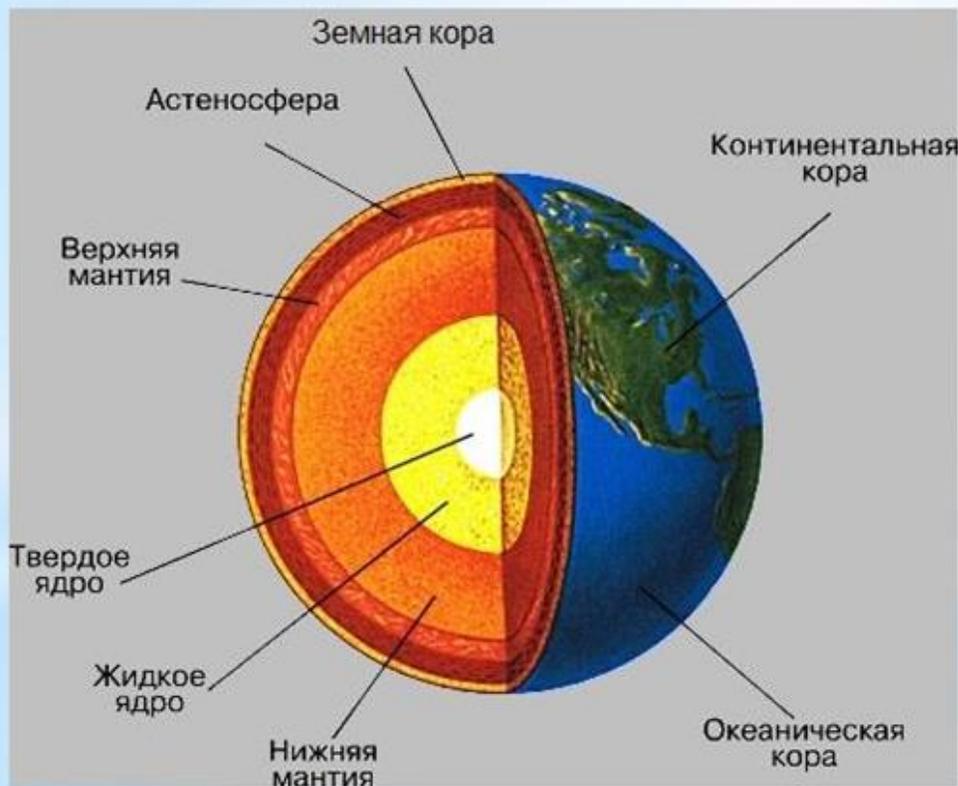


# Тема 5. Состав Земной коры.

\* В строении Земли выделяют три основных слоя: земную кору, мантию и ядро.

\* Земная кора в масштабе Земли это тонкая пленка её средняя мощность около 35 км.



Задача определения химического состава Земной коры была впервые поставлена Ф.Кларком в конце XIX века. Первая таблица состава Земной коры опубликована в 1889 г. (Clarke F., Data of Geochemistry).

Подход Кларка к решению этой задачи был прост – средний состав Земной коры определен как среднее арифметическое по всем анализам, выполненным в Геологической службе США.

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_i^n C_i$$

где  $C_i$  – концентрация элемента в  $i$ -том образце выборки ( $n$ )

Позже выявились недостатки такого подхода. В нем были сделаны три неявных в то время допущения, очевидные сейчас.

1. (психологическое) – допущение случайного характера опробования. Сейчас ясно, что в выборке Ф.Кларка присутствовало завышенное количество образцов редких пород (ультраосновных и щелочных).
2. Допускалось, что территория США представительна для всей поверхности Земли (опробована была континентальная кора).
3. Допускалось, что состав коры не меняется с глубиной (это не отвечает истинной картине).

Содержания макроэлементов в верхней части континентальной коры Земли (%)  
(сравнение составов, полученных разными методами)

Компонент	Clarke, 1889	Виноградов, 1962	Taylor, McLennan, 1985	Ронов и др., 1990	Rudnick, Gao, 2013
Метод	<i>Подход Кларка</i>	<i>Подход Полдерваарта (Б:Г=2:1)</i>	<i>Подход Полдерваарта (Б:Г=1:1)</i>	<i>Подход Ронова</i>	<i>Подход Ронова</i>
SiO <sub>2</sub>	60.2	63.4	66.0	65.3	66.62
TiO <sub>2</sub>	0.57	0.7	0.50	0.55	0.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.27	15.3	15.2	15.3	15.40
FeO <sub>tot</sub>	7.26	6.2	4.5	5.5	5.04
MnO	0.10	0.1	0.08	0.09	0.10
MgO	4.59	3.1	2.2	2.9	2.48
CaO	5.45	4.6	4.2	4.2	3.59
Na <sub>2</sub> O	3.29	3.4	3.9	3.1	3.27
K <sub>2</sub> O	2.99	3.0	3.4	2.9	2.80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23	0.2		0.14	0.15

Более совершенный путь определения состава Земной коры придуман А.Полдерваартом (1955). Он предложил использовать данные по распространенности горных пород в Земной коре (решение задачи представительности выборки).

$$\bar{C} = \sum_j \left( \delta_j \cdot \frac{1}{n_j} \sum_i^{n_j} C_{ij} \right)$$

где  $\delta_j$  – доля (распространенность)  $j$ -того типа пород,

$C_{ij}$  – концентрация в  $i$ -том образце выборки ( $n_j$ ) для  $j$ -того типа пород

Подход Полдерваарта позволил учесть реальное разнообразие состава Земной коры. Вместе с тем, он потребовал существенно более полной информации о геологическом строении Земной коры, чем имелось в середине XX века. В работе Полдерваарта было вынужденно использовано много экспертных оценок, и работа ограничивалась только макроэлементами.

Подход Полдерваарта в редуцированном виде (при малом количестве групп пород и экспертной оценке их доли), но распространенный на все элементы, был использован многими авторами (Виноградов, 1962, Taylor, McLennan, 1985 и др.). При этом стало ясно, что без систематического исследования геохимической структуры Земной коры повысить надежность оценки ее состава невозможно.

Содержания макроэлементов в верхней части континентальной коры Земли (%)  
(сравнение составов, полученных разными методами)

Компонент	Clarke, 1889	Виноградов, 1962	Taylor, McLennan, 1985	Ронов и др., 1990	Rudnick, Gao, 2013
<i>Метод</i>	<i>Подход Кларка</i>	<i>Подход Полдерваарта (Б:Г=2:1)</i>	<i>Подход Полдерваарта (Б:Г=1:1)</i>	<i>Подход Ронова</i>	<i>Подход Ронова</i>
SiO <sub>2</sub>	60.2	63.4	66.0	65.3	66.62
TiO <sub>2</sub>	0.57	0.7	0.50	0.55	0.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.27	15.3	15.2	15.3	15.40
FeO <sub>tot</sub>	7.26	6.2	4.5	5.5	5.04
MnO	0.10	0.1	0.08	0.09	0.10
MgO	4.59	3.1	2.2	2.9	2.48
CaO	5.45	4.6	4.2	4.2	3.59
Na <sub>2</sub> O	3.29	3.4	3.9	3.1	3.27
K <sub>2</sub> O	2.99	3.0	3.4	2.9	2.80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23	0.2		0.14	0.15

Систематические исследования по проблеме определения состава Земной коры были выполнены в ГЕОХИ АН СССР группой исследователей под руководством акад. А.Б.Ронова. В этих исследованиях использовалась модель Земной коры, в которой были выделены три принципиальных блока – океаническая, переходная и континентальная кора. Для каждого типа коры были отдельно определены распространенности типов горных пород и их составы (т.е., например, учитывалось, что базальты океанической коры, островодужные и континентальные различаются по составу). В модели учитывалось, что пропорции пород в строении горных сооружений, плит и щитов континентального блока различны. В результате, этот подход позволял наиболее полно отразить геохимическую структуру Земной коры с максимальным использованием имевшейся геолого-геофизической информации.

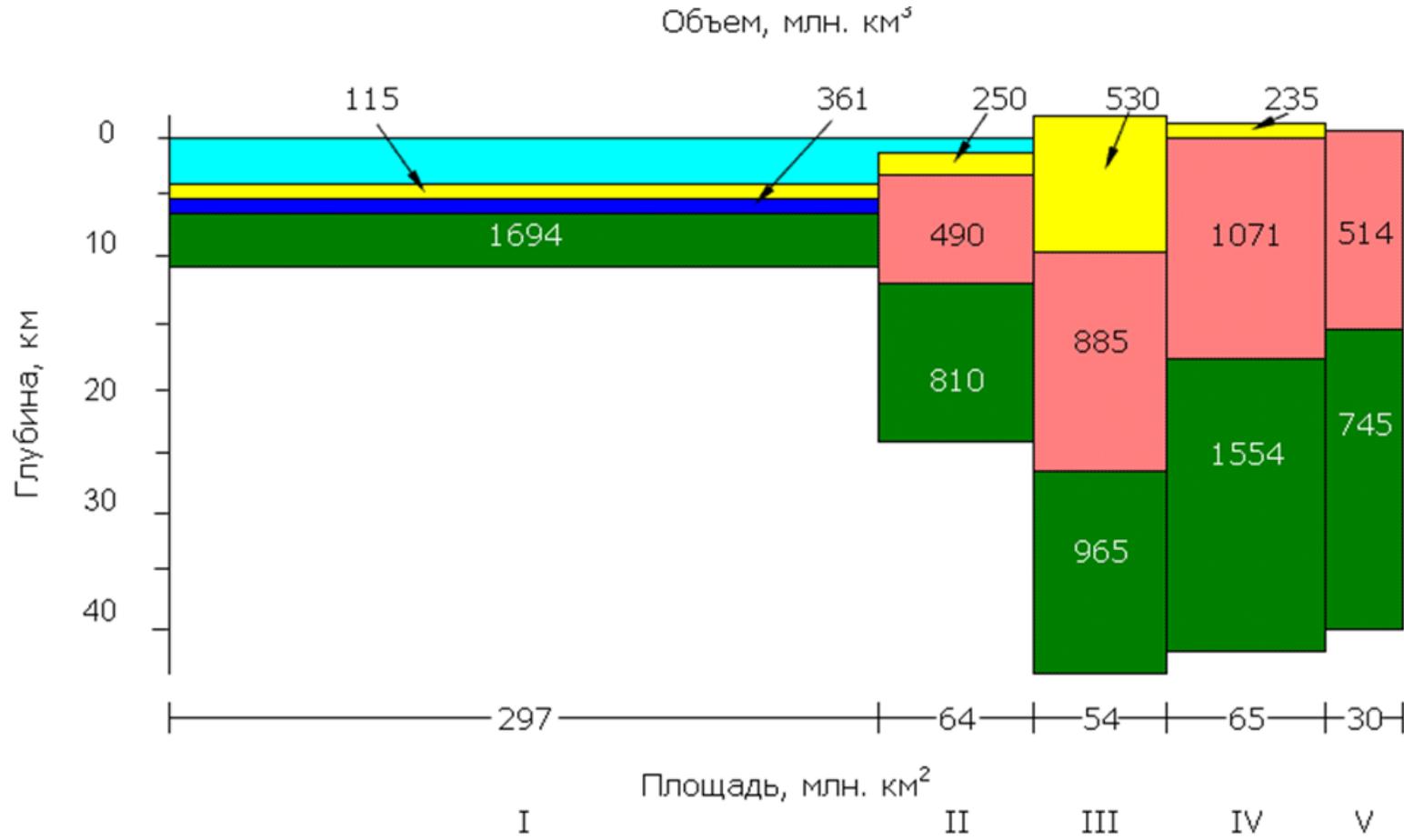
$$\bar{C} = \sum_k \left( \delta_k \cdot \sum_j \left( \delta_{jk} \cdot \left( \frac{1}{n_{jk}} \sum_i^{n_{jk}} C_{ijk} \right) \right) \right)$$

где  $\delta_k$  – массовая доля  $k$ -того типа Земной коры,

$\delta_{jk}$  – доля  $j$ -того типа пород в  $k$ -том типе коры,

$C_{ij}$  – концентрация в  $i$ -том образце выборки ( $n_{jk}$ ) для  $j$ -того типа пород в  $k$ -том типе Земной коры

# Модель Земной коры, использованная группой А.Б.Ронова (По А.А.Ярошевскому, 2004)



Типы коры:

I – океаническая;

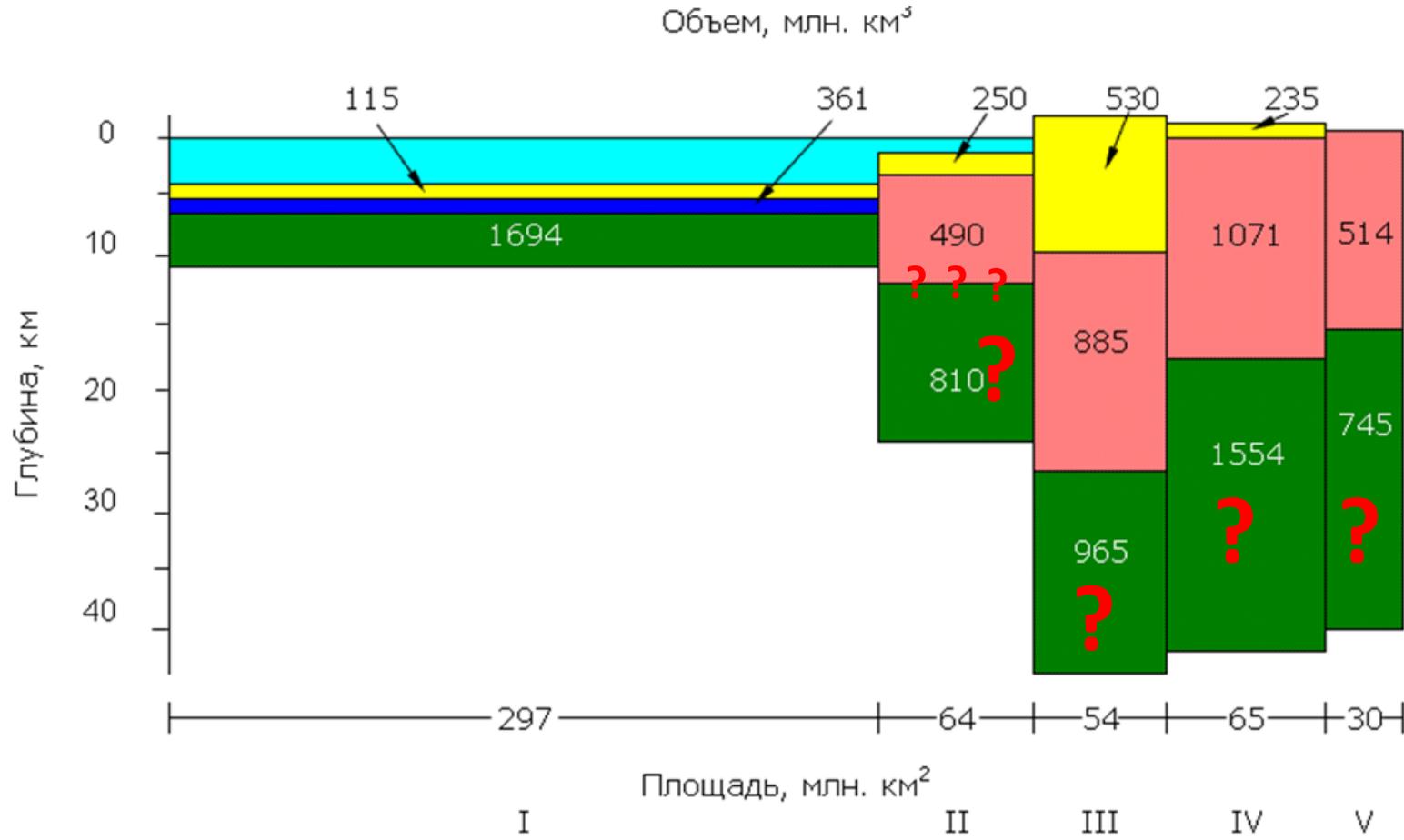
II – субконтинентальная;

III-V – подтипы континентальной коры:

- рифейские и послерифейские геосинклинали, плиты, щиты с дорифейским основанием.

Цвета́ми показаны комплексы пород: желтый – осадочная оболочка, розовый – “гранитная” оболочка, зеленый - “базальтовая” оболочка.

# Проблемы в модели Земной коры, использованная группой А.Б.Ронова



Типы коры:

I – океаническая;

II – субконтинентальная;

III-V – подтипы континентальной коры:

- рифейские и послерифейские геосинклинали, плиты, щиты с дорифейским основанием.

Цвета́ми показаны комплексы пород: желтый – осадочная оболочка, розовый – “гранитная” оболочка, зеленый - “базальтовая” оболочка.

Распространенность типов горных пород в Земной коре (суммарно)  
(Ронов и др., 1990)

Обобщенные типы пород	Распространенность, %
Базальты, габбро и их метаморфические аналоги (амфиболиты, кристаллические сланцы)	50.34
Граниты, гранитогнейсы, кислые эффузивы и их метаморфические аналоги	20.86
Кристаллические сланцы и парагнейсы	16.91
Глины, глинистые сланцы	4.48
Пески, песчаники, кварциты	3.56
Известняки, доломиты, мраморы	3.48
Железистые кварциты	0.17
Соли (гипс, ангидрит, галит)	0.09
Ультраосновные горные породы	0.07
Щелочные горные породы	0.04
Всего:	100.00

# Сравнение составов верхней континентальной коры

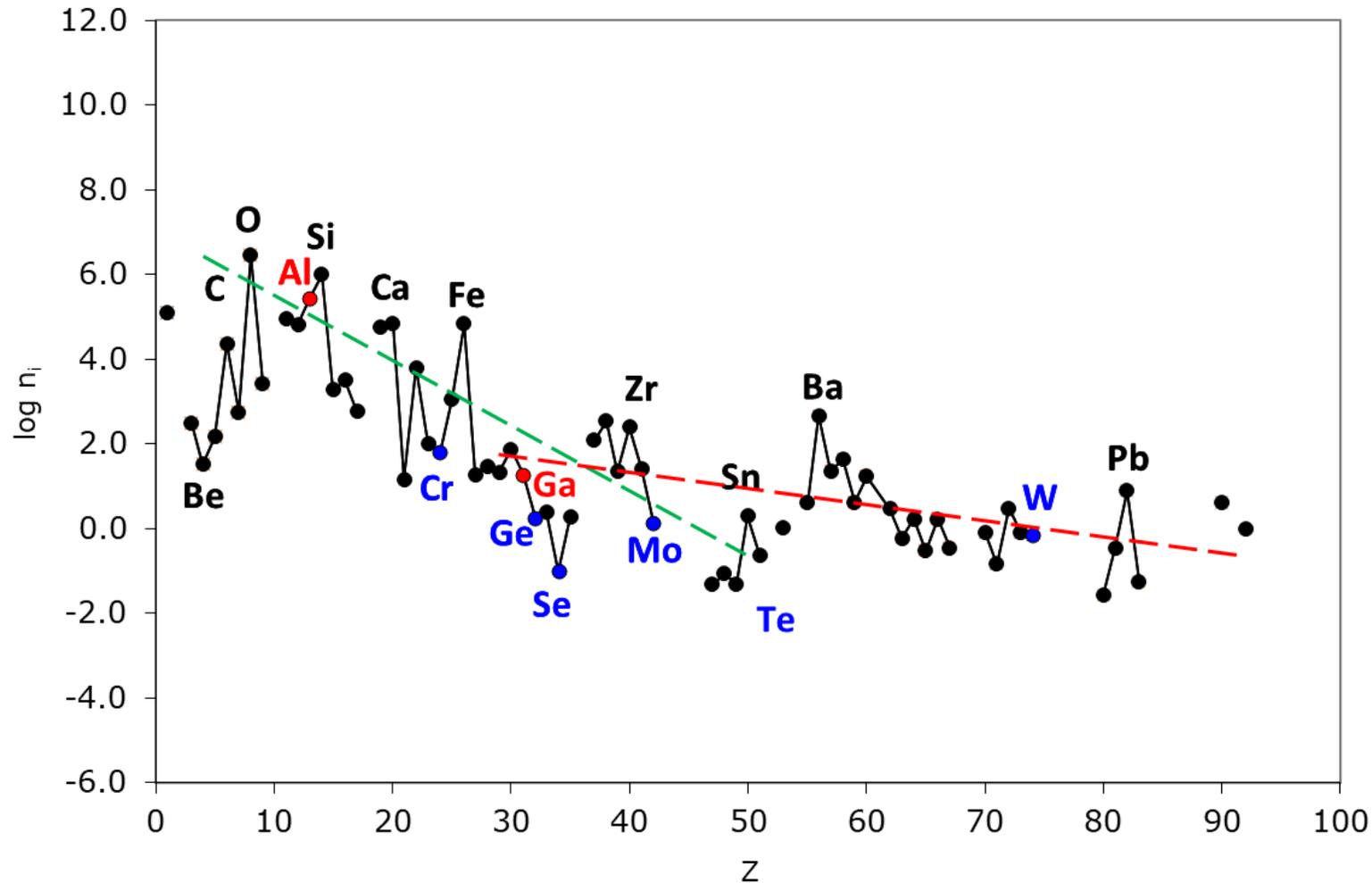
Компонент	Clarke, 1889	Виногра- дов, 1962	Taylor, McLennan, 1985	Ронов и др., 1990	Rudnick, Gao, 2013
<i>Метод</i>	<i>Подход Кларка</i>	<i>Подход Полдер- ваарта (Б:Г=2:1)</i>	<i>Подход Полдер- ваарта (Б:Г=1:1)</i>	<i>Подход Ронова</i>	<i>Подход Ронова</i>
SiO <sub>2</sub>	60.2	63.4	66.0	65.3	66.62
TiO <sub>2</sub>	0.57	0.7	0.50	0.55	0.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.27	15.3	15.2	15.3	15.40
FeO <sub>tot</sub>	7.26	6.2	4.5	5.5	5.04
MnO	0.10	0.1	0.08	0.09	0.10
MgO	4.59	3.1	2.2	2.9	2.48
CaO	5.45	4.6	4.2	4.2	3.59
Na <sub>2</sub> O	3.29	3.4	3.9	3.1	3.27
K <sub>2</sub> O	2.99	3.0	3.4	2.9	2.80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23	0.2		0.14	0.15

# Дифференциация вещества при образовании Земной коры

Сравнение составов верхней мантии, океанической и континентальной коры

Компонент	McDonough, 2013	White, Klein, 2013	Rudnick, Gao, 2013	Rudnick, Gao, 2013
	«силикатная Земля» (BSE)	океанская (MORB)	континен- тальная кора (суммарно)	верхняя континен- тальная кора
SiO <sub>2</sub>	44.9	50.06	<b>60,6</b>	<b>66.62</b>
TiO <sub>2</sub>	0.20	<b>1.52</b>	0,72	0.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.44	<b>15.00</b>	<b>15,9</b>	15.40
FeO <sub>tot</sub>	8.05	<b>10.36</b>	6,71	5.04
MnO	0.13	0.19	0,10	0.10
MgO	<b>37.8</b>	7.71	4,66	2.48
CaO	3.54	<b>11.46</b>	6,41	3.59
Na <sub>2</sub> O	0.36	<b>2.52</b>	<b>3,07</b>	3.27
K <sub>2</sub> O	0.03	0.19	<b>1,81</b>	<b>2.80</b>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.16	0,13	0.15

# Закономерности распространности элементов в Земной коре. Нарушения правила четности.



Выполняются:

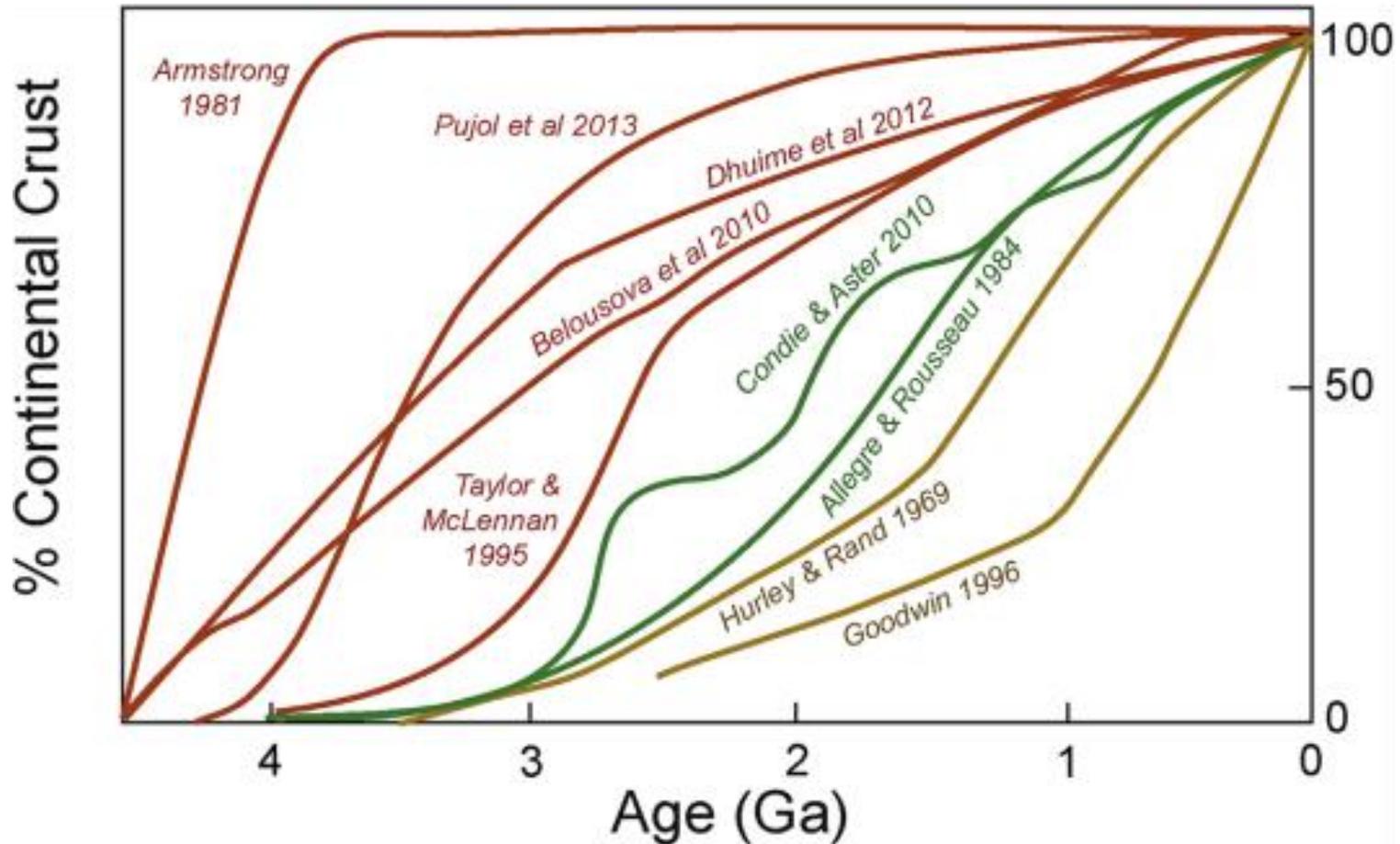
- убывание с ростом атомного номера;
- две «ветви» распространенности, крутая для ЛЕГКИХ элементов, пологая для тяжелых;
- локальные максимумы около Fe, Ba, Pb, минимум Li-Be-B;

Нарушено «правило четности» для нескольких элементов:

- избыток Al-Ga,
- недостаток Cr-Mo-W,
- недостаток Se-Te.

Проблема роста объема  
континентальной коры в  
геологической истории Земли

# Результаты применения различных моделей роста континентальной коры [по обзору Hawkesworth et al., 2019]



Коричневые кривые – модели, основанные на распределении возрастов пород, в настоящее время сохранившихся на поверхности Земли (Hurley, Rand, 1969; Goodwin, 1996).

Зеленые кривые – модели, основанные на современном распределении пород с различным «модельным возрастом» (т.е. возрастом отделения вещества от мантии) (Allègre, Rousseau, 1984; Condie, Aster, 2010).

Красные кривые – модели, основанные на геохимических индикаторах перераспределения вещества из мантии в кору (например, по изотопному составу Hf в «детритных» цирконах (Belousova et al., 2010)). Они учитывают объемы коры, существовавшие в разное время в истории Земли, даже если такие породы к настоящему времени не сохранились.

