

## Лекция № 18

# ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЭФФУЗИВНЫХ И ИНТРУЗИВНЫХ ТРАППОВ

### Часть 1:

- Специфика пород эффузивной фации трапповой формации: петрохимия и геохимические особенности
- Проблемы поиска первичных расплавов и оценки глубины магмогенерации

### Часть 2:

- Особенности строения интрузивных траппов
- Главные механизмы формирования долеритовых силлов
- Примеры численного моделирования распределения главных и примесных элементов по вертикальным разрезам долеритовых силлов

# ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫЕ СОСТАВЫ ЭФФУЗИВНЫХ ТРАПТТОВ

## ДОЛЕРИТЫ ФЕРРАРА, ТАСМАНИИ И ПАРАНЫ

Оксиды	Диабазы Феррара (Антарктида)		Тасманский долерит	Базальты Параны (Бразилия)	
SiO <sub>2</sub>	50.40	53.75	53.4	54.20	50.82
TiO <sub>2</sub>	0.44	0.70	0.6	1.53	2.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.51	14.23	15.4	14.74	14.15
FeO	8.72	9.62	9.1	11.70	13.49
MnO	0.17	0.18	0.10	0.17	0.20
MgO	10.60	6.64	6.7	4.54	4.81
CaO	10.87	10.60	11.1	8.77	9.40
Na <sub>2</sub> O	1.42	1.83	1.7	2.71	2.70
K <sub>2</sub> O	0.37	0.81	1.0	1.41	1.21
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.18	0.1	0.23	0.43
Mg#	0.682	0.552	0.568	0.409	0.389

$$\text{Mg\#} = \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$$

## СПЕЦИФИКА СОСТАВА ЭФФУЗИВНЫХ ТРАППОВ

1. Подавляющее большинство трапповых лав представлено базальтами и ферробазальтами, которые имеют слишком **низкий индекс магнезиальности  $Mg\# < 0.6$** , чтобы находиться в равновесии с мантийным оливином  $Fo > 88$ . Это явилось основанием допускать немантийное или мантийно-корое происхождение исходных магм.
2. **Пересыщенность платобазальтов нормативным кварцем** по сравнению с базальтами САХ. Относительная обогащенность Ti, P, Th, а также рядом других литофильных элементов
3. Пересыщенные кварцем платобазальты нередко встречаются совместно с недосыщенными по  $SiO_2$  коматиитами и кимберлитами

Решение проблем траппового магматизма предполагает рассмотрение следующих вопросов:

1. Эволюция континентальной мантии
2. Влияние мантийного магматизма
3. Роль контаминации коры
4. Процессы кристаллизационного фракционирования исходных магм

# ПРОВИНЦИЯ КАРРУ В ЮЖНОЙ АФРИКЕ

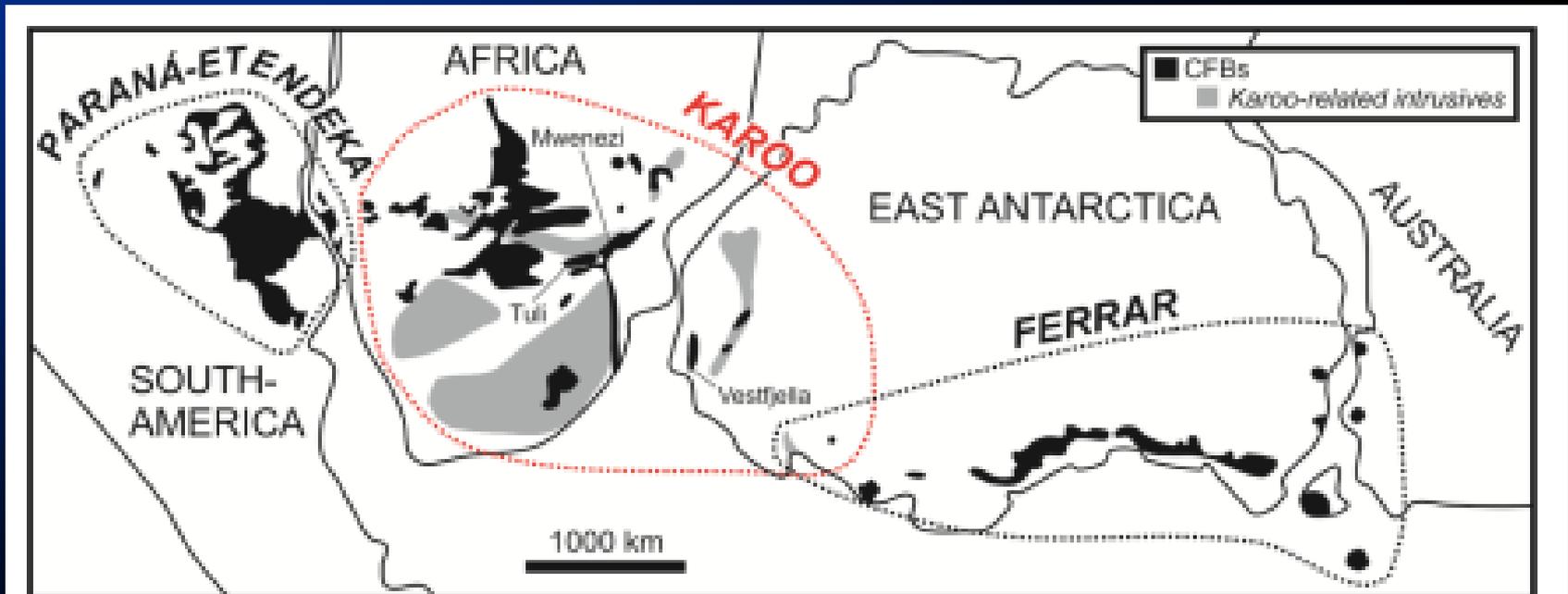


Fig. 1. A reconstruction (modified after Hergt et al., 1991; Storey et al., 1992; Segev, 2002; Leat et al., 2006; Jourdan et al., 2007) of Gondwana supercontinent showing the distribution of Mesozoic CFBs. In the case of the Karoo LIP, the extent of related intrusive rocks (found outside CFBs) is also shown.

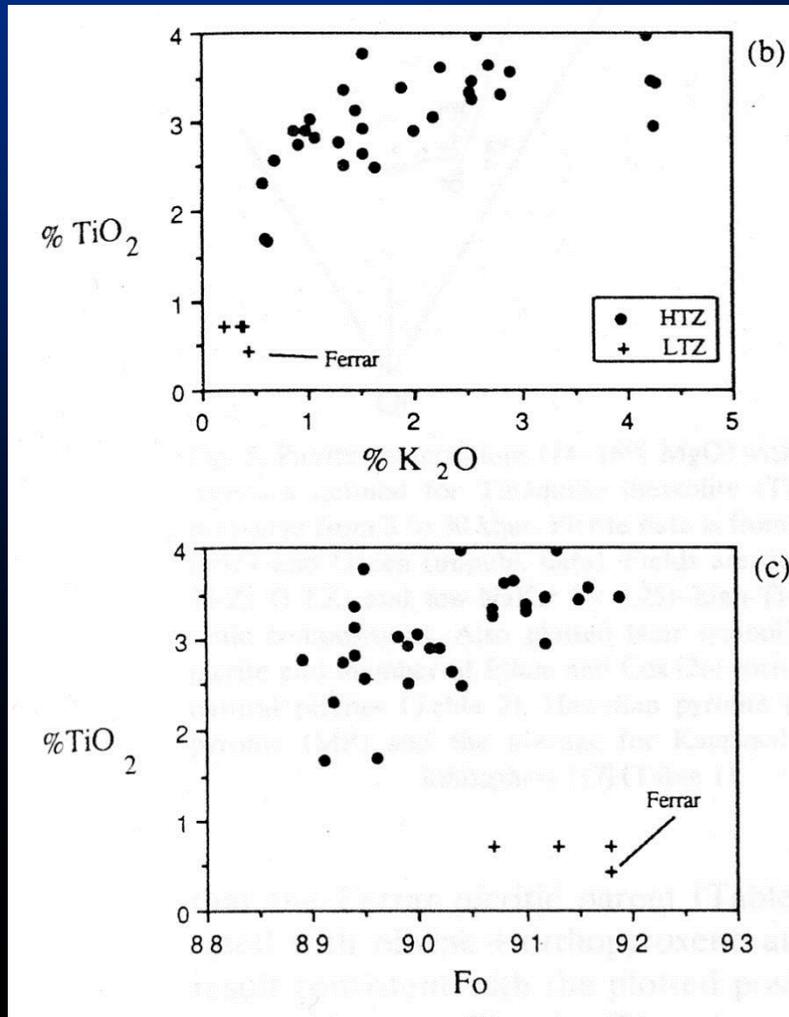
# ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫЕ СОСТАВЫ ПИКРИТОВ И БАЗАЛЬТОВ

## ПРОВИНЦИИ КАРРУ (ЮЖНАЯ АФРИКА)

Оксиды	Вулканические породы Карру				Плато Онтонг Ява
	Пикриты		Низко-Ti серия		
SiO <sub>2</sub>	48.96	48.87	50.22	50.17	49.25
TiO <sub>2</sub>	2.74	0.72	0.97	1.55	1.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.98	14.11	15.54	13.54	14.00
FeO	12.04	10.19	9.83	13.56	11.42
MnO	0.13	0.16	0.17	0.22	0.21
<b>MgO</b>	<b>15.48</b>	<b>15.08</b>	<b>7.36</b>	<b>5.28</b>	<b>7.75</b>
CaO	8.50	8.89	10.21	10.26	12.35
Na <sub>2</sub> O	1.62	1.56	2.06	2.63	2.05
K <sub>2</sub> O	0.90	0.21	0.22	0.28	0.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.34	0.09	0.17	0.19	0.06
<b>Mg#</b>	<b>0.696</b>	<b>0.725</b>	<b>0.572</b>	<b>0.410</b>	<b>0.547</b>

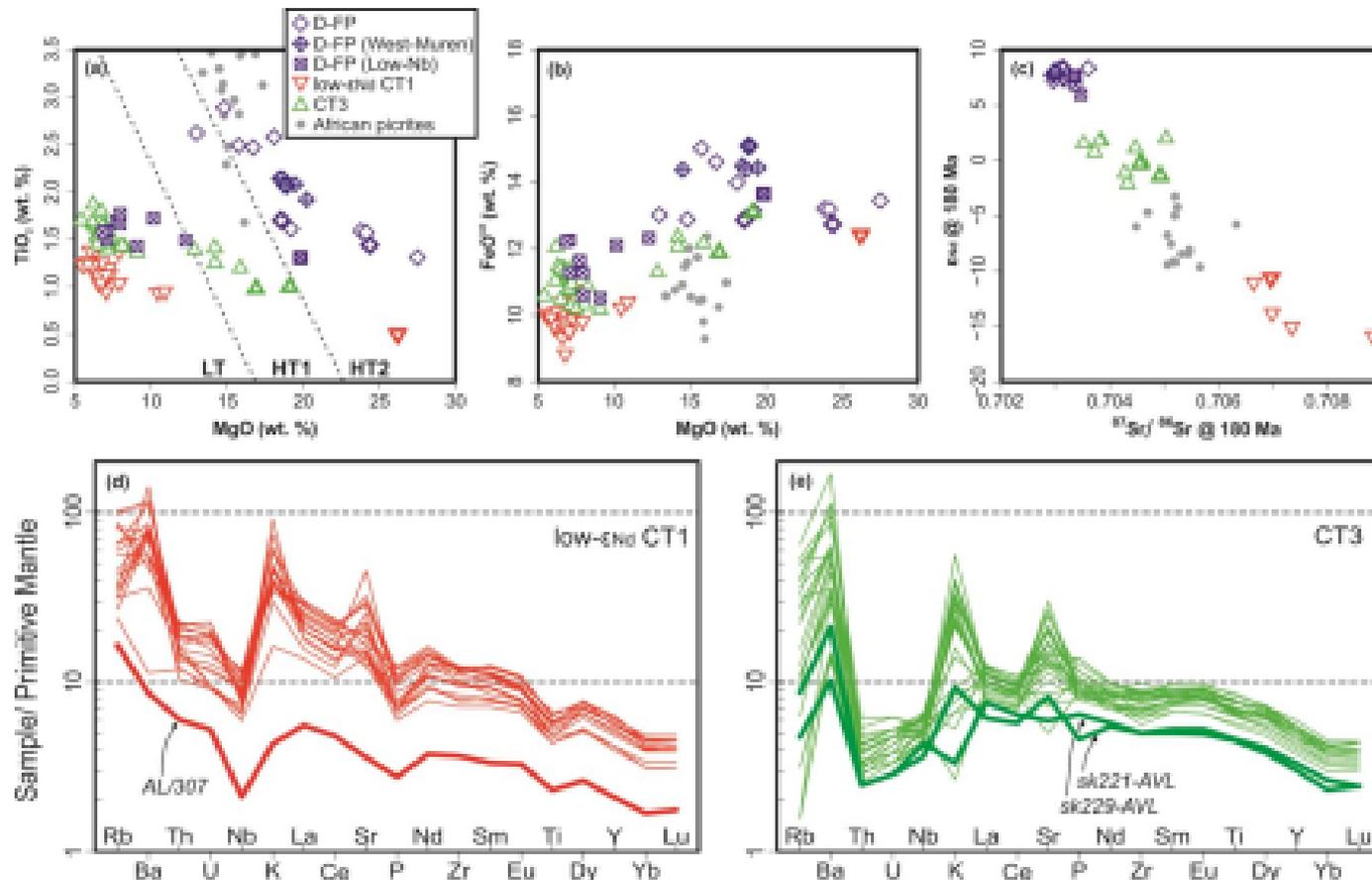
$$\text{Mg\#} = \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$$

# КОРРЕЛЯЦИИ СОДЕРЖАНИЙ $\text{TiO}_2$ , $\text{K}_2\text{O}$ И СОСТАВА ОЛИВИНА В ПИКРИТАХ КАРРУ ПРИ 14-16% $\text{MgO}$ (Sweeney et al., 1991)



- Различные точки зрения образования пикритов Карру, согласно которым было либо:
- Два источника
  - Два уровня глубины магмагенерации для одного и того же исходного мантийного вещества
  - Два источника, испытавших плавление на различных глубинах

# ПРОВИНЦИЯ КАРРУ В ЮЖНОЙ АФРИКЕ



Enrichment of 180 in the mantle sources of the Antarctic portion of the Karoo large igneous province

# ПРОВИНЦИЯ КАРРУ В ЮЖНОЙ АФРИКЕ

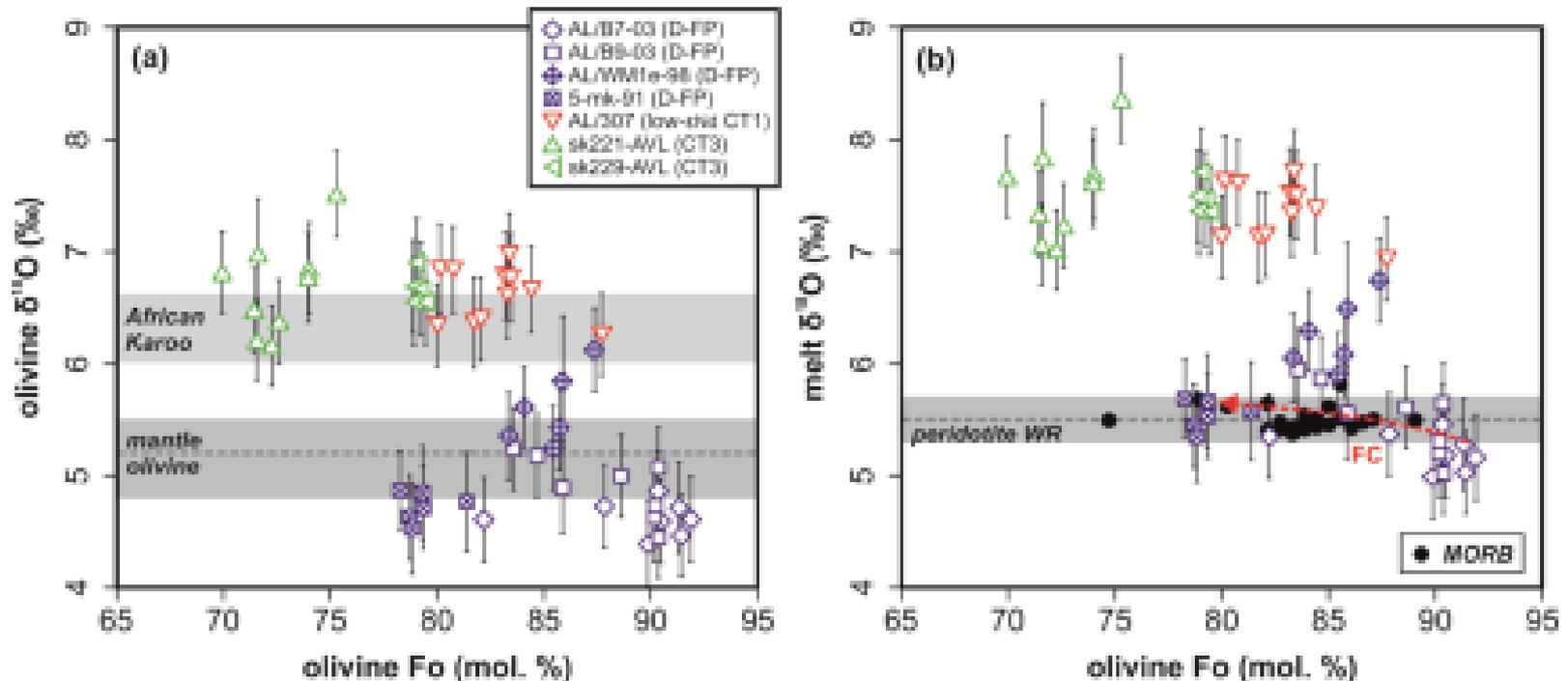
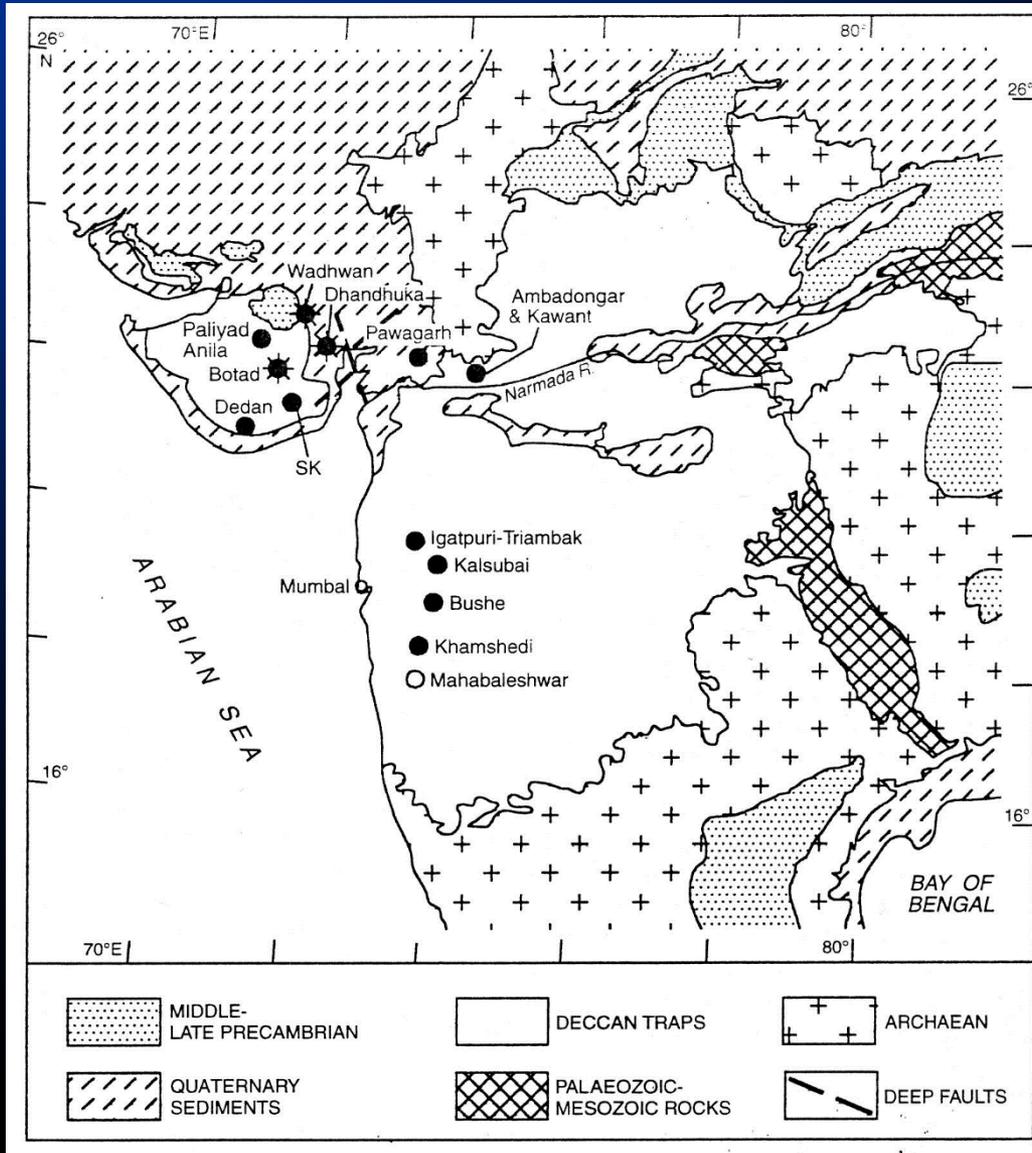


Fig. 4. Oxygen isotopic compositions of a) the analyzed Vestfjella olivines and b) equilibrium melts shown relative to olivine Fo content, error bars are  $\pm 2\sigma$  (Table 1). In a,  $\delta^{18}\text{O}$  ranges of olivines from Mwenzezi and Tuli picrites from Africa are after Harris et al. (2015; Fo not reported) and the  $\delta^{18}\text{O}$  ranges of mantle olivine are after Matthey et al. (1994; full range) and Eiler (2001; average). In b, peridotite whole-rocks are after Eiler (2001) (average  $\pm 1\sigma$ ) and references therein. MORB data is based on analyses of MORB glasses from Pacific, Atlantic, and Indian Oceans (Eiler et al., 2000); Fo content of equilibrium olivine has been calculated assuming  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{\text{tot}}$  of 0.9 and  $K_d(\text{Fe}^{2+}-\text{Mg})^{\text{ol-lik}}$  of 0.30. Fractional crystallization model (FC) is explained in section 6.

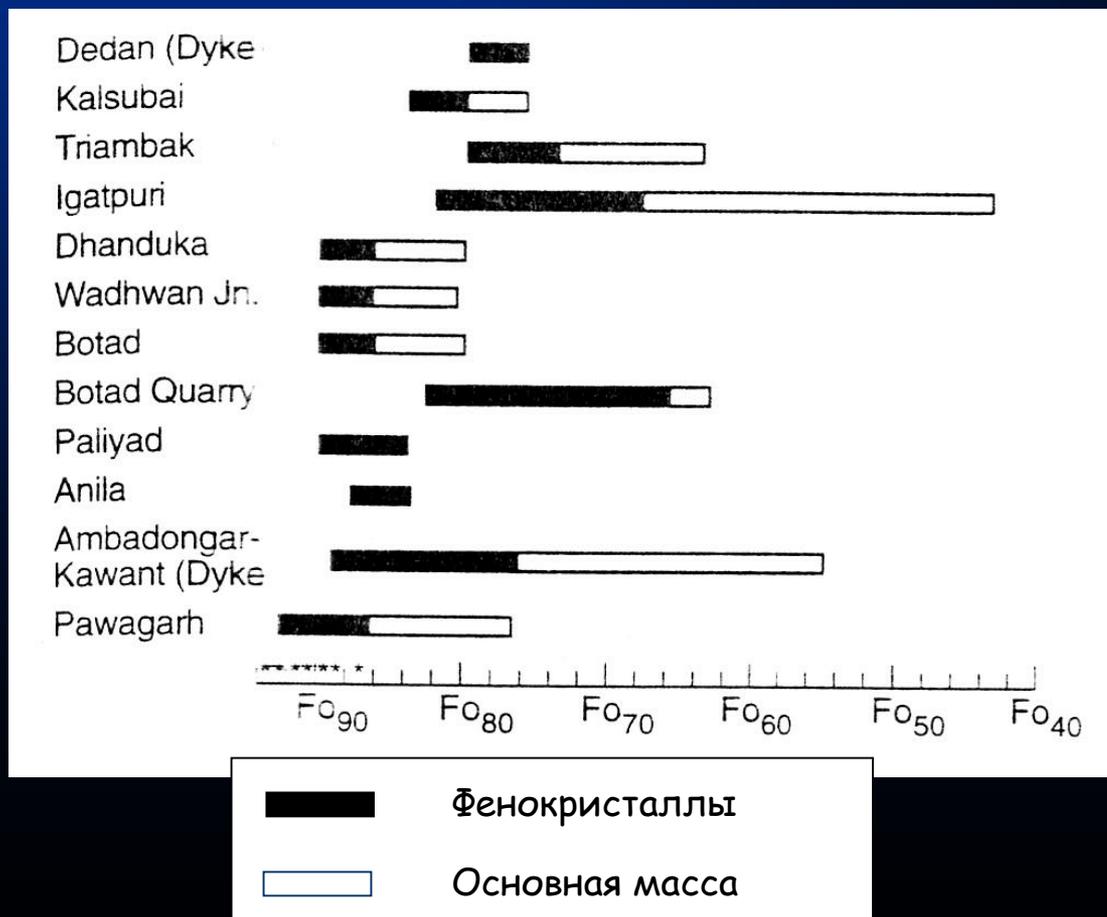
Enrichment of  $^{18}\text{O}$  in the mantle sources of the Antarctic portion of the Karoo large igneous province

# СХЕМА РАСТПРОСТРАНЕНИЯ ДЕКАНСКИХ ТРАПТТОВ

- Практически для всех континентальных провинций характерно присутствие пикробазальтов и пикритов в нижних частях вулканического разреза



## СОСТАВЫ ОЛИВИНА В ДЕКАНСКИХ ПИКРИТ-БАЗАЛЬТАХ



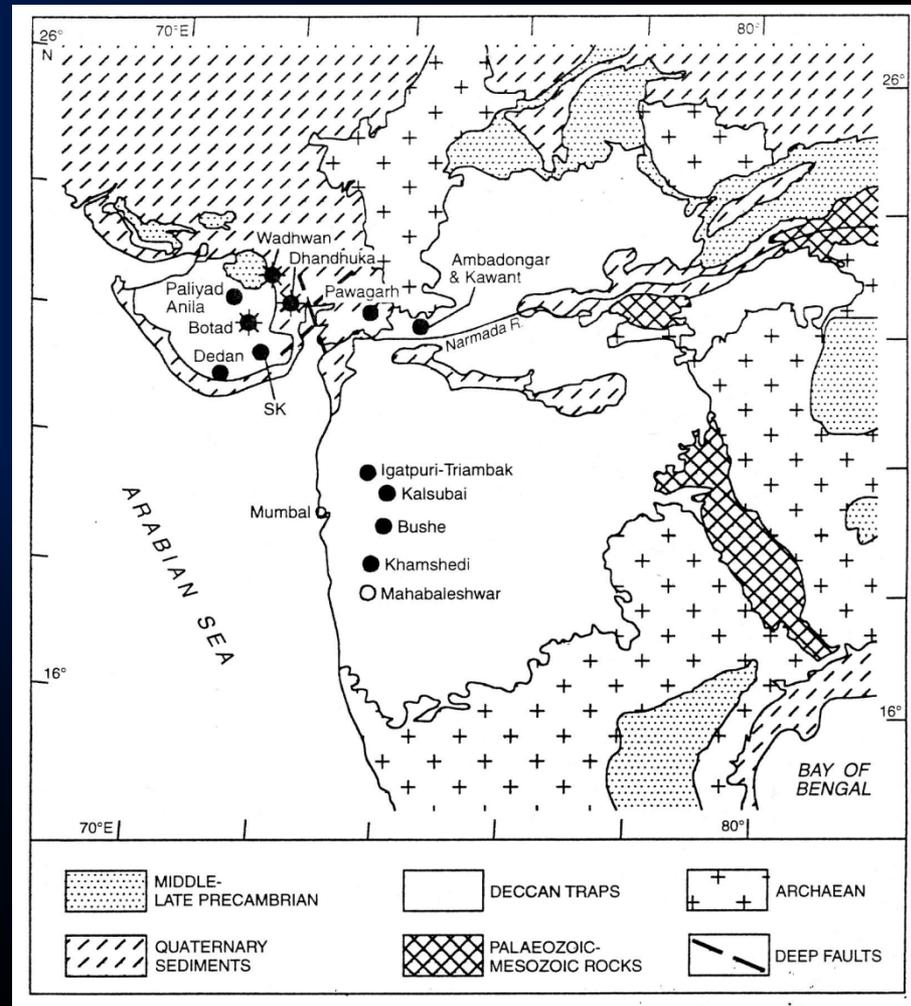
- Наиболее магнезиальные оливины из пикритов Деканских траппов имеют состав  $Fo_{90}$
- Это главный признак глубинного происхождения первичных магм из перидотитового вещества

# ПРИРОДА ДЕКАНСКОГО ТРАППОВОГО МАГМАТИЗМА

- Первые фазы деканского траппового магматизма проявились около 70 млн лет назад на СЗ п-ва Индостан, тогда как основная фаза толеитового магматизма, сформировавшая большую часть плато Декан протекала позже на 3-4 млн лет
- Самые ранние траппы представлены щелочными базальтоидами
- Есть основания предполагать, что деканский вулканический цикл начался с излияний расплавов, которые представляли продукты низких степеней плавления мантийного вещества. Затем изливались пикритовые лавы, сформировавшиеся из расплавов высоких степеней плавления источника, и, наконец, следовала главная стадия существенно толеитового магматизма
- Эта схема была предложена в 70х гг британским петрологом Коксом
- С небольшими поправками она используется при проведении современных генетических реконструкций. Они основаны на новых данных по геохимии и изотопному составу пород трапповых провинций

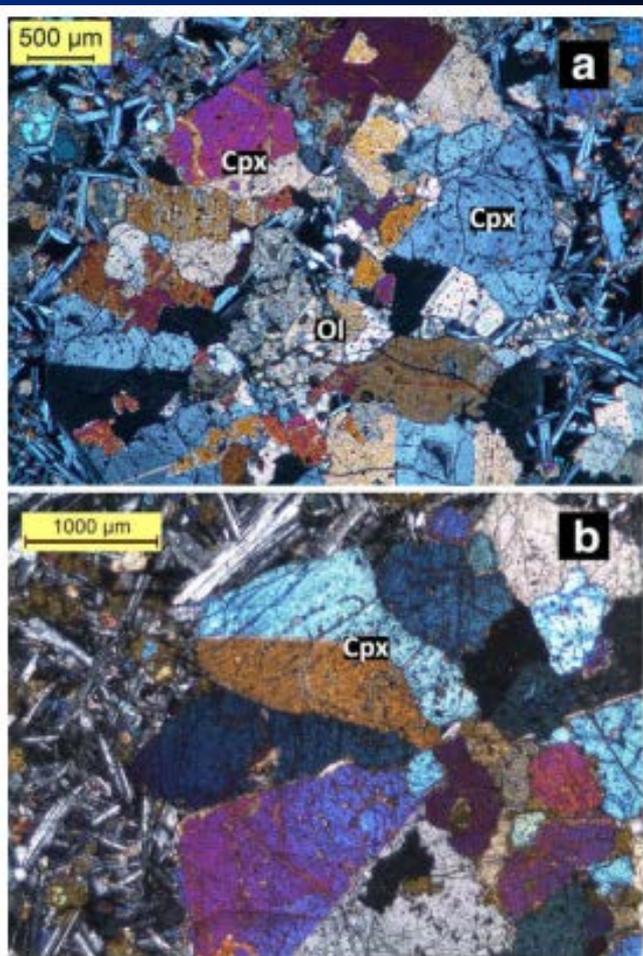
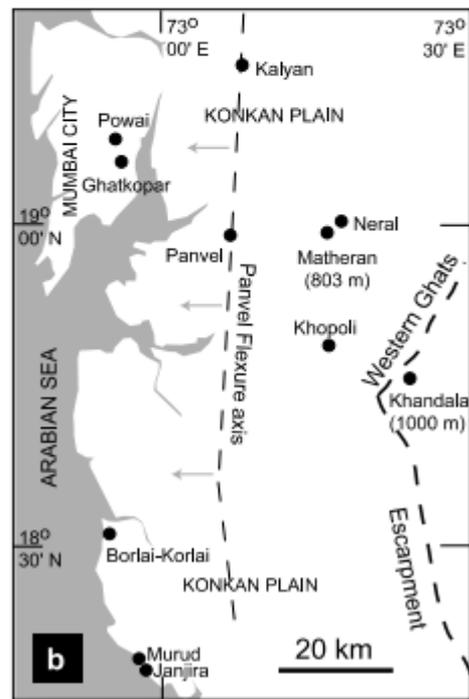
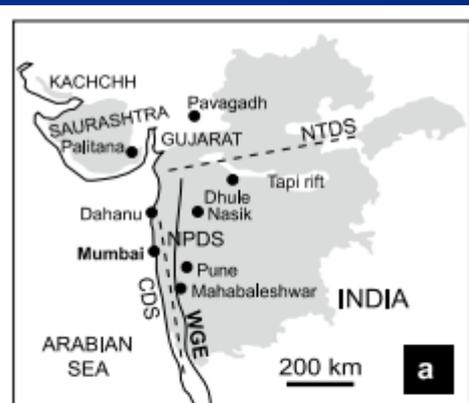
# ГЛАВНЫЕ ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ СЕРИИ ДЕКАНСКИХ ТРАПТТОВ

- Эти результаты позволили выделить две главные группы базальтов и пикритов, различающиеся щелочностью, содержанием  $TiO_2$  и степенью обогащения некогерентными элементами
- Самые ранние пикриты СЗ Индии представляют субщелочную высоко- $Ti$  тенденцию, а низко- $Ti$  пикриты Западных Гат являются предшественником основной массы толеитовых базальтов нормальной щелочности



# НОВЫЕ ДАННЫЕ ОБ ИСХОДНЫХ МАГМАХ ТОЛЕИТОВ ДЕКАНСКИХ ТРАПТТОВ

Значение анкармитов как исходных магм для толеитов Западных Гат

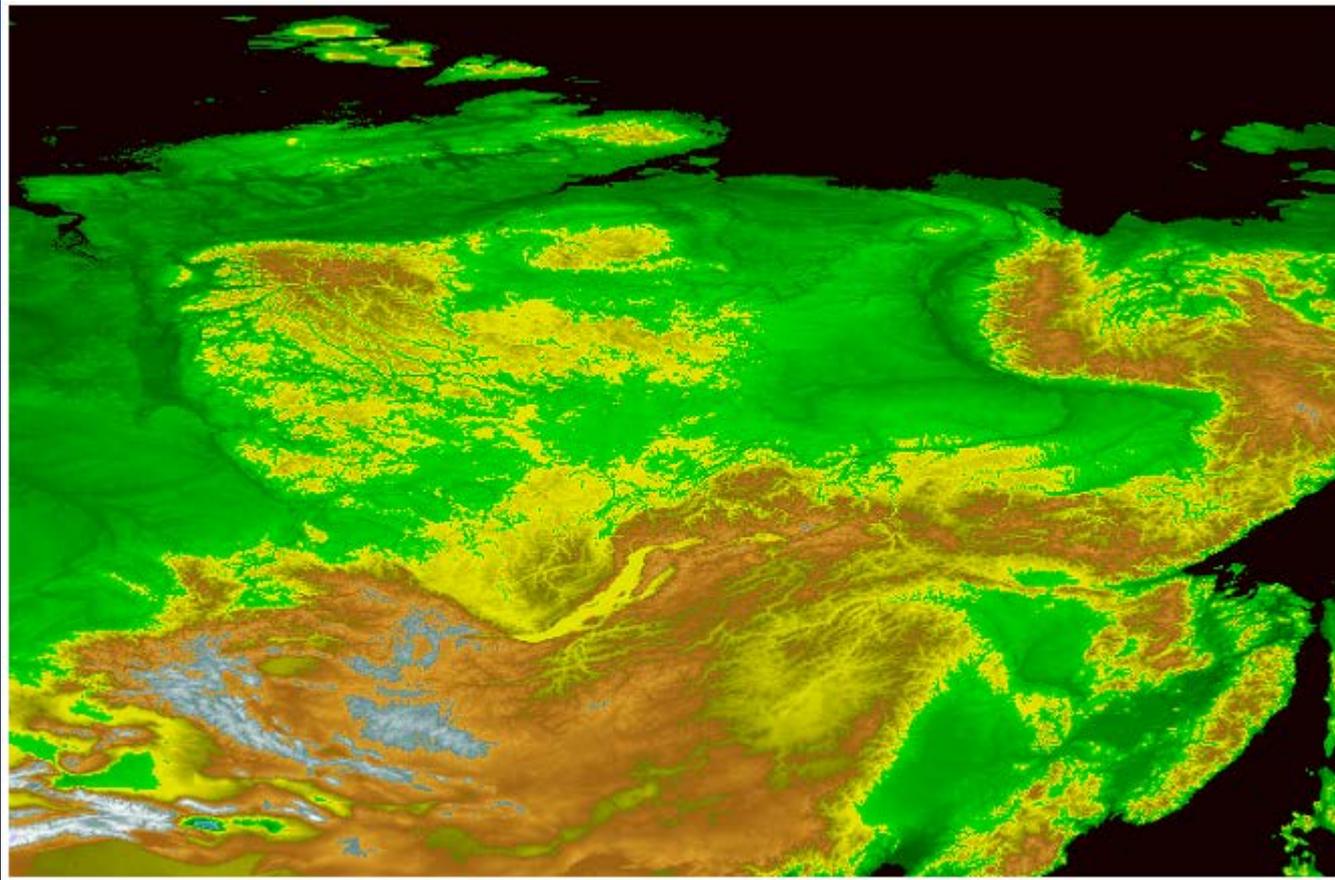


**Fig. 2** Thin section photomicrographs of the Powai ankaramite between crossed nicols showing large crystals of olivine (Ol) and sector zoned, twinned and radially arranged clinopyroxene (Cpx) surrounded by a fine-grained groundmass containing plagioclase laths

## Conclusions

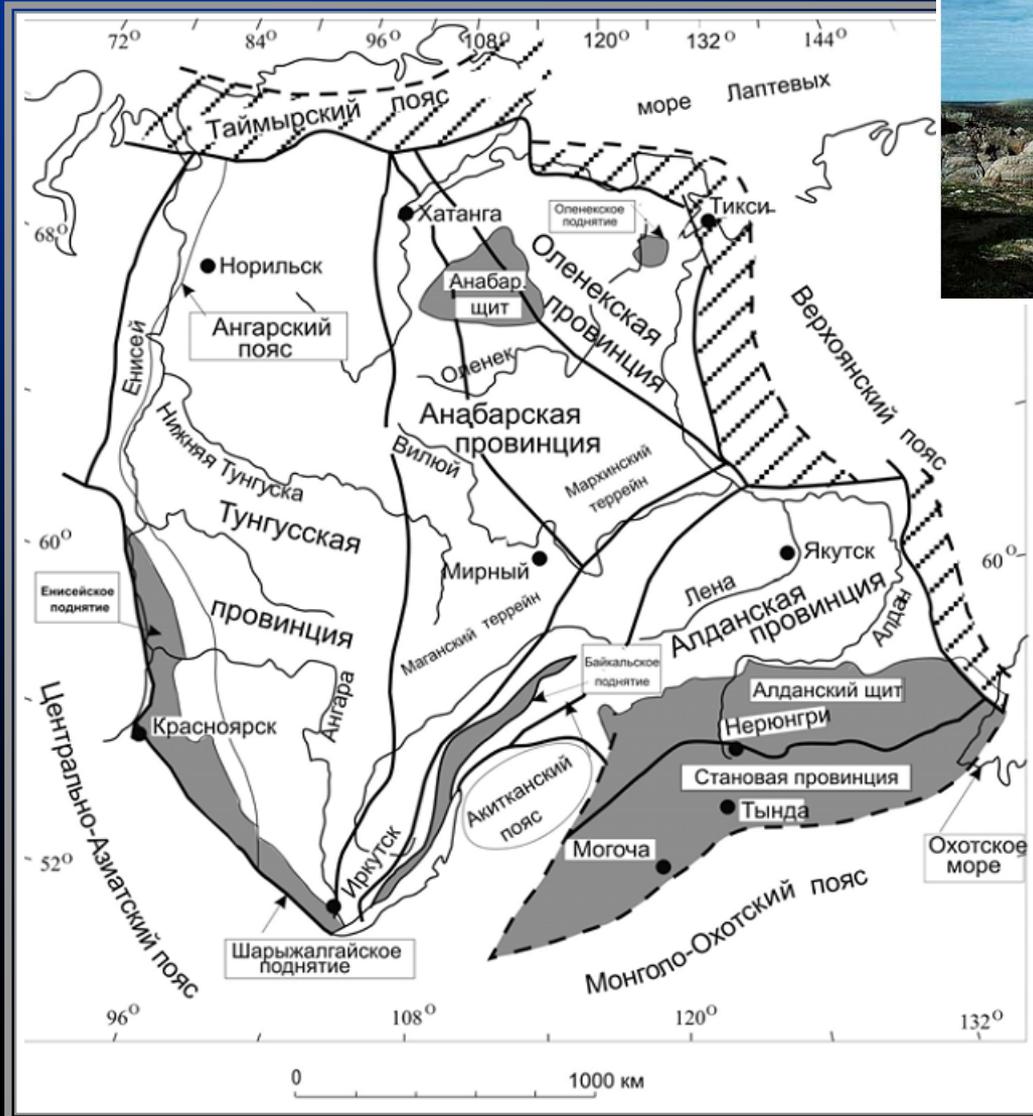
We have shown through thermobarometric calculations that most of the Deccan primary magmas of the Powai ankaramite and the Ghatkopar–Powai tholeiites in the Mumbai area, as well as those of the voluminous Ambenali and Mahabaleshwar Formation tholeiites in the Western Ghats sequence, are primitive tholeiites (MgO 8.74–11.77 wt%, Mg# 70–74; not picrites as concluded in previous studies) that last equilibrated with mantle peridotite at temperatures of 1268–1332 °C ( $\pm 12$  °C) and pressures of 8.0–13.0 kb ( $\pm 0.8$  kb). The estimated pressures correspond with depths of 30–49 km ( $\pm 3$  km) that overlap with the present-day seismically constrained Moho depths of 36–41 km ( $\pm 2$  km) below Mumbai and nearby areas. The primary magmas originated by  $\leq 15$  % batch melting of the mantle, ascended through the crust, and pooled and evolved in magma chambers at depths  $\leq 23$  km. Such chambers have been identified previously from geophysical modeling. The primary magmas underwent olivine gabbro fractionation to produce mafic cumulate piles (Ol + Cpx + Opx) at the bottom of the magma chambers, with plagioclase probably separating due to its buoyancy. Later batches of tholeiitic magmas would pierce these cumulate piles, leading to the formation of cumulate rocks such as the Powai ankaramite, in which we have identified dissolution of orthopyroxene and subsequent crystallization of augite, olivine, and plagioclase.

# ПОЛОЖЕНИЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ



Сибирский кратон, площадью около  $4 \times 10^9$  км<sup>2</sup>, большей частью (70 %), перекрыт рифейско-фанерозойскими отложениями чехла мощностью 1-8 км, в среднем – около 4 км.

# СТРУКТУРА ФУНДАМЕНТА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ



Анортозиты Анабарского щита (2.55 млрд. лет)

**Платформенный чехол**

**ФУНДАМЕНТ**

(Архей – Нижний протерозой, > 1.7 млрд. лет)

*Анабарский щит*

*Алданский щит*

*Шарыжалгайское*

*подняtie*

# ОСНОВЫ ГЕОЛОГИИ ТРАПТОВОЙ ПРОВИНЦИИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

## Платформенный чехол

Верхний "этаж"  
(Палеозой,  
<570 млн. лет)

Нижний "этаж"  
(Поздний протерозой)

## ФУНДАМЕНТ

(Архей – Нижний протерозой, >  
1.7 млрд. лет)

- Сибирская платформа с конца PR – стабильный кратон, который несколько раз испытал периоды магматической активизации
- Платформенный чехол подразделяется на 2 структурных этажа – нижний и верхний

# ОСНОВЫ ГЕОЛОГИИ ТРАППОВОЙ ПРОВИНЦИИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

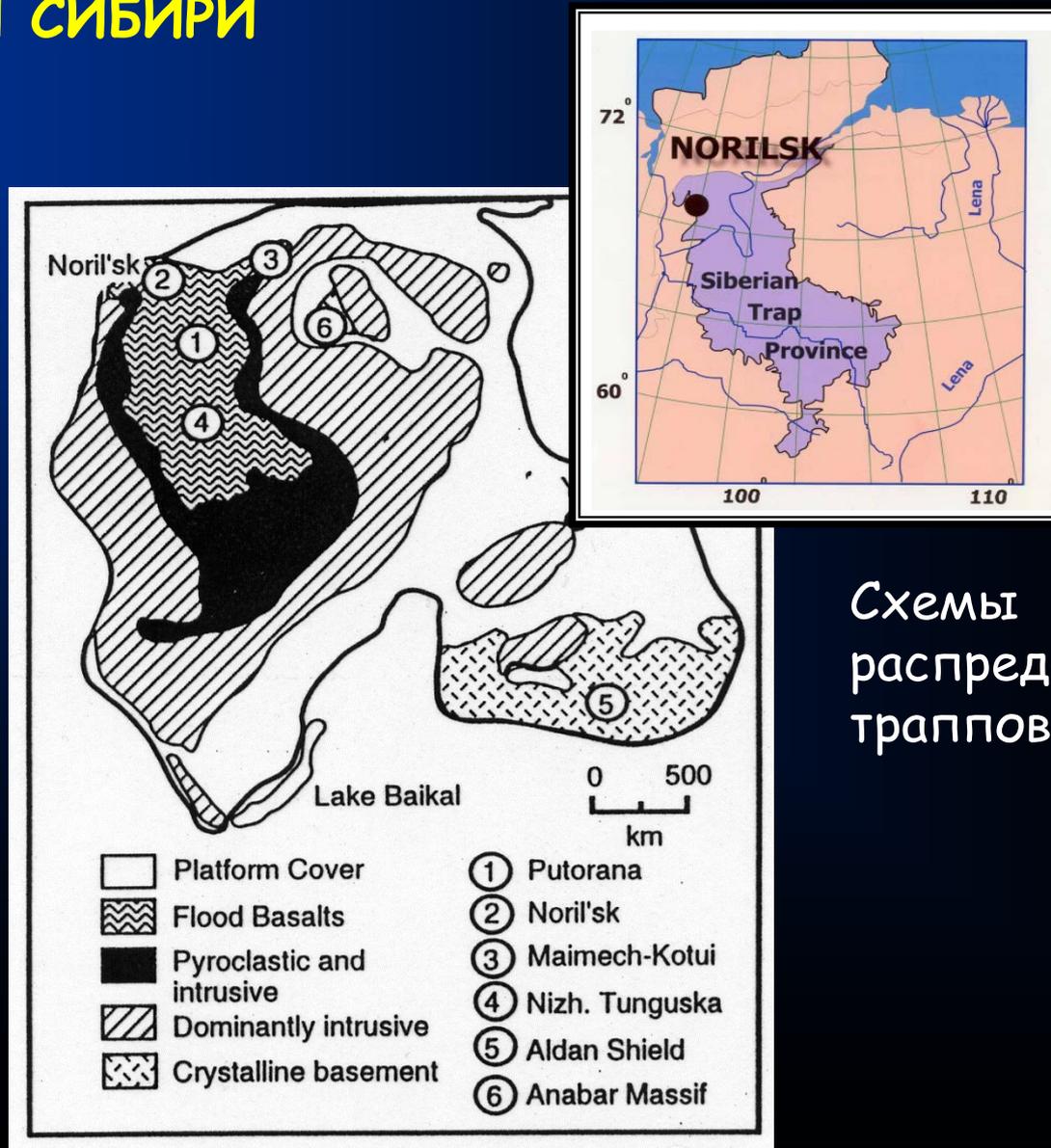
- Нижний этаж -  $PR_3$  (1.3-1.7 млрд. лет): осадочные и вулканогенные образования, претерпевшие метаморфизм зеленосланцевой фации. Самый ранний цикл платобазальтового магматизма Сибирской платформы
- Верхний этаж -  $PZ$ : подразделяется на 3 яруса:

Первый ярус  $V-C_1$ : морские (в основном, карбонатные) отложения

Второй ярус: мелководные угленосные осадки тунгусской серии и перекрывающие их породы трапповой формации. Период активного магматизма оценивается, как  $P_1-T$ . Наземные потоки базальтовых лав, обильная пирокластика и протяженные силлы долеритов покрыли площадь свыше 1.5 млн. кв. км.

Третий  $J-K$ : морские терригенные и контаминированные осадки, перекрытые четвертичными отложениями

# ОСНОВНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ТРАППОВОЙ ФОРМАЦИИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ



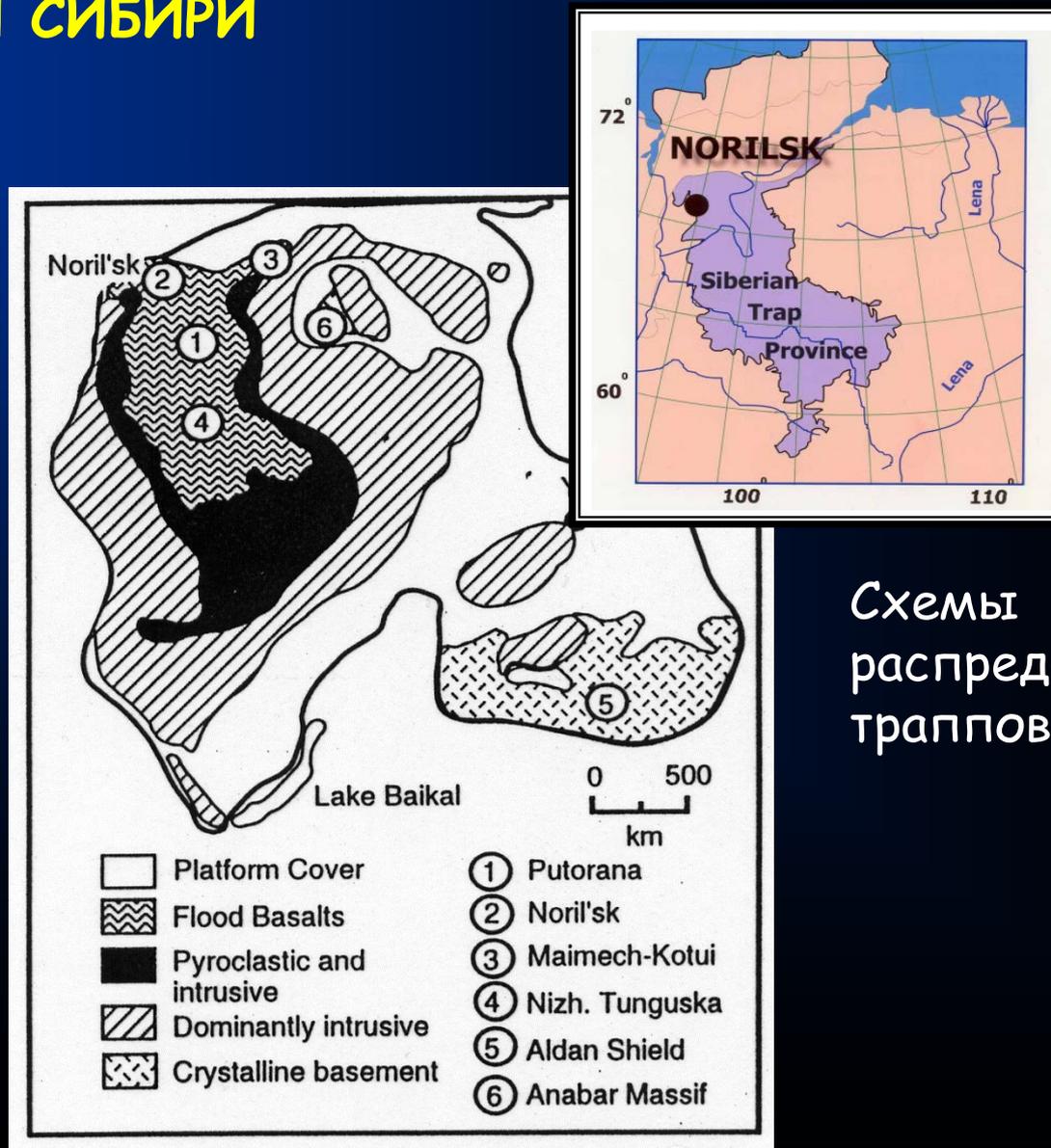
Схемы  
распределения  
траппов

# СОТНОШЕНИЯ ГЛАВНЫХ ФАЦИЙ ТРАППОВОЙ ФОРМАЦИИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (Лурье, Масайтис, 1964)

Фа́ции	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Средняя мощность, км	Объем, тыс. км <sup>3</sup>	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Масса, т×10 <sup>12</sup> г	% массы
Интрузивная	1500	0.25 (0-1.5)	337.5	2.9	1090	44.3
Эффузивная	337.5	1.0 (0-2.0)	337.5	2.8	944	38.4
Эксплозивная	675	0.35 (0-0.7)	236	1.8	425	17.3
<b>Всего</b>			<b>911</b>		<b>2459</b>	<b>100</b>

- Характерная особенность трапповой формации Сибири: обширная площадь распространения и значительная мощность эксплозивных образований.
- Возможно, это привело к вымиранию почти 90% морской фауны и около 70% организмов суши на границе Р-Т

# ОСНОВНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ТРАППОВОЙ ФОРМАЦИИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ



Схемы  
распределения  
траппов

## ЧЕТЫРЕ ГЛАВНЫХ ПРОВИНЦИЙ ЭФФУЗИВНЫХ ТРАПТТОВ

1. **Маймеча-Котуйская:** толеитовые базальты находятся в ассоциации со щелочными и субщелочными базальтами
2. **Норильский район:** толеитовые базальты находятся в ассоциации только с субщелочными базальтами; максимальная мощность лавовых разрезом - 4 км
3. **Плато Путорана :** практически нацело сложено толеитами, однако, и здесь не так давно были открыты единичные проявления субщелочных пикритов
4. **Район Нижней Тунгуски**

# КОРРЕЛЯЦИЯ РАЗРЕЗОВ ГЛАВНЫХ ПРОВИНЦИЙ ЭФФУЗИВНЫХ ТРАПТОВ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

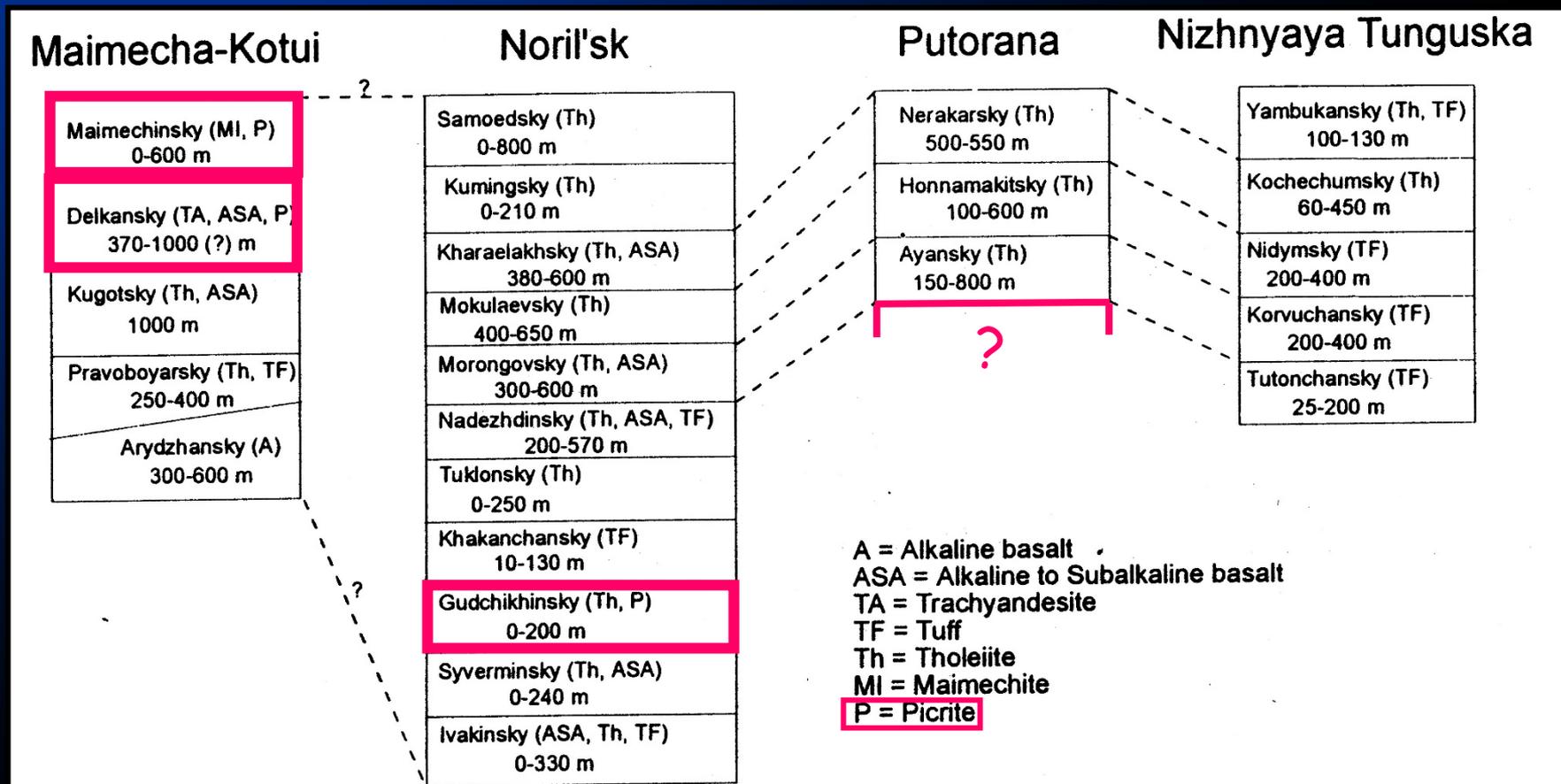


Figure 2. Composite volcano-stratigraphic section of the Siberian Traps (modified from Zolotukhin and Al'mukhamedov [1988], Sharma et al. [1991], and Fedorenko et al. [1996]).

# ПЛАТО ПУТОРАНА



Последовательность  
платобазальтов  
Путорана



Вертикальные обрывы  
верхней части плато

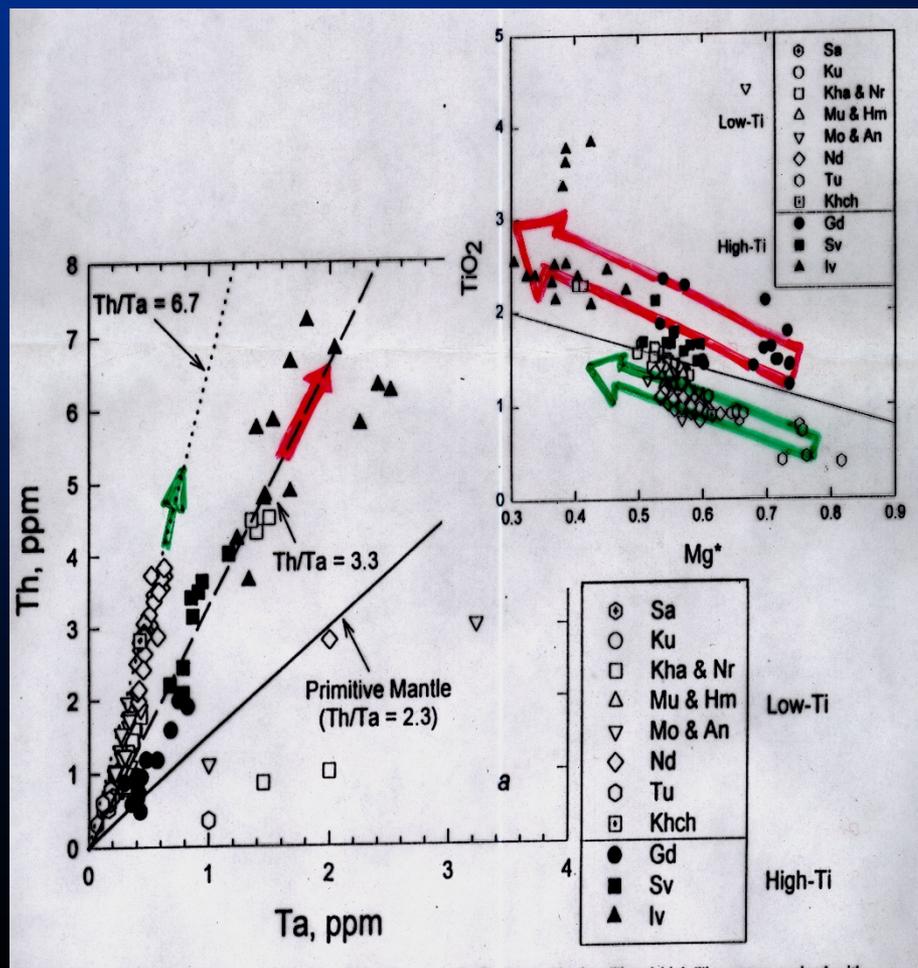
## СРЕДНИЕ СОСТАВЫ СВИТ НОРИЛЬСКОГО РАЙОНА И ПЛАТО ПУТОРАНА В СРАВНЕНИИ СО СРЕДНИМ ТРАППОМ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Оксиды, мас. %	Норильский район		Базальты Путорана (n=300)	“Средний трапп” (n=176)
	Гудчихинска я (n=126)	Моронговская (n=17)		
SiO <sub>2</sub>	45.33	46.35	49.89	49.43
TiO <sub>2</sub>	1.33	2.16	1.30	1.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.96	10.61	15.53	15.67
FeO	12.40	13.40	12.04	12.88
MnO	0.17	0.19	0.19	0.19
<b>MgO</b>	<b>14.84</b>	<b>10.18</b>	<b>7.30</b>	<b>6.31</b>
CaO	8.08	10.09	11.43	10.91
Na <sub>2</sub> O	1.27	1.79	1.93	2.22
K <sub>2</sub> O	0.28	0.55	0.29	0.75
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.26	0.12	0.13
<b>Mg#</b>	<b>0.681</b>	<b>0.575</b>	<b>0.519</b>	<b>0.466</b>

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ СИБИРСКИХ ТРАППОВ

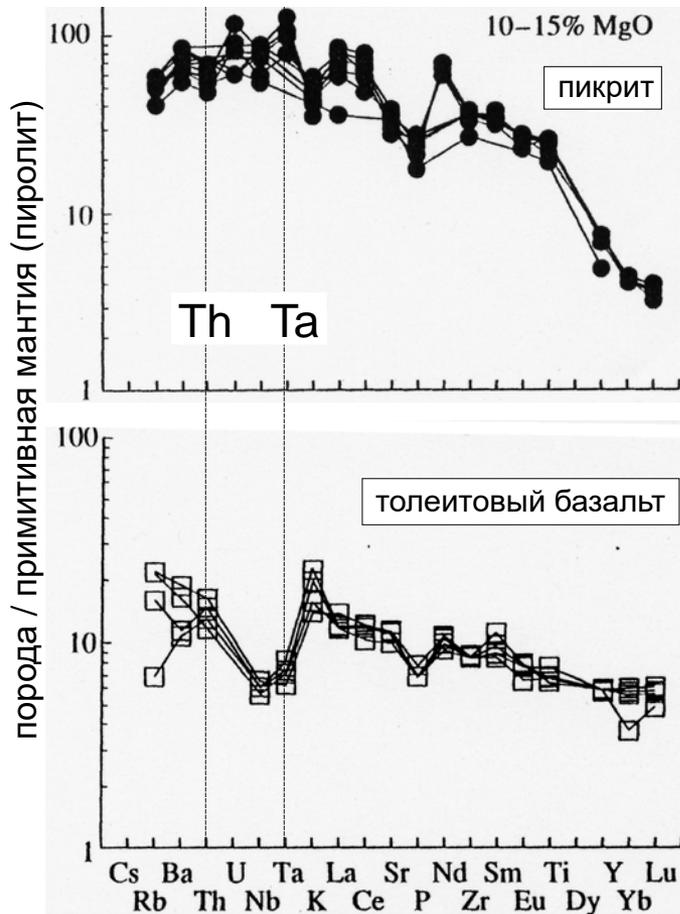
- Годлевский (60е гг): дифференцированные траппы СЗ Сибирской платформы представляют продукты более высокоMg# и глубинного магматизма, чем типичные траппы Тунгусской синеклизы
- Золотухин, Лагута (1985): «средний трапп» - продукт фракционной кристаллизации при низком давлении расплава, отвечающего высокоMg# базальту
- Проанализировав вышеприведенную таблицу, можно предположить, что источником большинства траппов Сибири могли являться расплавы, обедненные Ti, K, P - типа гудчихинских пикритов. При этом составы прод Моронговской свиты скорее близки к более щелочному высоко-Ti типу

# ОСОБЕННОСТИ ХИМИЗМА НИЗКО-Ті И ВЫСОКО-Ті БАЗАЛЬТОВ



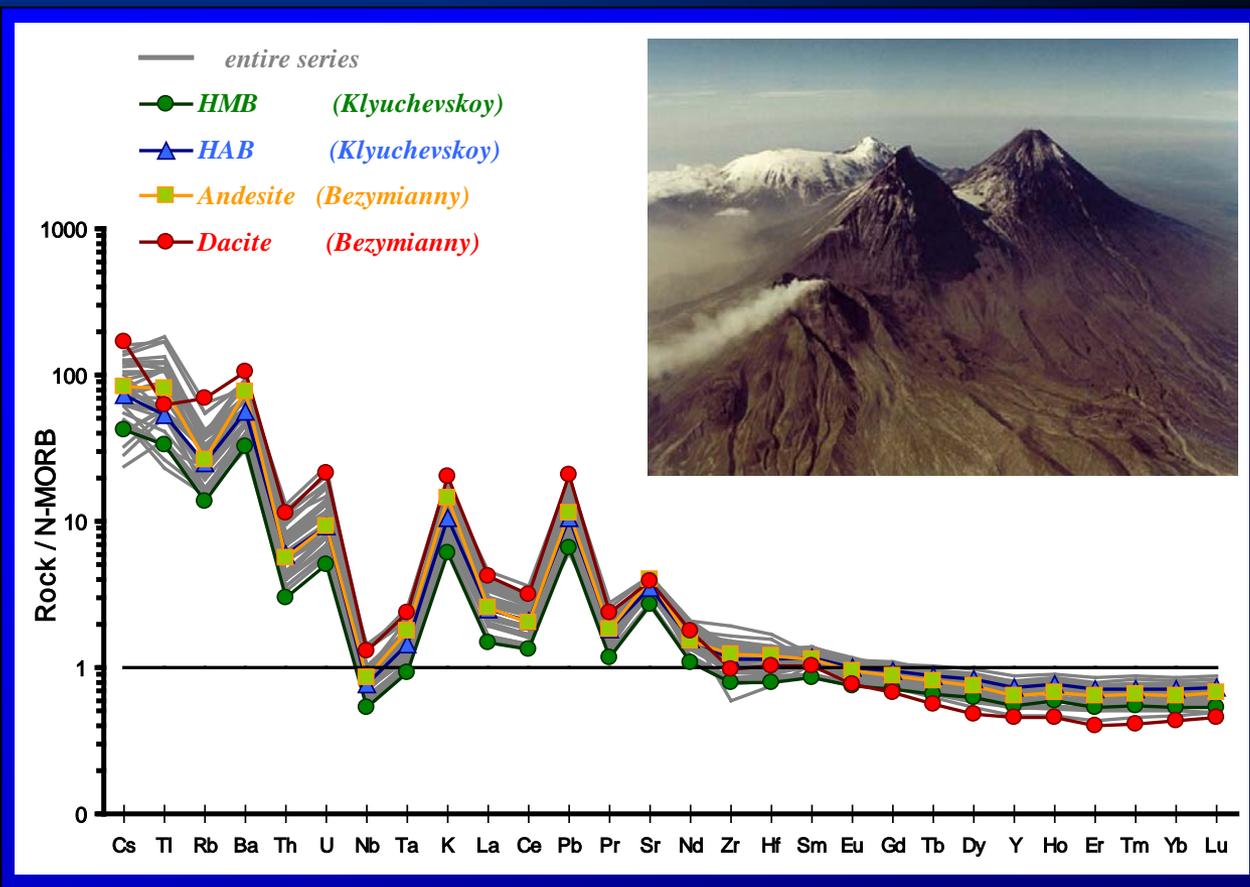
- Две группы формируют 2 субпараллельных тренда нормальной кристаллизационной эволюции, когда содержание  $TiO_2$  в продуктах фракционирования нарастает по мере снижения магнезиальности (за счет выделения ОI и ОI-PI котектики)
- На графиках корреляции содержаний Th и Ta эти субсерии также демонстрируют два тренда эволюции
- Обычные низко-Ti толеиты - в большей мере обогащены Th, чем высоко-Ti.
- Повышенное Th-Ta отношение некоторые исследователи рассматривают как указание на участие корового вещества в процессах траппового магмаобразования.

# ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭФФУЗИВНЫХ ТРАППОВ ПЛАТО ПУТОРАНА (Ryabchikov et al., 2001)



- Субщелочные пикриты высоко-Ti серии гораздо богаче Th и Ta, чем обычные толеиты, но, несмотря на это, толеитовые базальты имеют повышенные Th/Ta отношения
- Источник толеитовых траппов если и носил контаминированный характер, то контаминирована была не только сиалическая континентальная кора, а скорее кора другого (возможно, базальтового) типа

# СТАНДАРДГРАММА СОСТАВОВ БАЗАЛЬТОВ И АНДЕЗИТОВ ВУЛКАНОВ КЛЮЧЕВСКОЙ И БЕЗЫМЯННОЙ НА ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКЕ



- Для толеитов срединных хребтов совсем не характерен Nb-Ta минимум, который наблюдается в траппах Сибири

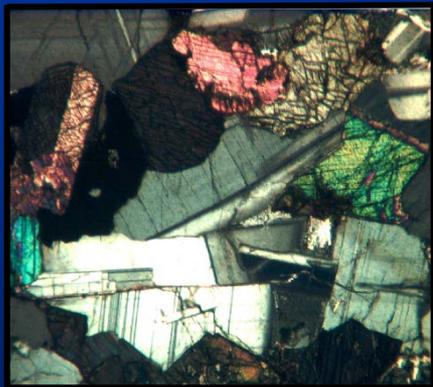
# СТРОЕНИЕ ИНТРУЗИВНЫХ ТРАПТТОВ



# КЛАССИФИКАЦИЯ ДОЛЕРИТОВ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

- Гипабиссальные породы нормального ряда щелочности подразделяют на два семейства - пикродолеритов и долеритов
- **Пикродолерит**: обогащен оливином (до 60 об.%) в интрузивных траппах; структура носит пойкилитовый характер (крупные зерна Pl и Crx заключают в себе идиоморфные кристаллы Ol размером до 1,5 мм)
- **Долериты**: (1) оливиновый долерит, (2) просто долерит и (3) лейкодолерит

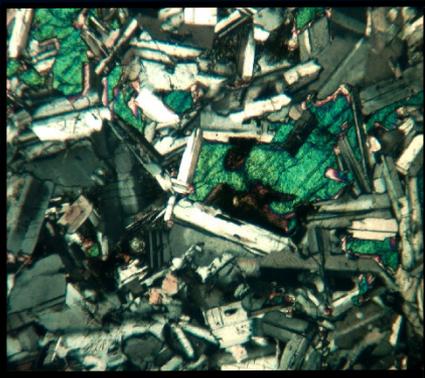
## СТРУКТУРЫ ДОЛЕРИТОВ



• Габбро-долерит: Pl и Hb распределены здесь относительно равномерно и характеризуются примерно одинаковой степенью идиоморфизма. Размер зерен 1-2 мм, а Ol достигает иногда 3-4 мм. В более значимых количествах проявляется титаномагнетит.



• Такситрохитовый долерит: присутствуют более крупные (до 5-6 мм) ойкокристаллы Hb. Долериты имеют неоднородное строение - в пределах шлифа есть участки и пойкилоофитовой, и призматически-зернистой структур.

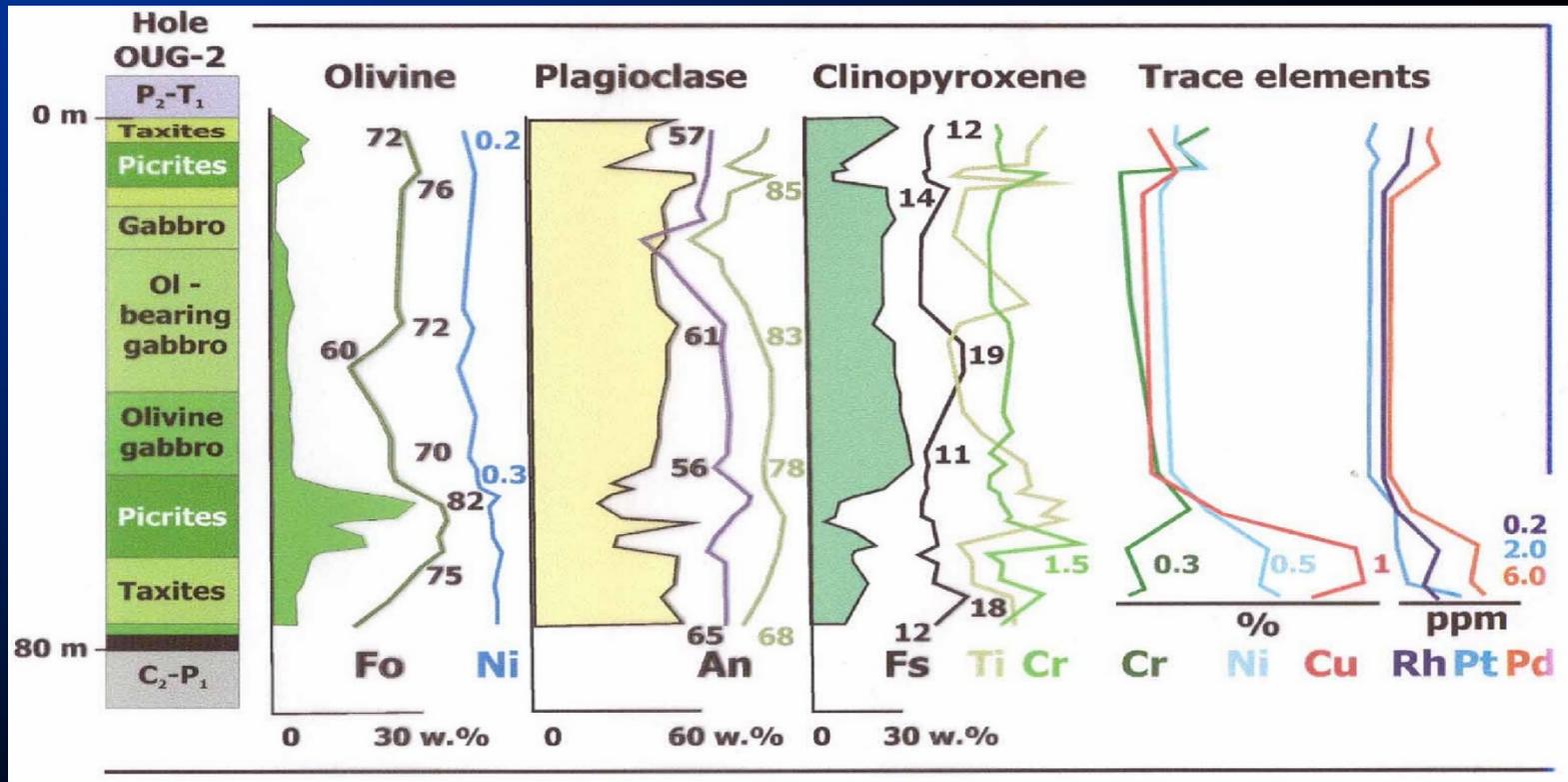


• Пойкилоофитовый долерит: ажурные крупне (до 1 см) ойкокристаллы Hb заполняют объем породы на 70-80% и заключают многочисленные идиоморфные хадакристаллы Pl и редкие Ol. Pl равномерно распределен в породе, а Ol концентрируются между ойкокристаллами. К этим интерстициям приурочены выделения ОРх и рудного минерала.

## ГЛАВНЫЕ ТИПЫ ДОЛЕРИТОВЫХ СИЛЛОВ

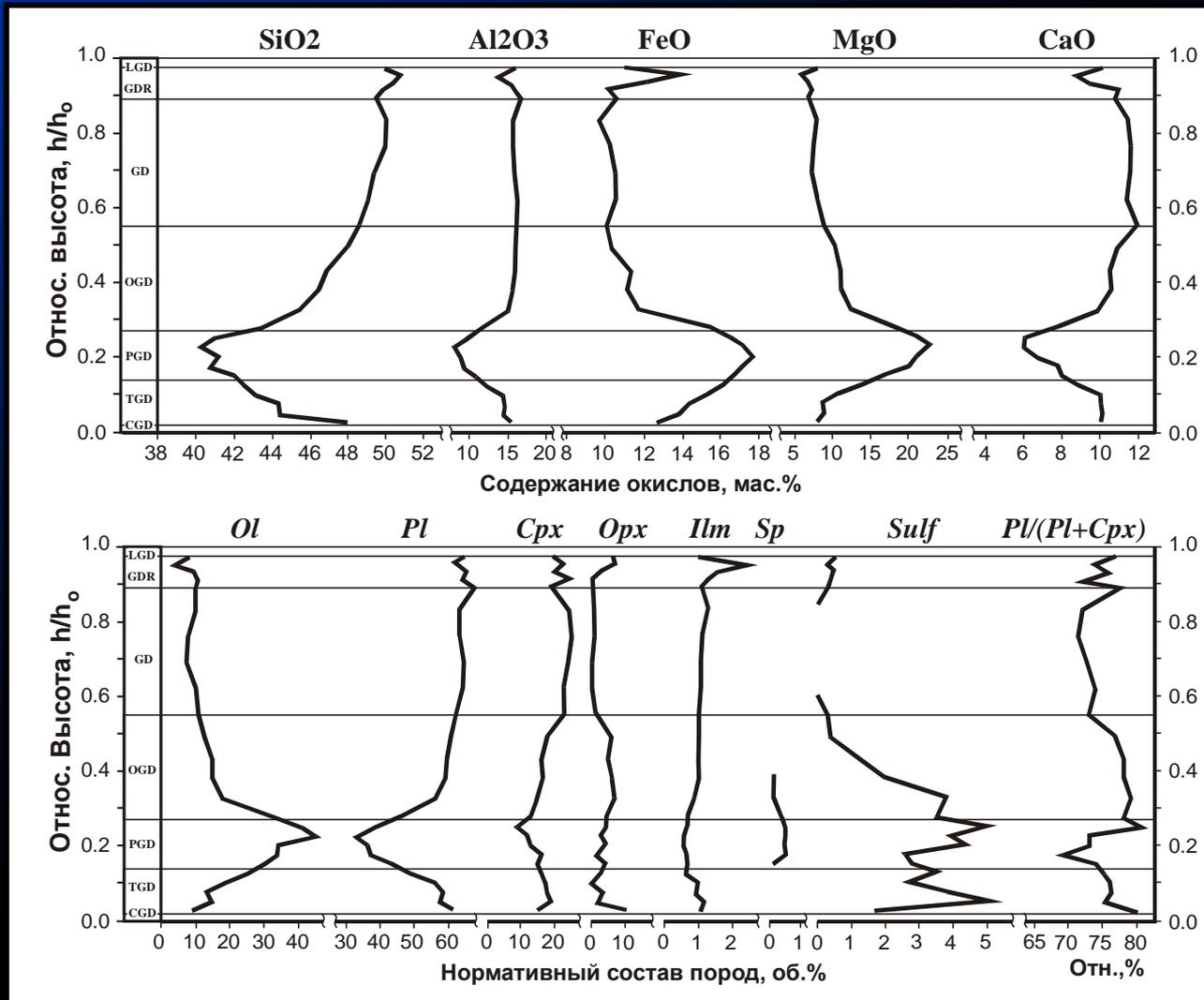
1. **Норильский:** интрузивы этого типа распространены на северо-западе Сибирской платформы (например, Талнахский интрузив) и очень хорошо изучены, поскольку с ними связано промышленное медно-никелевое оруденение. Их главным признаком является присутствие в придонных частях горизонта пикритового состава
2. **Аламджахский:** один из представителей этого типа - Вавуканский интрузив, который расположен в долине реки Вилной - притока Лены
3. **Ангара-Могдинский:** объединяет слабо-дифференцированные интрузивы. Это наиболее распространенный тип силлов Сибирской платформы. Характерный силл этого типа - Кузьмовский.

# СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕ-ТАЛНАХСКОГО ИНТРУЗИВА

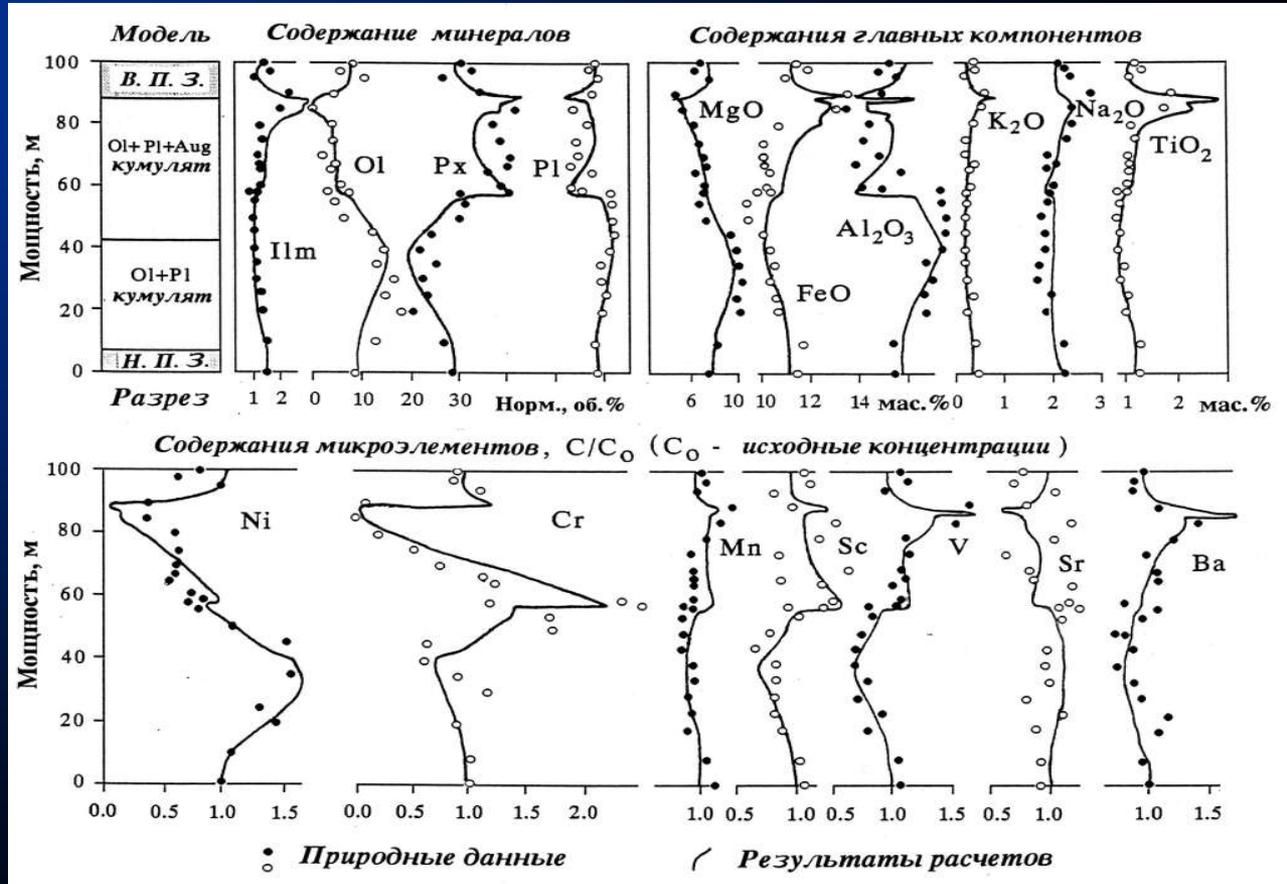


Обобщенный разрез интрузивов Норильского типа: Вдоль нижнего контакта протягиваются контактовые долериты, выше залегают такситовые долериты, которые образуют нижнюю приконтактовую зону. Выше - горизонт пикродолеритов, который перекрывается пойкилоофитовыми ОI-ми долеритами, сменяющимися вверх по разрезу такситоофитовыми ОI-содержащими долеритами. Трикровельная часть сложена пегматоидными кварцевыми габбро-диоритами со шлирами диорит- и габбро-пегматитов.

# СТРОЕНИЕ ТАЛНАХСКОГО ИНТРУЗИВА (по данным Днепровской)

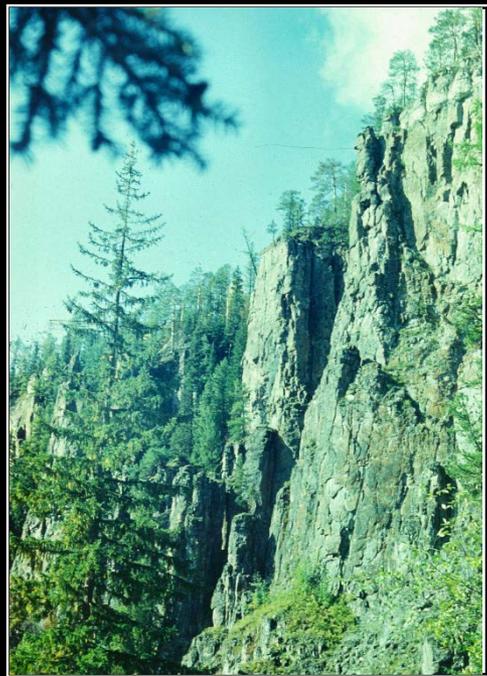


# СТРОЕНИЕ ВАВУКАНСКОГО ИНТРУЗИВА



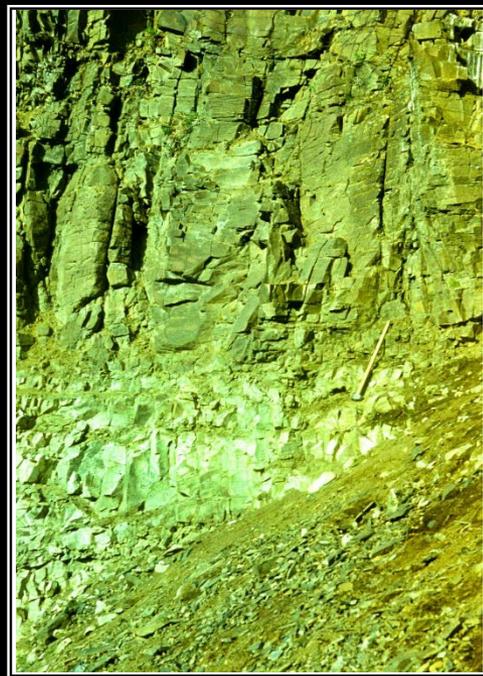
Для интрузивов аламджахского типа также характерна расслоенность и асимметрия строения, но, в отличие от норильских, они лишены горизонтов пикродолеритов. Главным типоморфным признаком этих силлов является присутствие горизонта призматически-зернистых габбро-долеритов. Вавуканский интрузив имеет мощность 100 м, но распределение минерального и химического состава отличается здесь весьма существенно.

# КУЗЬМОВСКИЙ СИЛЛ



Скальные выходы  
Кузьмовского силла  
долеритов

Нижний контакт  
долеритов  
с карбонатными  
осадками



Ангаро-могдинский тип  
объединяет  
слабодифференцированные  
интрузивы. Это наиболее  
распространенный тип  
силлов  
Сибирской платформы.  
Основной объем этих тел  
сложен пойкилоофитовыми  
долеритами с небольшим  
накоплением оливина в  
нижних частях разреза.

# СТРОЕНИЕ КУЗЬМОВСКОГО СИЛЛА ДОЛЕРИТОВ

