

# *Простые вещества*

# Тип - простые вещества (безанионные соединения)

## Классы:

- Самородные вещества
  - Карбиды
  - Силициды
  - Нитриды
  - Фосфиды
- 
- Самородные вещества — около 100 минеральных видов, не более 0,02 % массы земной коры. Все остальные вместе насчитывают около 40 минеральных видов.

# Тип - простые вещества (безанионные соединения)

## Нитриды

<u>Карлсбергит</u>	CrN
<u>Ньерит</u>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
<u>Осборнит</u>	TiN
<u>Роалдит</u>	(Fe,Ni) <sub>4</sub> N
<u>Сидеразот</u>	FeN <sub>x</sub> (x ≈ 0.25-0.5)
<u>Цинсунит</u>	BN

## Силициды

<u>Браунлиит</u>	MnSi
<u>Зюссит</u>	Fe <sub>3</sub> Si
<u>Линьчжиит</u>	FeSi <sub>2</sub>
<u>Лобусаит</u>	Fe <sub>0.84</sub> Si <sub>2</sub>
<u>Мавляновит</u>	Mn <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>
<u>Нагчуит</u>	FeSi
<u>Палладосилицид</u>	Pd <sub>2</sub> Si
<u>Хапкеит</u>	Fe <sub>2</sub> Si
<u>Цангпоит</u>	TiFeSi <sub>2</sub>
<u>Цзифенгит</u>	Fe <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>

# Тип - простые вещества (безанионные соединения)

## Фосфиды

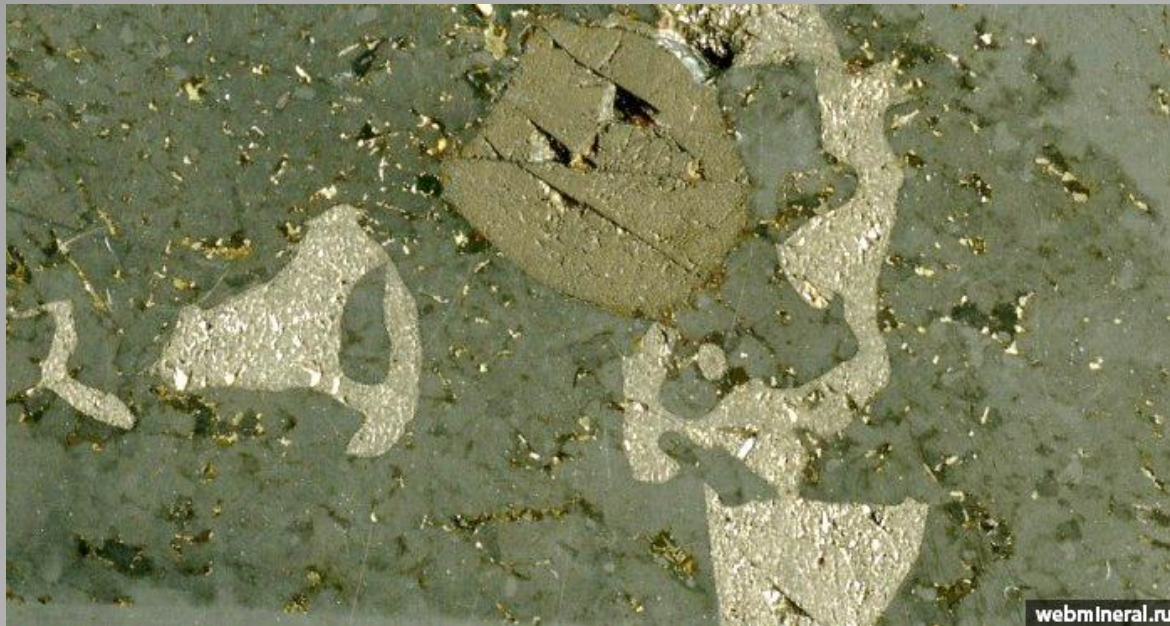
<u>Аллабогданит</u>	$(\text{Fe}, \text{Ni})_2\text{P}$
<u>Андрейивановит</u>	$\text{FeCrP}$
<u>Баррингерит</u>	$(\text{Fe}, \text{Ni})_2\text{P}$
<u>Меллиниит</u>	$(\text{Ni}, \text{Fe})_4\text{P}$
<u>Монипит</u>	$\text{MoNiP}$
<u>Мурашкоит</u>	$\text{FeP}$
<u>Негевит</u>	$\text{NiP}_2$
<u>Никельфосфид</u>	$(\text{Ni}, \text{Fe})_3\text{P}$
<u>Перриит</u>	$(\text{Ni}, \text{Fe})_8(\text{Si}, \text{P})_3$
<u>Трансиорданит</u>	$\text{Ni}_2\text{P}$
<u>Флоренскиит</u>	$\text{FeTiP}$
<u>Халамишит</u>	$\text{Ni}_5\text{P}_4$
<u>Цуктамрурит</u>	$\text{FeP}_2$
<u>Шрейберзит</u>	$(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$

## Карбиды

<u>Исовит</u>	$(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$
<u>Когенит</u>	$(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})_3\text{C}$
<u>Кусонгит</u>	$\text{WC}$
<u>Муассанит</u>	$\text{SiC}$
<u>Ниобокарбид</u>	$(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}$
<u>Танталкарбид</u>	$\text{TaC}$
<u>Тонгбаит</u>	$\text{Cr}_3\text{C}_2$
<u>Хаксонит</u>	$(\text{Fe}, \text{Ni})_{23}\text{C}_6$
<u>Хамрабаевит</u>	$(\text{Ti}, \text{V}, \text{Fe})\text{C}$
<u>Ярлонгит</u>	$(\text{Cr}_4\text{Fe}_4\text{Ni})\text{C}_4$

# Шрейберзит, $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$

Минерал встречается почти во всех железных метеоритах, за исключением бедных никелем; также отмечен в базальтах острова Диско (Гренландия) и в гидротермально замещенной минерализованной древесине в Красном море.



Крупные (размером около 1 см) выделения светлого шрейберзита 1-й генерации и мелкие (около 1 мм) яркие зерна шрейберзита 2-й генерации в сером камасите. В верхней части фото капля желтоватого троилита с включениями пластинчатого темного брецинаита ( $\text{Cr}_3\text{S}_4$ ).

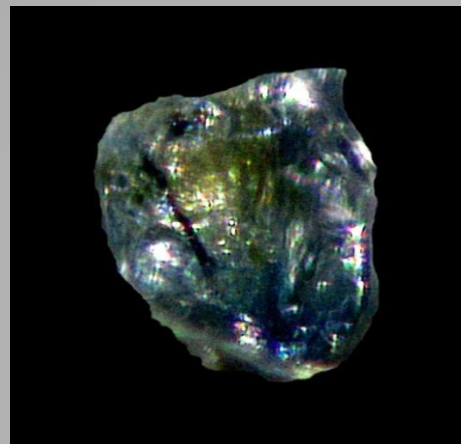
Сихоте-Алиньский метеорит,  
Приморский край, Россия  
Фото Карташова П.М.

# Муассанит, SiC.

Типично большое количество политипов.

Большая часть природного муассанита является 6H и 15R политипами (Shiryaev et al., 2011).

Встречен в каменных метеоритах (в том числе досолнечный муассанит), в импактных структурах (впервые обнаружен Анри Муассаном при исследовании образцов горных пород из метеоритного кратера Canyon Diablo meteorite, шт. Аризона (США), в 1893 году), кимберлитах, лампроитах, установлен в виде включений в алмазах.



Пучеж-Катунский кратер -  
Нижегородская обл., Россия  
Mindat.org



**Moissanite-6H.** Kishon  
river, Haifa District,  
Israel  
Mindat.org



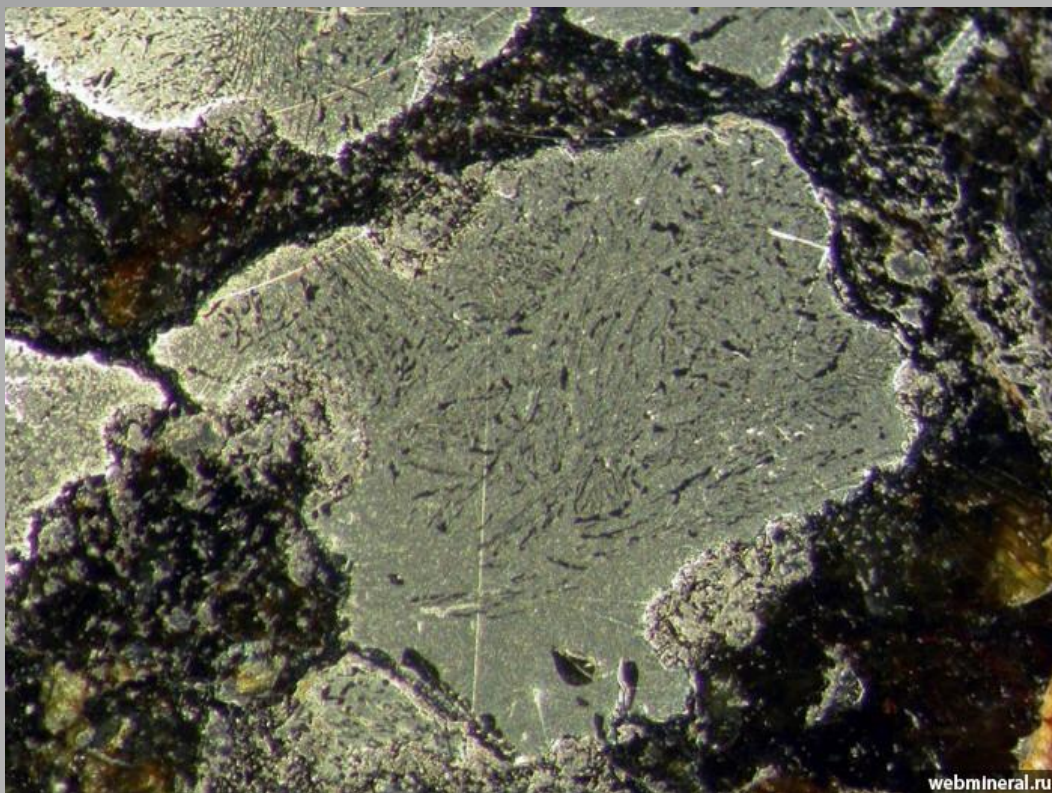
<http://www.gia.edu/gems-gemology/summer-2014-gemnews-moissanite-crystals-israel>



Когенит,  
 $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})_3\text{C}$ , ромб.

Когенит первоначально  
открыт в железных  
метеоритах, позднее  
встречен в базальтоидах  
трапповых формаций,  
кимберлитах,  
ультрабазитах,  
вулканических возгонах.

*Минерал магнитный!*



Мирмекитовые включения когенита  
(темный) в каплях самородного железа  
в базальте.

Хунгтукунский массив, Таймырский  
район, Россия. Фото Карташова П.М.

# Самородные вещества

По составу и кристаллохимическим особенностям выделяют:

- 1) самородные элементы, 2) твердые растворы и 3) интерметаллиды

По характеру химической связи и свойствам выделяют:

- 1) металлы, 2) полуметаллы и 3) неметаллы

*Многие минералы имеют большое практическое значение.*

Самородные металлы - Au, Ag, Cu, Hg, ЭПГ, Fe, Co, Ni и др.

Для металлов типичны ПУ, часто образуют твердые растворы (Au-Ag, Pt-Fe, Os-Ru-Ir, Fe-Ni-Co) и интерметаллические соединения.

Химическая связь металлическая - минералы непрозрачны, проявляют металлический блеск, электропроводность, как правило, относительно мягкие, ковкие. Минералы обычно не имеют спайности (исключение – самородный осмий).



# Минералы Fe-Ni

## Fe- $\alpha$

Самородное железо (феррит) – кубическая объемноцентрированная ячейка. При  $T$  больше  $800^\circ\text{C}$  переход в  $\gamma$ -модификацию. Камасит - разновидность с 0,2 – 8 % Ni).

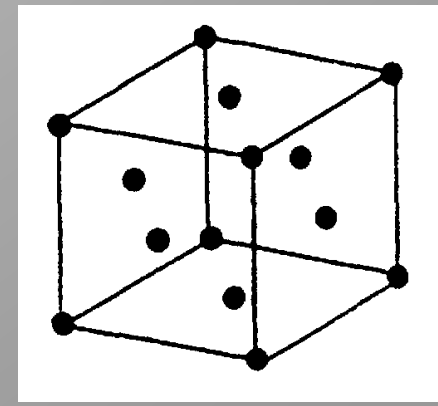
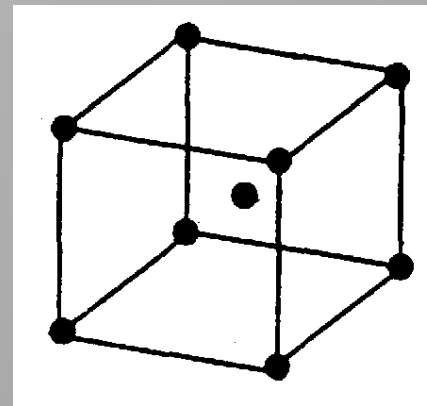


Атомium в Брюсселе

## FeNi – тетратэнит (тетр.)

## Fe-Ni- $\gamma$

Тэнит (до 75% Ni), аваруит ( $\text{Ni}_3\text{Fe}$ ), никель самородный – кубическая гранецентрированная ячейка (структурный тип меди).



# Минералы Fe-Ni

Камасит и тэнит – типичные минералы метеоритов

При  $T$  более  $800^{\circ}\text{C}$  устойчив тэнит (стр. тип меди). При охлаждении происходит распад твердого раствора с выделением камасита и образование характерных структур (видманштеттовы фигуры).



Сеймчан метеорит, Магаданская область.  
<https://webmineral.ru/>



Gibeon meteorite, Gibeon, Hardap  
Region, Namibia  
<https://www.mindat.org/>



# Минералы Fe-Ni

Земное самородное Fe – базальты о-ва Диско, р. Курейка (п-ов Таймыр)

Аваруит и самородный Ni – серпентинизированные УО породы.



webmineral.ru

Агрегаты аваруита и менее никелевых фаз (вплоть до тетраэзнита) с магнетитом, серпентином, андрадитом, клинохлором и др. Josephine Creek placers, Oregon, USA <https://webmineral.ru/>



Железо в габбро-долерите.  
Озёрная г., низовья р. Курейка.



Окатанные самородки аваруита  
South Fork Smith  
River, Klamath  
Mountains, California, USA  
[www.mindat.org/](http://www.mindat.org/)

# Минералы элементов платиновой группы

Общепринятые сокращения:

элементы платиновой группы – ЭПГ (PGE)

минералы платиновой группы – МПГ (PGM)

# Элементы платиновой группы

*Платина* - от исп. platina – серебришко. Была известна в доколумбовой Америке. Привезена в Европу в середине XVI в. Как химический элемент открыта в 1748 г.

В образцах колумбийской шлиховой платины были открыты:

*Палладий* – в честь астероида Паллада. Открыт в 1803.

*Родий* - от греч. rhodon – розовый. Открыт в 1803.

*Осмий* - от греч. osme – запах. Открыт в 1804.

*Иридий* - от лат. iris – радуга. Открыт в 1804.

20-е года XIX – открытие богатейших россыпей Урала. В образцах уральской шлиховой платины в 1844 был открыт *рутений* – от лат. ruthenia – Россия.





# Использование ЭПГ

- Валютные металлы
- Ювелирные сплавы
- Электроника
- Термопары (работают при высоких  $T$ )
- Термостойкие тигли
- Катализаторы - крекинг нефти, *очистка (дожигание) выхлопных газов*

# Позиция ЭПГ в периодической системе элементов

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			I	II	III	IV	V	VI	VII	( )
1	<sup>1</sup> H																	<sup>2</sup> He
2	<sup>3</sup> Li	<sup>4</sup> Be	<sup>5</sup> B											<sup>6</sup> C	<sup>7</sup> N	<sup>8</sup> O	<sup>9</sup> F	<sup>10</sup> Ne
3	<sup>11</sup> Na	<sup>12</sup> Mg	<sup>13</sup> Al											<sup>14</sup> Si	<sup>15</sup> P	<sup>16</sup> S	<sup>17</sup> Cl	<sup>18</sup> Ar
4	<sup>19</sup> K	<sup>20</sup> Ca	<sup>21</sup> Sc	<sup>22</sup> Ti	<sup>23</sup> V	<sup>24</sup> Cr	<sup>25</sup> Mn	<sup>26</sup> Fe	<sup>27</sup> Co	<sup>28</sup> Ni	<sup>29</sup> Cu	<sup>30</sup> Zn	<sup>31</sup> Ga	<sup>32</sup> Ge	<sup>33</sup> As	<sup>34</sup> Se	<sup>35</sup> Br	<sup>36</sup> Kr
5	<sup>37</sup> Rb	<sup>38</sup> Sr	<sup>39</sup> Y	<sup>40</sup> Zr	<sup>41</sup> Nb	<sup>42</sup> Mo	<sup>43</sup> Tc	<sup>44</sup> Ru	<sup>45</sup> Rh	<sup>46</sup> Pd	<sup>47</sup> Ag	<sup>48</sup> Cd	<sup>49</sup> In	<sup>50</sup> Sn	<sup>51</sup> Sb	<sup>52</sup> Te	<sup>53</sup> I	<sup>54</sup> Xe
6	<sup>55</sup> Cs	<sup>56</sup> Ba	<sup>57-71</sup> TR	<sup>72</sup> Hf	<sup>73</sup> Ta	<sup>74</sup> W	<sup>75</sup> Re	<sup>76</sup> Os	<sup>77</sup> Ir	<sup>78</sup> Pt	<sup>79</sup> Au	<sup>80</sup> Hg	<sup>81</sup> Tl	<sup>82</sup> Pb	<sup>83</sup> Bi	<sup>84</sup> Po	<sup>85</sup> At	<sup>86</sup> Rn
7	<sup>87</sup> Fr	<sup>88</sup> Ra	<sup>89</sup> Ac	<sup>90</sup> Th	<sup>91</sup> Pa	<sup>92</sup> U												

1 
2 
3 
4

1 – атмосферные эл., 2 – литофильные эл., 3 – халькофильные эл., 4 – сидерофильные эл.

ЭПГ располагаются в центральной части таблицы Менделеева. В.М. Гольдшмидтом ЭПГ, а также Fe, Co, Ni и др. были отнесены к сидерофильным элементам.

# Особенности поведения ЭПГ в природе

При высоких температурах ЭПГ хорошо растворяются в любых металлических и сульфидных расплавах.

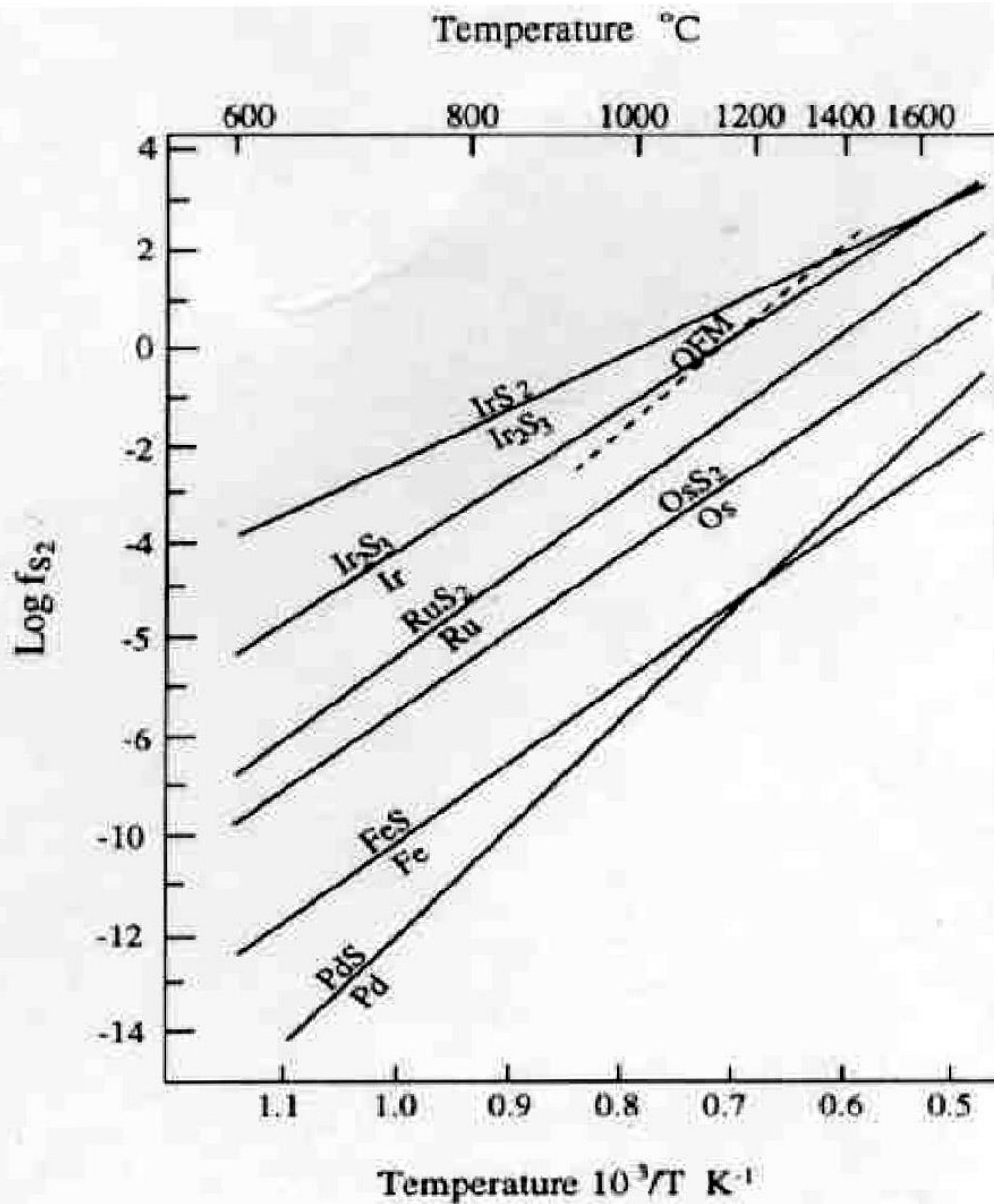
По-видимому, основная масса ЭПГ (и золота) в планетах и метеоритах Солнечной системы связана в высокотемпературных твёрдых растворах (металлическом Fe-Ni и моносульфидных Fe-Ni (Mss) и Fe-Cu-Ni (Iss)).

Mss-совместимые PGE : Ru, Os, Ir, Rh

Iss-совместимые PGE : Pt, Pd (Au, Ag)

**Содержание (в мг/т) металлов группы платины и золота в метеоритах  
(Лазаренков, Таловина, 2001)**

Метеориты и их минеральные фазы	Pt	Pd	Ir	Os	Ru	Au
Углистые хондриты	1020	545	540	514	690	152
Обыкновенные хондриты	1350	770	750	450	780	210
Силикатные хондры	330	40	300	50	270	10
Сульфиды	3070	2700	1500	1170	2300	730
Никель-железная фаза	12800	5310	5440	3590	4630	1510
Хондрит (L) Саратов	1500	480	920	470	880	168
Силикаты	100	20	300	40	300	4
Сульфиды	2800	800	2100	1400	2400	300
Никель-железная фаза	13370	3850	7090	3090	3600	1430
Хондрит (L) Еленовка	1160	690	610	460	730	160
Силикаты	100	20	300	40	200	20
Сульфиды	1600	900	1400	1300	1600	300
Никель-железная фаза	11650	6730	3360	3600	6000	1760
Хондрит (L) Кунашак	1400	1150	730	410	730	292
Силикаты	800	80	300	60	300	2
Сульфиды	4800	6400	1000	800	2900	1500
Никель-железная фаза	13370	5380	5860	4090	4300	1340



ЭПГ проявляют  
сильное сродство к  
сульфидной сере.

*Главные минералы  
ЭПГ – сульфиды*



# Особенности поведения ЭПГ в природе

## Образование МПГ

Для образования МПГ требуется накопление ЭПГ в результате процессов дифференциации вещества. ЭПГ – прекрасный репер магматической дифференциации вещества.

## Миграция ЭПГ

Обычно осуществляется посредством карбонильных (CO) комплексов. В гидротермальных системах Ir, Ru, Os и Rh практически *не подвижны*. Pd и Pt могут мигрировать в виде хлоридных комплексов.

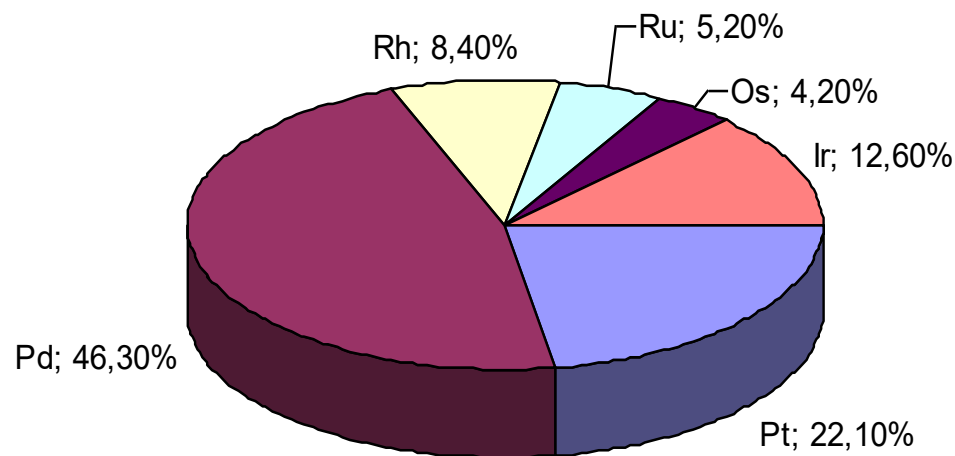
## Изоморфизм в МПГ

Изоферроплатина  $\text{Pt}_3\text{Fe}$   
 $(\text{Pt}, \text{Ir}, \text{Rh}, \text{Os})_3(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Cu})$

Атокит  $\text{Pd}_3\text{Sn}$   
 $(\text{Pd}, \text{Pt}, \text{Au})_3(\text{Sn}, \text{Pb}, \text{Bi}, \text{S}, \text{As})$

# Минералы элементов платиновой группы

Среди более чем 350 минералов благородных металлов на долю минералов элементов платиновой группы (ЭПГ) приходится около 140 минеральных видов, и число их продолжает неуклонно увеличиваться.



2019 г. - 142 минерала ЭПГ.

Из них сам., тв. р-ры и интерметаллиды (Sn,Ge,Pb,Si,In,Hg) – 38 минералов, остальные - сульфиды, арсениды, теллуриды и др.

# Минералы системы Pt-Fe(Cu,Ni)

Cabri, L.J., Feather, C.E. (1975)

- Самородная платина (Pt,Fe) (Pt больше 80 ат. %)
- Изоферроплатина  $\text{Pt}_3\text{Fe}$
- Железистая платина (Pt,Fe) (Pt от 80 до 50 ат. %)
- Тетраферроплатина  $\text{PtFe}$
- Туламинит  $\text{Pt}_2\text{FeCu}$
- Ферроникельплатина  $\text{Pt}_2\text{FeNi}$

*Устаревшие названия – поликсен*

# Минералы системы Pt-Fe(Cu,Ni)

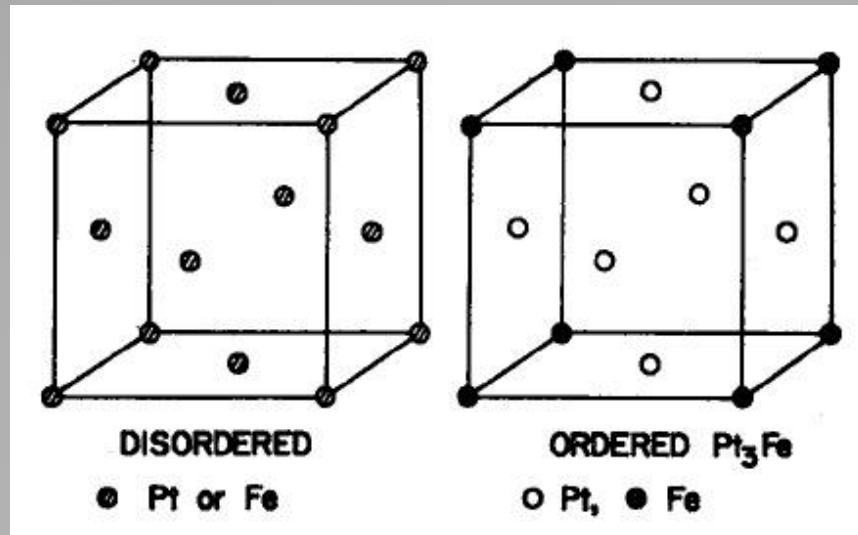
## Структура типа ПКУ

*Самородная платина* (неупорядоченная структура, Pt больше 80 ат. %)

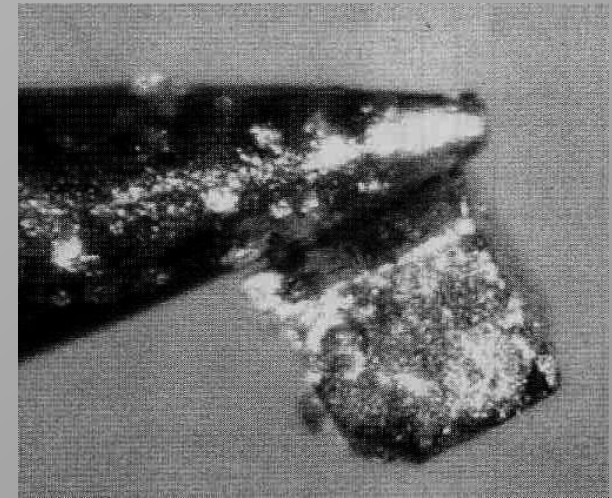
*Изоферроплатина*  $Pt_3Fe$  (упорядоченная структура)

*Тетраферроплатина*  $PtFe$  (упорядоченная структура)

*Железистая платина* (неупорядоченная структура, содержание Pt между 80 и 50 ат. %).



Слева - неупорядоченная структура самородной платины (гранецентрированная решетка), справа - упорядоченная структура изоферроплатины (примитивная кубическая ячейка).



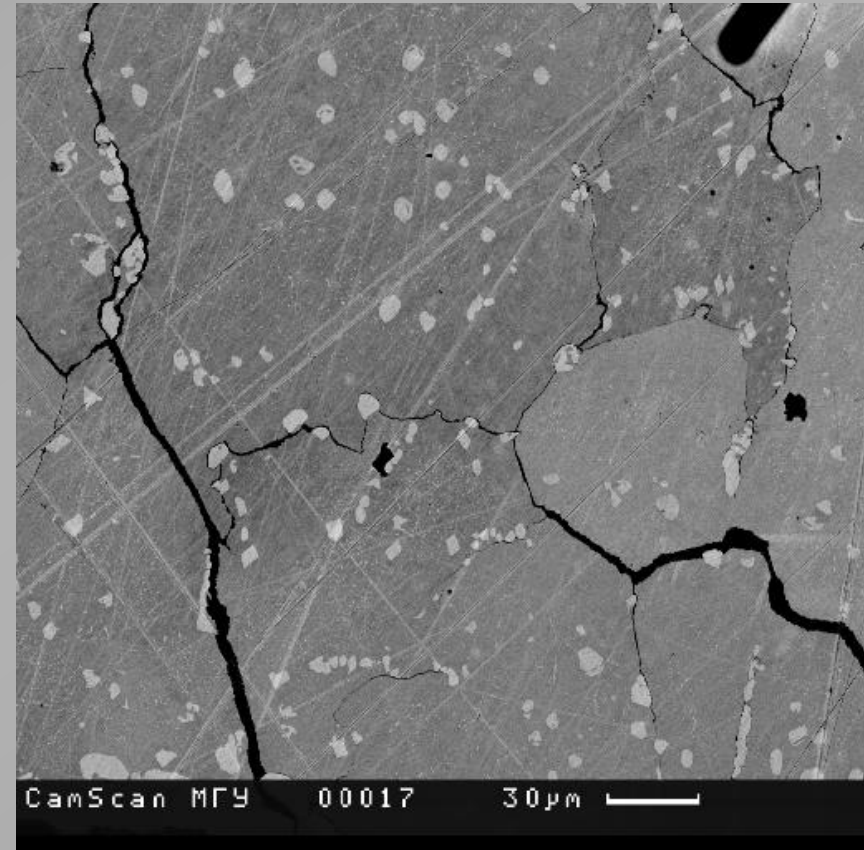
*Железистая платина - магнитна*

# Минералы системы Pt-Fe(Cu,Ni)

Изоферроплатина - обычно высокотемпературные пневматолитовые образования в хромититах среди дунитов.

Типичны примеси Ir,Os,Rh -  $(\text{Pt}_{\text{Ir,Os,Rh}})_3\text{Fe}$

Характерны структуры распада высокотемпературного твёрдого раствора.



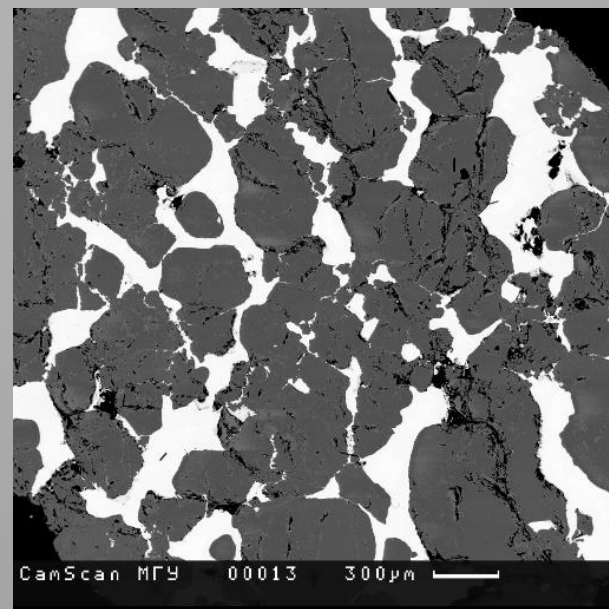
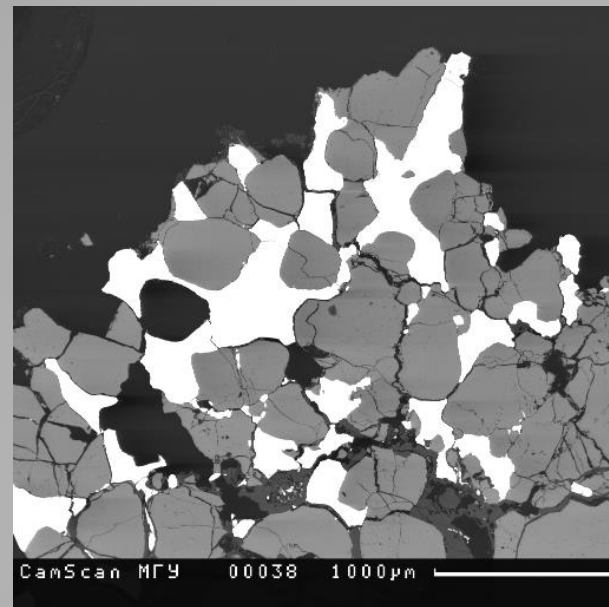
Вкрапления самородного иридия в  
изоферроплатине - структуры распада  
высокотемпературного  
твёрдого раствора



# Минералы системы Pt- Fe(Cu,Ni)

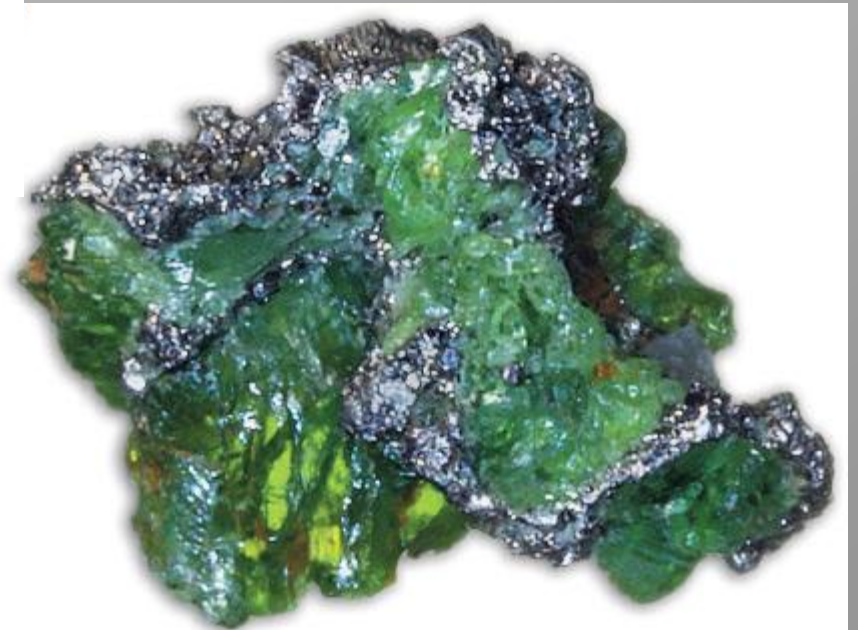


Изоферроплатина в хромите. Вересовоборский м-в  
Качканарского интрузива. Минералогический Музея  
им. А.Е. Ферсмана РАН. <https://webmineral.ru/>



Изоферроплатина в хромите.  
Гальмознанский м-в, Корякия

# Минералы системы Pt-Fe (Cu,Ni)



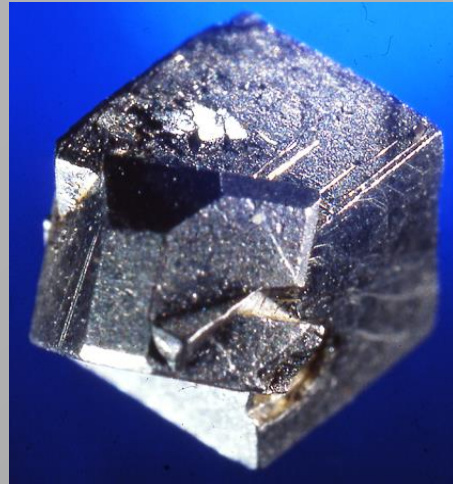
Сростки минералов платины (главным образом, изоферроплатины) с диопсидом. Кондерский м-в, Хабаровский край (Мочалов, 2019).



# Минералы системы Pt-Fe (Cu,Ni)



Кондёрский массив. Алданский щит



Плёнки золота

# Определение возраста минералов Pt

Природная платина - смесь 6 изотопов:  $^{190}\text{Pt}$ ,  $^{192}\text{Pt}$ ,  $^{194}\text{Pt}$ ,  $^{195}\text{Pt}$ ,  $^{196}\text{Pt}$  и  $^{198}\text{Pt}$ . Преобладают  $^{195}\text{Pt}$  (33,8%) и  $^{194}\text{Pt}$  (32,9%), наименее распространён  $^{190}\text{Pt}$  (0,01%), обладающий слабой  $\alpha$ -радиоактивностью ( $T_{1/2}$  - 6,9 x  $10^{11}$  лет).

Ю.А. Шуколюковым с коллегами ИГГД РАН разработан новый  **$^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$**  метод прямого изотопного датирования минералов платины.

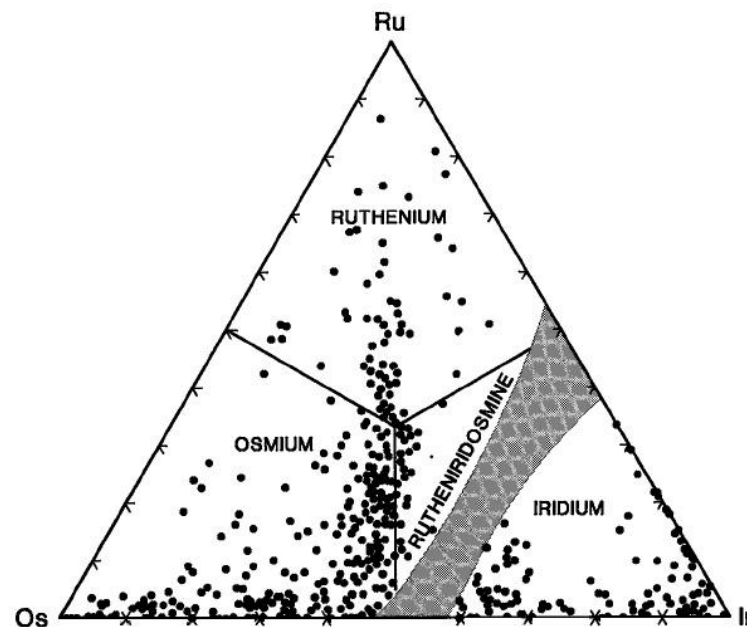
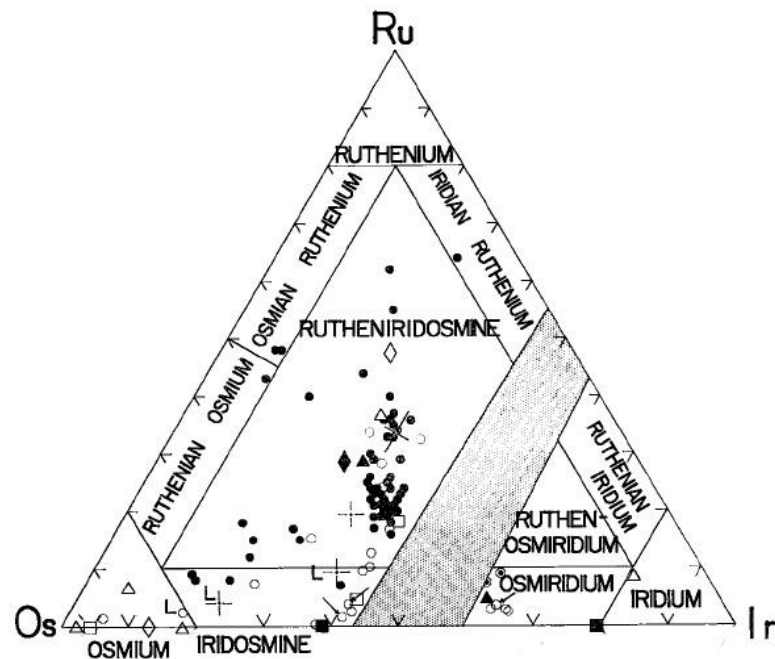
Метод успешно применен для датирования изоферроплатины ( $\text{Pt}_3\text{Fe}$ ), тетраферроплатины ( $\text{PtFe}$ ), самородной платины ( $\text{Pt,Fe}$ ), а также сперрилита ( $\text{PtAs}_2$ ), звягинцевита ( $\text{Pd}_3\text{Pb}$ ).

# Минералы системы Os-Ru-Ir

Структура самородных Os  
и Ru – ПГУ, Ir – ПКУ

*Иридий (платинистый,  
осмистый) - максимальная  
плотность (22-22,7 г/см<sup>3</sup>)*

*Осмий - твердый (6-7) и  
хрупкий, совершенная  
спайность по (0001)*





# Плотность минералов

**Плотность** – это величина, выражающая отношение массы вещества к его объему ( $\text{г/см}^3$ ). Нередко используется термин **удельный вес** – это *относительная плотность*, выражающая отношение веса вещества определенного объема к весу такого же объема воды при  $4^0\text{C}$ . Это – безразмерная величина.

Плотность - важнейшим свойством минералов, которое зависит от **химического состава** (атомный вес элементов, валентность ионов) и **характера кристаллической структуры** (плотность упаковки, размеров ионных радиусов в ионных кристаллах, наличие дефектов в структуре и т.д.).

В полиморфных модификациях с увеличением плотности упаковки, с увеличением КЧ элемента возрастают значения плотности (графит  $2,2 \text{ г/см}^3$  - алмаз  $3,5 \text{ г/см}^3$ ; кальцит  $2,6\text{-}2,8 \text{ г/см}^3$  - арагонит -  $2,9 - 3,0 \text{ г/см}^3$ ).

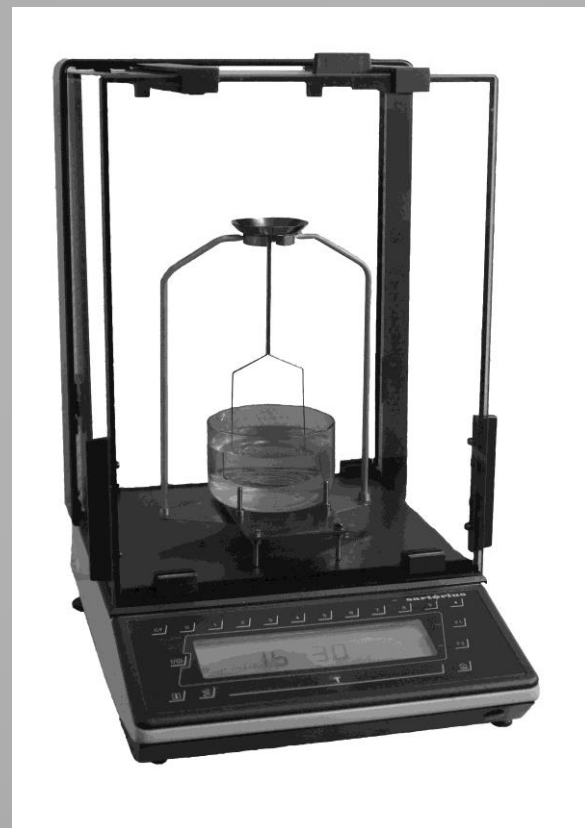
Плотность минералов переменного состава меняется по принципу аддитивности свойств для изоморфных смесей (в ряду Fo-Fa плотность увеличивается от  $3,2$  до  $4,35 \text{ г/см}^3$ ; в ряду Ab-An от  $2,61$  до  $2,75 \text{ г/см}^3$ ). При гетеровалентных замещениях внедрения или замещения плотность минералов меняется соответственно количеству внедренных атомов или вакансий.

*Плотность играет важную роль при сепарации минералов в процессах обогащения руд.*

# Плотность минералов

**Методы определения плотности** минералов подразделяются на две основные группы: расчетные и экспериментальные. Среди них отметим следующие методы:

- 1) расчета плотности на основе данных рентгеноструктурного анализа;
- 2) объемно-метрический (метод Василевского);
- 3) объемно-весовой;
- 4) пикнометрический;
- 5) тяжелых жидкостей;
- 6) гидростатического взвешивания.



Весы фирмы Sartorius с гидростатической приставкой.

$$d = \frac{P_B}{P_B - P_J} \cdot d_J \text{ (г/см}^3\text{)}$$

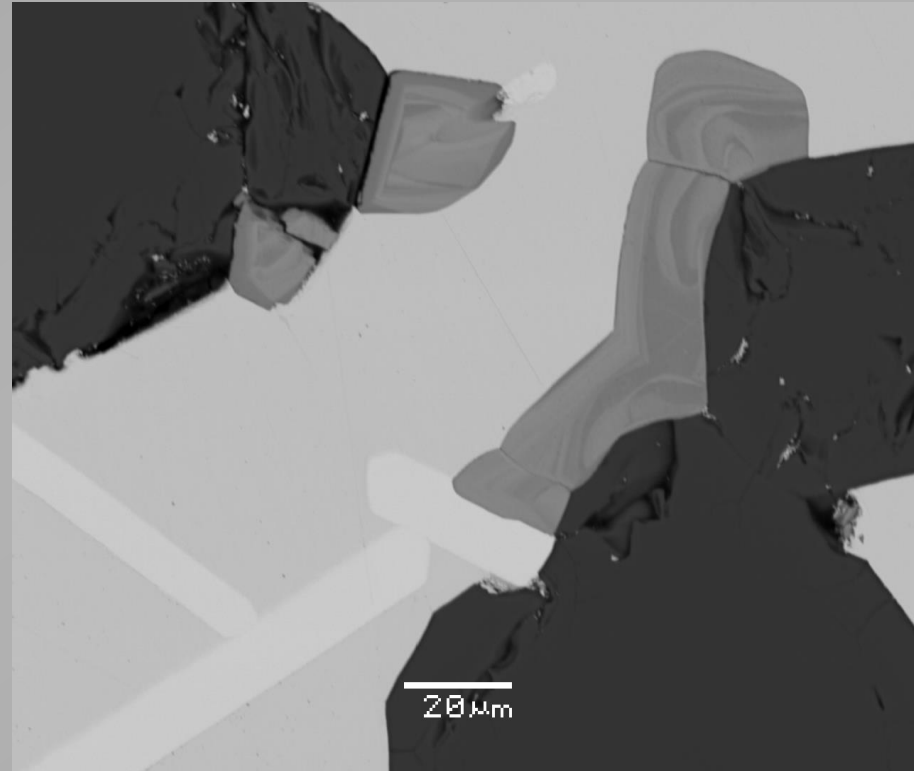
# Плотность минералов

Легкие (d менее 2,9г/см <sup>3</sup> )	Тяжелые (d от 2,9 до 6,0 г/см <sup>3</sup> )	Очень тяжелые (d более 6,0 г/см <sup>3</sup> )
Лед 0,9	Биотит 2,8-3,2	Шеелит 6,1
Бишофит – 1,5-1,6	Флюорит 3,1	Касситерит 6,8
Карналлит – 1,6	Алмаз 3,5	Вольфрамит 7,0
Сера 2,0	Топаз 3,5	Галенит 7,4
Графит 2,1	Корунд 4,0	Киноварь 8,1
Гипс 2,3	Барит 4,5	Медь 8,9
Полевые шпаты 2,5-2,7	Пирротин 4,6	Серебро 10,5
Берилл 2,6-2,9	Пирит 5,0	Золото 15,0-19,3
Кальцит 2,7	Магнетит 5,2	Платина 14-19
Кварц 2,7	Гематит 5,3	Иридий 19,3-22,7

# Минералы системы Os-Ru-Ir

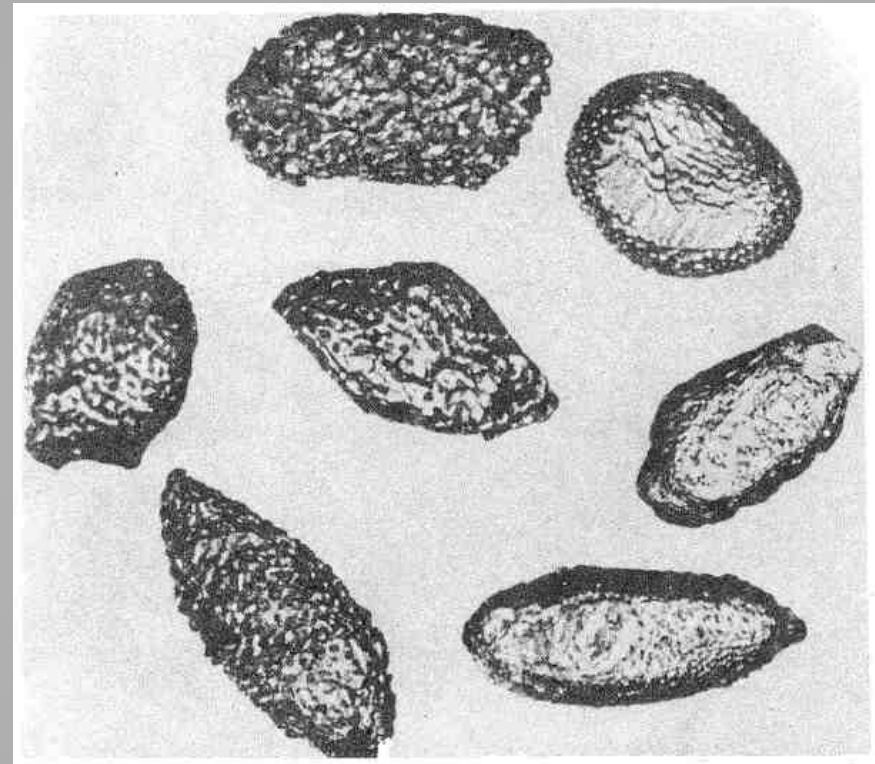
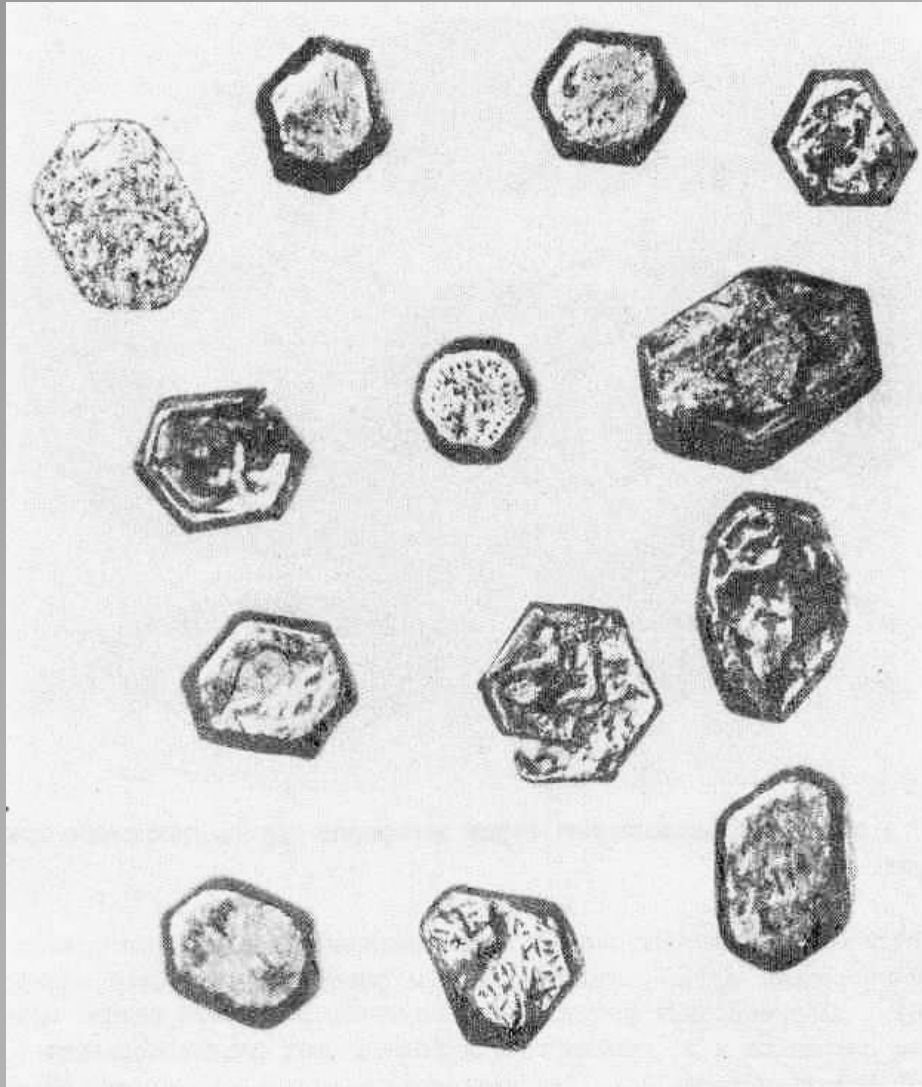


Самородный иридий в  
изоферроплатине, Чадский м-в.  
Фото в отраженных электронах.



Самородный осмий с  
ассоциации с зональным  
лауритом, изоферроплатиной и  
хромшпинелидом, Чадский м-в.  
Фото в отраженных электронах.

# Минералы системы Os-Ru-Ir



Самородный осмий  
Россыпи Среднего Урала

# Теллуриды, висмутиды, стибниды, плюмбиды, станниды ЭПГ

*Инсизваит*  $\text{PtBi}_2$ , *геверсит*  $\text{PtSb}_2$ , *масловит*  $\text{PtBiTe}$  –  
кубические, надгруппа пирита

*Мончеит*  $\text{Pt}(\text{Te}, \text{Bi})_2$ , *меренскит*  $\text{Pd}(\text{Te}, \text{Bi})_2$  –  
тригональные твердые растворы

*Котульскит*  $\text{PdTe}$ , *садбериит*  $\text{PdSb}$ , *соболевскит*  
 $\text{PdBi}$ , *нигглиит*  $\text{PtSn}$  – гексагональные, группа  
никелина

*Рустенбургит*  $\text{Pt}_3\text{Sn}$ , *атокит*  $\text{Pd}_3\text{Sn}$ , *звягинцевит*  
 $\text{Pd}_3\text{Pb}$  – кубические

*Паоловит*  $\text{Pd}_2\text{Sn}$  – ромбический

# Халькогениды МПГ

*лаурит*  $\text{RuS}_2$  – *эрлихманит*  $\text{OsS}_2$  (кубические, группа пирита)

*кашинит*  $\text{Ir}_2\text{S}_3$  - *боуит*  $\text{Rh}_2\text{S}_3$  (ромбические)

*куперит*  $\text{PtS}$  – *брэггит*  $(\text{Pt},\text{Pd})\text{S}$  – *высоцкит*  $\text{PdS}$  (тетрагональные)

Продукты кристаллизации из силикатных ультраосновных–основных расплавов; реже встречаются в гидротермальных и метаморфогенно-гидротермальных образованиях.

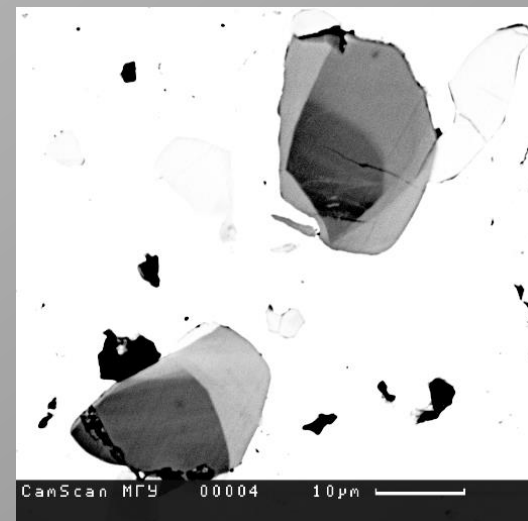
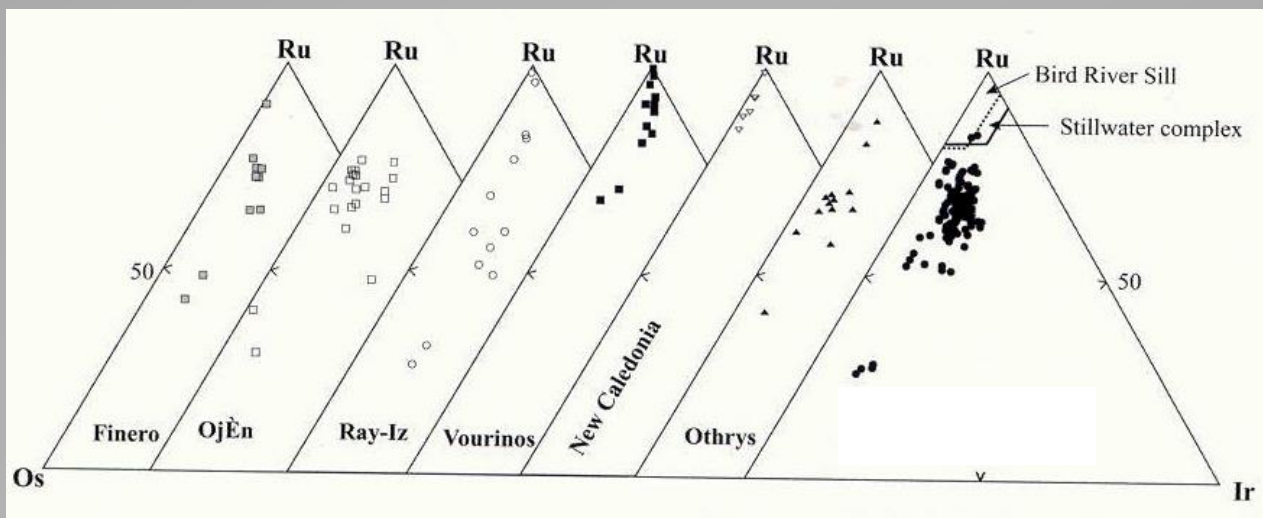
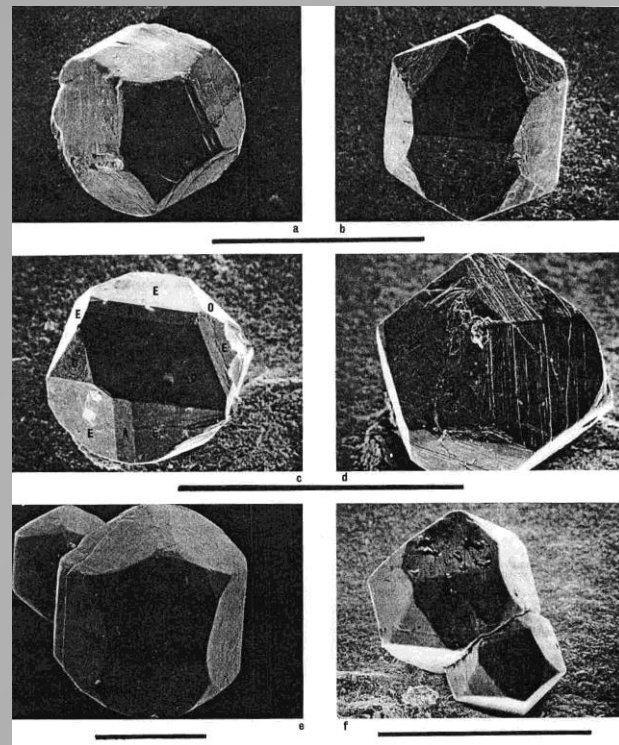


# Халькогениды МПГ

Ряд лаурит ( $\text{RuS}_2$ ) – эрлихманит ( $\text{OsS}_2$ )

Распространенные минералы ультраосновных пород и хромититов, Т кристаллизации до  $1400^\circ\text{C}$ .

Характерна зональность  $\text{Ru} \rightarrow \text{Os}$



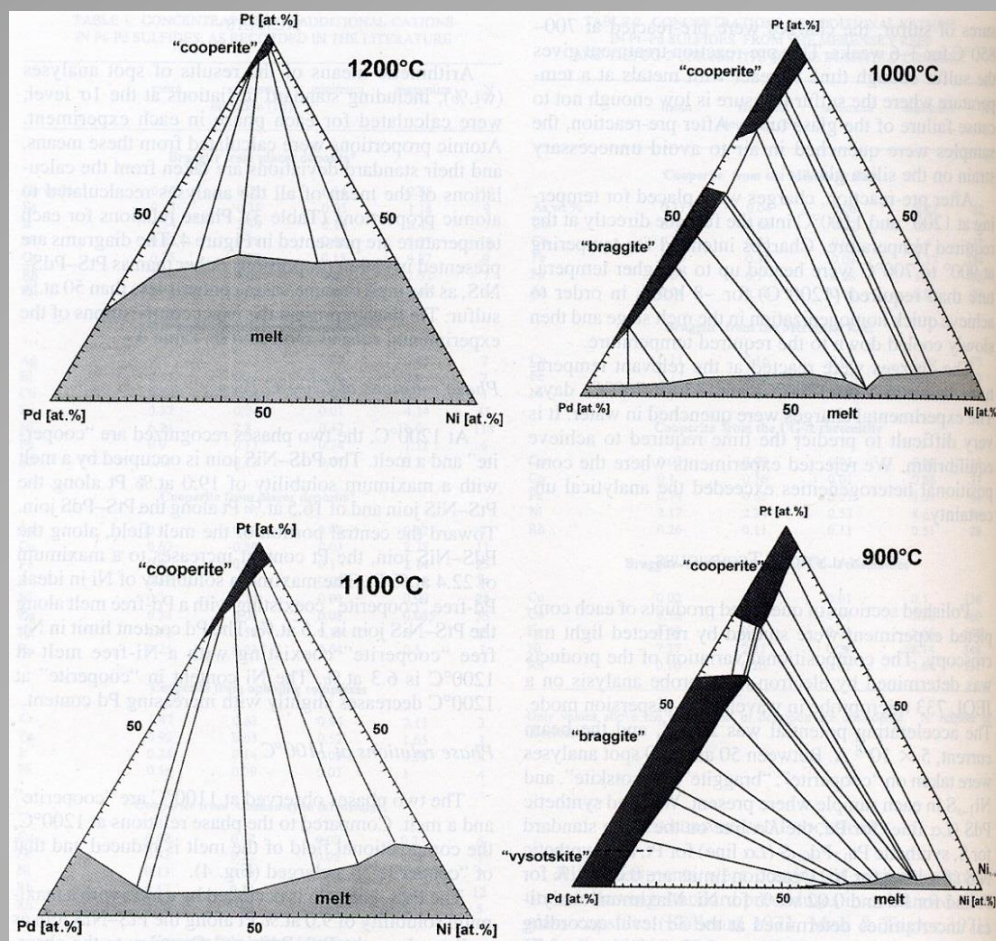
Зональные кристаллы лаурита-эрлихманита в изоферроплатине

# Халькогениды МПГ

Куперит  $\text{PtS}$  – брэггит  
( $\text{Pt}, \text{Pd}, \text{Ni}$ ) $\text{S}$  – висоцкит  
( $\text{Pd}, \text{Ni}, \text{Pt}$ ) $\text{S}$

Куперит – начало  
кристаллизации  $1200^\circ\text{C}$ ,  
брэггит –  $1000^\circ\text{C}$ , висоцкит  
–  $900^\circ\text{C}$ .

Бреггит и куперит в пентландите,  
Бушвельд, ЮАР





# Халькогениды МПГ

*Сперрилит*  $\text{PtAs}_2$  (группа пирита)

*Платарсит*  $\text{PtAsS}$ , *ирарсит*  $\text{IrAsS}$ , *холлингвортит*  $\text{RhAsS}$  (группа кобальтина)

*Осарсит*  $\text{OsAsS}$ , *руарсит*  $\text{RuAsS}$  (группа арсенопирита)



Кубооктаэдрические кристаллы  
сперрилит, Норильск

# Типы месторождений и проявлений МПГ

- 1) Расслоенные и дифференцированные основные-ультраосновные комплексы - главные магматогенные Pt-Pd месторождения*
- 2) Коматииты
- 3) Зональные дунит-клинопироксенит-габбровые м-вы*
- 4) Щелочно-ультраосновные массивы*
- 5) Офиолитовые комплексы*
- 6) Гидротермальные золото-молибден-меднопорфировые м-ния
- 7) Телетермальные м-ния Au
- 8) Россыпи*

# Расслоенные и дифференцированные основные-ультраосновные комплексы



## *Бушвельдский расслоенный комплекс*

350 x 450 км при мощности до 10 км.  
Объем около 500000 км<sup>3</sup> – самый  
крупный базит-гипербазитовый  
комплекс.

Приблизительно 80 % мировых запасов  
Pt и около 50 % Cr, Ti, V

UG-1 и UG-2 – хромитовые горизонты с повышенными  
концентрациями Ir, Os, Ru

Риф Меренского – Pt-Pd малосульфидные руды.

Главные рудные минералы - брэггит (Pt,Pd,Ni)S, куперит PtS,  
высоцкит (Pd,Pt,Ni)S – продукты позднемагматической  
кристаллизации из высокотемпературных «сухих» силикатных  
расплавов при умеренной  $fS_2$  (Спиридонов, 2019).

# Расслоенные и дифференцированные основные-ультраосновные комплексы

## Месторождения Норильского рудного узла

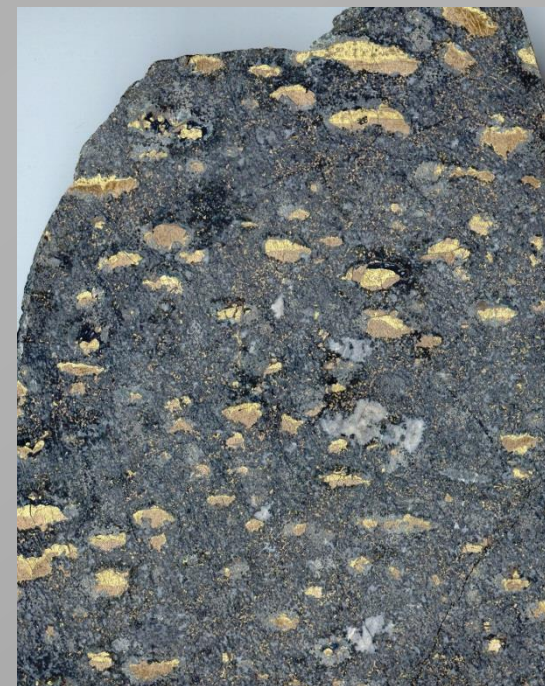
(Талнахское и Норильское рудные поля)

Комплексные сульфидные руды Ni, Cu, Co, ЭПГ, Au, Ag ...

Залежи магматических сульфидных руд мощностью около 25 м (максимум до 75 м!)

### 2 стадии формирования:

1. Захват ЭПГ сульфидными твердыми растворами
2. Флюидная переработка ЭПГ-содержащих сульфидных твердых растворов и кристаллизация интерметаллидов Pd и Pt в резко восстановительных условиях при  $T \approx 450 - 350$  °C в условиях очень низкой  $fS_2$





# Месторождения Норильского рудного узла

Главные минералы ЭПГ руд месторождений Норильского рудного узла:

*тетраферроплатина*  $\text{Pt}(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Cu})$

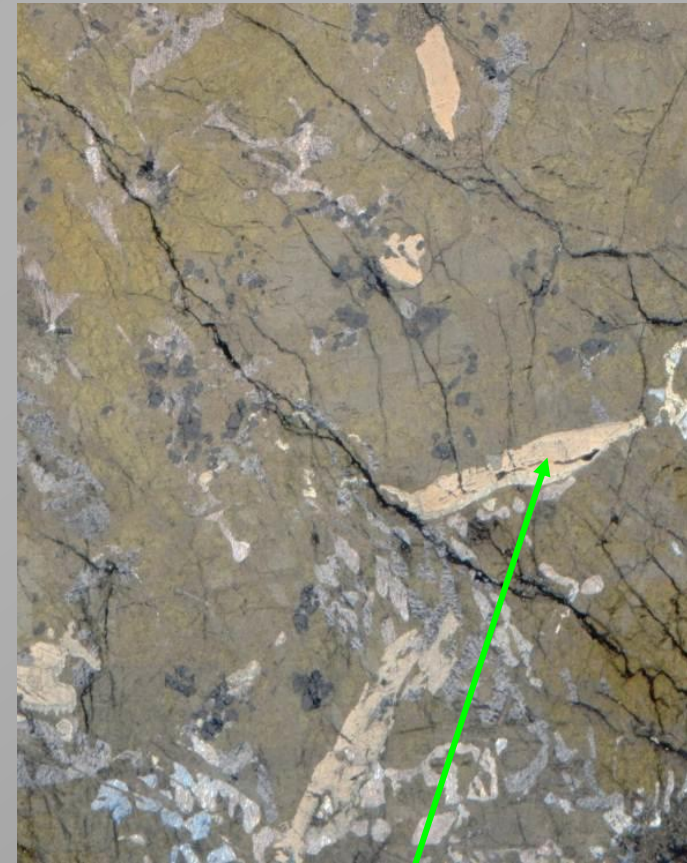
*рустенбургит*  $(\text{Pt}, \text{Pd})_3\text{Sn}$

*инсизваит*  $\text{PtBi}_2$  - *геверсит*  $\text{PtSb}_2$

*паоловит*  $\text{Pd}_2(\text{Sn}, \text{Sb})$

*атокит*  $(\text{Pd}, \text{Pt})_3\text{Sn}$

*соболевскит*  $\text{Pd}(\text{Bi}, \text{Pb}, \text{Te})$



Метакристаллы (до 16 мм)  
паоловита –  $\text{Pd}_2(\text{Sn}, \text{Sb})$



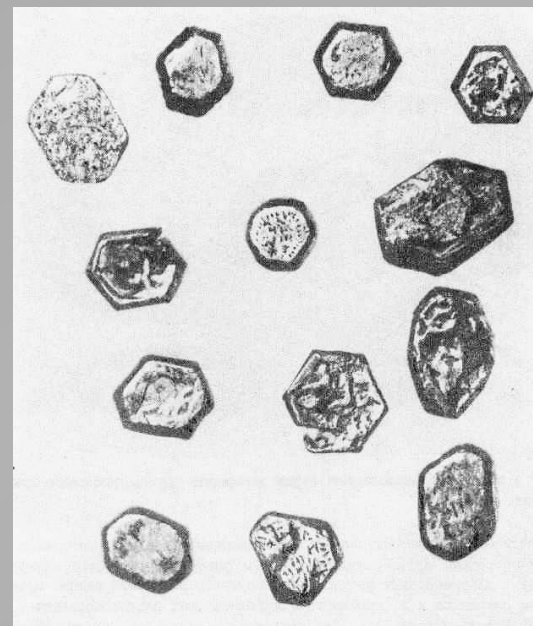
# Россыпные месторождения ЭПГ

*Офиолитовые комплексы –  
минералы системы Os-Ru-Ir*

*Зональные массивы платформ и  
складчатых областей –*

самородная Pt, изоферроплатина,  
тетраферроплатина, туламинит,  
сульфиды (лаурит-эрлихманит,  
кашинит, боуит и др.),  
сульфоарсениды (ирарсит,  
холлингвортит и др.) и арсениды  
(сперрилит) ЭПГ.

Самородок платины «Уральский великан» - самый  
крупный в мире из сохранившихся.  
Размер 12,7\*12,4\*9,9; масса 7860 г.



Самородный осмий  
Россыпи Среднего Урала



# Россыпные месторождения ЭПГ

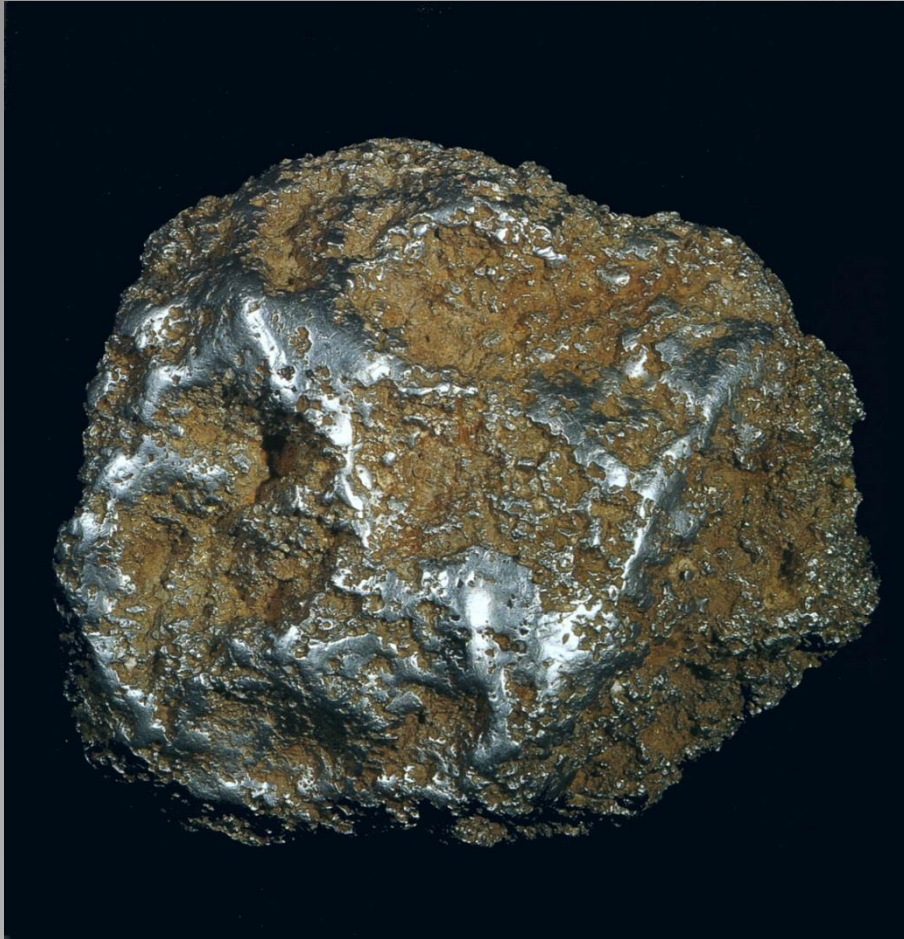
*Крупные магматогенные месторождения ЭПГ, связанные с расслоенными комплексами не являются россыпеобразующими!*

В коренных породах дунит-клинопироксенит-габбровых, щелочно-ультраосновных и офиолитовых массивов промышленных скоплений платиноиды, как правило, не образуют, но при этом данные массивы являются коренными источниками крупных и уникальных россыпных месторождений платиноидов.

Самыми знаменитыми россыпными месторождениями ЭПГ, являются россыпи Урала (ныне почти выработанные), Алдана, Корякии, Аляски, Канады, Колумбии.



# Россыпные месторождения ЭПГ



Самородок платины «Демидовский» - первый (1824 г) крупный самородок Урала. Размер 10,7\*9,4\*6,0; масса 4314 г. Фото Лейбова М.Б.



Самородок платины «Уральский великан» - самый крупный в мире из сохранившихся. Размер 12,7\*12,4\*9,9; масса 7860 г. Фото Лейбова М.Б.



# Россыпные месторождения ЭПГ



Окатанные самородки  
платины из россыпи р.  
Кондер (добыча 1990-х  
годов).

<https://webmineral.ru/>



# Россыпные месторождения ЭПГ



Сросток кубических кристаллов  
изоферроплатины, Кондер



Самородное золото на кубическом  
кристалле изоферроплатины, Кондер