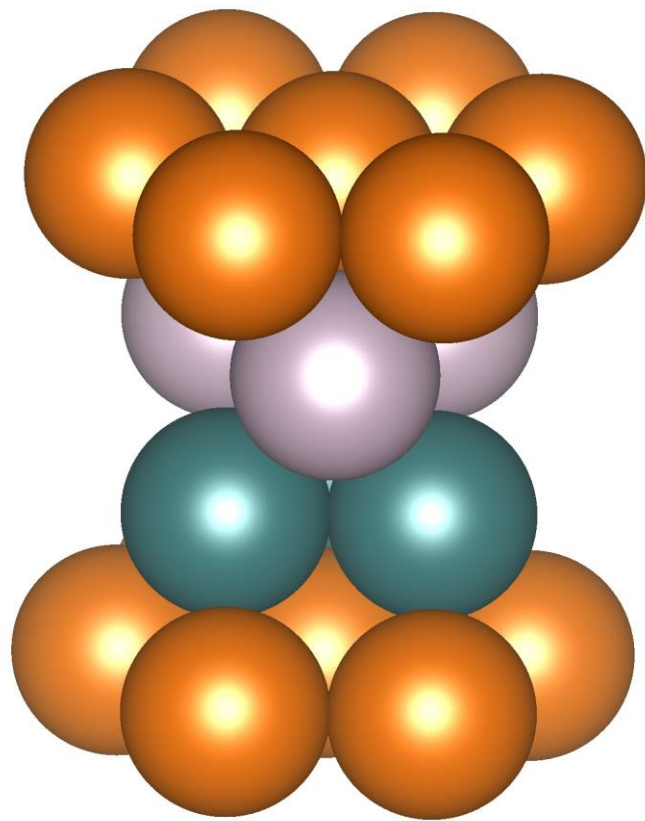


Тригональная



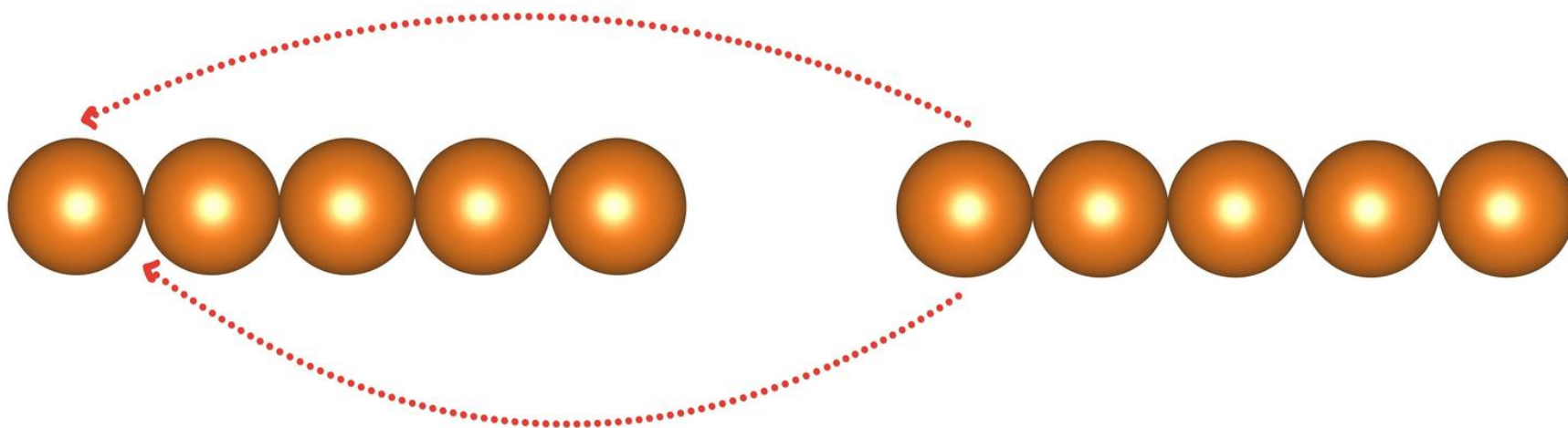
Кубическая

# Концепция **шаровых** упаковок и кладок

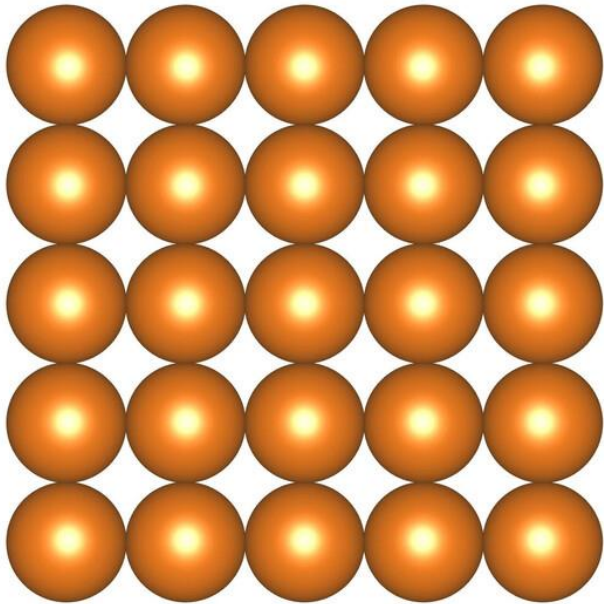




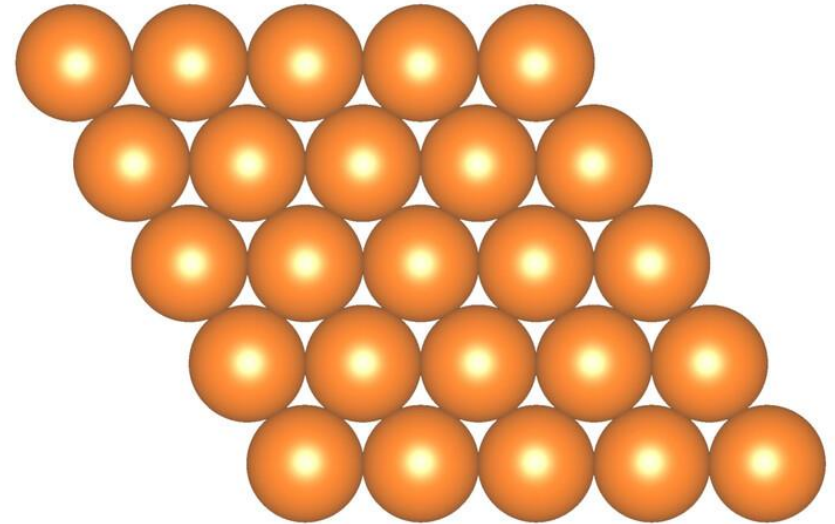
# Шаровые упаковки



# Шаровые упаковки

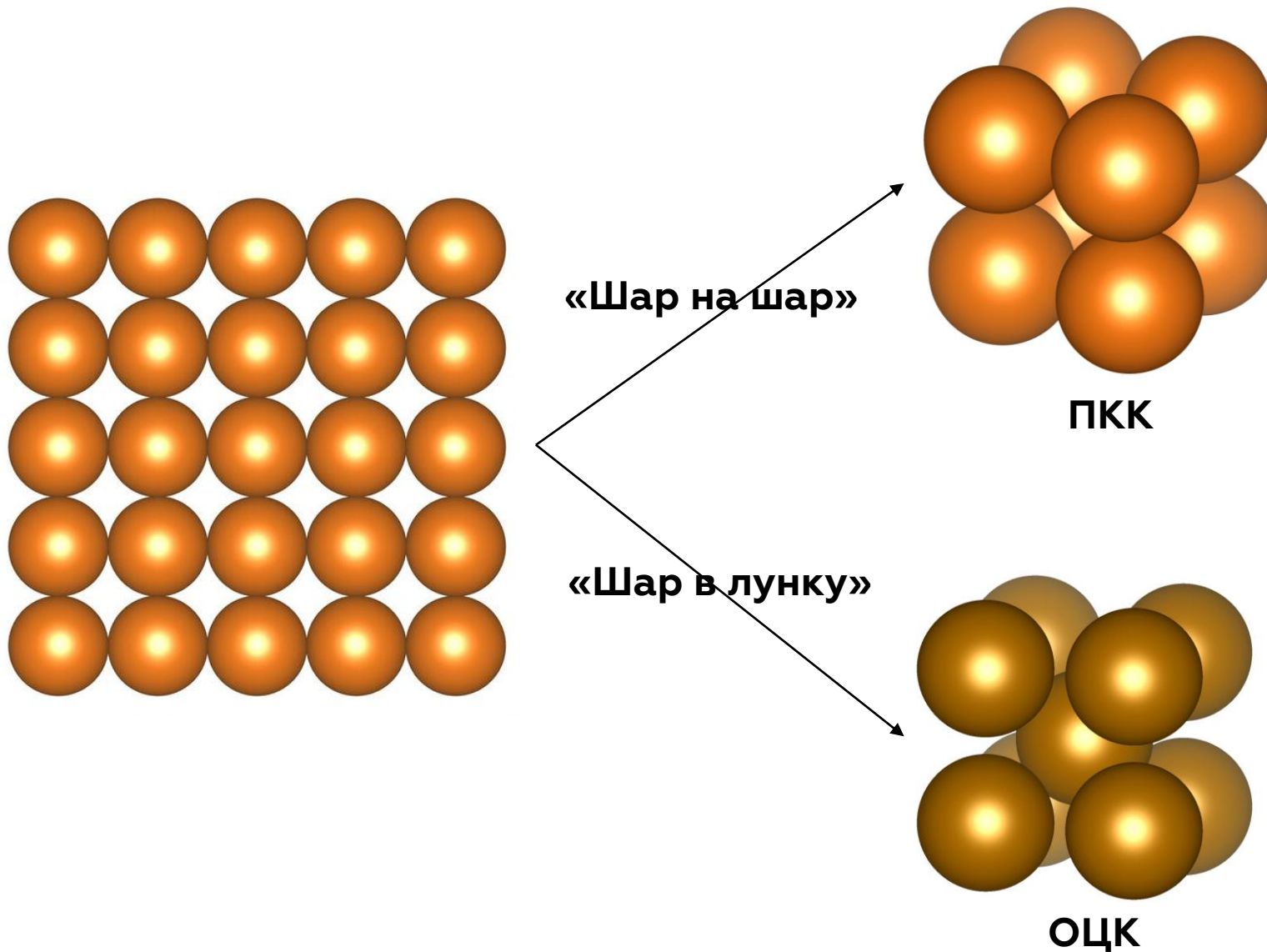


плотный (тетрагональный)  
слой

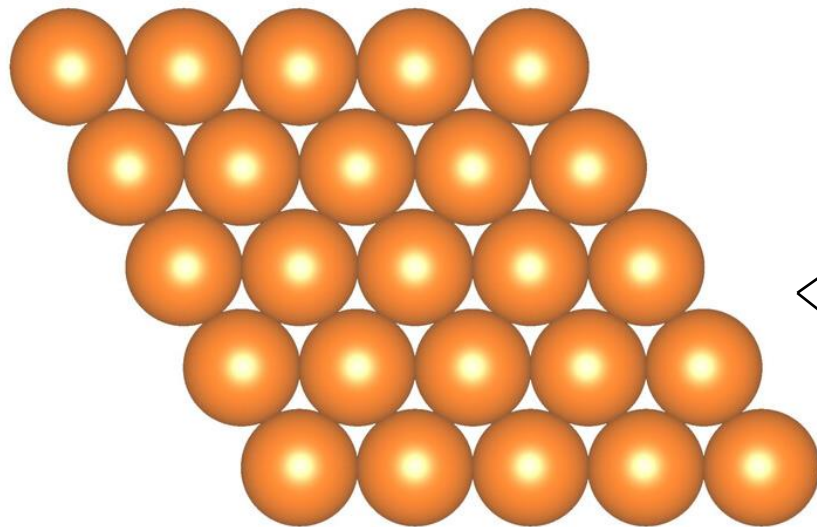


плотнейший (гексагональный)  
слой

# Шаровые упаковки



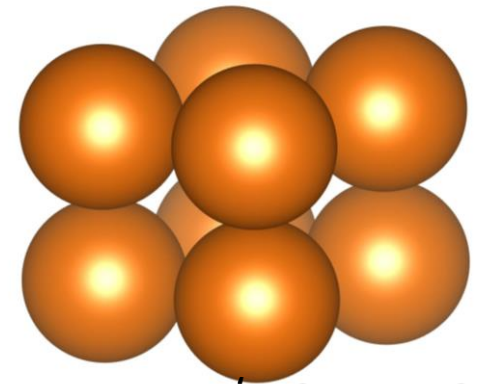
# Шаровые упаковки



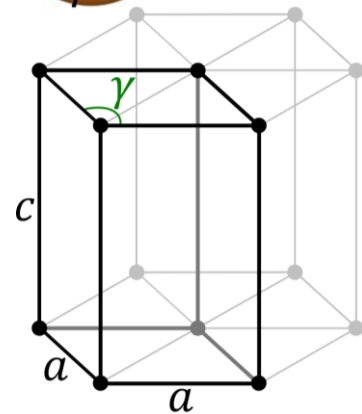
плотнейший (гексагональный)  
слой

«Шар на шар»

«Шар в лунку»



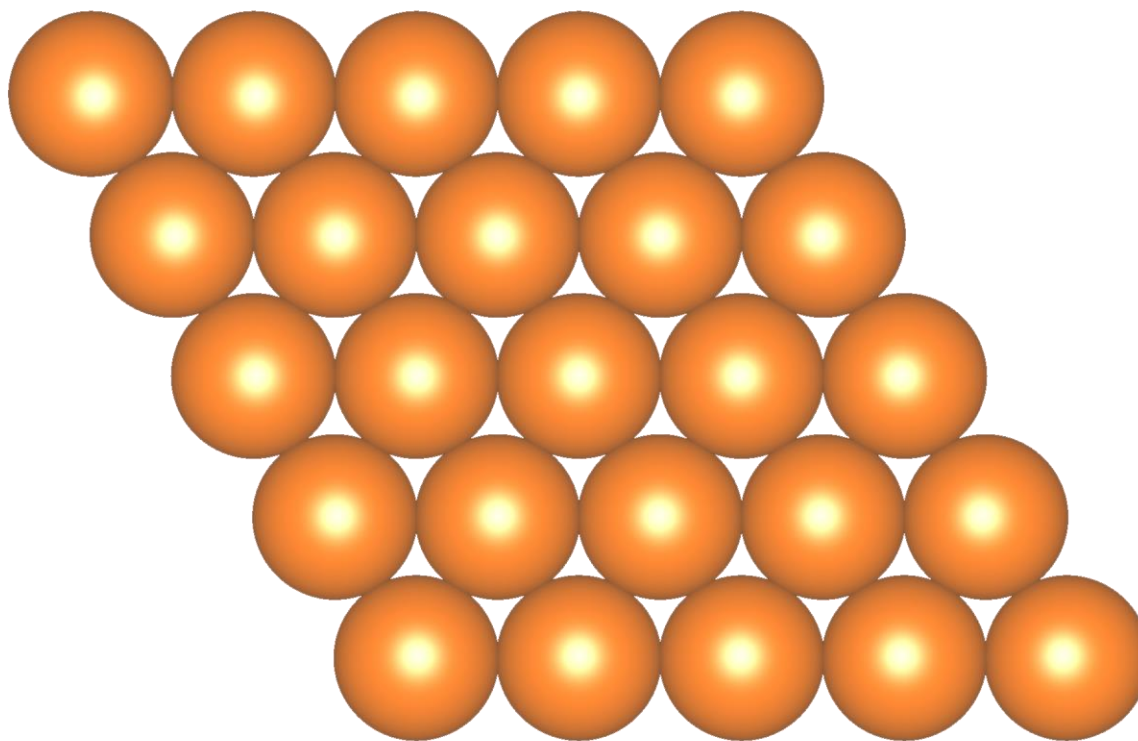
ПГК



ПШУ

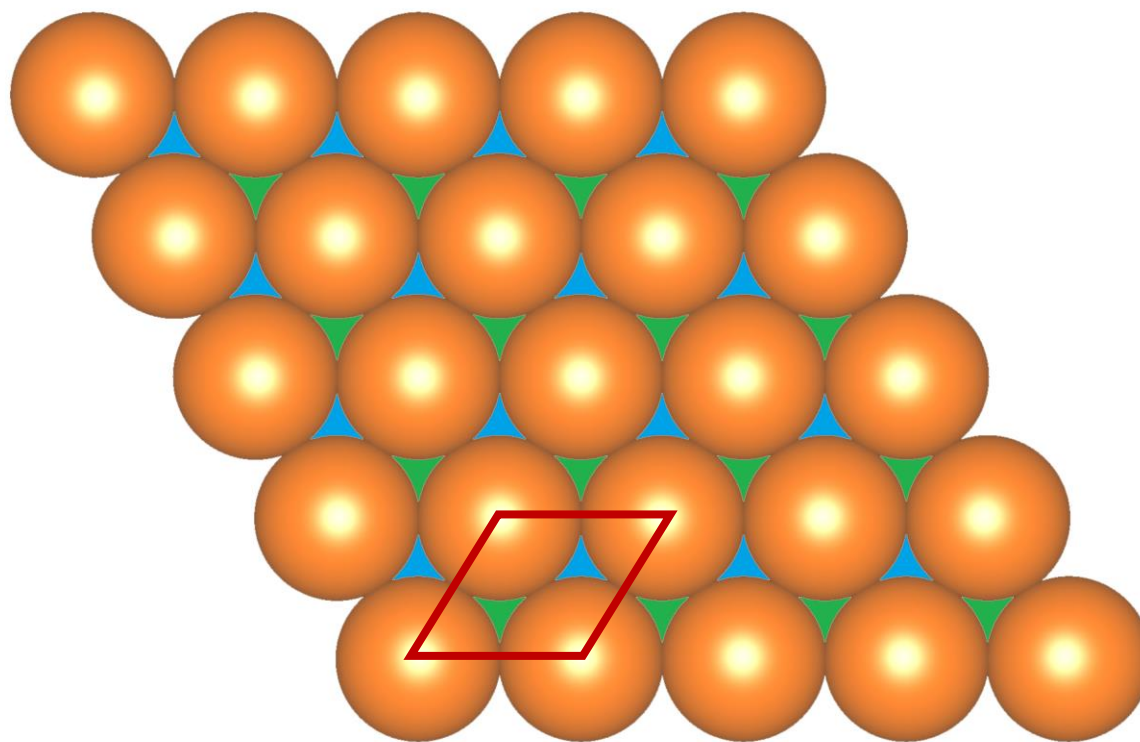
# Плотнейшие шаровые упаковки

**Задание.** Каково отношение числа пустот в одном плотнейшем слое к числу шаров?



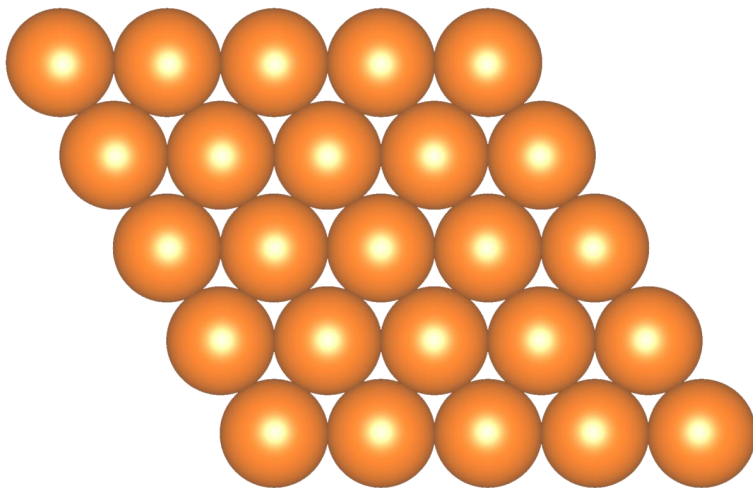
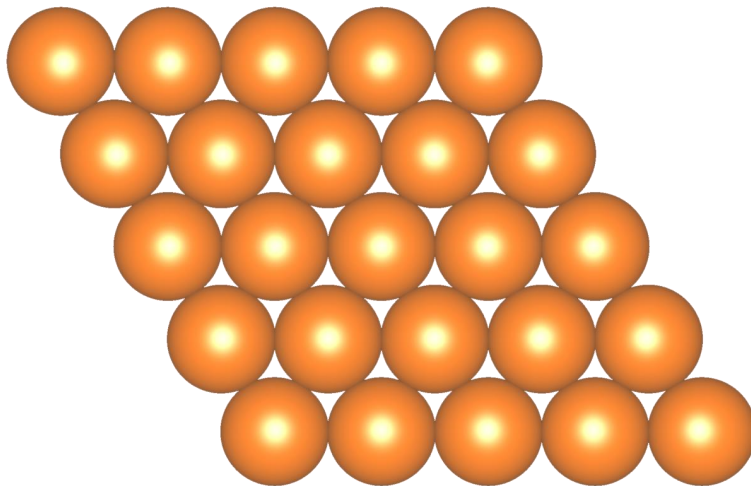


# Плотнейшие шаровые упаковки

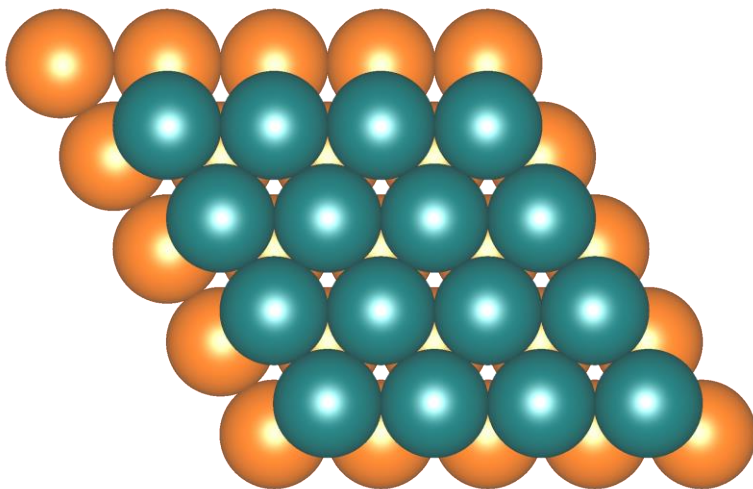
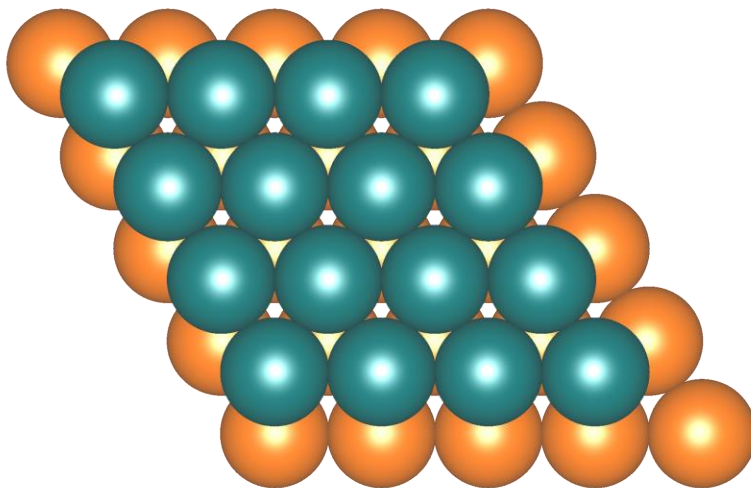


# Плотнейшие шаровые упаковки

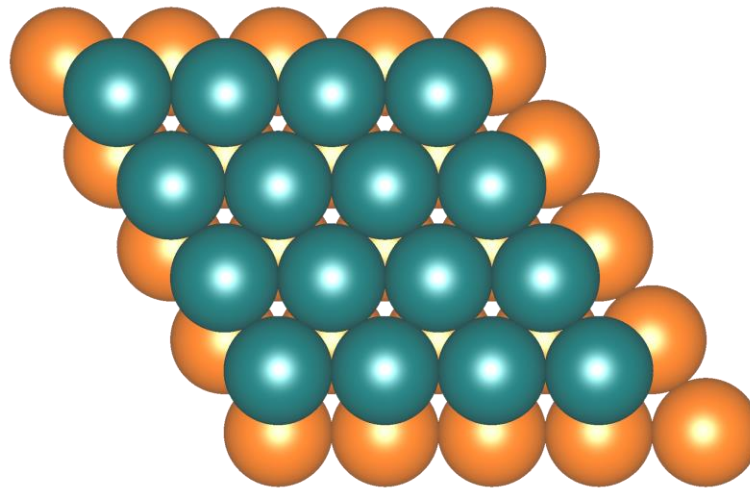
Сколько существует вариантов расположения второго слоя над первым слоем плотнейшим способом ?



# Плотнейшие шаровые упаковки

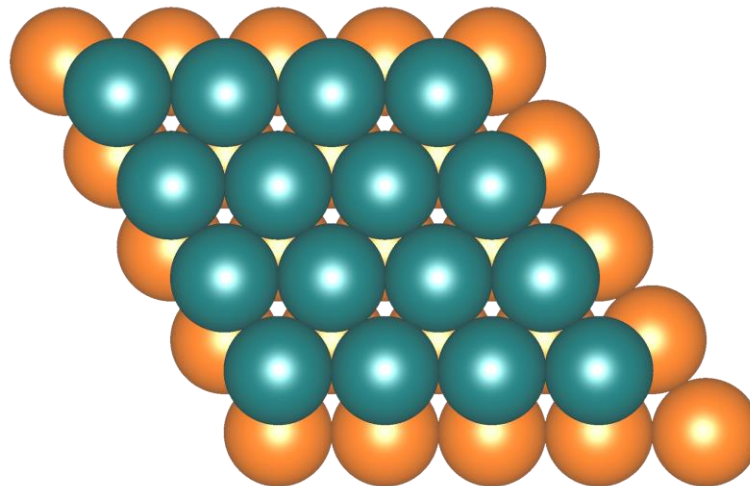


# Плотнейшие шаровые упаковки

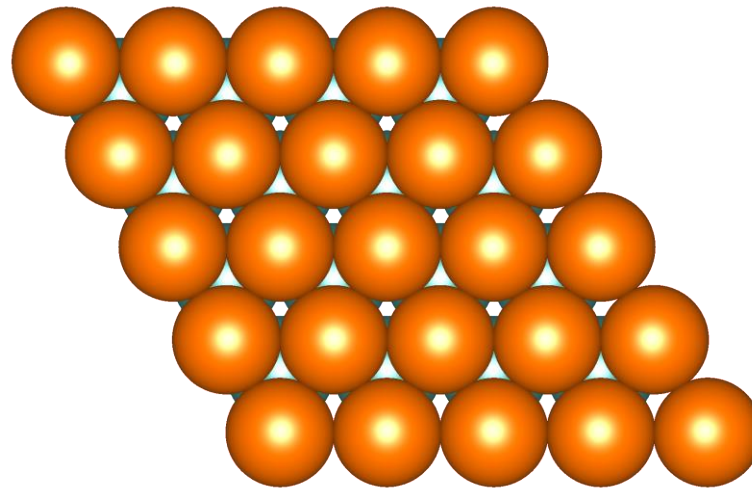


A

B



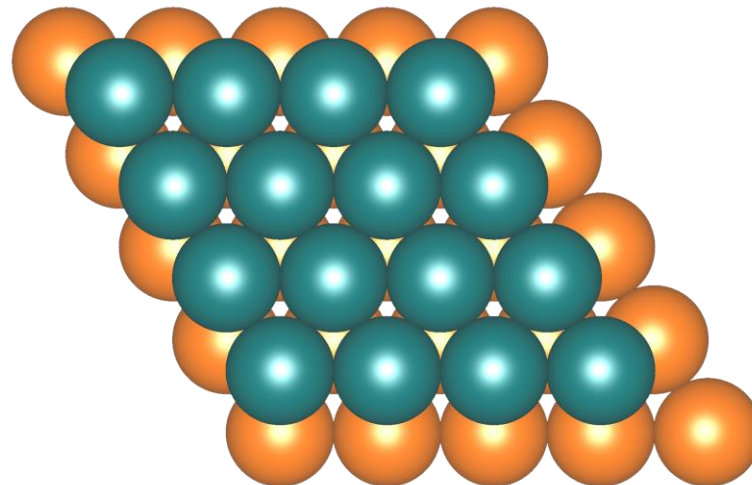
# Плотнейшие шаровые упаковки



A

B

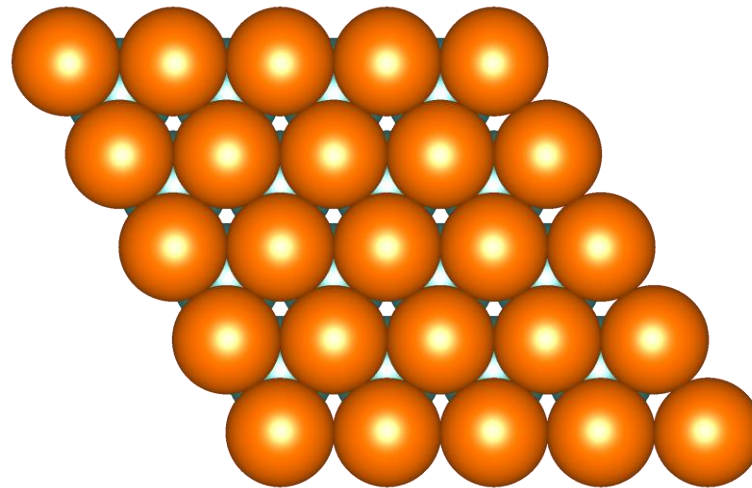
ABABAB...



A

B

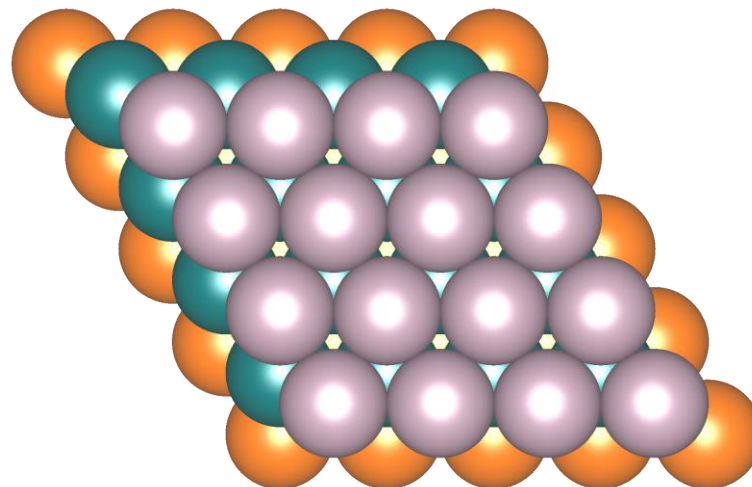
# Плотнейшие шаровые упаковки



A

B

ABABAB...



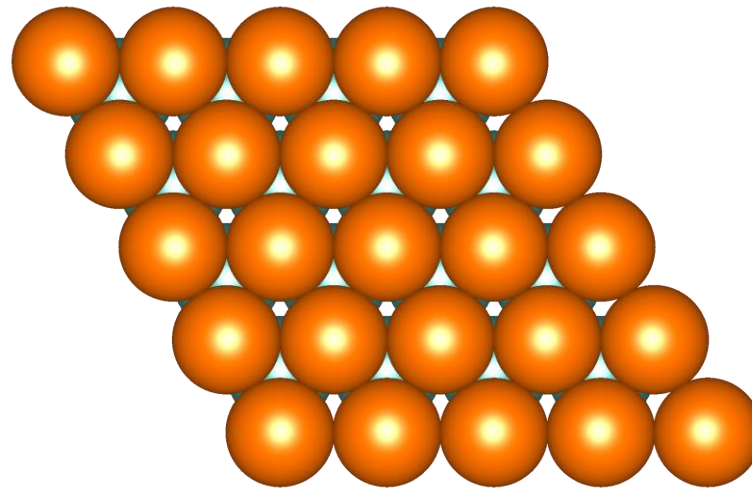
A

B

C



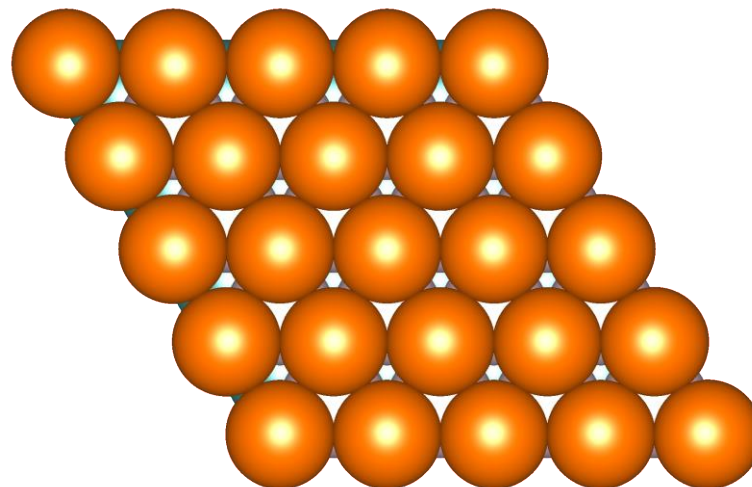
# Плотнейшие шаровые упаковки



A

B

ABABAB...



A

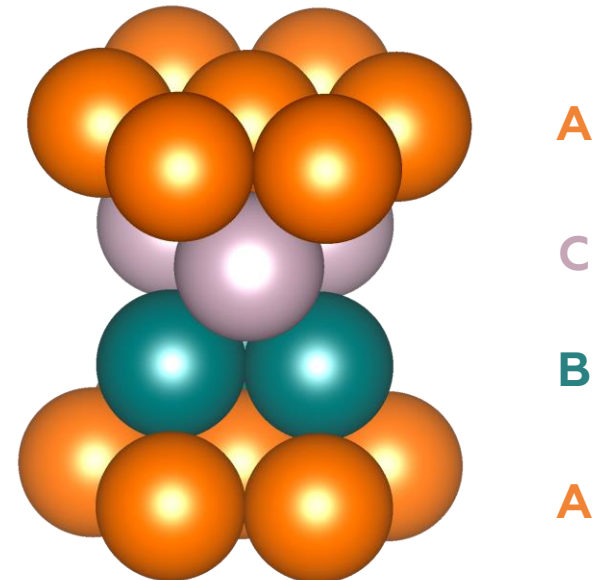
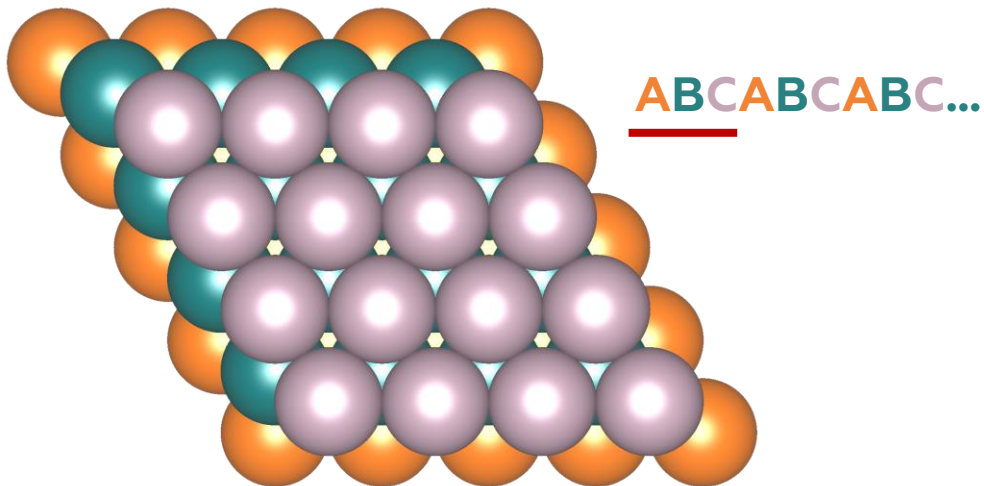
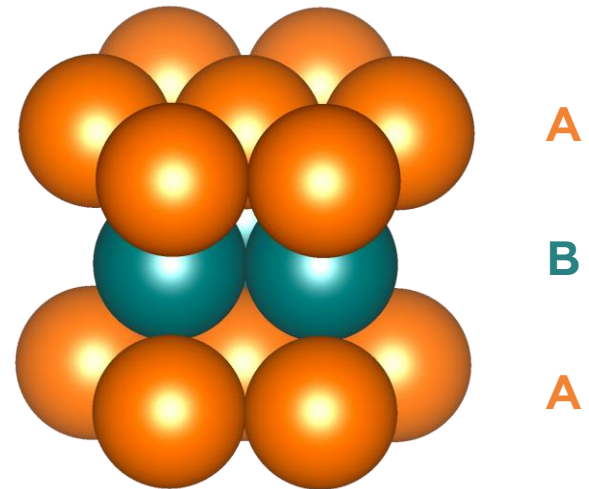
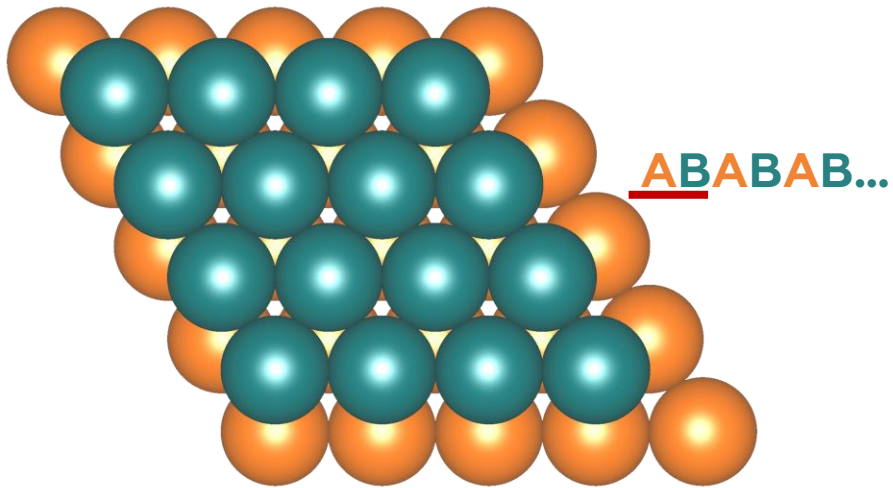
B

C

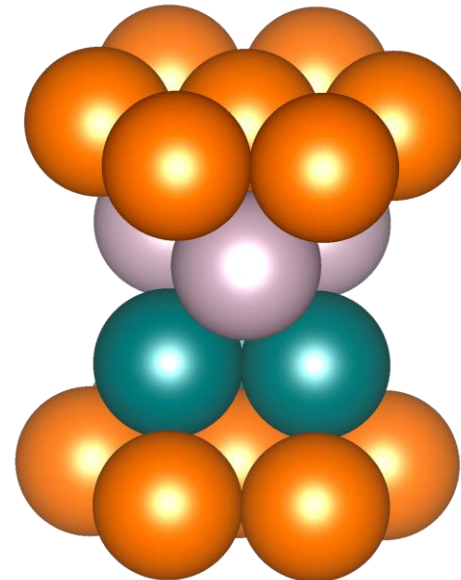
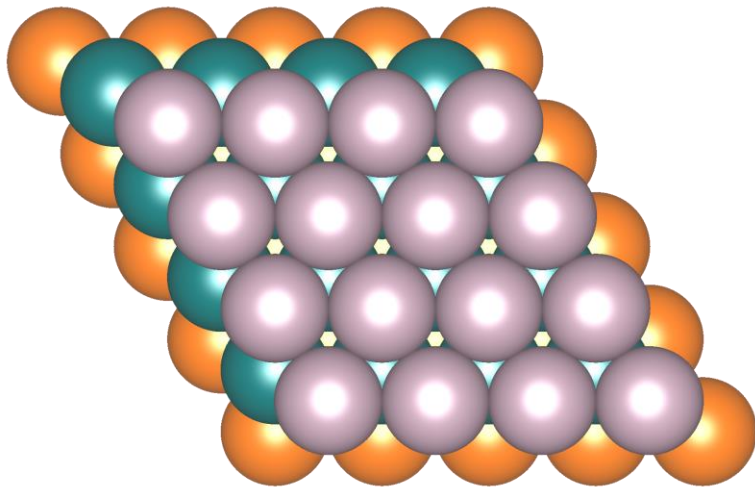
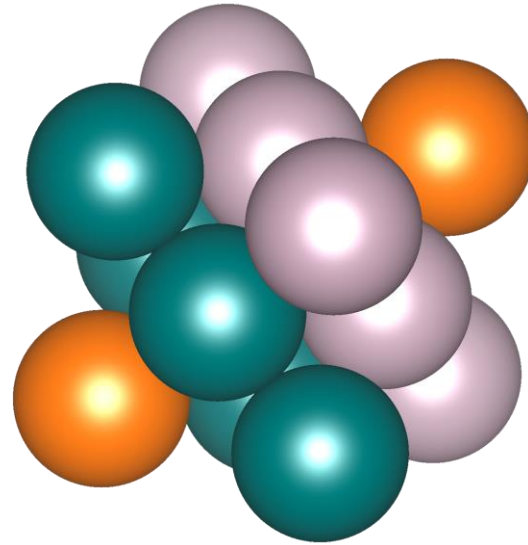
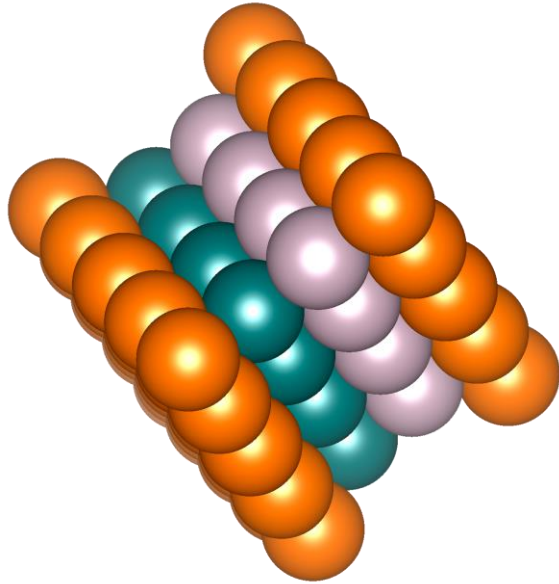
ABCABCABC...



# Плотнейшие шаровые упаковки



# Плотнейшие шаровые упаковки



# Плотнейшие шаровые упаковки

А бывает ли ПШУ большей слойности?

A B A C A B A C ...

4-х слойная ПШУ

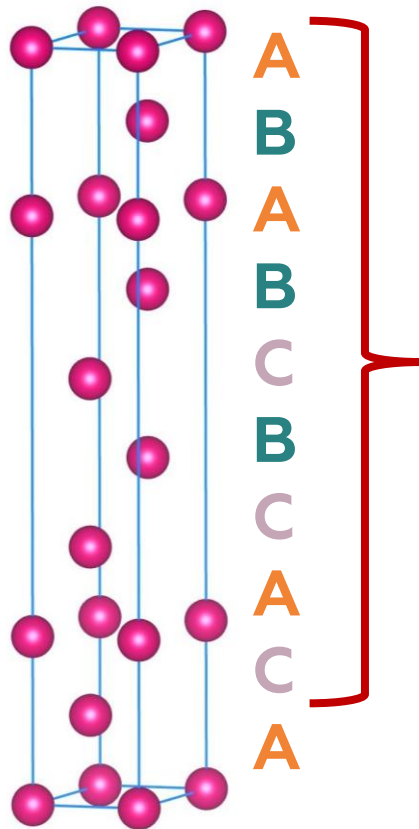
A B C B A B C B ...

4-х слойная ПШУ

A B C B C A B C B C ...

5-и слойная ПШУ

# Плотнейшие шаровые упаковки



Sm – 9-ти слойная ПШУ

## Задание

Какие из приведенных схем повторения плотнейших слоев (наложения плотнейших слоев друг на друга) не соответствуют плотнейшим шаровым упаковкам?

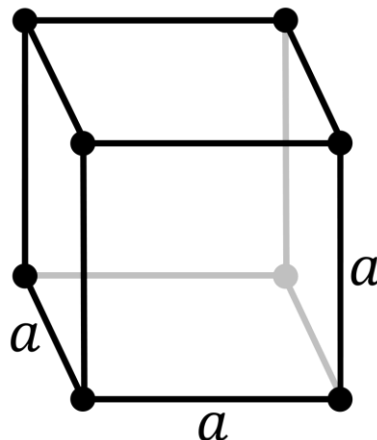
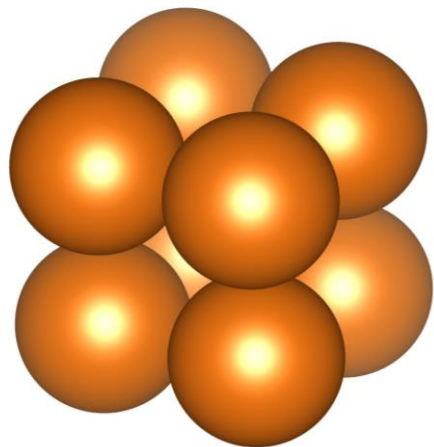
А) ABCABC... Б) ABACABAC... В) ABBAВВА...

Г) ABCBCABCBC... Д) ABCCBABCССВ...

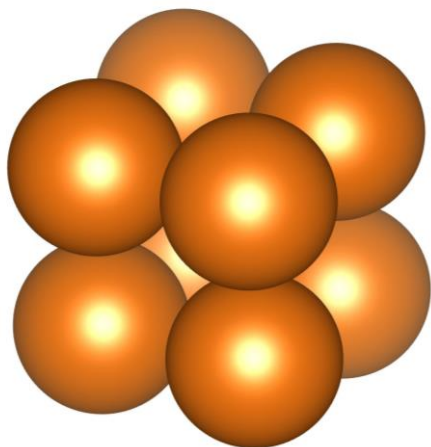
Для остальных случаев определите слойность ПШУ.

# Связь параметров ЭЯ с размером шаров

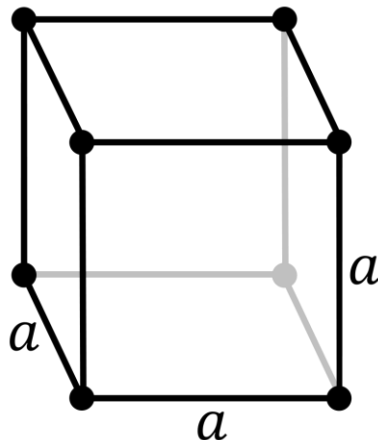
**Задание.** Полоний кристаллизуется в простой кубической кладке. Определите металлический радиус полония, если параметр его элементарной ячейки равен  $3.36 \text{ \AA}$ .



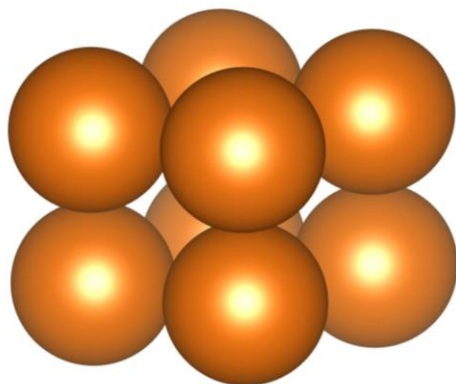
# Связь параметров ЭЯ с размером шаров



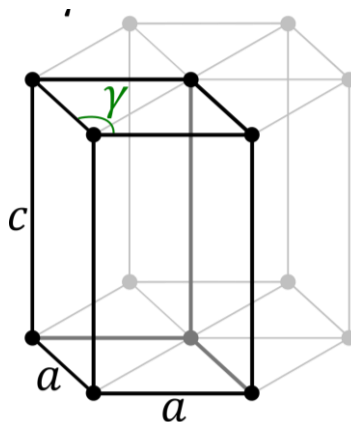
ПКК



$$a = 2R$$



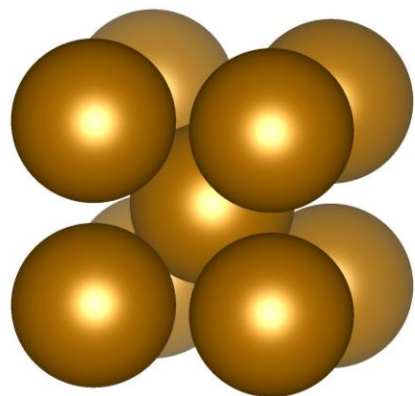
ГГК



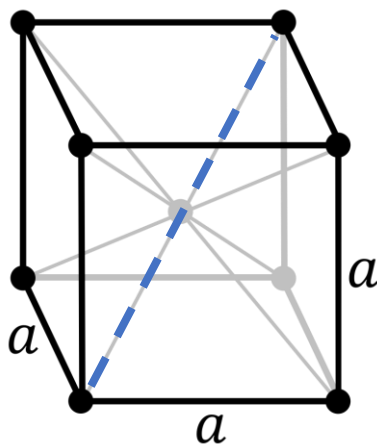
$$a = c = 2R$$



# Связь параметров ЭЯ с размером шаров

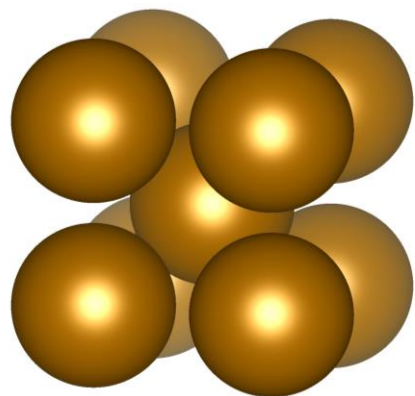


ОЦК

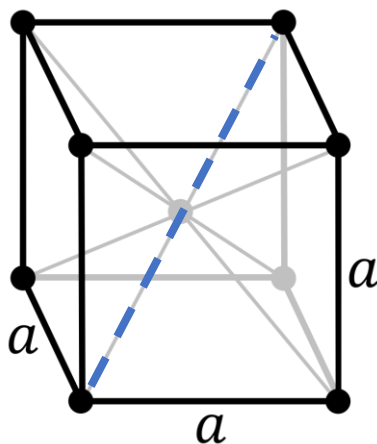


Касание шаров происходит  
вдоль диагонали куба!

# Связь параметров ЭЯ с размером шаров



ОЦК



Касание шаров происходит  
вдоль **объемной** диагонали  
куба!

$$a\sqrt{3} = 4R$$

$$a = \frac{4\sqrt{3}}{3} R$$

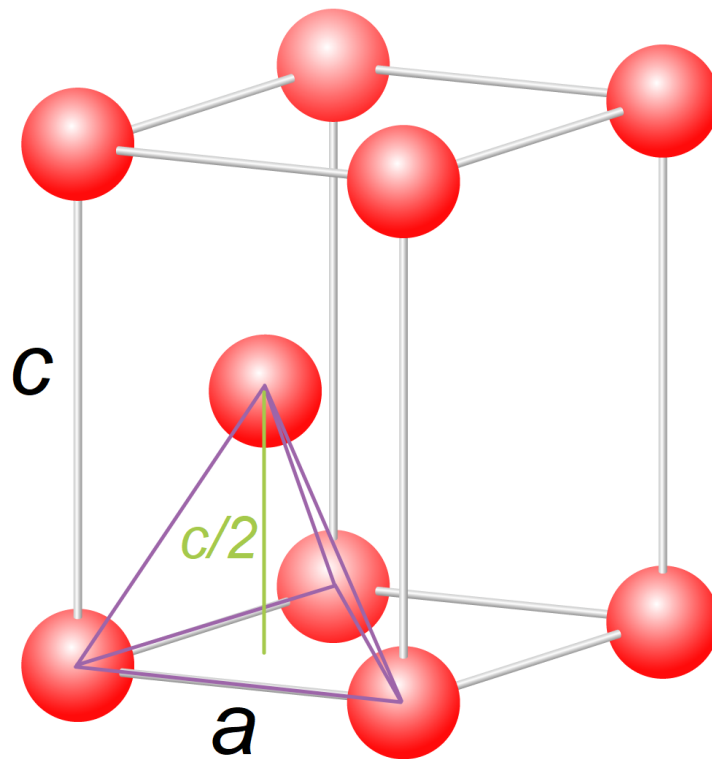
$$R = a \frac{\sqrt{3}}{4}$$

# Связь параметров ЭЯ с размером шаров

**Задание.** Рассчитайте значение параметра  $s$  для 4-х слойной ПШУ и выразите его через радиус шара. Примите радиус шара  $R = 1$ .

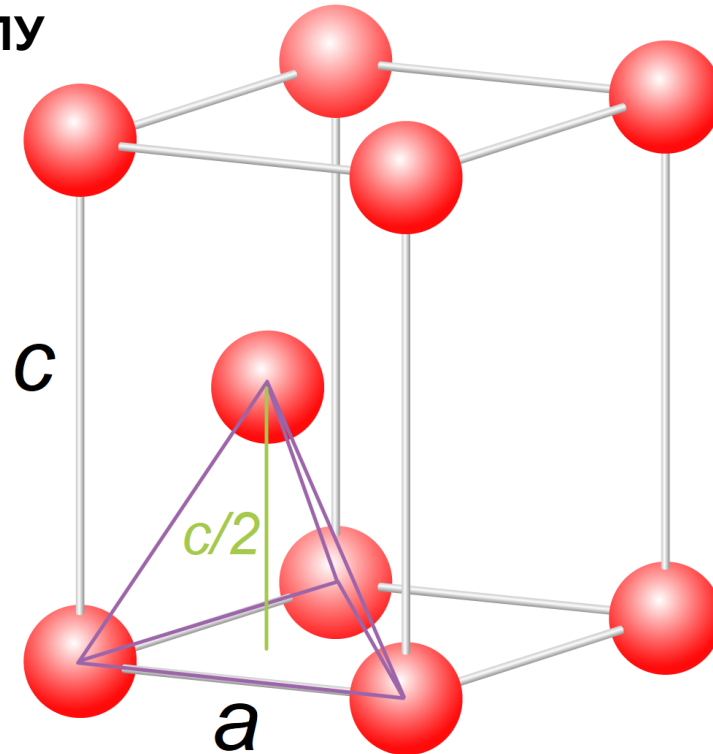
# Связь параметров ЭЯ с размером шаров

**Задание.** Рассчитайте значение параметра  $c$  для 4-х слойной ПШУ и выразите его через радиус шара. Примите радиус шара  $R = 1$ .



# Связь параметров ЭЯ с размером шаров

2 слойная ПШУ = ГПУ

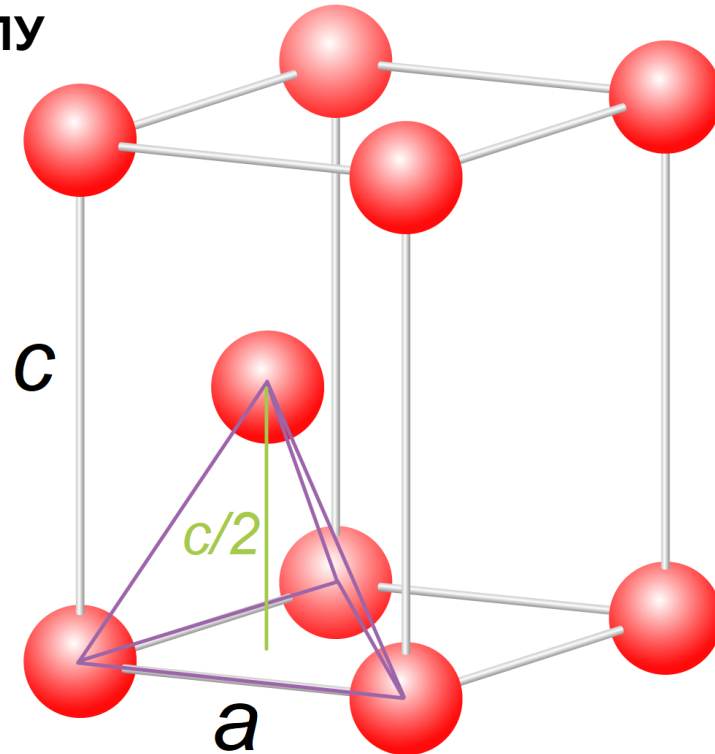


$$a = 2R$$

$$c = 2a \sqrt{\frac{2}{3}} = 4 \sqrt{\frac{2}{3}} R$$

# Связь параметров ЭЯ с размером шаров

2 слойная ПШУ = ГПУ

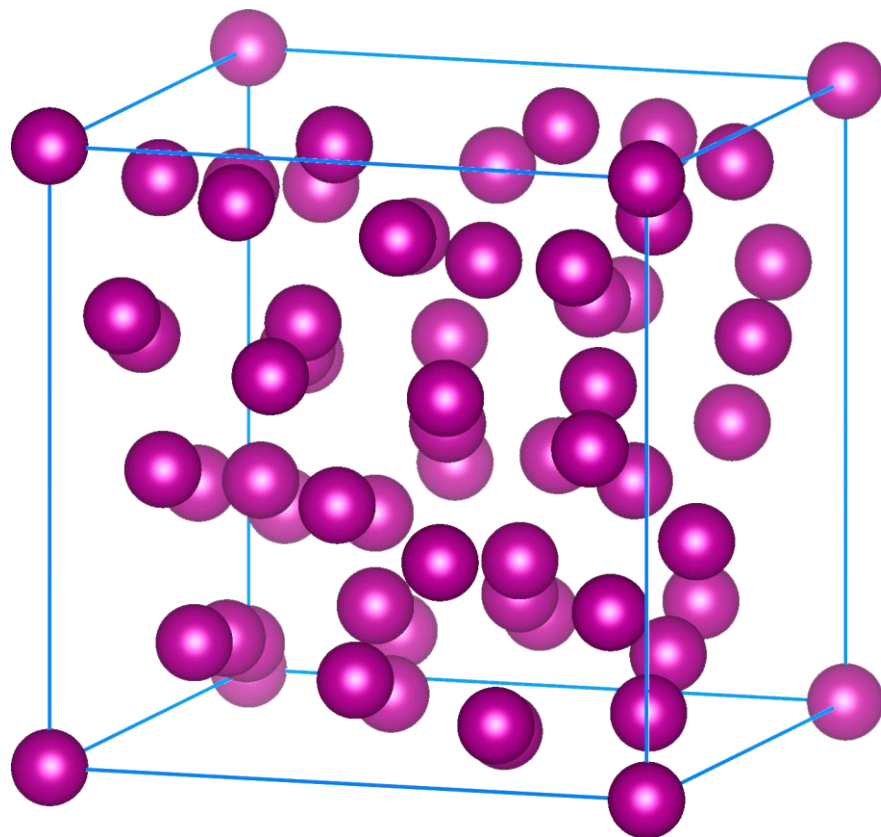


$$a = 2R$$

Расстояние между  
плотнейшими слоями

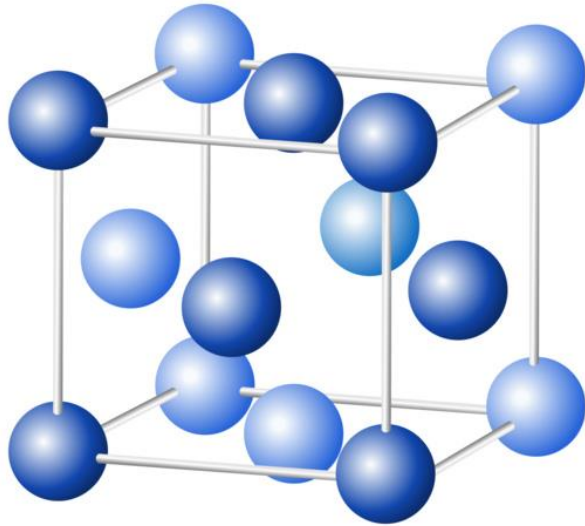
$$= a \sqrt{\frac{2}{3}} = 2R \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0.816a$$

# Кристаллическое строение **металлов**



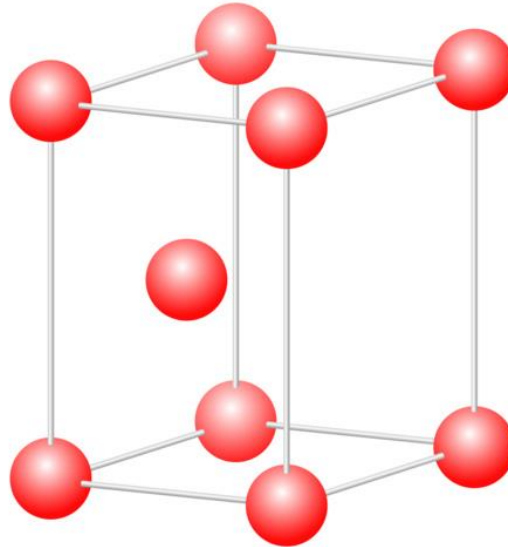


# Основные структурные типы металлов



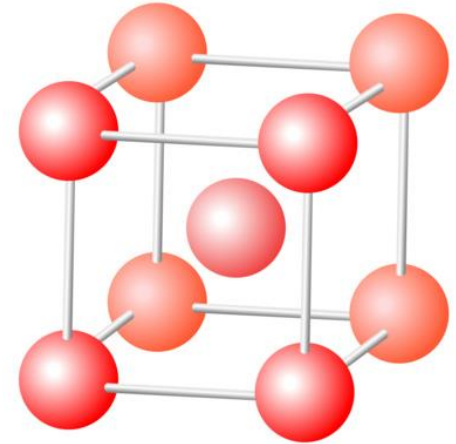
**Cu**

Ag, Au, Rh, Ir,  
Pd, Pt, Al, Pb



**Mg**

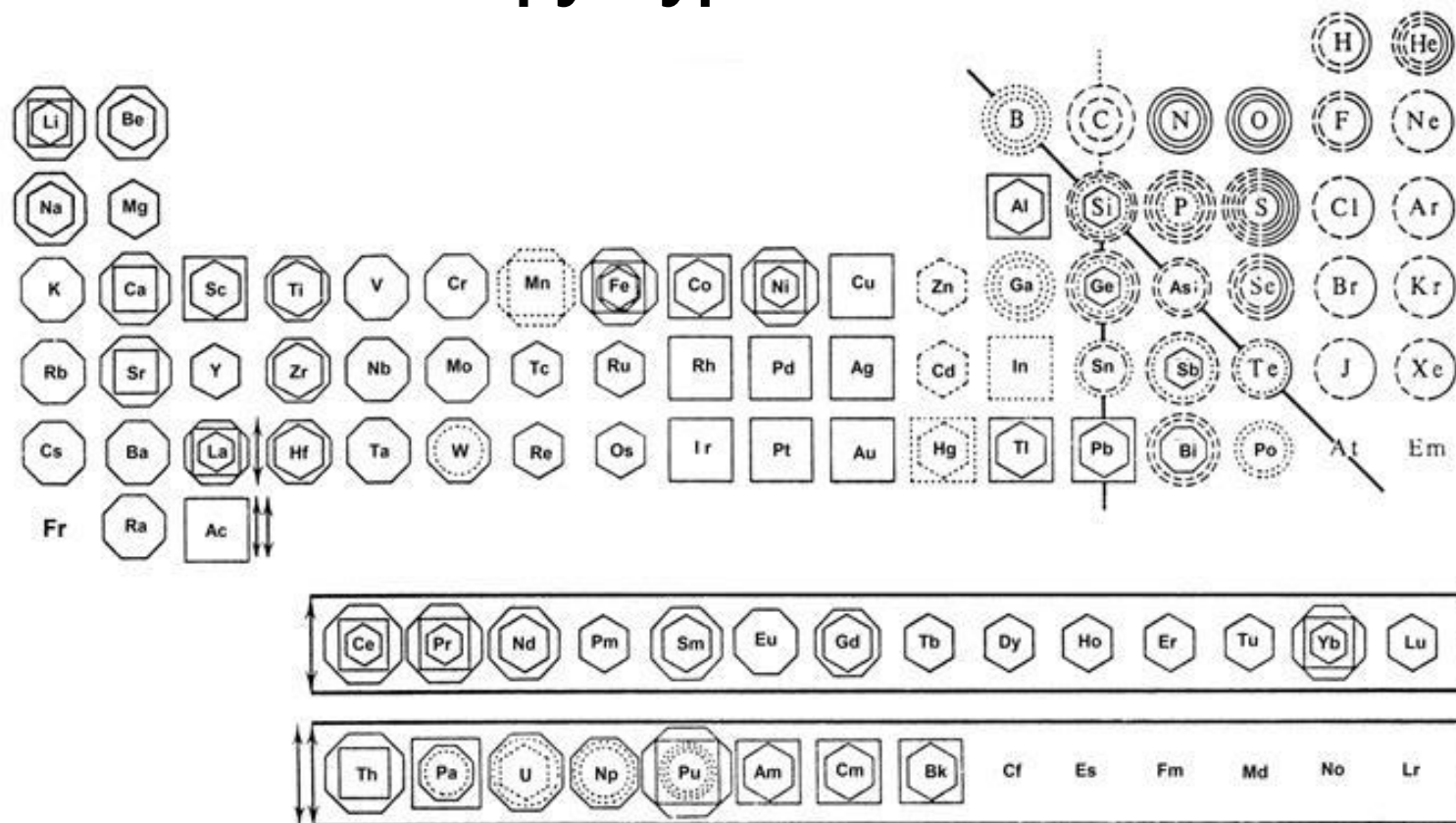
Be, Ti, Tc, Ru,  
Re, Os, PЗЭ



**$\alpha$ -W**

Fe, V, Nb, Ta,  
Cr, Mo, W, ЩМ

# Основные структурные типы металлов



Условные обозначения



КПУ (ГЦК)



ГПУ (в т.ч. многослойные ПШУ  
гексагональной сингонии)



ОЦК

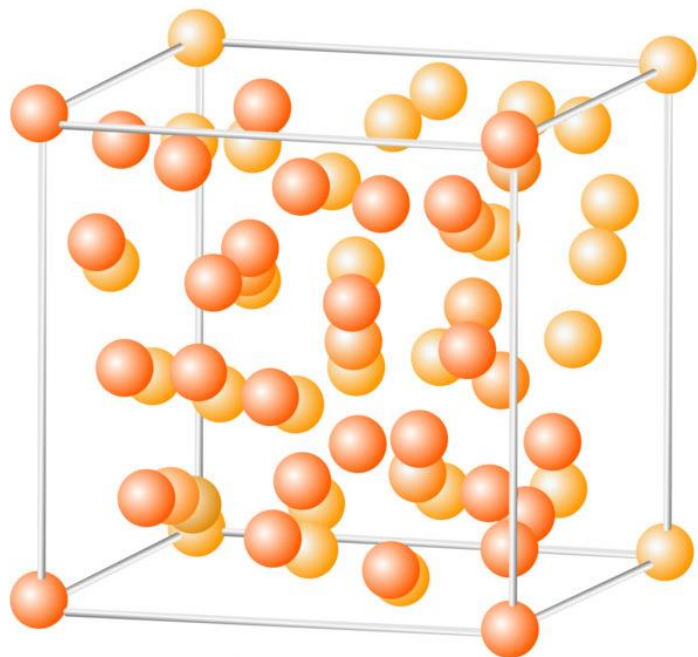


особые структурные типы

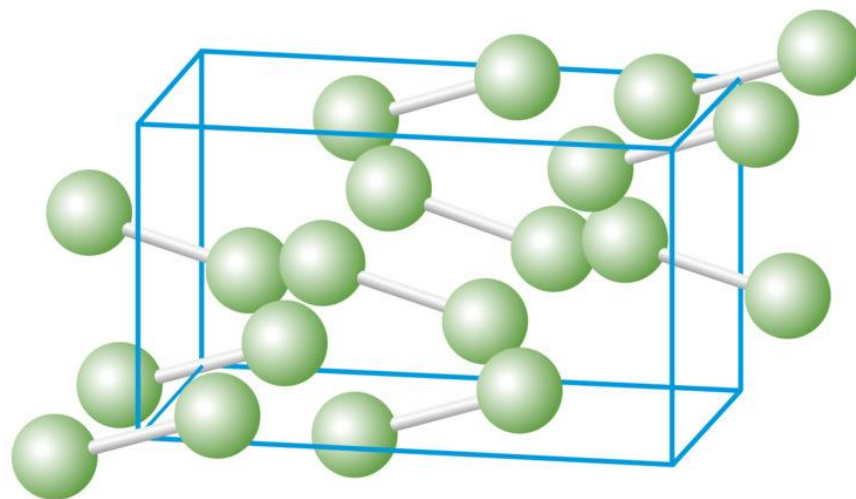


молекулярные структуры

# Основные структурные типы металлов

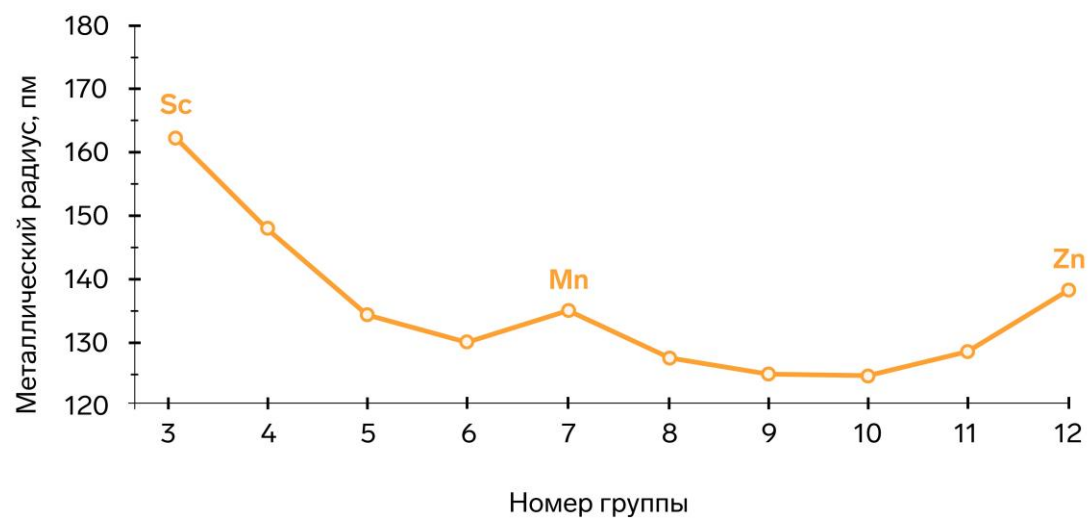
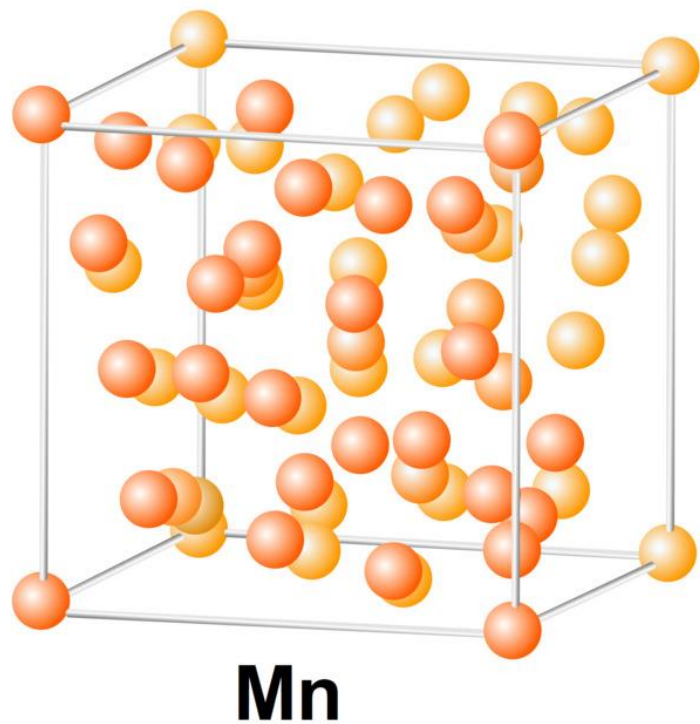


**Mn**

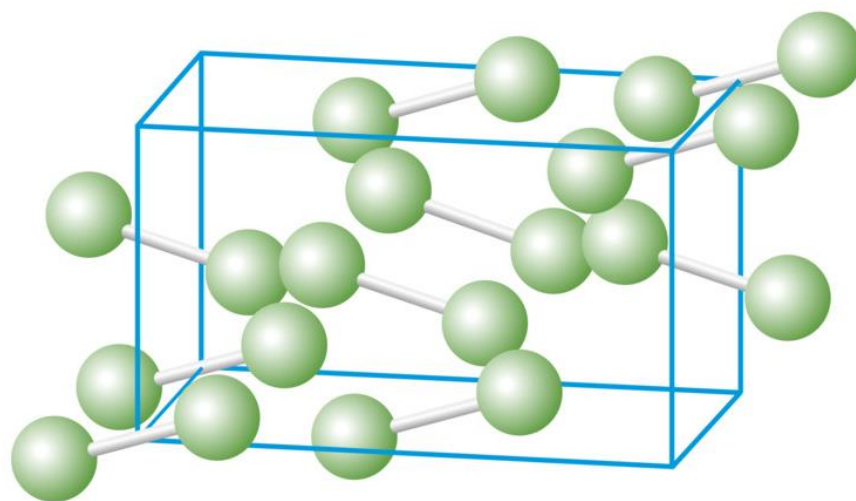


**Ga**

# Основные структурные типы металлов



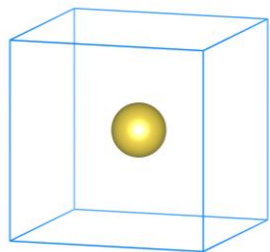
# Основные структурные типы металлов



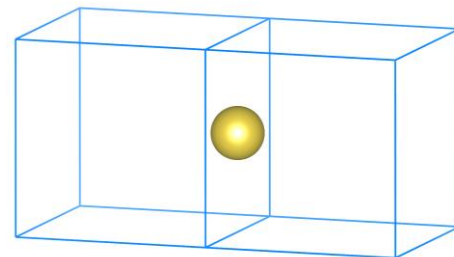
**Ga**

# Число формульных единиц

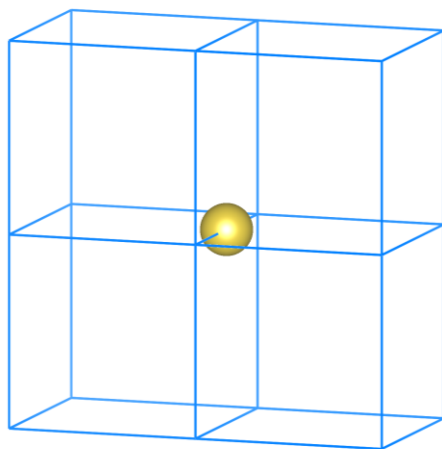
Атом внутри  
ЭЯ



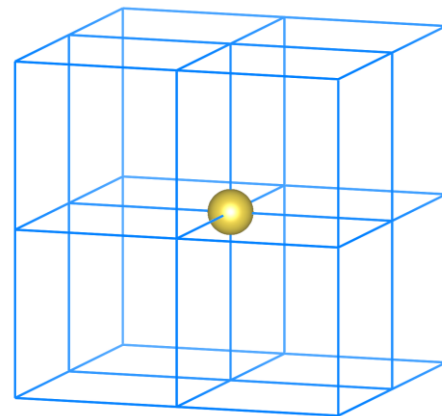
Атом на грани ЭЯ



Атом на ребре ЭЯ



Атом в вершине ЭЯ



**Задание.** Металлическое железо плавится при 1811 К. Между комнатной температурой и точкой плавления металлическое железо может существовать в различных кристаллических формах.

От комнатной температуры до 1185 К кристаллическая структура металлического железа существует в виде ОЦК решетки ( $\alpha$ -Fe).

От 1185 К до 1667 К структура становится ГЦК ( $\gamma$ -Fe).

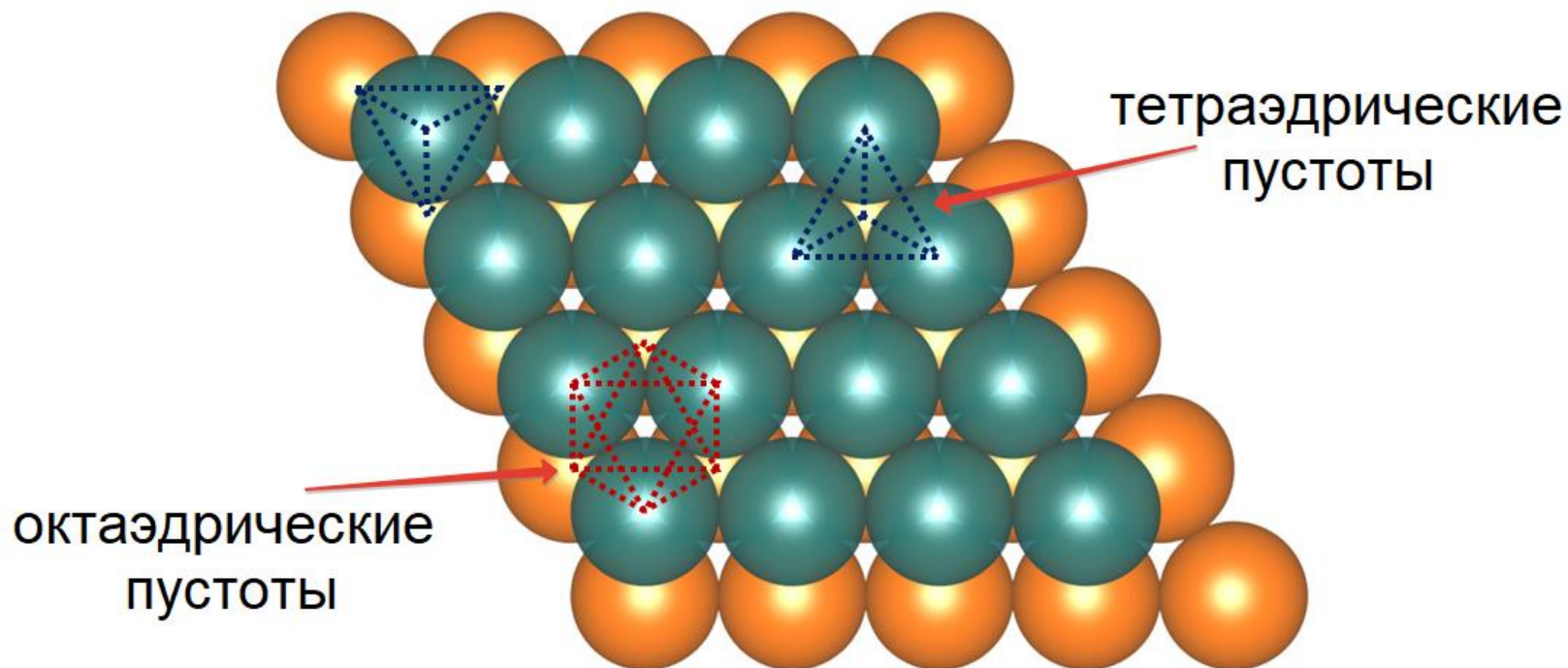
Выше 1667 К и вплоть до точки плавления железо возвращается к ОЦК-структуре. Последняя фаза называется  $\delta$ -Fe.

Плотность чистого металлического железа составляет  $7.874 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  при 293 К.

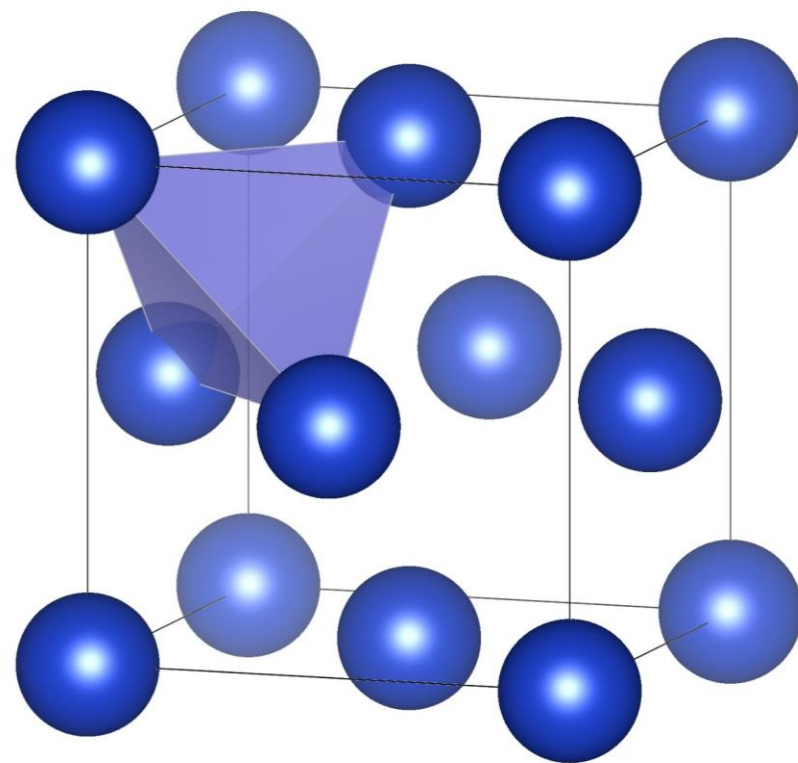
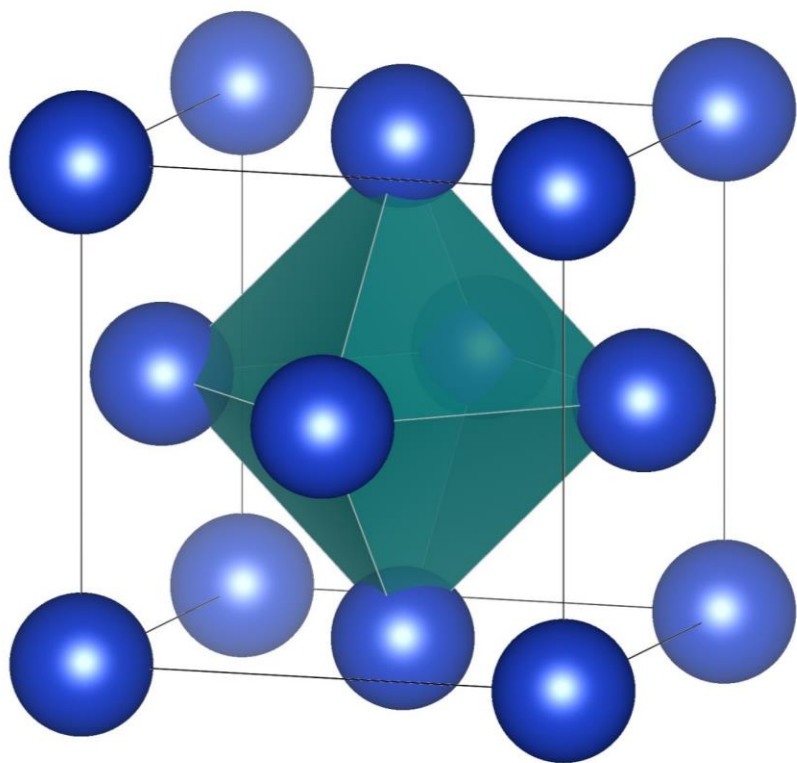
1. Рассчитайте металлический радиус железа
2. Рассчитайте плотность железа при 1250 К



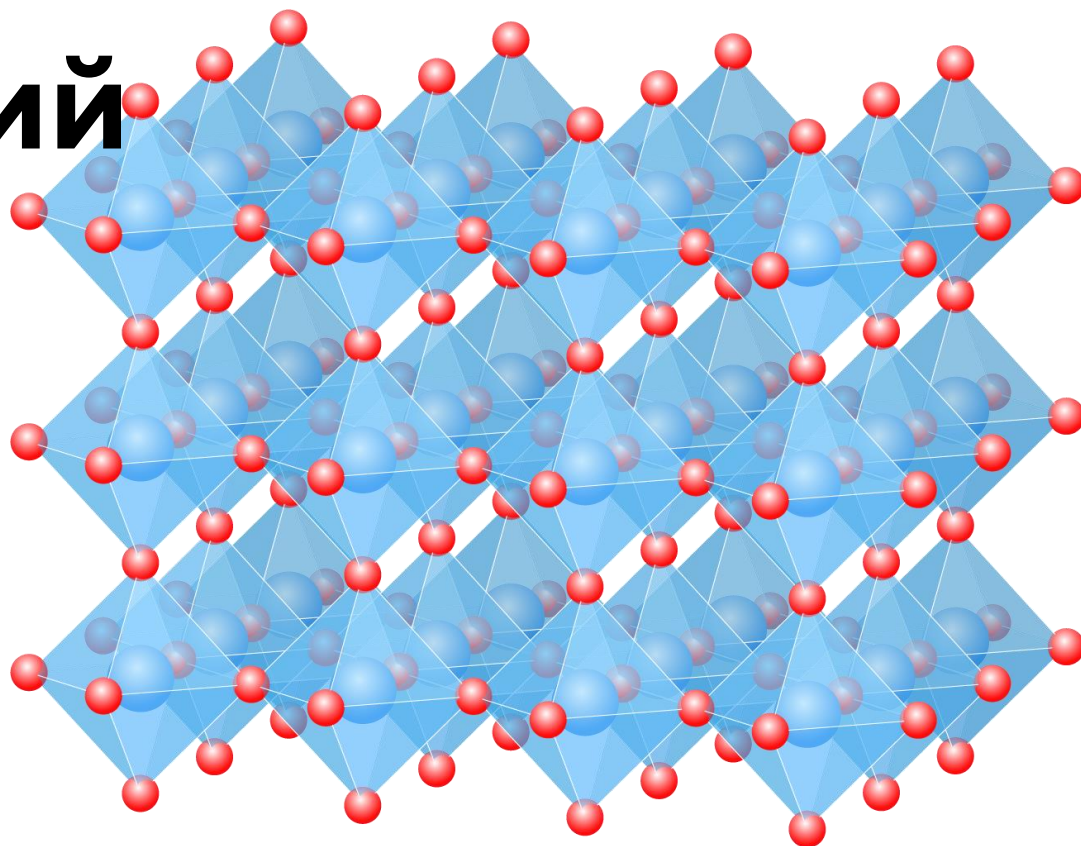
# Пустоты в шаровых упаковках и кладках



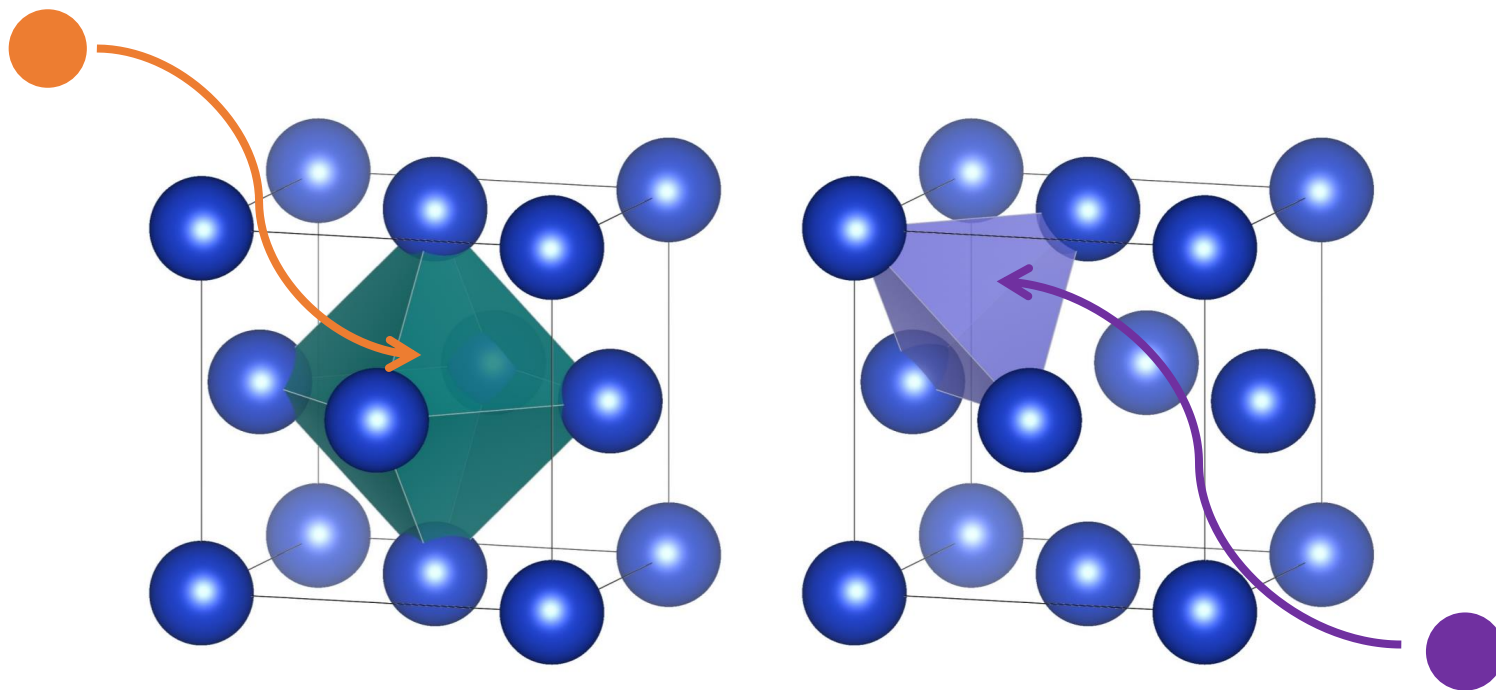
# Пустоты в шаровых упаковках и кладках



# Кристаллическое строение **ионных** соединений

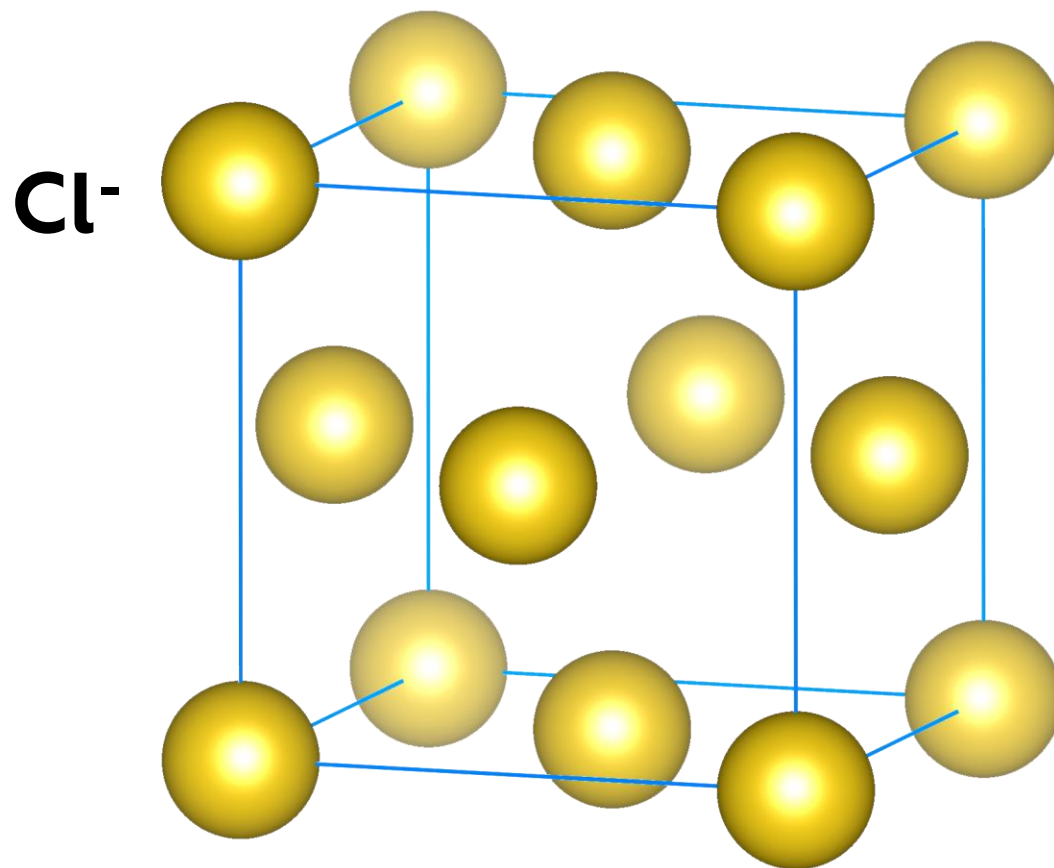


# Концепция описания строения ионных кристаллов

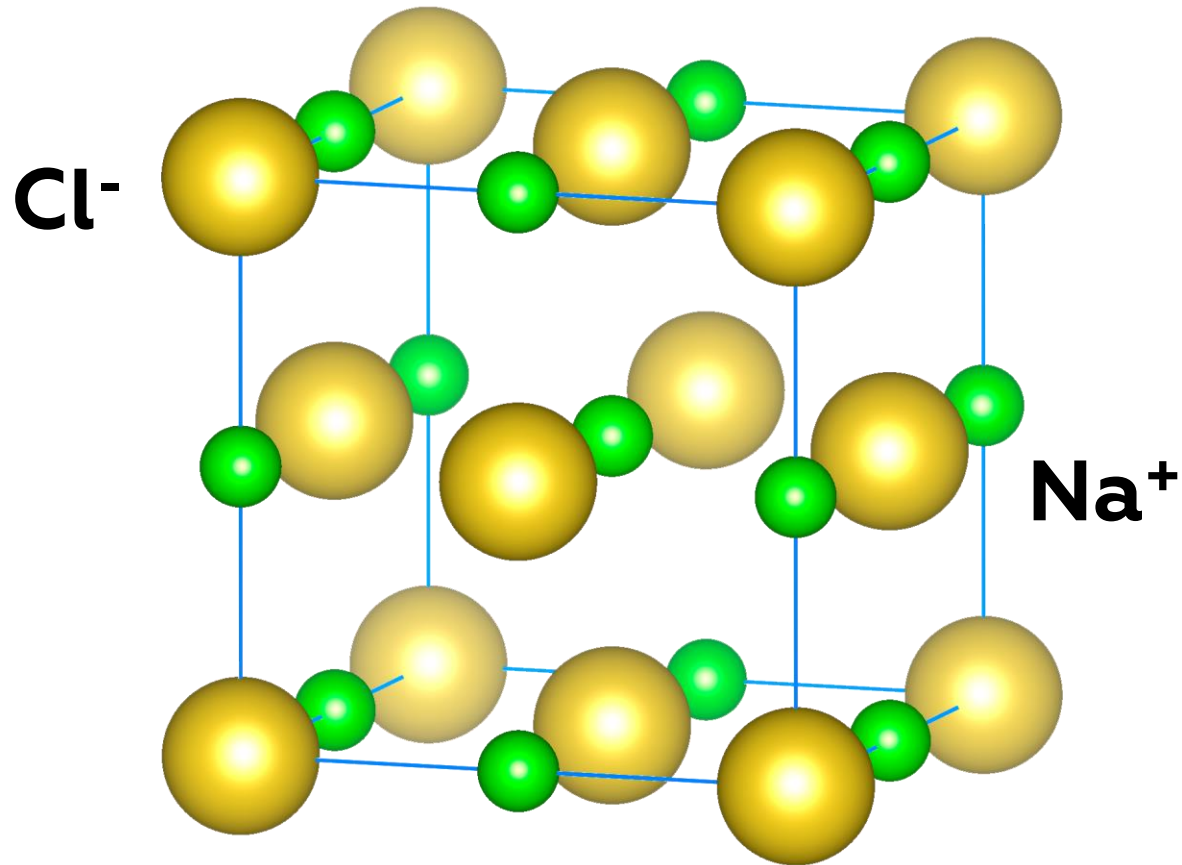


Один тип ионов образует ШУ, в пустотах которой  
располагаются ионы другого типа

## Структуры производные от ПШУ



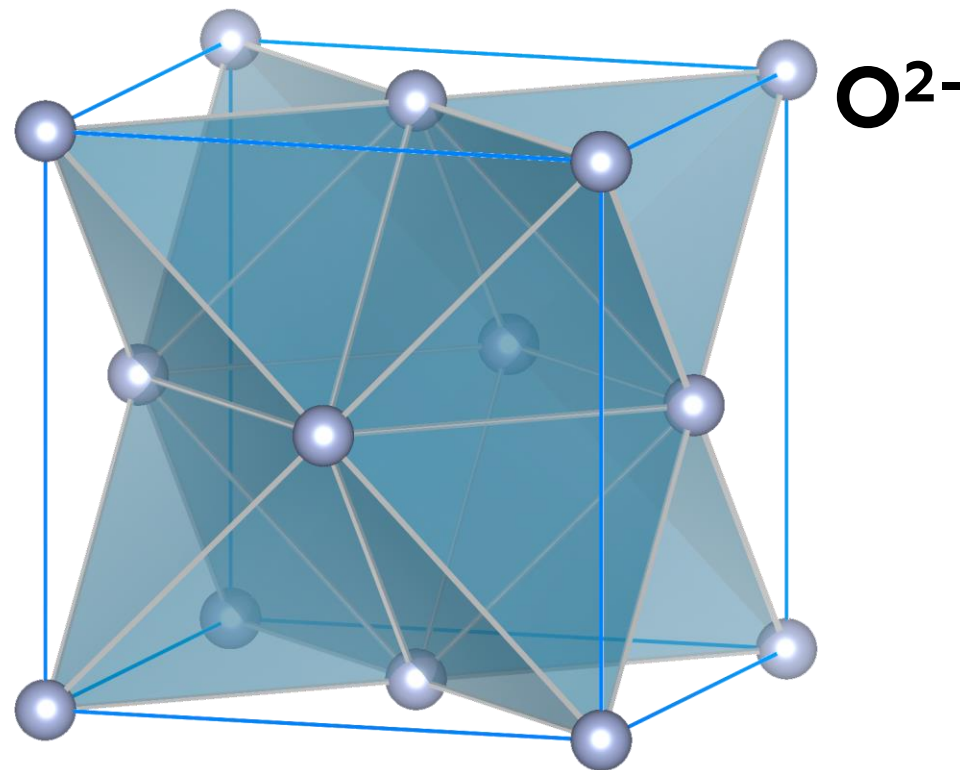
## Структуры производные от ПШУ



Структурный тип **каменной соли**

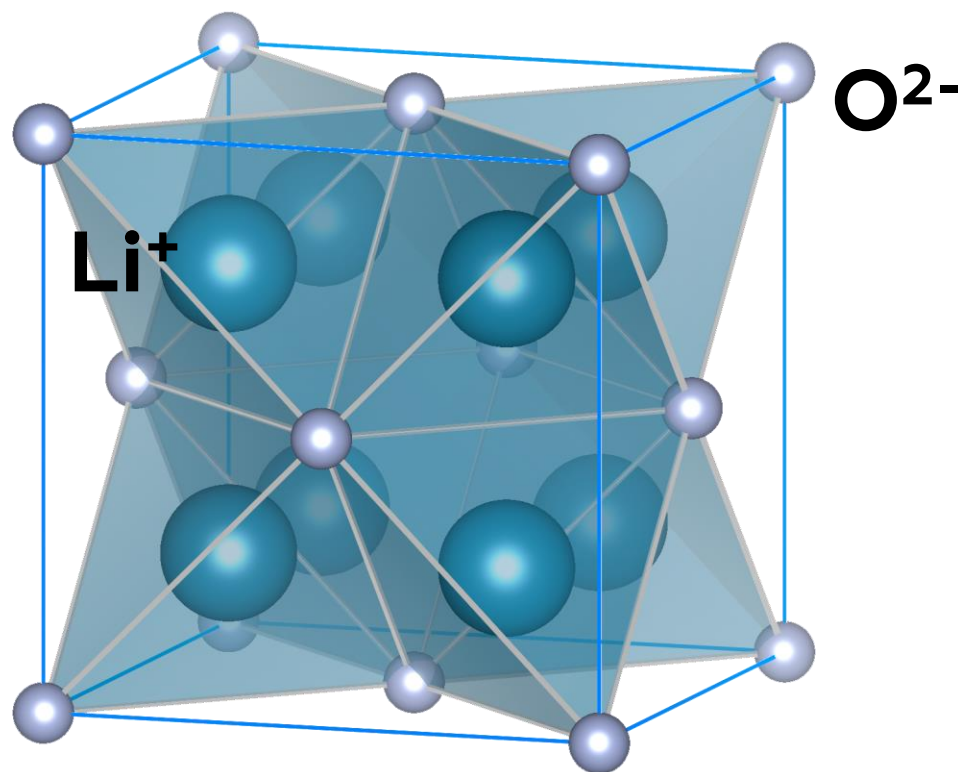


# Структуры производные от ПШУ



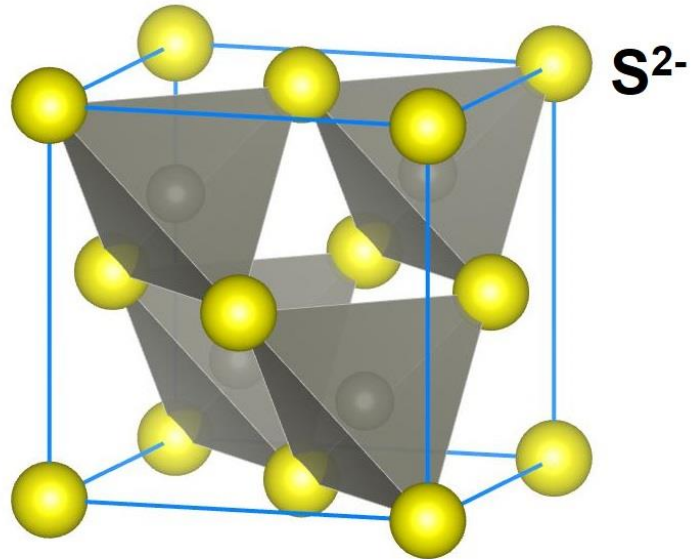


## Структуры производные от ПШУ

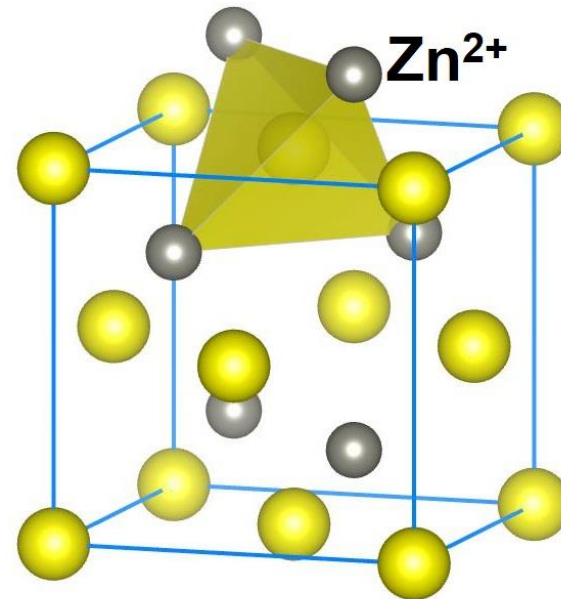


Структурный тип **антифлюорита**

## Структуры производные от ПШУ

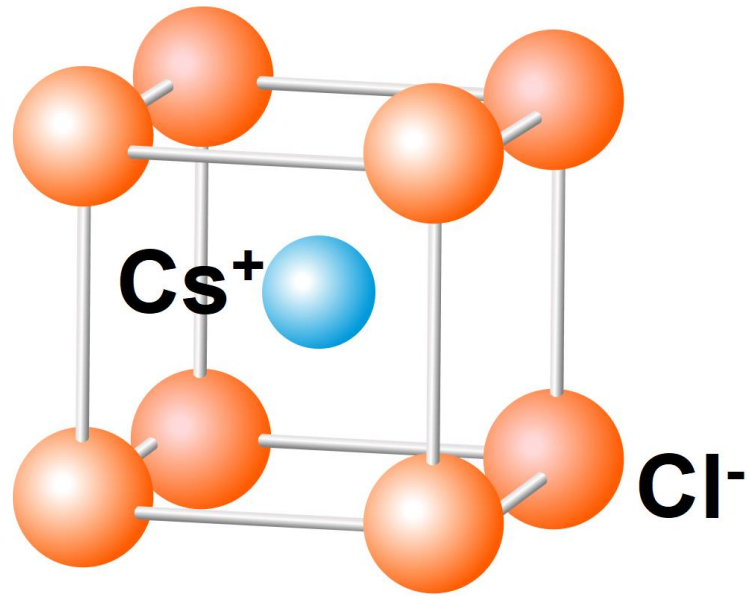


**ZnS - сфалерит**



**Координационное  
окружение серы**

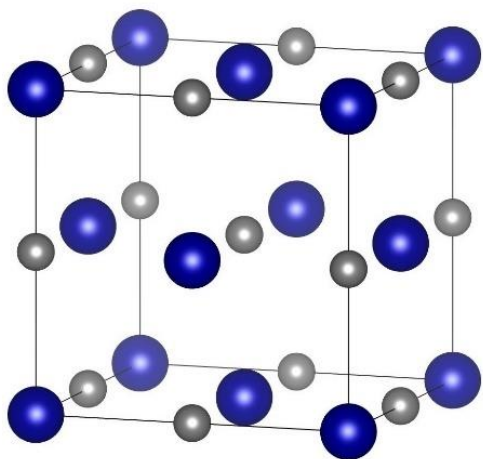
## Другие структурные типы ионных кристаллов



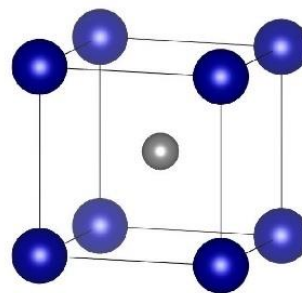
**Структурный тип CsCl**

**Задание.** Для одного из галогенидов цезия CsHal характерно явление полиморфизма – существование в нескольких кристаллических модификациях. Так при обычных условиях этот галогенид кристаллизуется в структурном типе CsCl, а при повышении температуры претерпевает превращение в структуру каменной соли – NaCl.

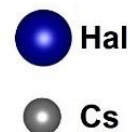
1. В каком из структурных типов CsHal будет иметь большую плотность? Ответ подтвердите расчетом отношения плотностей, если известно, что параметр элементарной ячейки CsHal составляет  $a = 4.11\text{\AA}$  (стр. тип CsCl),  $a = 6.95\text{\AA}$  (стр. тип NaCl).



Структурный тип NaCl



Структурный тип CsCl

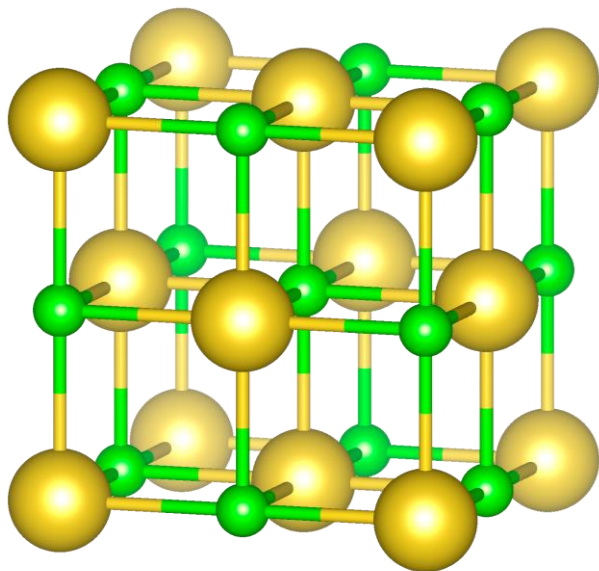


**Задание.** Считается, что в ионных структурах анионы образуют кладку, а катионы располагаются в пустотах. Так, в структуре NaCl анионы хлора формируют 3 слойную ПШУ (КПУ), а катионы натрия заселяют все октаэдрические пустоты.

2. Рассчитайте ионный радиус галогена в CsHal в структурном типе NaCl.

3. Рассчитайте радиус тетраэдрической пустоты, выразив его через радиус Hal.

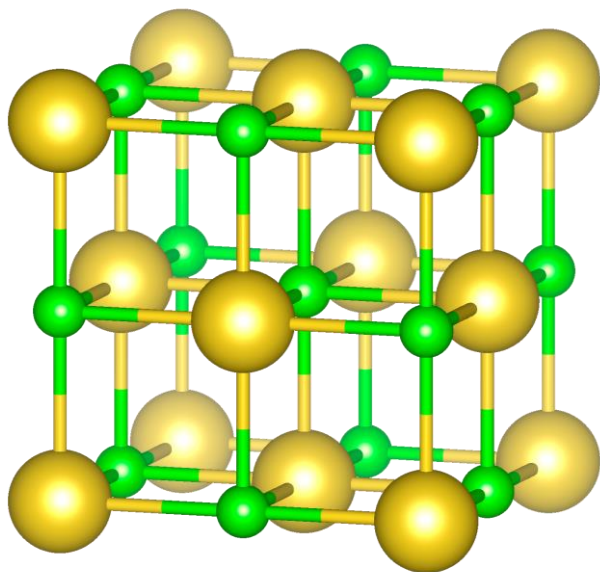
**Задание.** Длина ребра элементарной ячейки каменной соли NaCl  $a = 5.66 \text{ \AA}$ . Ионный радиус хлора  $r(\text{Cl}^-) = 1.81 \text{ \AA}$ . Найдите радиус катиона натрия. Рассчитайте теоретическую плотность NaCl.



$$a = 2r(\text{Na}^+) + 2r(\text{Cl}^-)$$

$$\begin{aligned} r(\text{Na}^+) &= a/2 - r(\text{Cl}^-) = \\ &= 5.66/2 - 1.81 = 1.02 \text{ \AA} \end{aligned}$$

**Задание.** Длина ребра элементарной ячейки каменной соли NaCl  $a = 5.66 \text{ \AA}$ . Ионный радиус хлора  $r(\text{Cl}^-) = 1.81 \text{ \AA}$ . Найдите радиус катиона натрия. Рассчитайте теоретическую плотность NaCl.



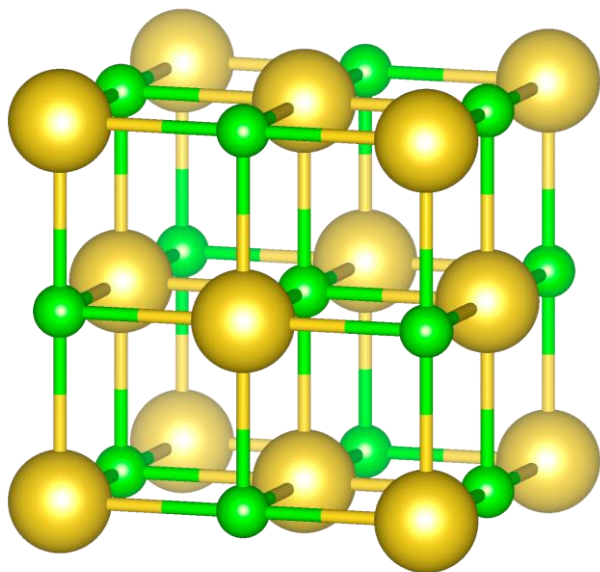
$$d = m_{\text{Э.я.}} / V_{\text{Э.я.}}$$

$$m_{\text{Э.я.}} = M_{\text{Э.я.}} / N_A = M(\text{NaCl}) \cdot Z / N_A$$

$$V_{\text{Э.я.}} = a^3$$



**Задание.** Длина ребра элементарной ячейки каменной соли NaCl  $a = 5.66 \text{ \AA}$ . Ионный радиус хлора  $r(\text{Cl}^-) = 1.81 \text{ \AA}$ . Найдите радиус катиона натрия. Рассчитайте теоретическую плотность NaCl.



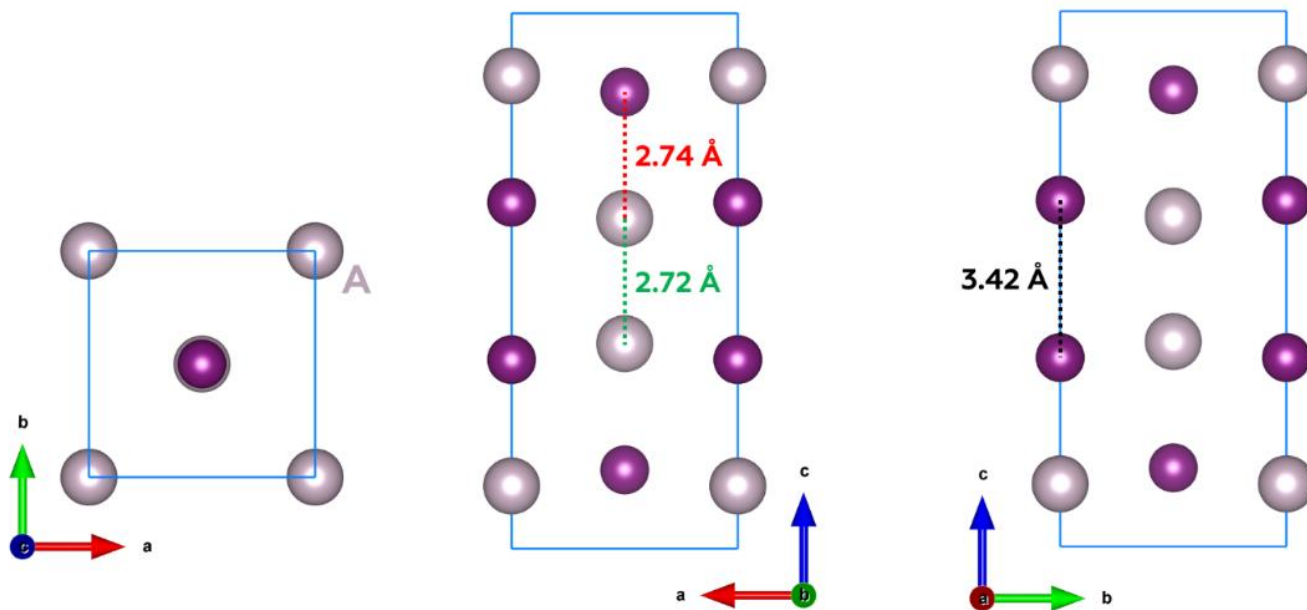
$$d = m_{\text{Э.Я.}} / V_{\text{Э.Я.}}$$

$$m_{\text{Э.Я.}} = M_{\text{Э.Я.}} / N_A = M(\text{NaCl}) \cdot Z / N_A$$

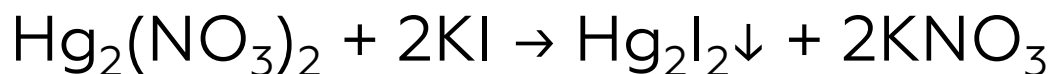
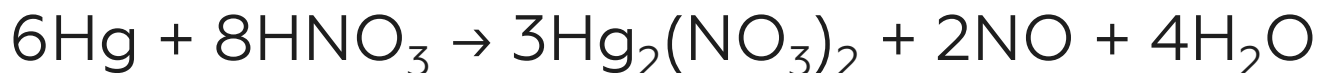
$$V_{\text{Э.Я.}} = a^3$$

$$d = \frac{M(\text{NaCl}) \cdot Z}{N_A \cdot a^3} = \frac{58.5 \cdot 4}{6.02 \cdot 10^{23} \cdot (5.66 \cdot 10^{-8})^3} = 2.14 \text{ г/см}^3$$

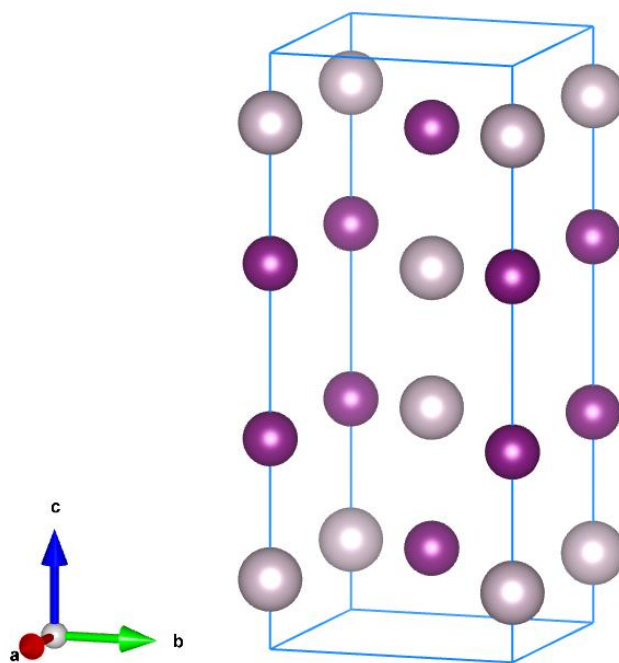
**Задание.** Жидкое при н.у. простое вещество **A**, взятое в избытке, растворяется в разбавленной азотной кислоте с образованием раствор соли **B**. При медленном добавлении по каплям раствора иодида калия выпадает желто-зеленый осадок **C**, проекции кристаллической структуры которого на разные плоскости приведены на рисунке ниже. Элементарная ячейка **C** тетрагональная ( $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ,  $d \approx 7.72$  г/см<sup>3</sup>).



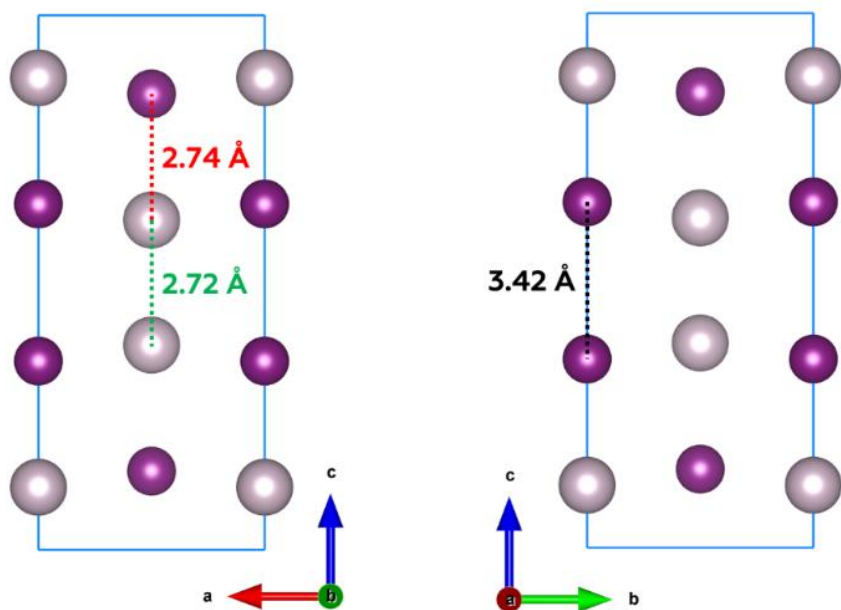
**Задание.** Жидкое при н.у. простое вещество **A**, взятое в избытке, растворяется в разбавленной азотной кислоте с образованием раствора соли **B**. При медленном добавлении по каплям раствора иодида калия выпадает желто-зеленый осадок **C**, проекции кристаллической структуры которого на разные плоскости приведены на рисунке ниже. Элементарная ячейка **C** тетрагональная ( $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ,  $d \approx 7.72$  г/см<sup>3</sup>).



**Задание.** Жидкое при н.у. простое вещество **A**, взятое в избытке, растворяется в разбавленной азотной кислоте с образованием раствор соли **B**. При медленном добавлении по каплям раствора иодида калия выпадает желто-зеленый осадок **C**, проекции кристаллической структуры которого на разные плоскости приведены на рисунке ниже. Элементарная ячейка **C** тетрагональная ( $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ,  $d \approx 7.72$  г/см<sup>3</sup>).



**Задание.** Жидкое при н.у. простое вещество **A**, взятое в избытке, растворяется в разбавленной азотной кислоте с образованием раствора соли **B**. При медленном добавлении по каплям раствора иодида калия выпадает желто-зеленый осадок **C**, проекции кристаллической структуры которого на разные плоскости приведены на рисунке ниже. Элементарная ячейка **C** тетрагональная ( $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ,  $d \approx 7.72$  г/см<sup>3</sup>).



$$c = 2.74 \cdot 2 + 2.72 + 3.42 = 11.62 \text{ \AA}$$

$$d = \frac{Z \cdot M(\text{Hg}_2\text{I}_2)}{N_A \cdot a^2 \cdot c}$$

$$a = \sqrt{\frac{Z \cdot M(\text{Hg}_2\text{I}_2)}{N_A \cdot c \cdot d}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 656}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 11,62 \cdot 10^{-8} \cdot 7,72}} = 4,93 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 4,93 \text{ \AA}.$$

При дальнейшем добавлении к осадку **С** иодида калия цвет осадка изменяется и в результате образуется бесцветный раствор **Д** и черный осадок.

Если к раствору **В** прилить раствор сульфида натрия, то сразу выпадает черный осадок и образуется бесцветный раствор **Е**.

При добавлении к раствору **В** солянокислого раствора хлорида олова(+2) сначала выпадает белый осадок **Ф**, изоструктурный **С**, который постепенно чернеет. В растворе соединений элемента **А** не остается.

При дальнейшем добавлении к осадку **С** иодида калия цвет осадка изменяется и в результате образуется бесцветный раствор **Д** и черный осадок.

Если к раствору **В** прилить раствор сульфида натрия, то сразу выпадает черный осадок и образуется бесцветный раствор **Е**.

При добавлении к раствору **В** солянокислого раствора хлорида олова(+2) сначала выпадает белый осадок **Ф**, изоструктурный **С**, который постепенно чернеет. В растворе соединений элемента **А** не остается.





При дальнейшем добавлении к осадку **С** иодида калия цвет осадка изменяется и в результате образуется бесцветный раствор **Д** и черный осадок.

Если к раствору **В** прилить раствор сульфида натрия, то сразу выпадает черный осадок и образуется бесцветный раствор **Е**.

При добавлении к раствору **В** солянокислого раствора хлорида олова(+2) сначала выпадает белый осадок **Ф**, изоструктурный **С**, который постепенно чернеет. В растворе соединений элемента **А** не остается.



При дальнейшем добавлении к осадку **C** иодида калия цвет осадка изменяется и в результате образуется бесцветный раствор **D** и черный осадок.

Если к раствору **B** прилить раствор сульфида натрия, то сразу выпадает черный осадок и образуется бесцветный раствор **E**.

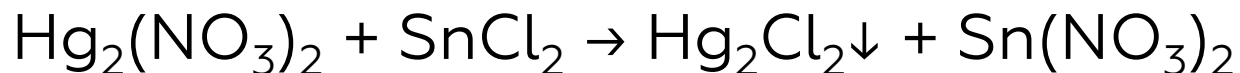
При добавлении к раствору **B** солянокислого раствора хлорида олова(+2) сначала выпадает белый осадок **F**, изоструктурный **C**, который постепенно чернеет. В растворе соединений элемента **A** не остается.



При дальнейшем добавлении к осадку **С** иодида калия цвет осадка изменяется и в результате образуется бесцветный раствор **Д** и черный осадок.

Если к раствору **В** прилить раствор сульфида натрия, то сразу выпадает черный осадок и образуется бесцветный раствор **Е**.

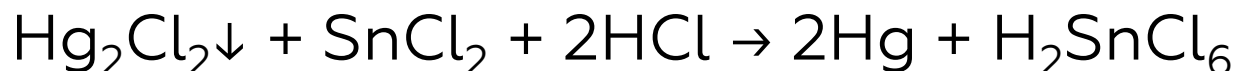
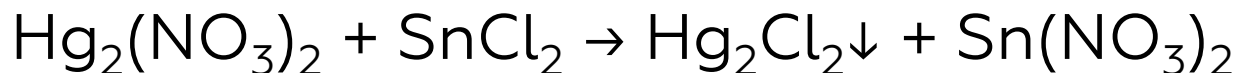
При добавлении к раствору **В** солянокислого раствора хлорида олова(+2) сначала выпадает белый осадок **Ф**, изоструктурный **С**, который постепенно чернеет. В растворе соединений элемента **А** не остается.



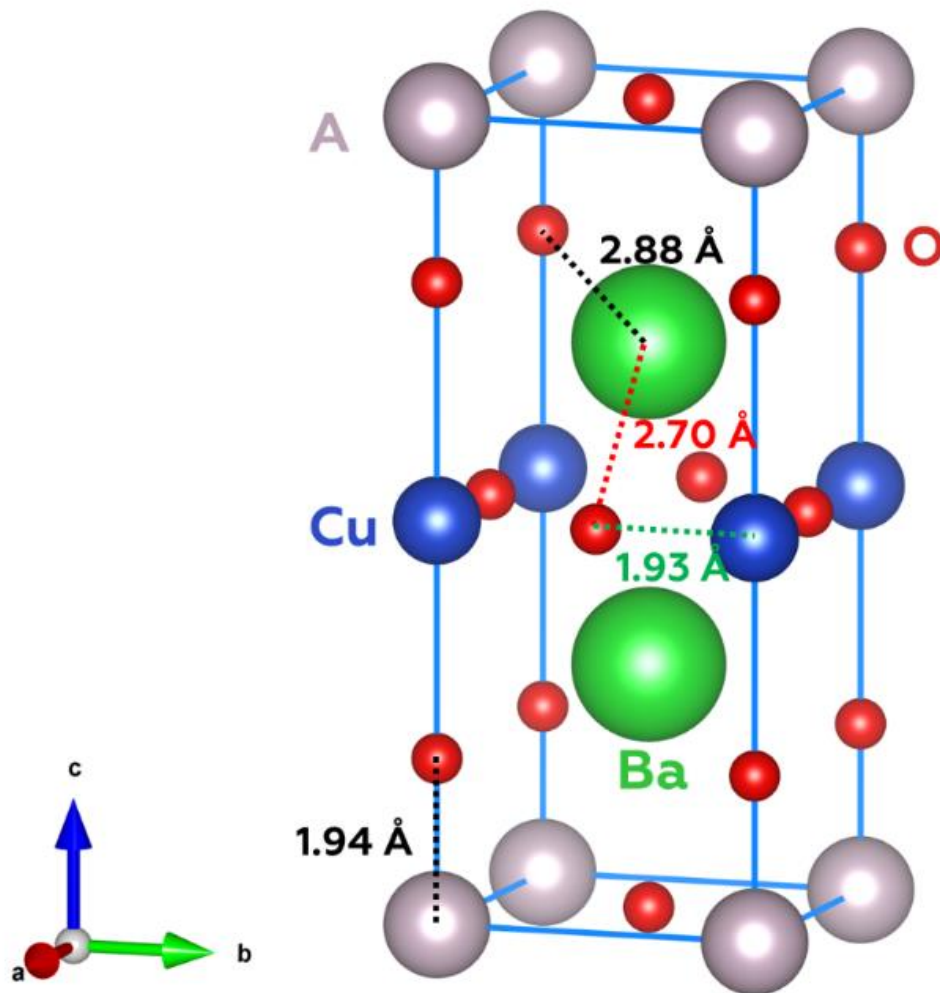
При дальнейшем добавлении к осадку **С** иодида калия цвет осадка изменяется и в результате образуется бесцветный раствор **Д** и черный осадок.

Если к раствору **В** прилить раствор сульфида натрия, то сразу выпадает черный осадок и образуется бесцветный раствор **Е**.

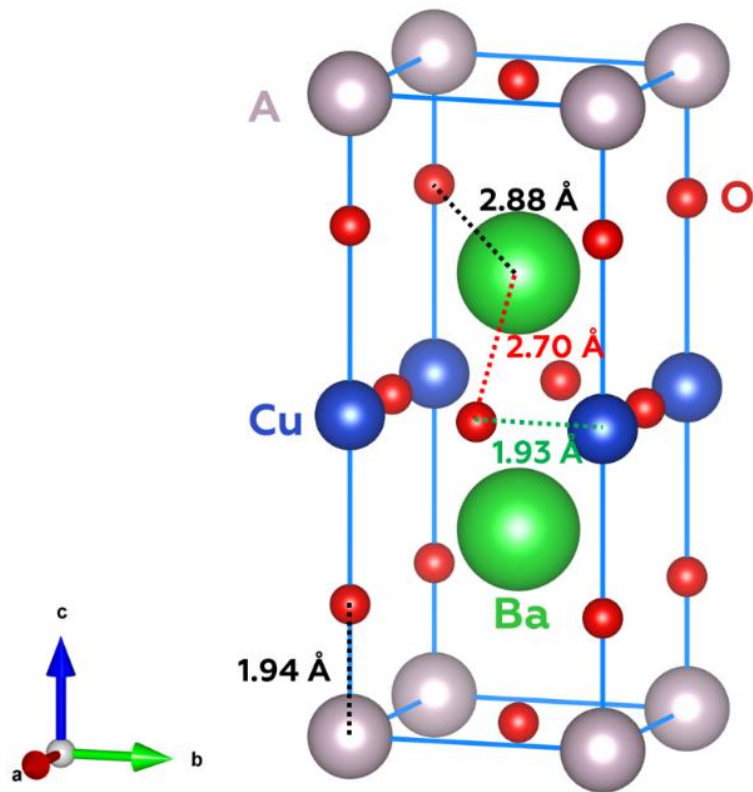
При добавлении к раствору **В** солянокислого раствора хлорида олова(+2) сначала выпадает белый осадок **Ф**, изоструктурный **С**, который постепенно чернеет. В растворе соединений элемента **А** не остается.



**A** является одним из компонентов купратного сверхпроводника – **G**, для которого было обнаружено одно из рекордных значений критической температуры. **Тетрагональная** элементарная ячейка **G** приведена на рисунке ниже, а также показаны некоторые межатомные расстояния.



**A** является одним из компонентов купратного сверхпроводника – **G**, для которого было обнаружено одно из рекордных значений критической температуры. Тетрагональная элементарная ячейка **G** приведена на рисунке ниже, а также показаны некоторые межатомные расстояния.



Ba – 2

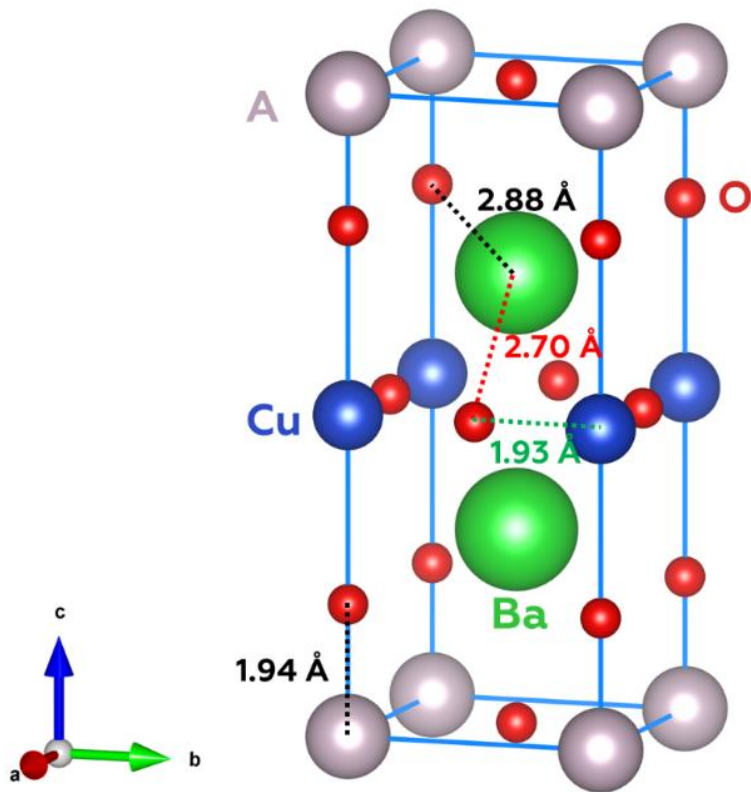
Cu – 1

Hg – 1

O – 4.1



**A** является одним из компонентов купратного сверхпроводника – **G**, для которого было обнаружено одно из рекордных значений критической температуры. Тетрагональная элементарная ячейка **G** приведена на рисунке ниже, а также показаны некоторые межатомные расстояния.



$$a = 2 \cdot 1.93 = 3.86 \text{ \AA}$$

$$c = 1.94 \cdot 2 + 2 \cdot (2.70^2 - 1.93^2)^{1/2} + 2 \cdot (2.88^2 - 2 \cdot 1.93^2)^{1/2} = 9.49 \text{ \AA}$$

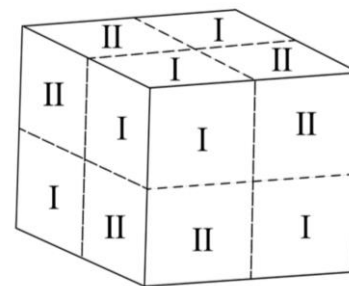
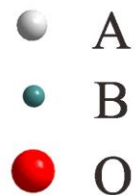
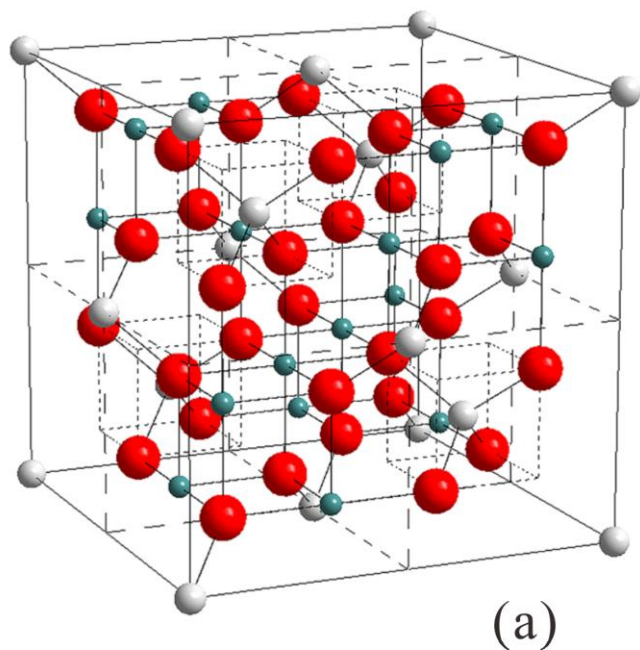


**Задание.** Эквимольную смесь оксида лантана(+3) и оксида марганца(+2) подвергли обжигу в присутствии кислорода при температуре 800°C. В качестве основного продукта этой реакции было получено вещество **X**, кристаллизующееся в структуре перовскита.

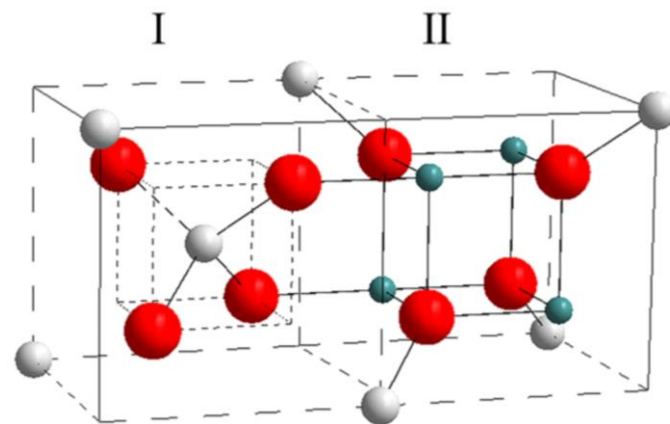
1. Изобразите элементарную ячейку (ЭЯ) перовскита. Какие позиции в структуре занимает катион лантана, а какие катион марганца? Почему?
2. Определите число формульных единиц в ЭЯ перовскита.
3. Определите молярную массу вещества **X** и рассчитайте его теоретическую плотность, если известно, что параметр элементарной ячейки оксида  $\text{MnO}$ , кристаллизующегося в структурном типе  $\text{NaCl}$ , составляет 4.46 Å, ионный радиус кислорода  $r_{\text{ион}}(\text{O}^{2-}) = 1.32\text{Å}$ , а ионный радиус Mn при изменении степени окисления на единицу меняется на 23.1%.
4. Оцените ионный радиус катиона лантана в соединении **X**.

# Задача МХО-2022

Типичная черная глазурь состоит из железосодержащих оксидов со структурой шпинели. Шпинели имеют общую формулу  $AB_2O_4$  и представляют собой кубическую плотнейшую упаковку ионов  $O^{2-}$ , в которой катионы А занимают 1/8 часть тетраэдрических пустот, а катионы В - 1/2 октаэдрических, как показано на рисунке элементарной ячейки.



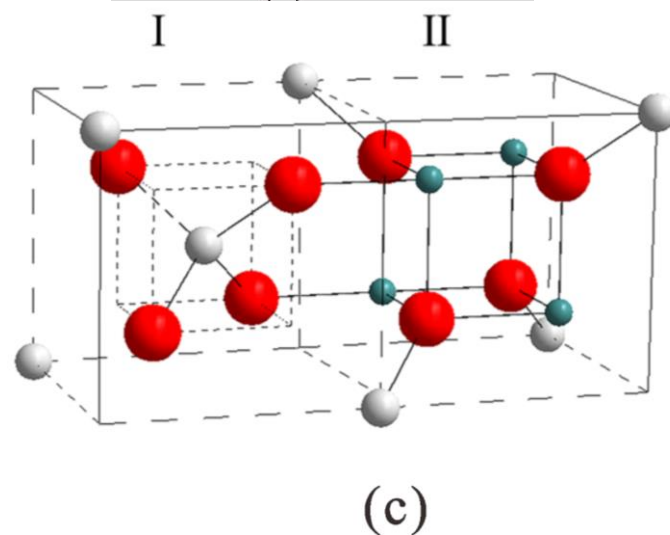
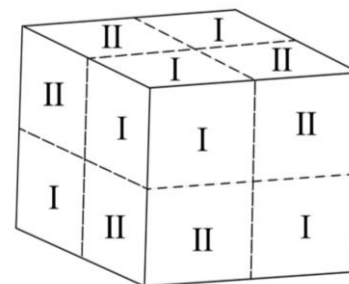
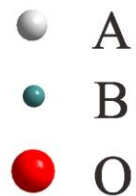
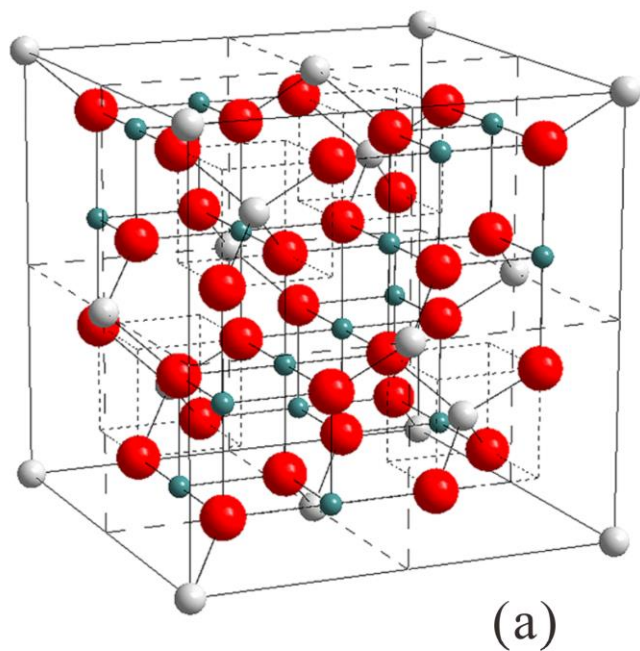
(b)



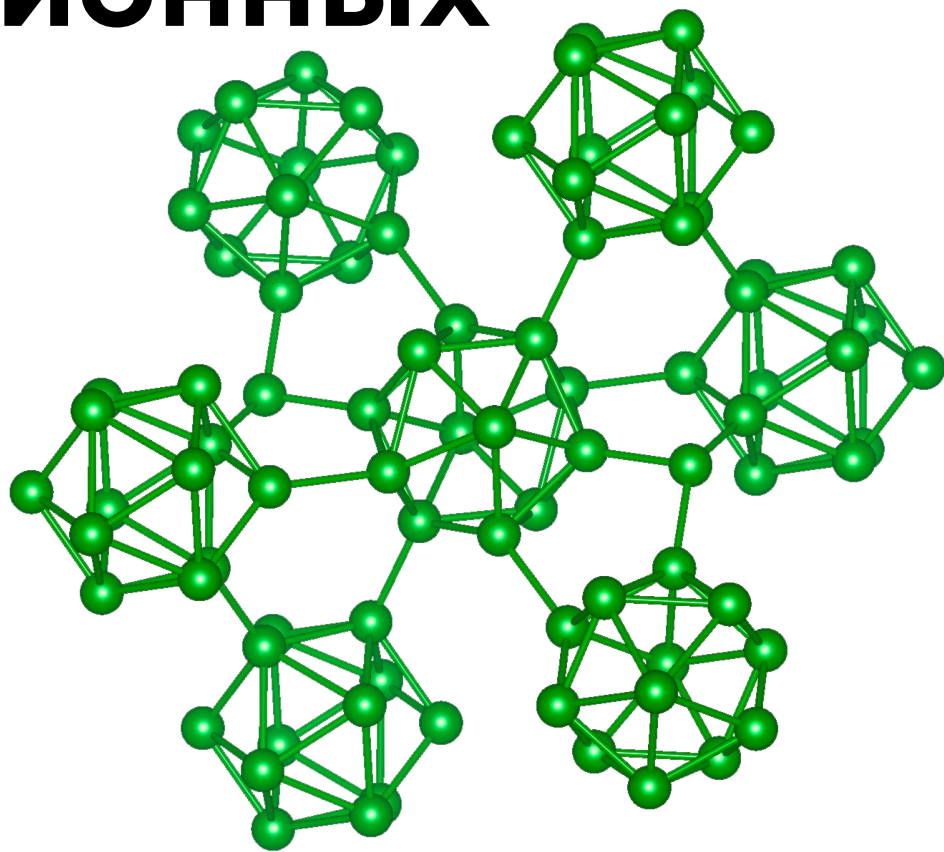
(c)

# Задача МХО-2022

Сколько катионов А и сколько В находится в элементарной ячейке?

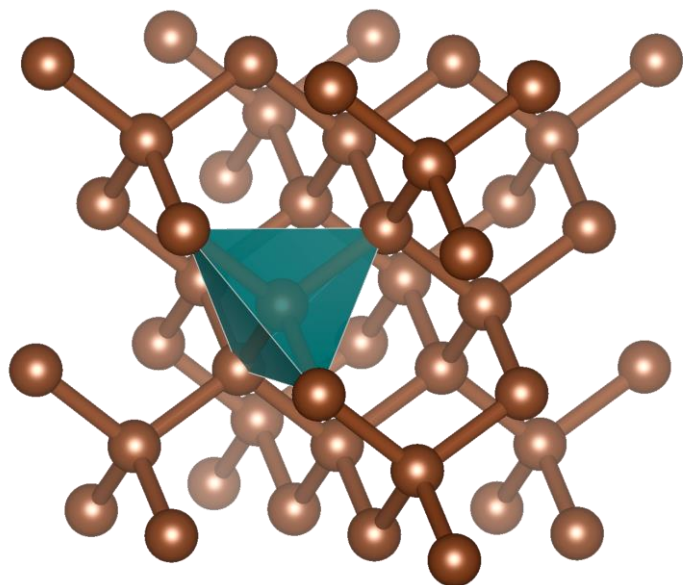
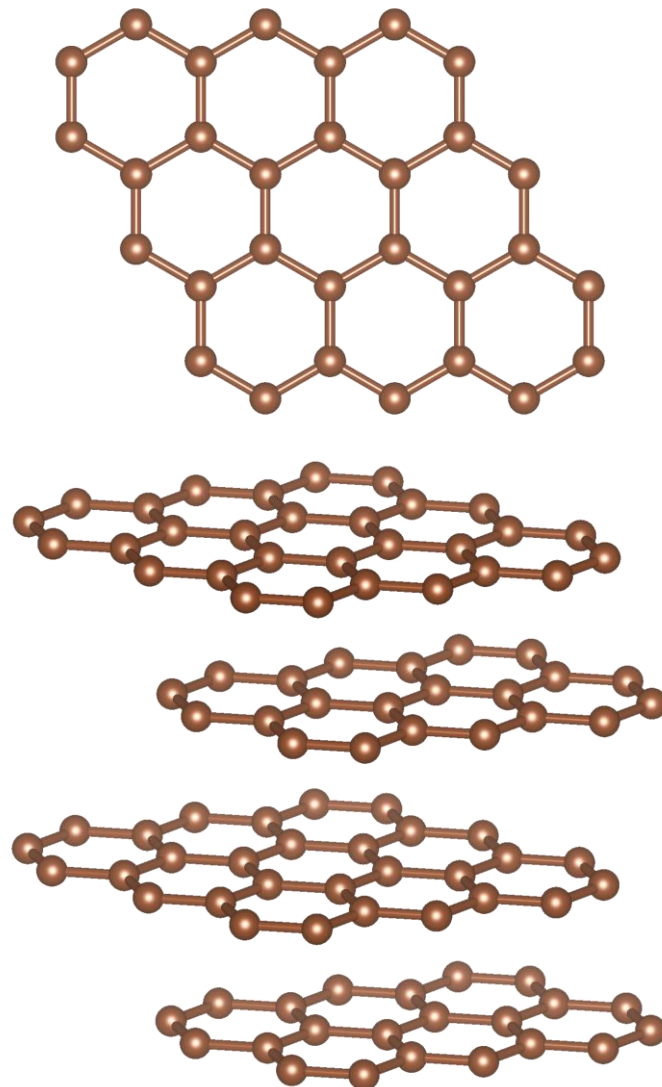


# Кристаллическое строение **не**ионных соединений



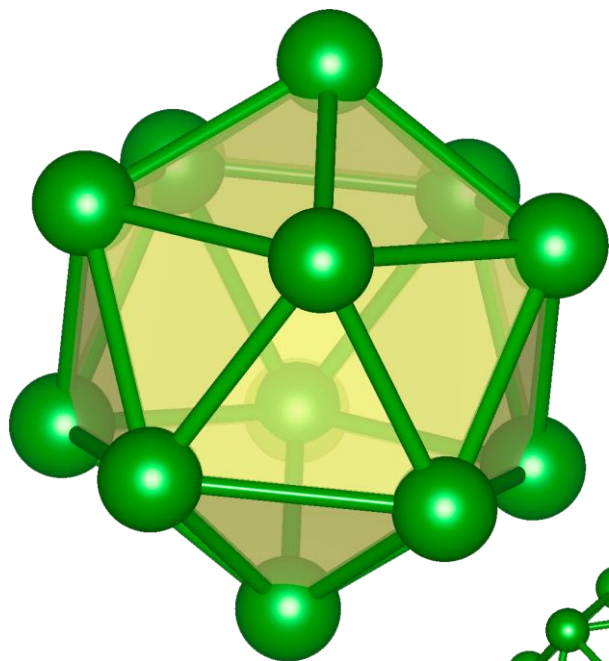
## Строение твердых веществ. Другие виды взаимодействия.

С - графит

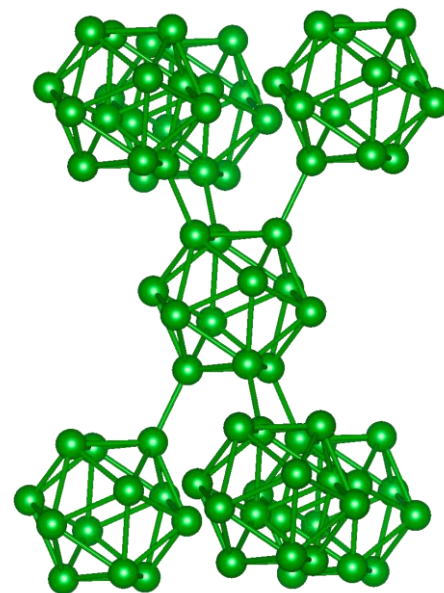
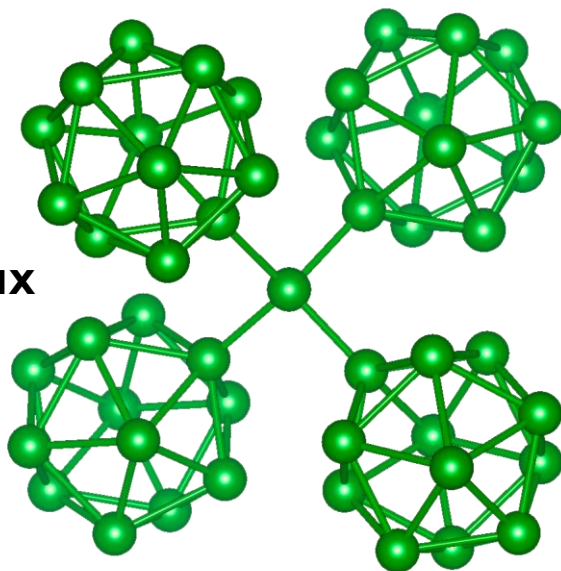
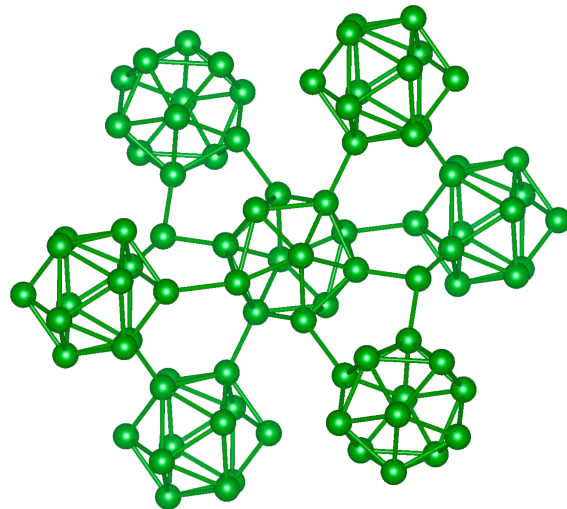


С - алмаз

## Строение твердых веществ. Другие виды взаимодействия.

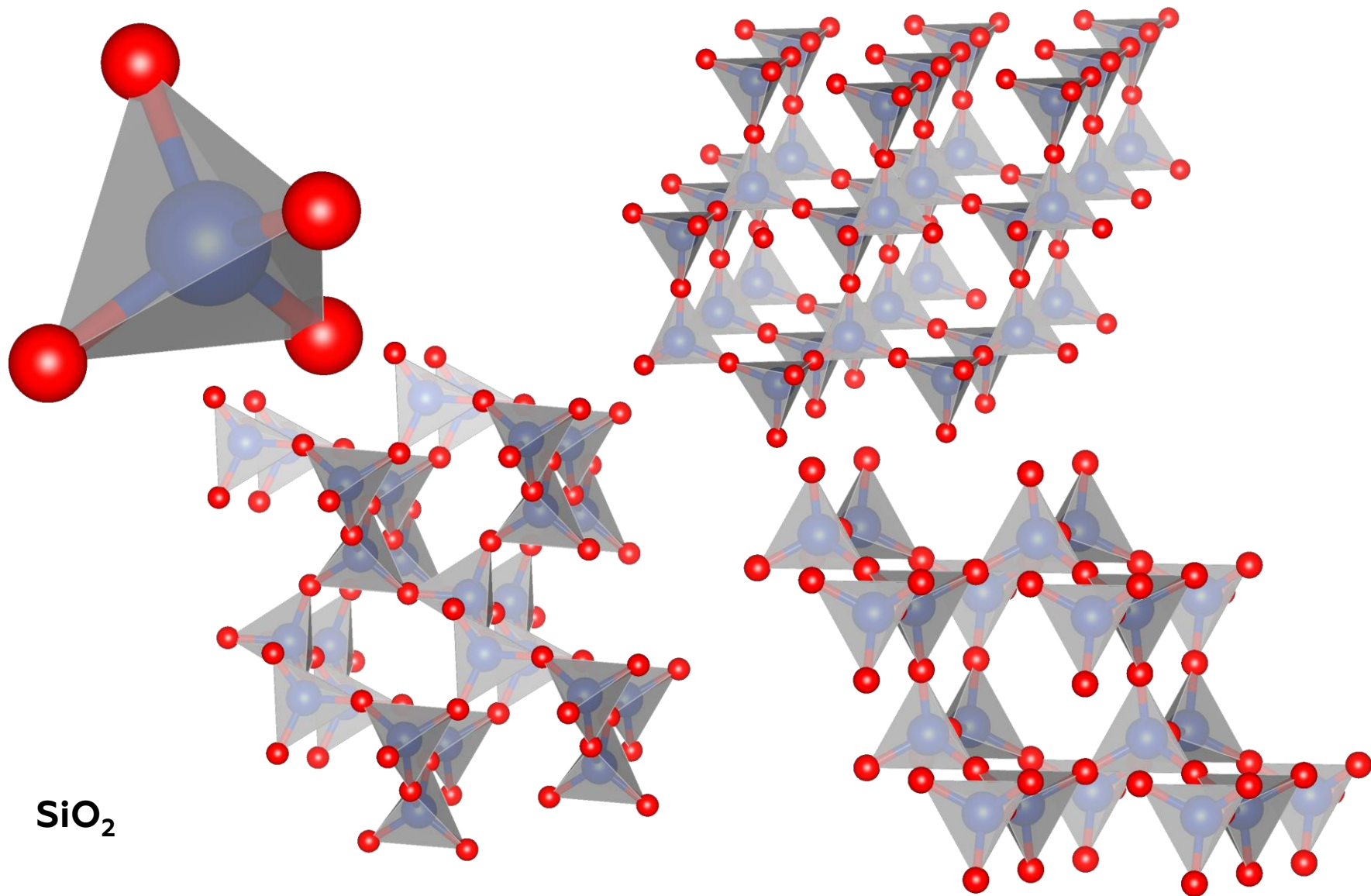


**B<sub>12</sub> – структурная  
единица аллотропных  
модификаций бора**

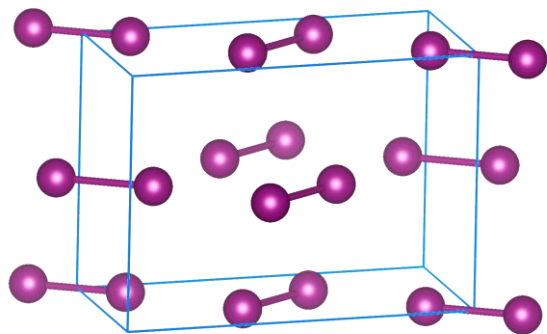




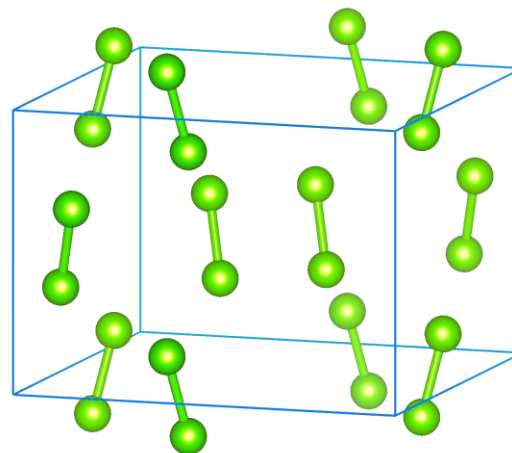
## Строение твердых веществ. Другие виды взаимодействия.



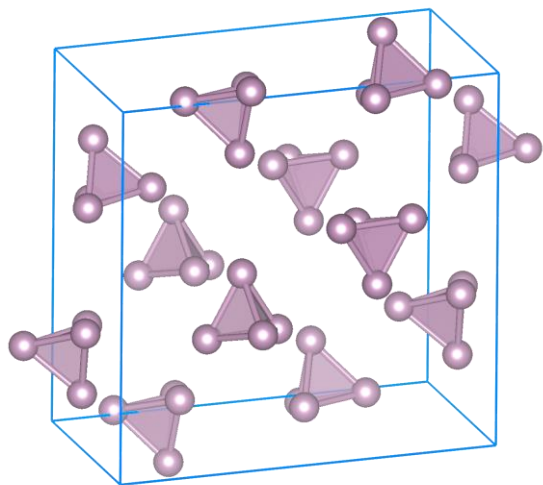
## Строение твердых веществ. Другие виды взаимодействия.



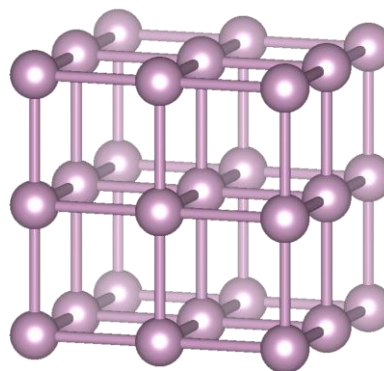
$I_2$



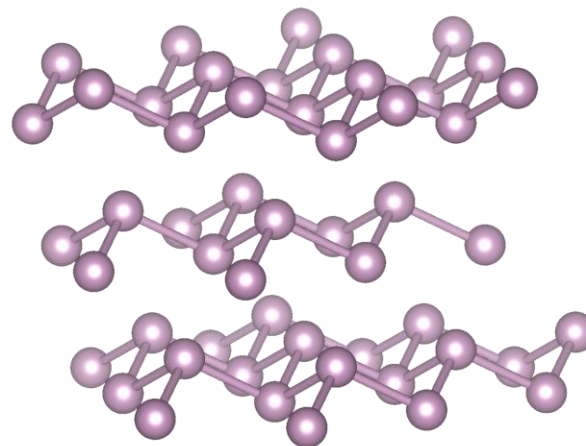
$Cl_2$



Белый  $P_4$



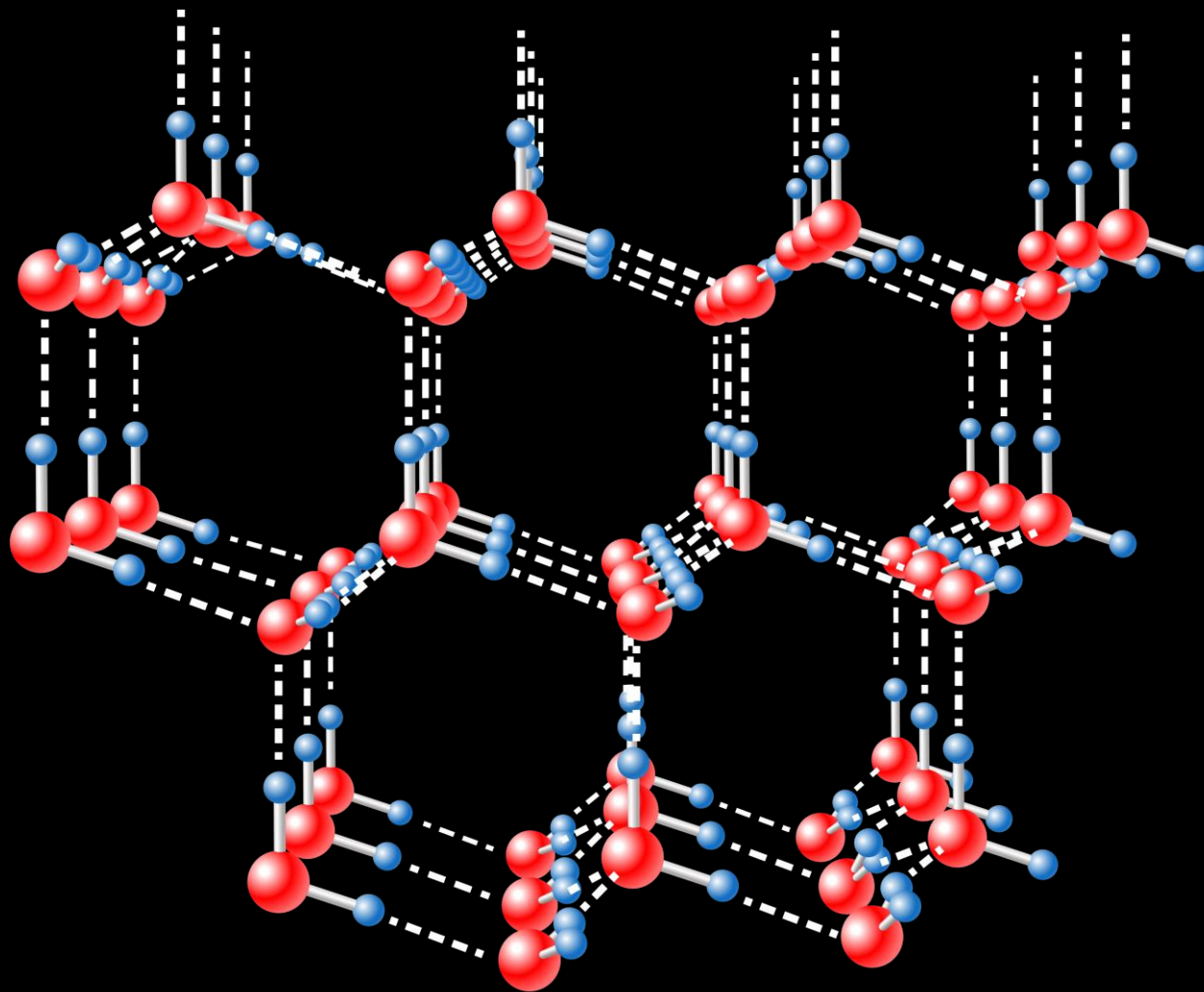
Кубический P (*hp*)



Черный P (*hp*)



## Строение твердых веществ. Другие виды взаимодействия.



## Строение твердых веществ. Другие виды взаимодействия.



**Спасибо за внимание!**



<https://disk.yandex.ru/d/UrSL7e6cY7qALQ>

**likhanovms@my.msu.ru**