

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 ТРАПТОВ

ДОЛЕРИТЫ ФЕРРАРА, ТАСМАНИИ И ПАРАНЫ

Оксиды	Диабазы Феррара (Антарктида)		Тасманский долерит	Базальты Параны (Бразилия)	
SiO ₂	50.40	53.75	53.4	54.20	50.82
TiO ₂	0.44	0.70	0.6	1.53	2.79
Al ₂ O ₃	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 ₂ O	1.42	1.83	1.7	2.71	2.70
K ₂ O	0.37	0.81	1.0	1.41	1.21
P ₂ O ₅	0.08	0.18	0.1	0.23	0.43
Mg#	0.682	0.552	0.568	0.409	0.389

$$Mg\# = MgO / (MgO + FeO)$$

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-коровое 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 ответы на следующие вопросы:

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

ПРОВИНЦИЯ КАРРУ В ГЛОБАЛЬНОМ МАСШТАБЕ

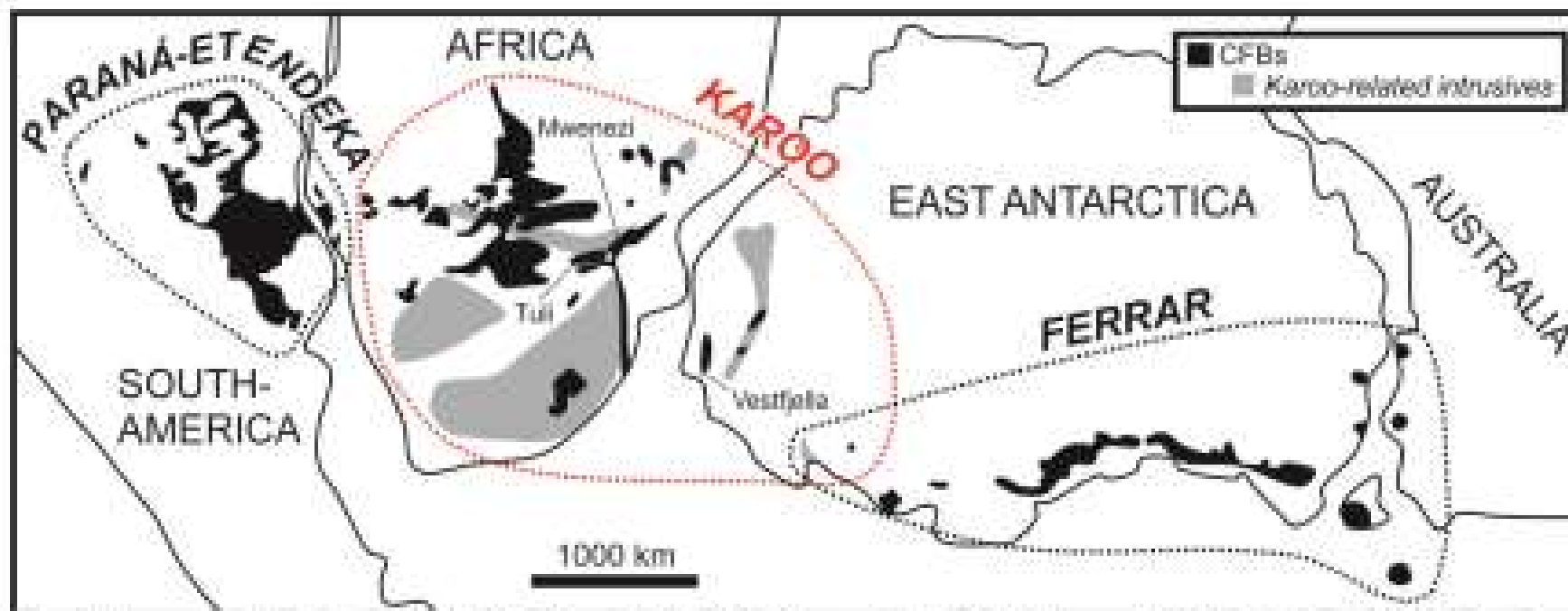


Fig. 1. A reconstruction (modified after Hergt et al., 1991; Storey et al., 1992; Segev, 2002; Leat et al., 2006; Jourdan et al., 2007) of Gondwana supercontinent showing the distribution of Mesozoic CFBs. In the case of the Karoo LIP, the extent of related intrusive rocks (found outside CFBs) is also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

Провинция Карру в Южной Африке: sauser-like intrusions

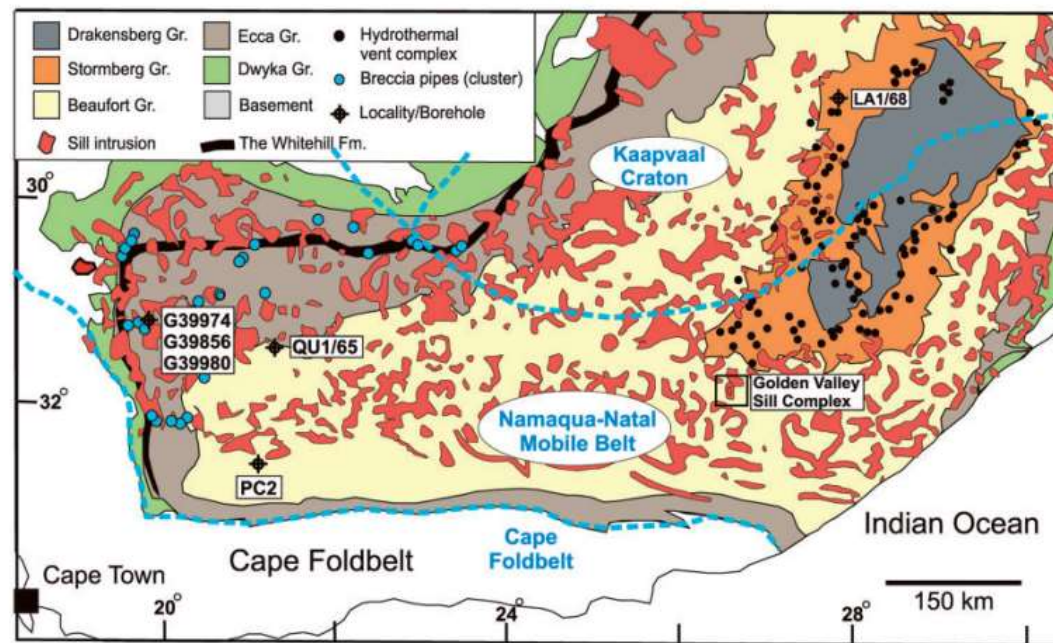


Fig. 1. Simplified geological map of the Karoo Basin showing the locations of the studied boreholes. The blue dashed lines mark the boundaries between basement terranes or domains. Based on maps by De Wit *et al.* (1992), Cole (1998) and Schmitz (2002), and references therein.

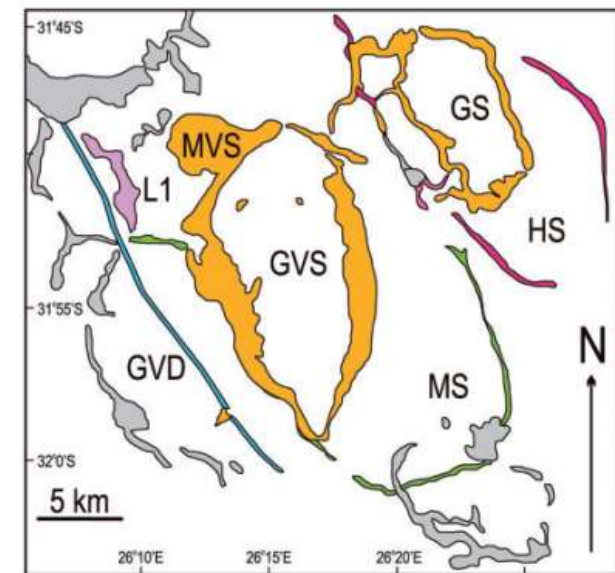
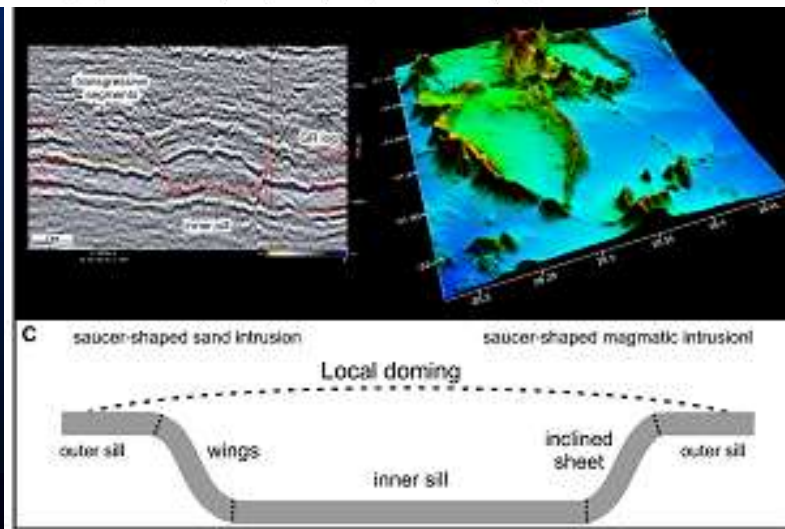


Fig. 2. Simplified map showing the main sills and dykes in the Golden Valley Sill Complex (after Galerne *et al.*, 2008). Different colors distinguish the geochemical signatures established by Galerne *et al.* (2008) by forward stepwise-discriminant function analysis; sills not included in this study are shown in grey. GVS, Golden Valley Sill; GS, Glen Sill; HS, Harmony Sill; MS, Morning Sun Sill; L1, L1 sill; GVD, Golden Valley Dyke. The position of the Golden Valley Sill Complex is indicated in Fig. 1. The *c.* 100 km long, up to 30 m wide Cradock dyke (Marsh & Mndaweni, 1998) is located 70 km west of the Golden Valley Sill Complex.



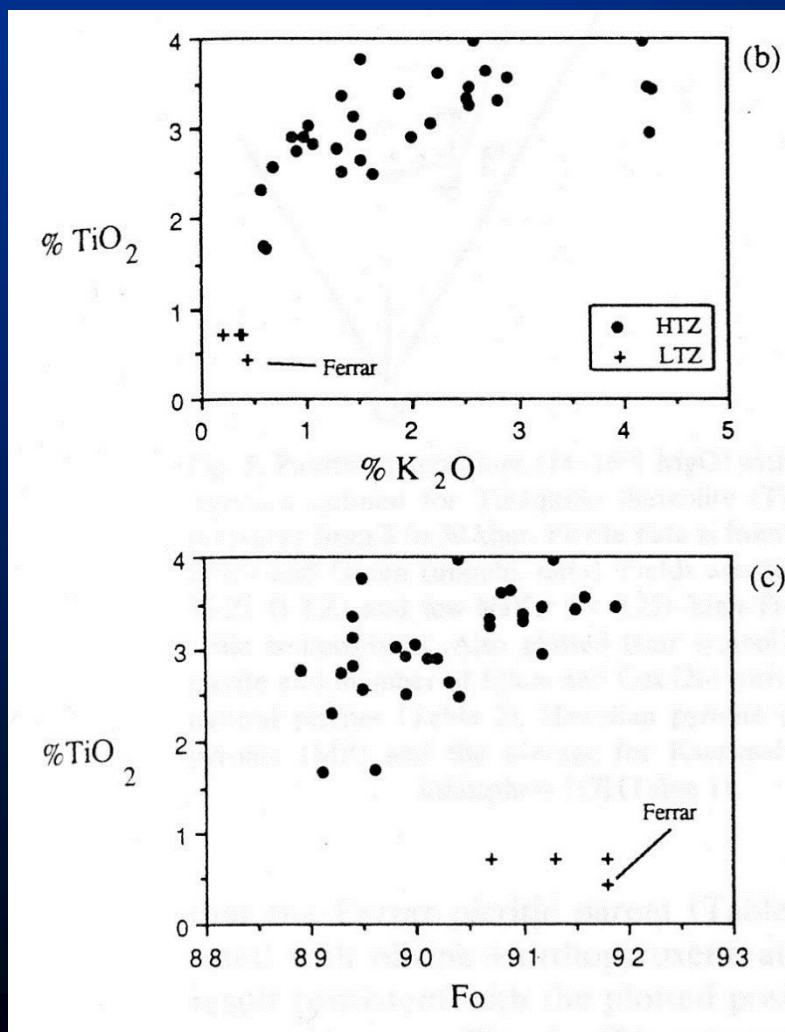
ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫЕ СОСТАВЫ ТИКРИТОВ И БАЗАЛЬТОВ

ПРОВИНЦИИ КАРРУ (ЮЖНАЯ АФРИКА)

Оксиды	Вулканические породы Карру				Плато Онтонг Ява
	Тикриты		Низко-Ti серия		
SiO ₂	48.96	48.87	50.22	50.17	49.25
TiO ₂	2.74	0.72	0.97	1.55	1.20
Al ₂ O ₃	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
MgO	15.48	15.08	7.36	5.28	7.75
CaO	8.50	8.89	10.21	10.26	12.35
Na ₂ O	1.62	1.56	2.06	2.63	2.05
K ₂ O	0.90	0.21	0.22	0.28	0.14
P ₂ O ₅	0.34	0.09	0.17	0.19	0.06
Mg#	0.696	0.725	0.572	0.410	0.547

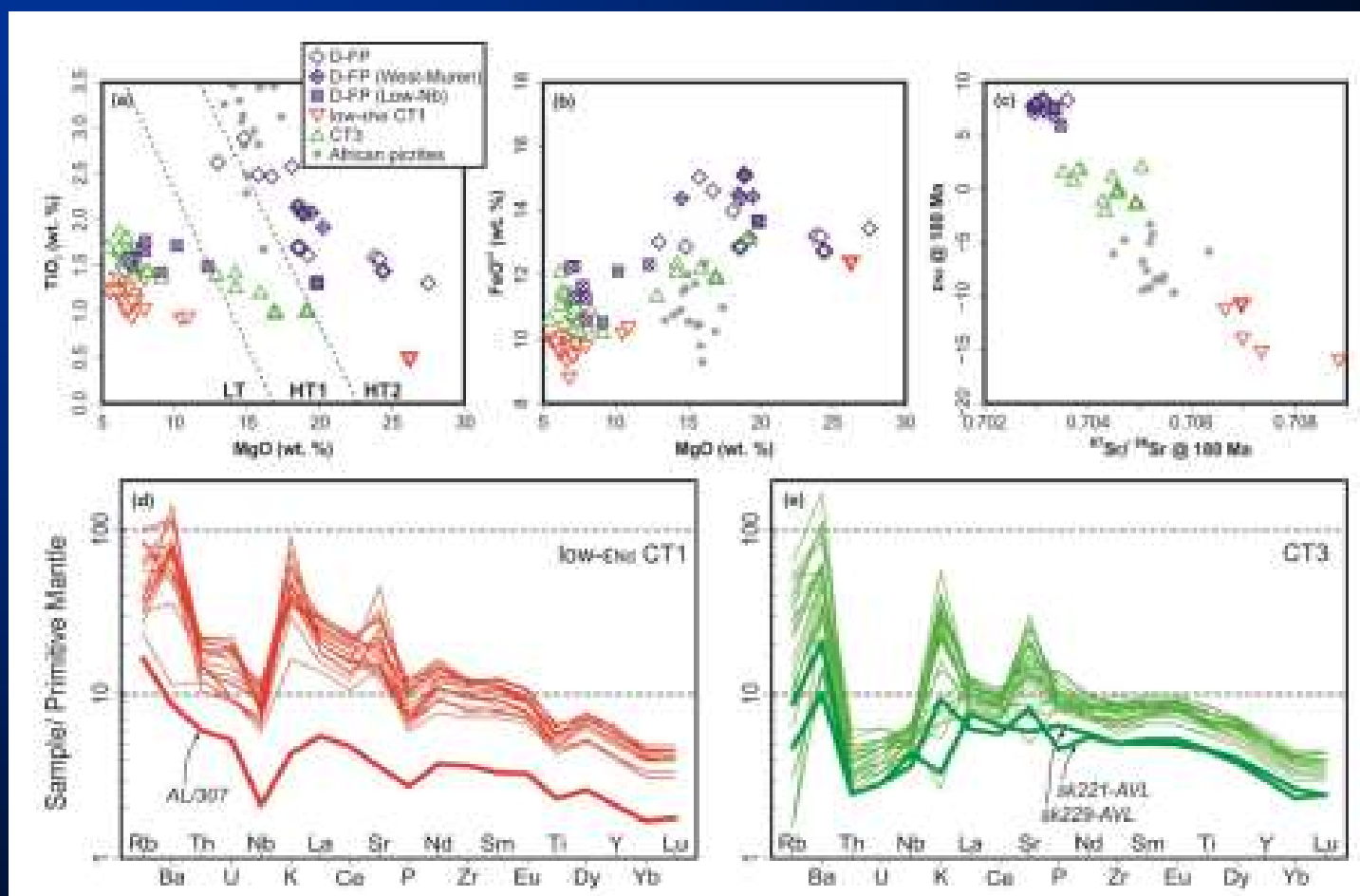
$$\text{Mg\#} = \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$$

КОРРЕЛЯЦИИ СОДЕРЖАНИЙ TiO_2 , K_2O И СОСТАВА ОЛИВИНА В ПИКРИТАХ КАРРУ ПРИ 14-16% 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 ^{18}O in the mantle sources of the Antarctic portion of the Karoo large igneous province

Провинция Карру в Южной Африке

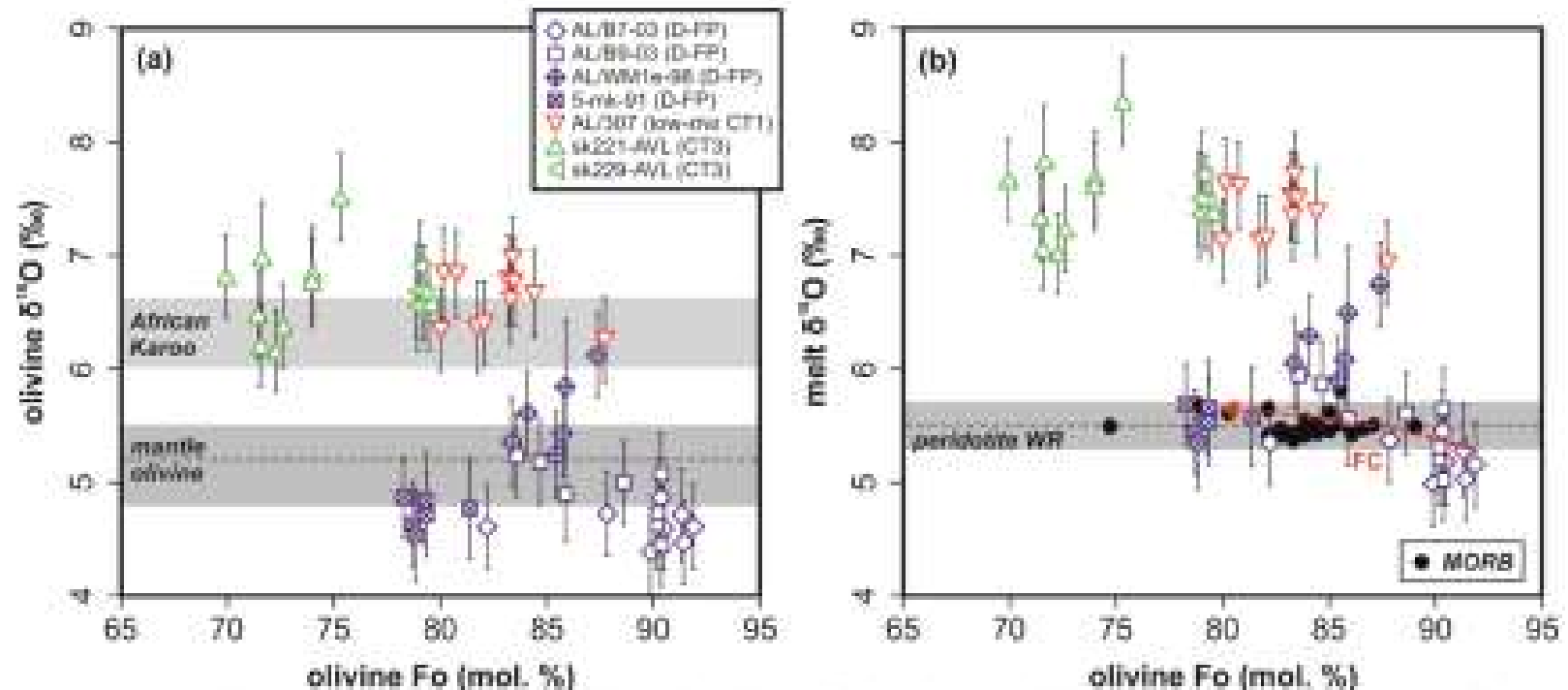


Fig. 4. Oxygen isotopic compositions of a) the analyzed Vestfjella olivines and b) equilibrium melts shown relative to olivine Fo content, error bars are $\pm 2\sigma$ (Table 1). In a, $\delta^{18}\text{O}$ ranges of olivines from Mwenzezi and Tuli picrites from Africa are after Harris et al. (2015; 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 $K_d(\text{Fe}^{2+}-\text{Mg})^{\text{ol-liq}}$ of 0.30. Fractional crystallization model (FC) is explained in section 6.

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

ТРАПТЫ ДЕКАНА

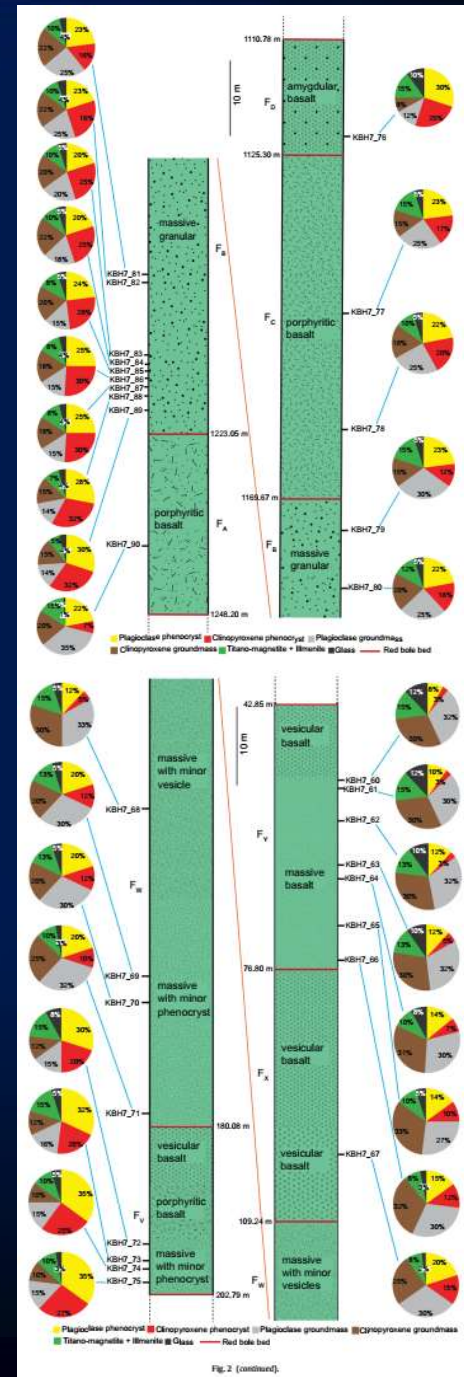
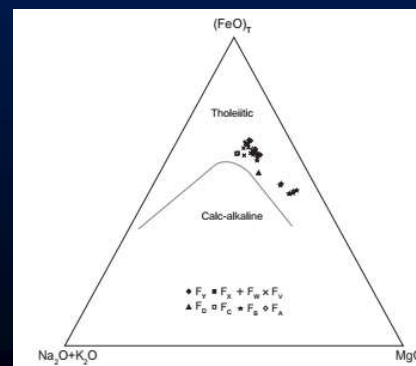
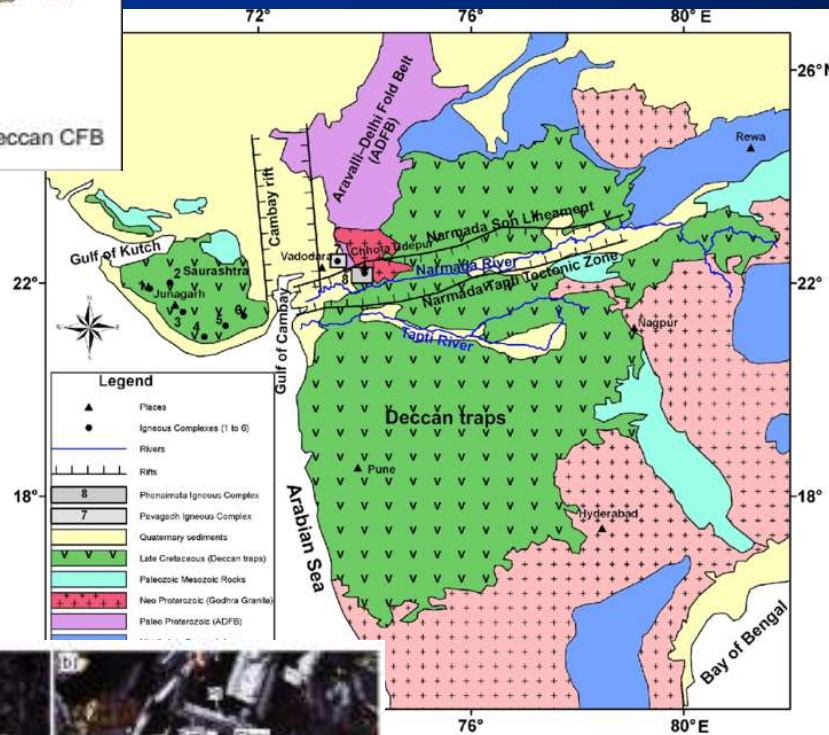
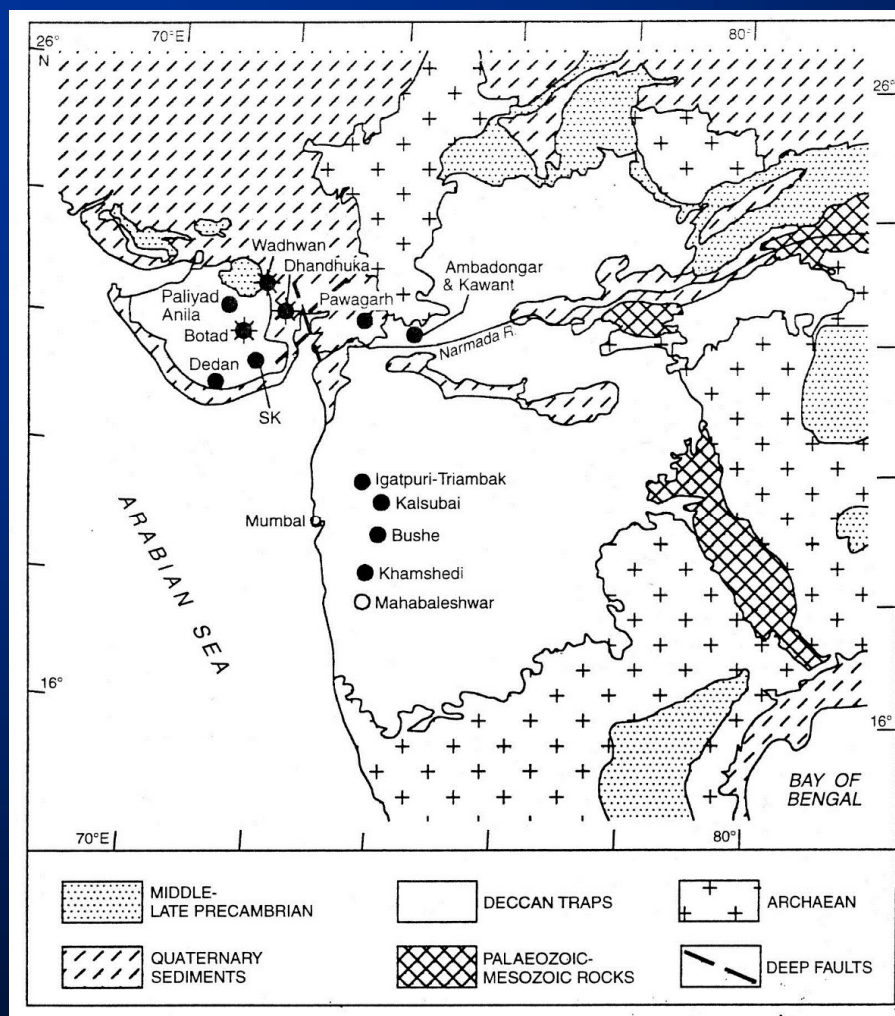


СХЕМА РАСТРОСТРАНЕНИЯ ДЕКАНСКИХ ТРАПТТОВ



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

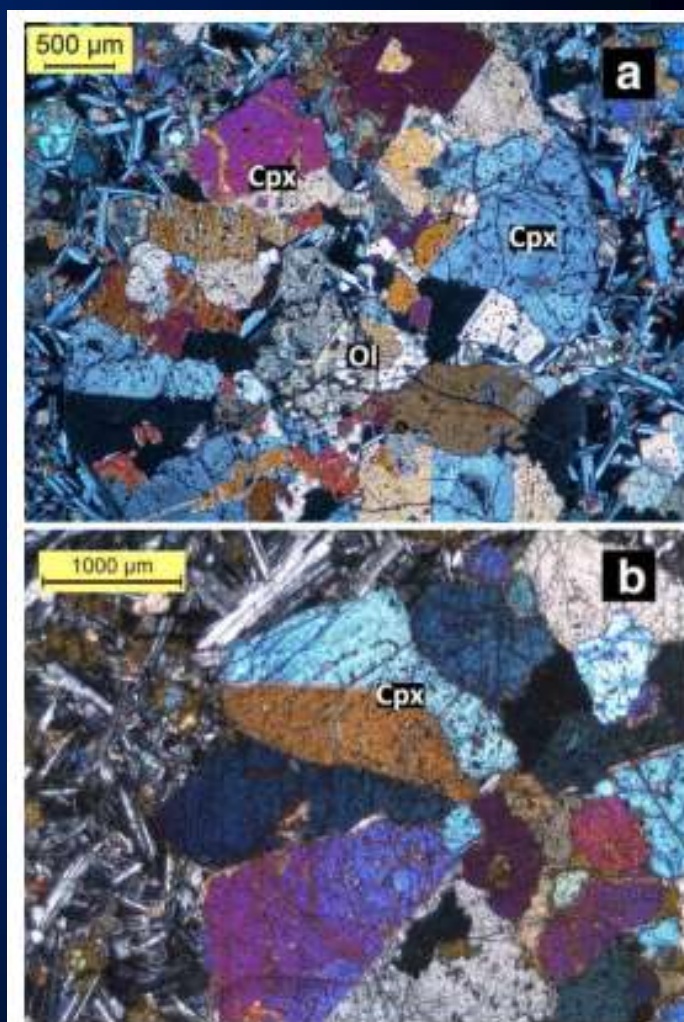
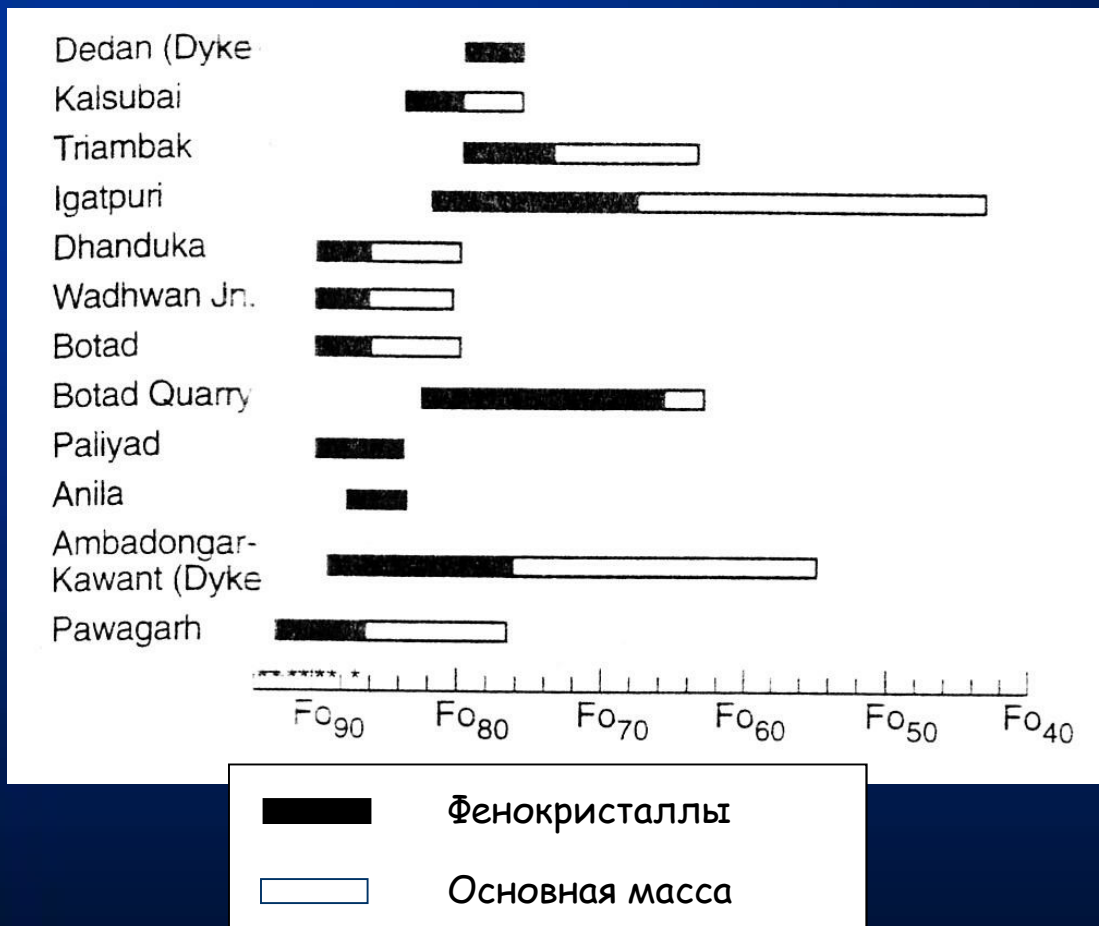


Fig. 2 Thin section photomicrographs of the Powai ankaramite between crossed nicols showing large crystals of olivine (Ol) and sector zoned, twinned and radially arranged clinopyroxene (Cpx) surrounded by a fine-grained groundmass containing plagioclase laths

СОСТАВЫ ОЛИВИНА В ДЕКАНСКИХ ПИКРИТ-БАЗАЛЬТАХ



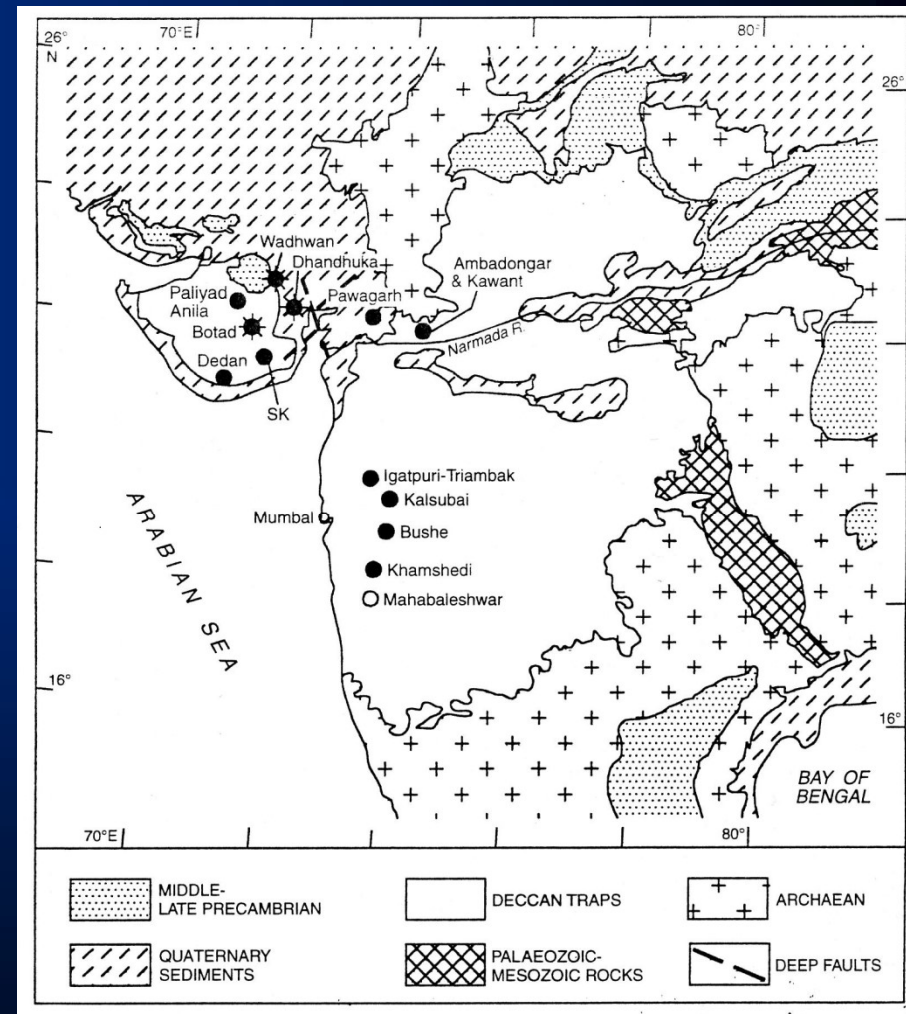
- Наиболее магнезиальные оливины из пикритов Деканских траппов имеют состав Fo_{90}
- Это главный признак глубинного происхождения первичных магм из перidotитового вещества

ПРИРОДА ДЕКАНСКОГО ТРАППОВОГО МАГМАТИЗМА

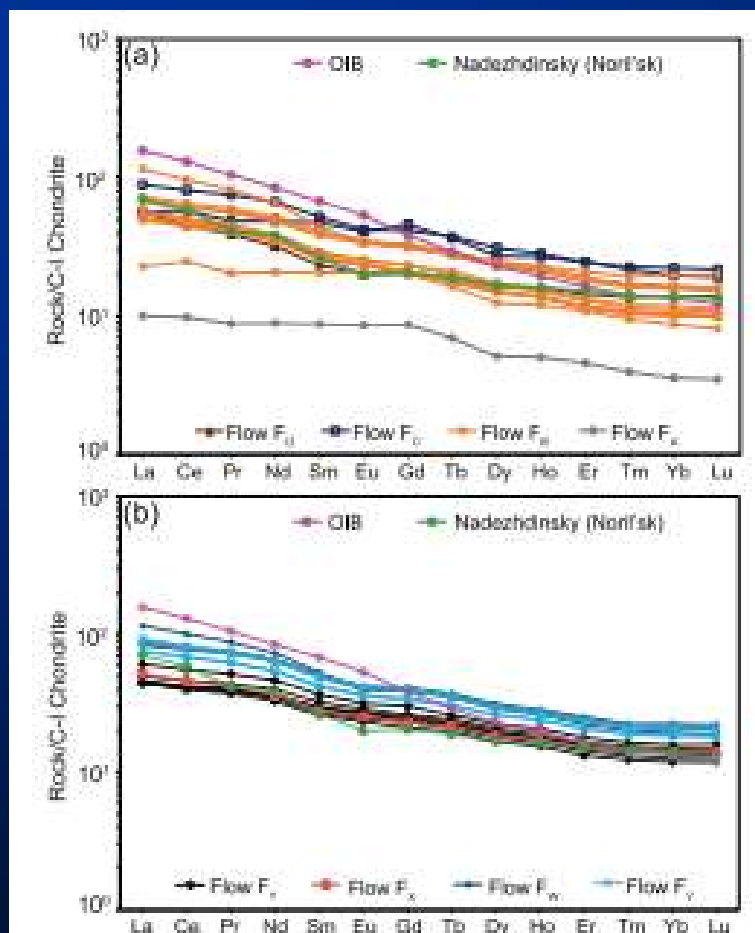
- Первые фазы деканского траппового магматизма проявились около 70 млн лет назад на СЗ п-ва Индостан, тогда как основная фаза толеитового магматизма, сформировавшая большую часть плато Декан протекала позже на 3-4 млн лет
- Самые ранние траппы представлены щелочными базальтоидами
- Есть основания предполагать, 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 ТРАПТОВ

- 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 О ГЕОХИМИИ ДЕКАНСКИХ ТРАПТТОВ



Низы

Верхи

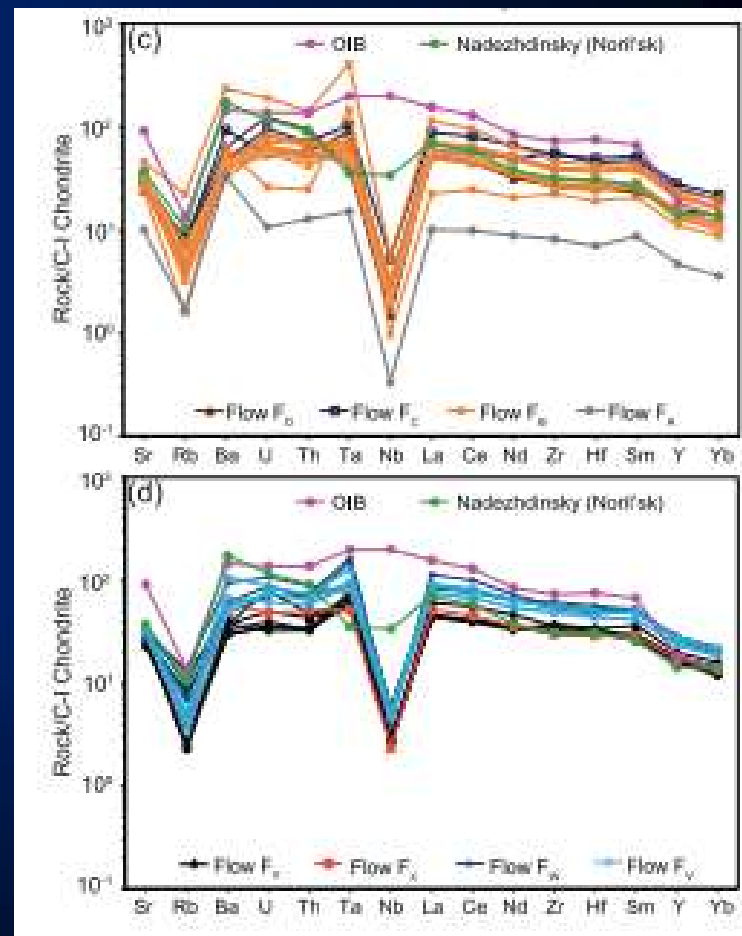


Fig. 12. Chondrite-normalized REE plots and chondrite normalized multi-element plots of the KBH-7 basalts from the lower (a, c) and upper (b, d) parts of the KBH-7 borehole. Normalized values are from McDonough and Sun (1995). OIB data are from Sun and McDonough (1989), and Siberian trap data are from Lightfoot et al. (1990b, 1993).

НОВЫЕ ДАННЫЕ ОБ ИСХОДНЫХ МАГМАХ ТОЛЕИТОВ ДЕКАНСКИХ ТРАПТОВ

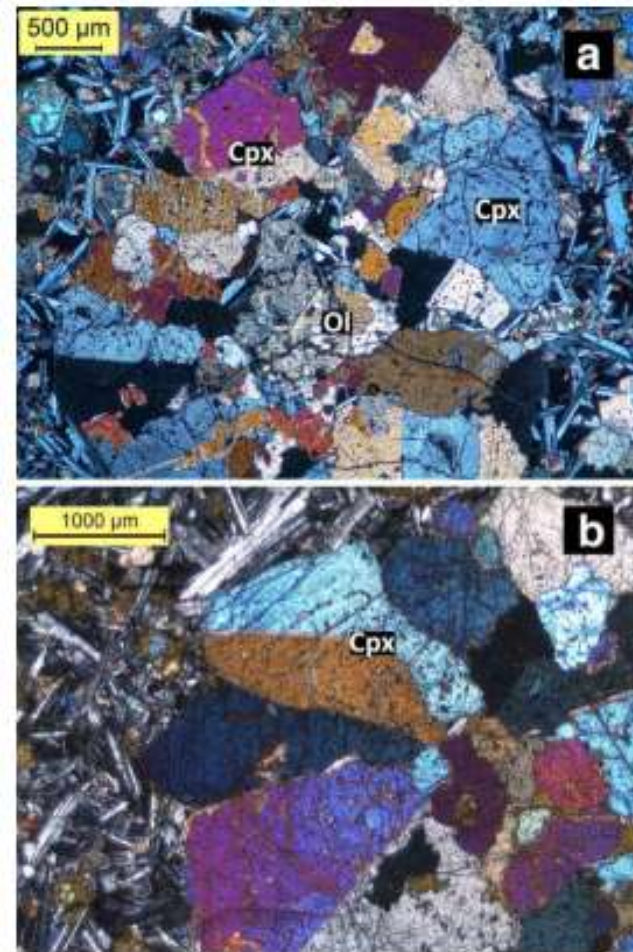
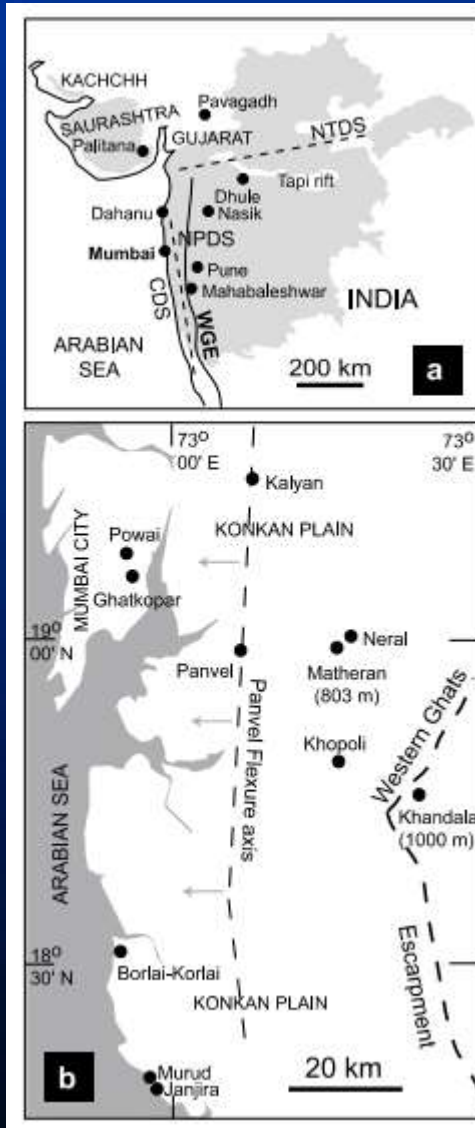


Fig. 2 Thin section photomicrographs of the Powai ankaramite between crossed nicols showing large crystals of olivine (Ol) and sector zoned, twinned and radially arranged clinopyroxene (Cpx) surrounded by a fine-grained groundmass containing plagioclase laths

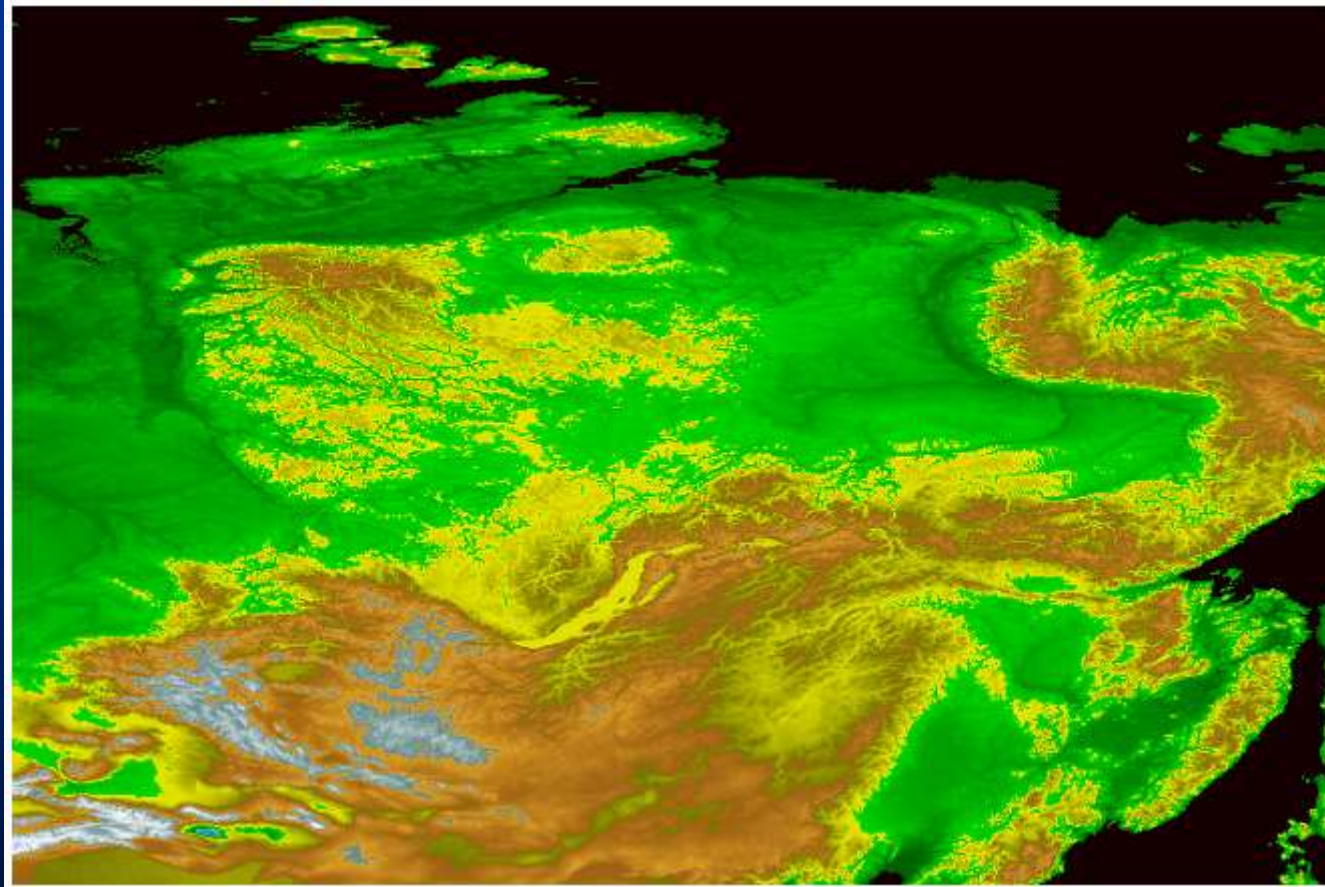
Значение анкарамитов как исходных магм для толеитов Западных Гат

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 (± 12 °C) and pressures of 8.0–13.0 kb (± 0.8 kb). The estimated pressures correspond with depths of 30–49 km (± 3 km) that overlap with the present-day seismically constrained Moho depths of 36–41 km (± 2 km) below Mumbai and nearby areas. The primary magmas originated by ≤ 15 % batch melting of the mantle, ascended through the crust, and pooled and evolved in magma chambers at depths ≤ 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

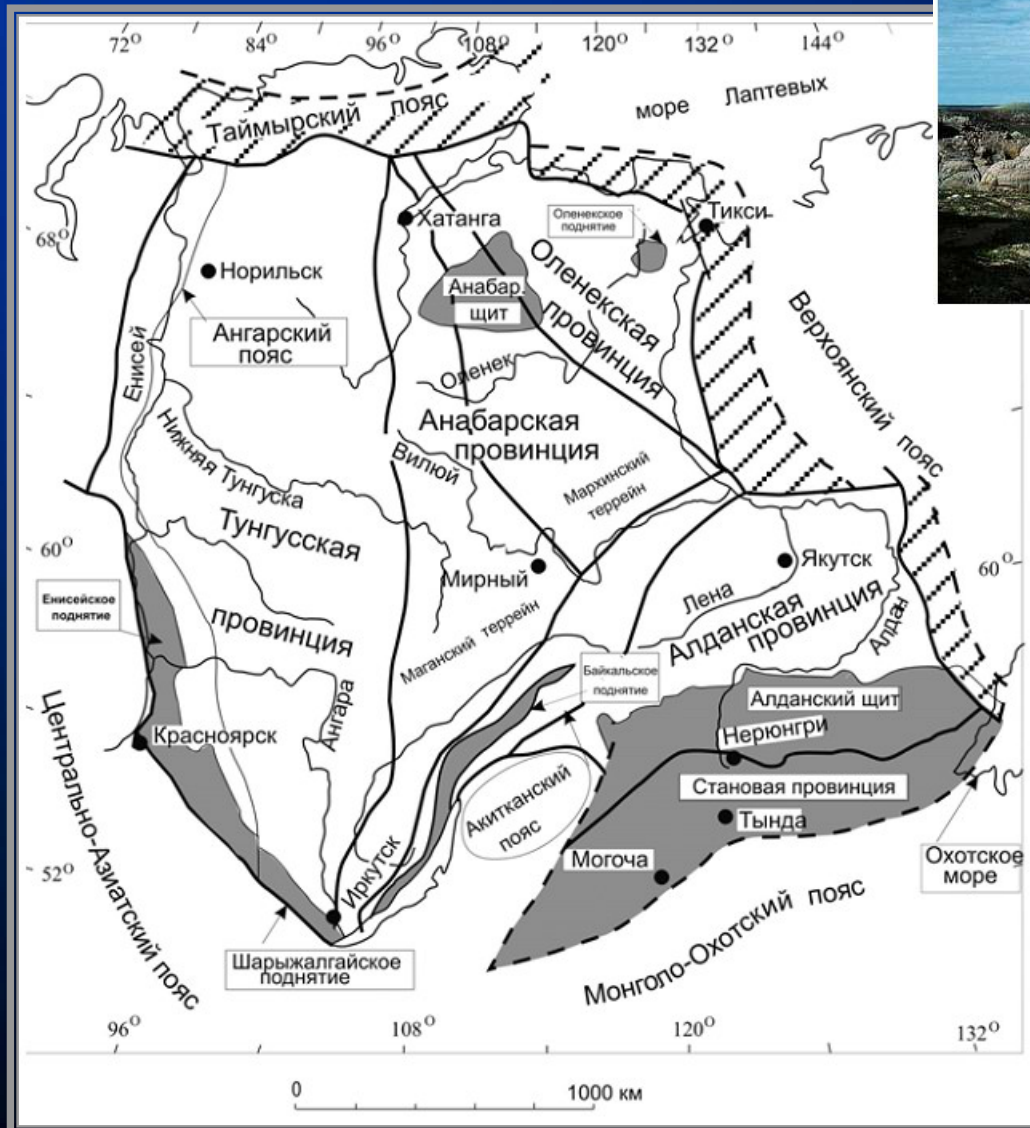
separating due to its buoyancy. Later batches of tholeiitic magmas would pierce these cumulate piles, leading to the formation of cumulate rocks such as the Powai ankaramite, in which we have identified dissolution of orthopyroxene and subsequent crystallization of augite, olivine, and plagioclase. The tholeiitic primary magmas of the Powai ankaramite, the Ghatkopar–Powai tholeiites, and the voluminous Ambenali and Mahabaleshwar tholeiites of the Western Ghats last equilibrated with spinel lherzolite mantle that was neither Fe rich nor anomalously hot.

ПОЛОЖЕНИЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ



Сибирский кратон, площадью около 4×10^9 км², 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
два структурных этажа –
нижний и верхний

ГЕОЛОГИЯ ТРАПТОВОЙ ПРОВИНЦИИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Верхний этаж – PZ: подразделяется на 3 яруса:

Третий J-K: преимущественно морские терригенные осадки, перекрытые четвертичными отложениями

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.

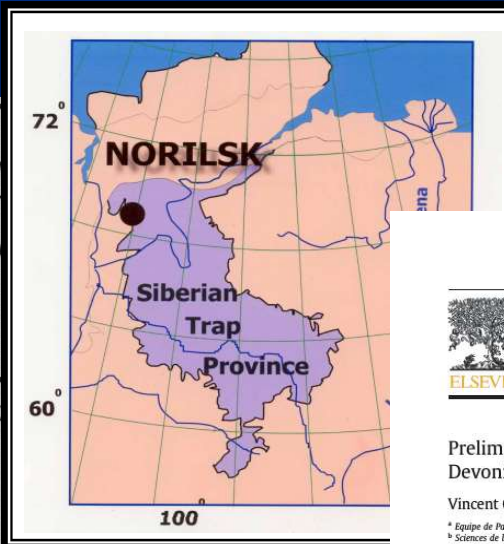
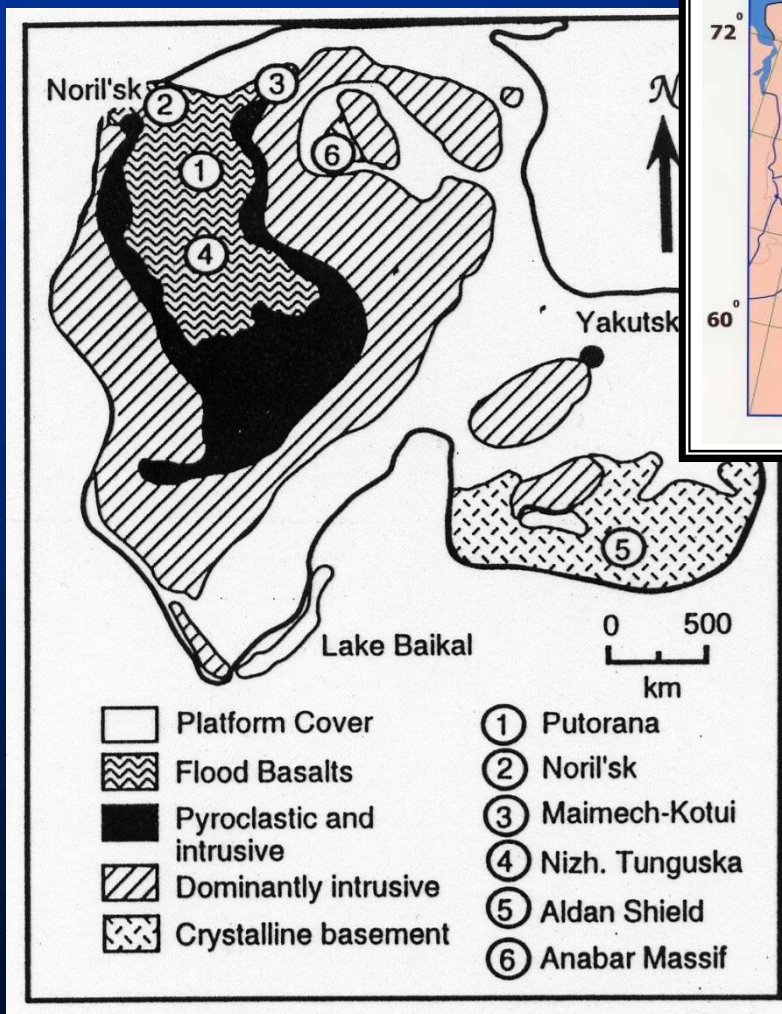
Первый ярус V-C₁: морские (в основном, карбонатные) отложения

Нижний этаж – PR (1.3-1.7 млрд. лет):

осадочные и вулканогенные образования, претерпевшие метаморфизм зеленосланцевой фации. Самый ранний цикл платобазальтового магматизма Сибирской платформы.



ОСНОВНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ТРАППОВОЙ ФОРМАЦИИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ



Девонские траппы Вилуя:
345-367 млн. лет



Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): Eruption at the time of Late Devonian extinction events?

Vincent Courtillot^{a,b}, Vadim A. Kravchinsky^c, Xavier Quidelleur^{d,e,*}, Paul R. Renne^{f,g}, Dmitry P. Gladkochub^h

^a Equipe de Paléomagnétisme, Institut de Physique du Globe, UMR 7154, Sorbonne Paris Cité, F-75005, Paris, France
^b Sciences de la Terre, de l'Environnement et des Planètes, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, F-75013, Paris, France
^c Department of Physics, University of Alberta, Edmonton, Canada
^d Univ Paris-Sud, Laboratoire IDES, UMR8148, F-91405, France
^e CNRS, Orsay, F-91405, France
^f Berkeley Geochronology Center, 2455 Ridge Road, Berkeley, California, USA, 94709
^g Dept. of Earth and Planetary Science, University of California, Berkeley, CA, USA 94720
^h Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

ARTICLE INFO

Article history:
Received 28 May 2010
Received in revised form 23 September 2010
Accepted 29 September 2010
Available online 3 November 2010

Editor: R.W. Carlson

Keywords:
⁴⁰Ar/³⁹Ar dating
K-Ar dating
Frasnian-Famennian
Viluy Traps
Siberia

ABSTRACT

In this short note, we report new age determinations from four samples of the Middle-Paleozoic Viluy Traps in Siberia, east of the more famous Permo-Triassic Siberian Traps. These samples, which were collected from three drill cores, have been analyzed in parallel and independently in the Orsay (France) and Berkeley Geochronology Center (BGC, USA) geochronology laboratories, using respectively the Cassinot-Gillot K-Ar and the ⁴⁰Ar/³⁹Ar techniques. Dating these samples as a concerted effort in two independent laboratories working jointly on their interpretation is a rather rare yet very valuable exercise. With the K-Ar technique, ages ranging from 338 to 367 Ma with uncertainties on the order of 5 Ma were obtained. With the ⁴⁰Ar/³⁹Ar technique, integrated ages range from 344 to 367 Ma, with uncertainties on the order of 1 Ma, and two samples yielded plateaus, i.e. the best determined ages, at 360.3 ± 0.9 and 370.0 ± 0.7 Ma. Three out of four ages yielded by the two separate methods are in agreement within uncertainties. One sample yields incompatible ages and could be from a later, altered dyke event. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar plateau age of 370.0 ± 0.7 Ma (conventional calibration) or 373.4 ± 0.7 Ma (recalculated per Renne et al., 2010), the most reliable age obtained in this study, is compatible with recent determinations of the Late Devonian extinction events at the end-Frasnian (~376 ± 3 Ma). These results underscore a need for further work, in progress.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In the course of a study of the rock- and paleo-magnetic properties of samples collected from volcanic outcrops related to (sometimes diamond-bearing) kimberlite pipes in the Viluy area, east of the Permo-Triassic Siberian Traps province, Kravchinsky et al. (2002) found two distinct paleomagnetic poles. One of these poles could unambiguously be correlated with the 250 Ma-old Siberian Traps (e.g. Pavlov et al., 2007) and therefore the magmatic samples could be assigned that age, corresponding to the Permo-Triassic boundary. The other pole was at a previously unknown location. Rather imprecise dating allowed its assignment to the period from 350 to 380 Ma, which Kravchinsky et al. (2002) noted included the Frasnian-Famennian (FF) boundary, the largest mass extinction event prior to the Permo-Triassic and Guadalupian-Tatarian extinctions near the end of the Paleozoic. This led to the

suggestion that the corresponding magmatism could have been related to a major flood basalt event, emplacing a large volume of magma at the FF boundary some 370 Ma ago. This would be an interesting indication of yet another such event related to diamond-bearing kimberlites, and would almost complete the list of Phanerozoic flood basalt/mass extinction correlations (summarized by Courtillot and Renne, 2003), with a single event at the time of the end-Ordovician mass extinction still unrecognized. Since that suggestion was made, the age of the Frasnian-Famennian boundary has been significantly revised. Based on the interpolation between two biontic dates using U/Pb at 381.1 ± 1.3 and 363.6 ± 1.6 Ma (Tucker et al., 1998), the age of the FF boundary was interpolated at 376.5 Ma, some 10 Ma older than most previous estimates; as a result, Gradstein et al. (2005) placed the FF boundary in their new geological time scale at 374.5 ± 2.6 Ma. Using the same approach, a slightly older age of 376.1 ± 1.6 Ma has recently been proposed (Kaufmann et al., 2004) and subsequently revised to 376.1 ± 3.6 Ma (Kaufmann, 2006). In the debate on the causes of mass extinctions, meteorite or comet impacts have been the main candidate often opposed to volcanism. In their review, Courtillot and Renne (2003)

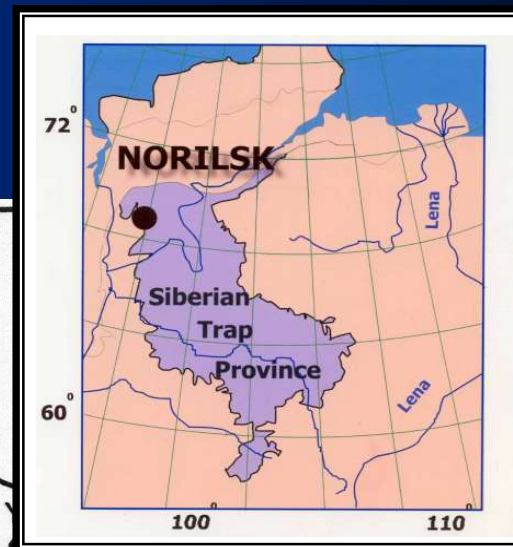
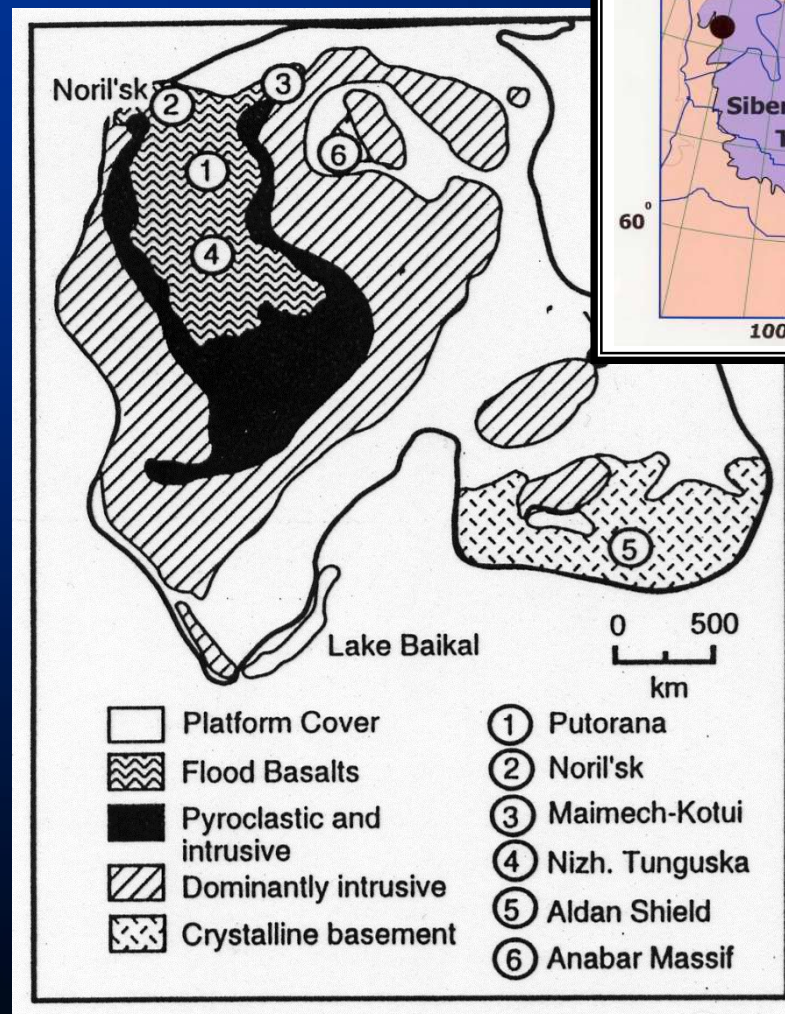
* Corresponding author. Univ Paris-Sud, Laboratoire IDES, UMR8148, F-91405, France.
E-mail address: xavier.quidelleur@u-psud.fr (X. Quidelleur).

СООТНОШЕНИЯ ГЛАВНЫХ ФАЦИЙ ТРАПТОВОЙ ФОРМАЦИИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (Лурье, Масайтис, 1964)

Фации	Площадь, тыс. км ²	Средняя мощность, км	Объем, тыс. км ³	Средняя плотность, г/см ³	Масса, т×10 ¹² 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
Всего			911		2459	100

- Характерная особенность траптовой 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 разрезов – 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 ТРАППОВ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

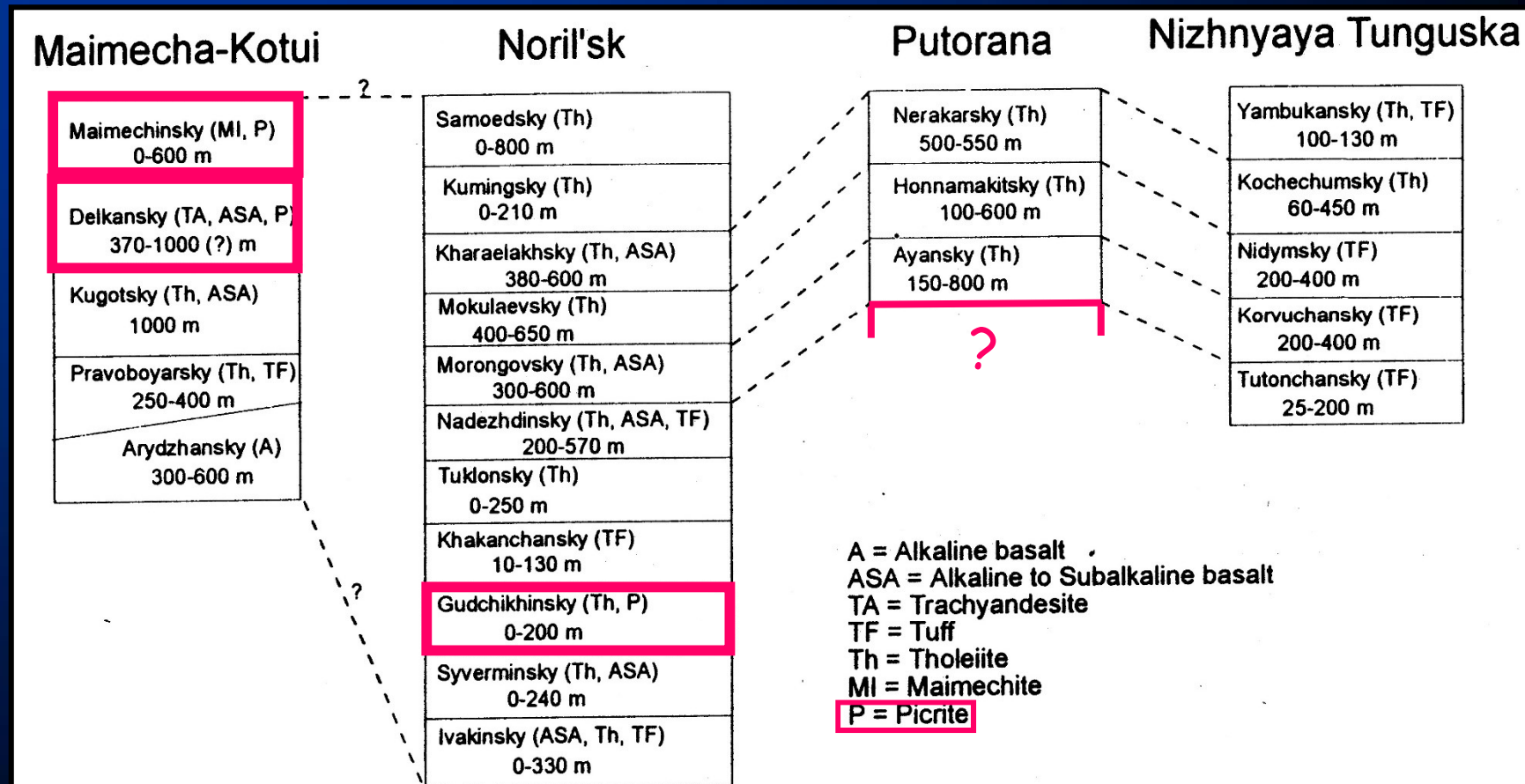


Figure 2. Composite volcano-stratigraphic section of the Siberian Traps (modified from Zolotukhin and Al'mukhamedov [1988], Sharma et al. [1991], and Fedorenko et al. [1996]).

ПЛАТО ПУТОРАНА



Последовательность
платобазальтов
Путорана

Вертикальные обрывы
верхней части плато



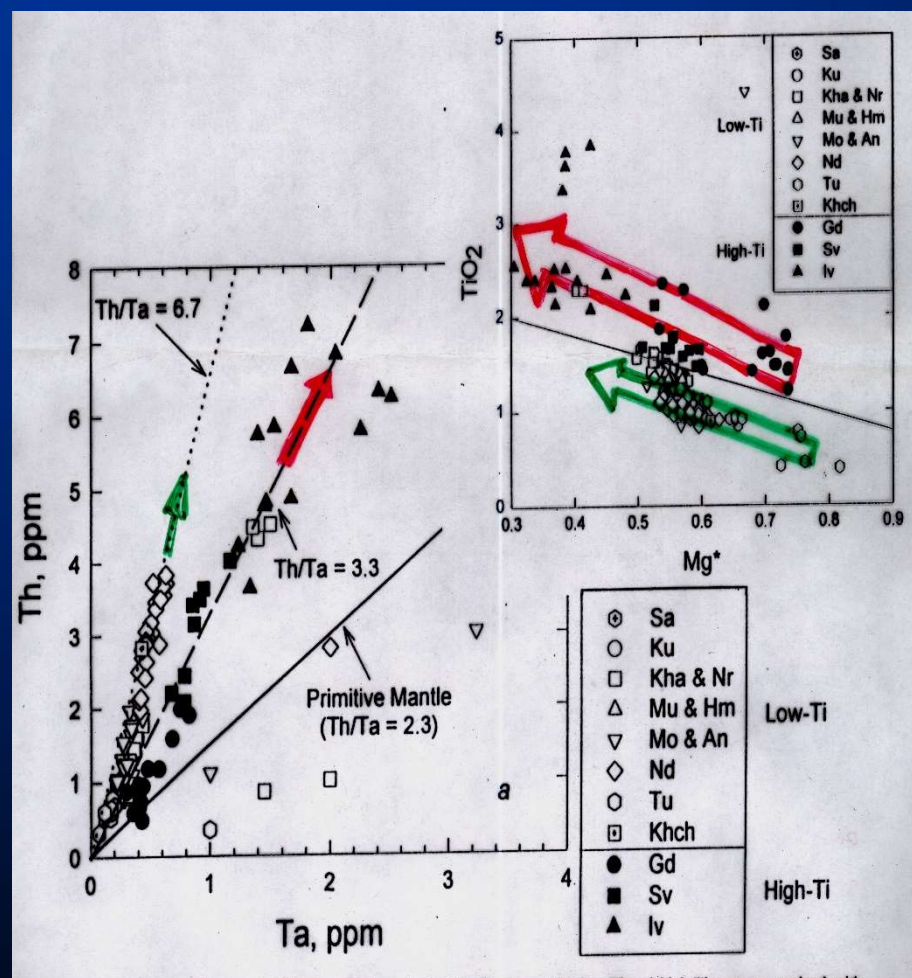
СРЕДНИЕ СОСТАВЫ СВИТ НОРИЛЬСКОГО РАЙОНА И ПЛАТО ПУТОРАНА В СРАВНЕНИИ СО СРЕДНИМ ТРАППОМ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Оксиды, мас. %	Норильский район		Базальты Путорана (n=300)	“Средний трапп” (n=176)
	Гудчихинская я (n=126)	Моронговская (n=17)		
SiO ₂	45.33	46.35	49.89	49.43
TiO ₂	1.33	2.16	1.30	1.51
Al ₂ O ₃	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
MgO	14.84	10.18	7.30	6.31
CaO	8.08	10.09	11.43	10.91
Na ₂ O	1.27	1.79	1.93	2.22
K ₂ O	0.28	0.55	0.29	0.75
P ₂ O ₅	0.14	0.26	0.12	0.13
Mg#	0.681	0.575	0.519	0.466

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

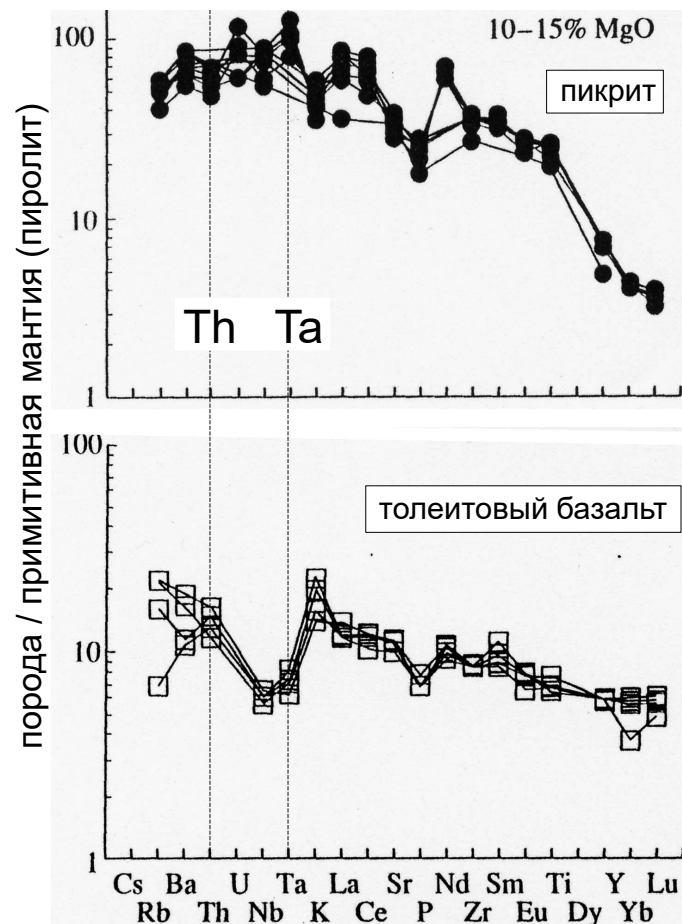
ОСОБЕННОСТИ ХИМИЗМА НИЗКО-Ті И ВЫСОКО-Ті БАЗАЛЬТОВ



- 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-Ті толеиты – в большей мере обогащены Th, чем высоко-Ті.
- Повышенное Th-Ta отношение некоторые исследователи рассматривают как указание на участие корового вещества в процессах траппового магмаобразования.

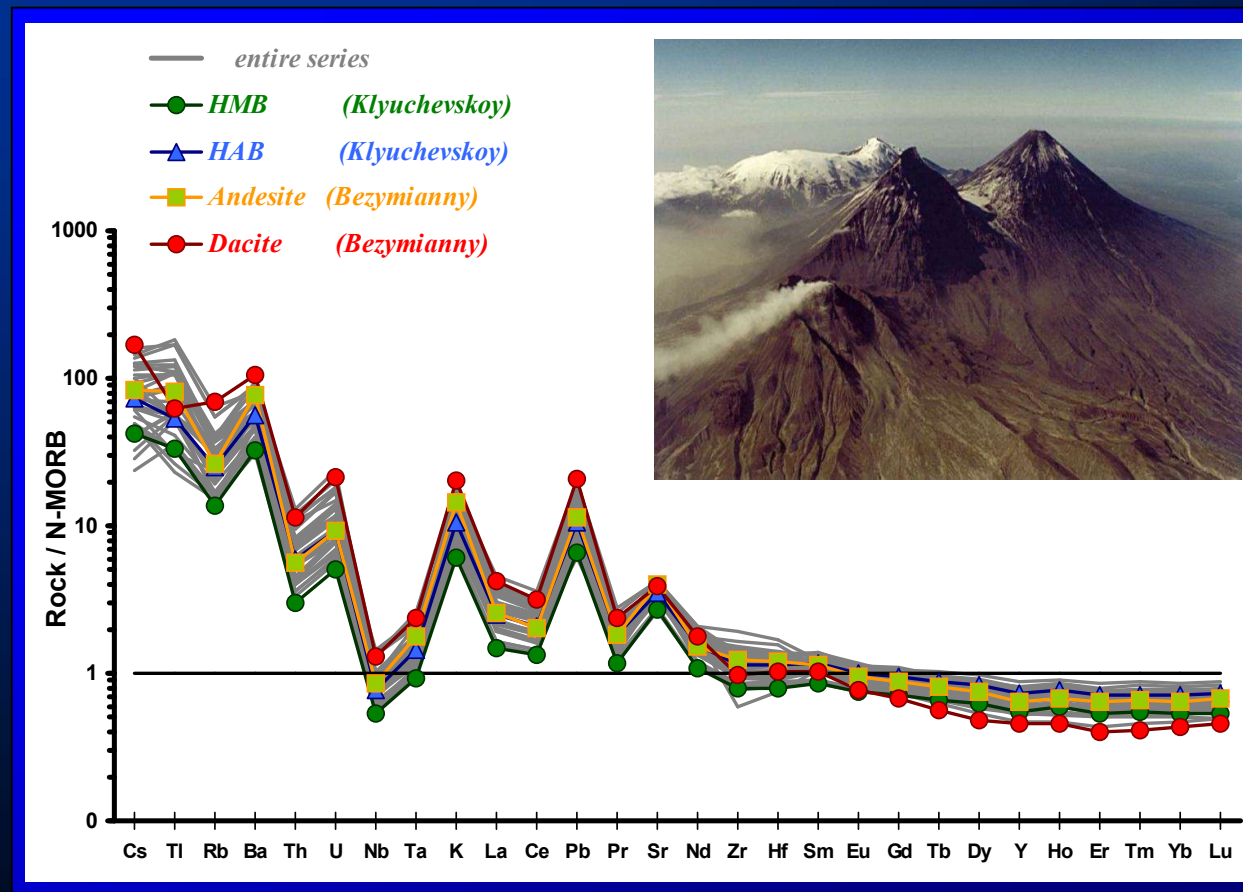
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭФФУЗИВНЫХ ТРАППОВ ПЛАТО ПУТОРАНА

(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



Geochemistry of deep Tunguska Basin sills, Siberian Traps: correlations and potential implications for the end-Permian environmental crisis

S. Callegaro¹ · H. H. Svensen¹ · E. R. Neumann¹ · A. G. Polozov² · D. A. Jerram^{1,3} · F. M. Deegan⁴ · S. Planke^{1,5} · O. V. Shiganova⁶ · N. A. Ivanova⁶ · N. V. Melnikov⁶

Abstract

A vast portion of the plumbing system of the Siberian Traps Large Igneous Province (STLIP) is emplaced in the Tunguska Basin, where borehole data reveal ubiquitous and abundant sills with great lateral extension. These intrusions intersect Cambrian–Ordovician evaporite, carbonate and siliciclastic series, and locally coal-bearing Permian host rocks, with a high potential for thermogenic gas generation. Here we present new geochemical data from 71 magmatic and 4 sedimentary rock samples from the Tunguska Basin center and periphery, recovered from 15 deep sills intercepted by boreholes. The studied samples are all low-Ti basalt and basaltic andesites, confirming absence of high-Ti and alkaline STLIP magmatism in the Tunguska Basin. The sills derive from picritic parental melts produced by extensive melting of a mantle source with recycled crustal components below a thinned lithosphere (50–60 km), within the spinel stability field. The mantle source was dominantly peridotitic, with enriched pyroxenitic domains formed by recycled lower crust, in agreement with previous models for the main tholeiitic STLIP phase. Limited amounts (up to 5%) of highly radiogenic granitoids or moderately radiogenic metapelites were assimilated in upper crustal magma reservoirs. After emplacement, sills intruded in Cambrian evaporites assimilated marlstones and interacted with the evaporitic host rocks, probably via fluids and brines. This is the first time that such process is described in subvolcanic rocks from all across the volcanic basin. The sills are correlated geochemically with the established chemostratigraphy for the on-craton STLIP lava piles and intrusions (Norilsk region). Sills correlated with the Morongovsky–Mokulaevsky Fm. and the Norilsk-type intrusions are the most voluminous, present all across the central Tunguska Basin, and bear the strongest evidence of interaction with evaporites. Massive discharge of thermogenic volatiles is suggested by explosive pipes and hydrothermal vent structures throughout the Tunguska Basin. We propose that this voluminous pulse of magmatism is a good candidate for the hitherto unidentified early intrusive phase of the STLIP, and may link the deep Tunguska basin sills to the end-Permian environmental crisis.

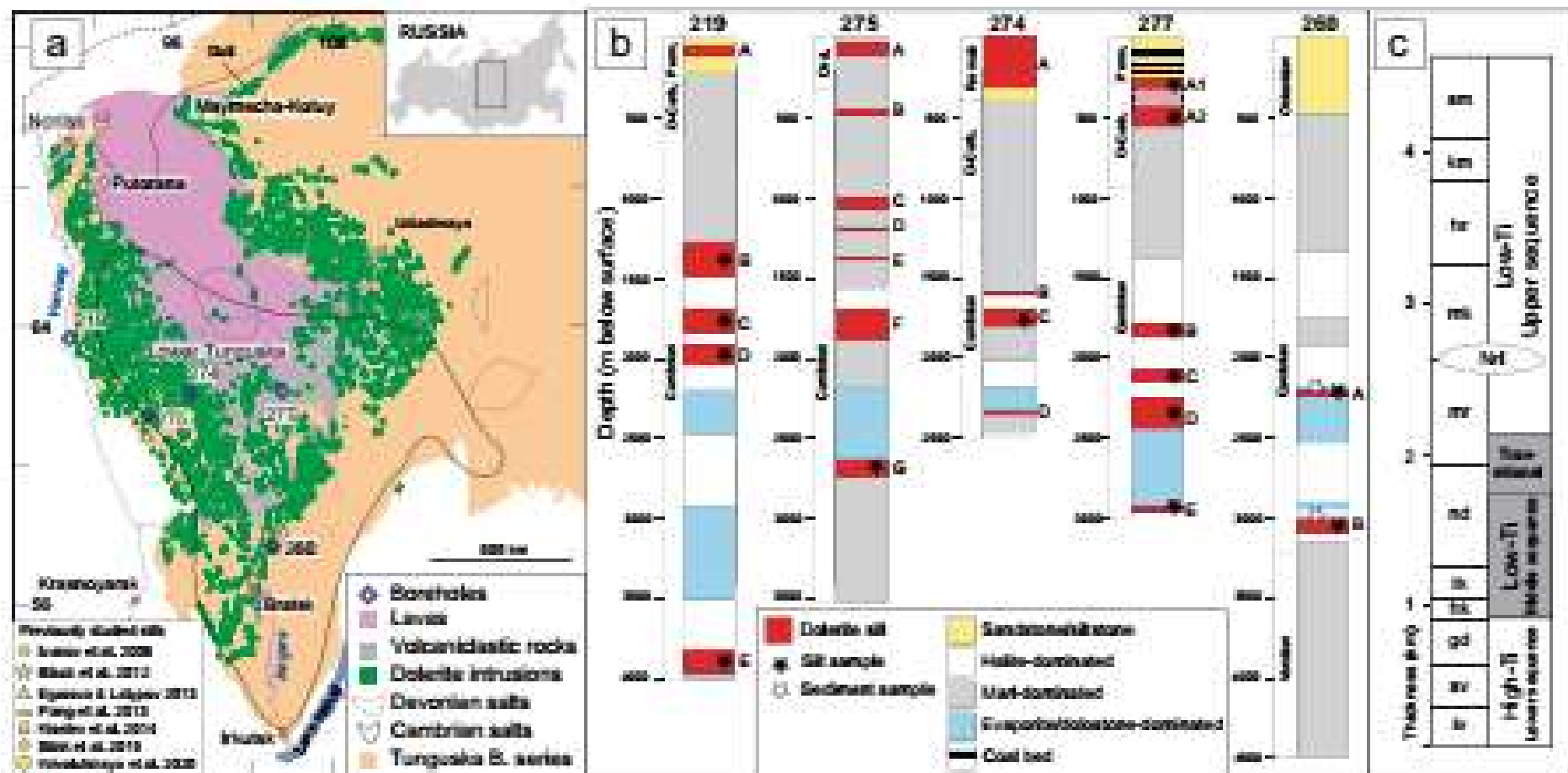


Fig. 1 a Borehole locations (blue diamonds) are plotted on a map of the Siberian Traps LIP (modified after Svensen et al. 2018), along with locations of previously studied sills (yellow symbols). The Siberian Traps crop out in several regions. Four of these are roughly on-craton, namely Norilsk, Putorana, Maymecha-Kotuy and Nizhnyaya Tunguska (translated to Lower Tunguska). Other expressions of the Siberian Traps magmatism appear in regions off-craton, such as the West Siberian Basin, and the Taimyr Peninsula in the North (Reichow et al. 2005, 2016). b Schematic logs of the investigated boreholes organized from W to E from 219 to 277; borehole 260 is placed last

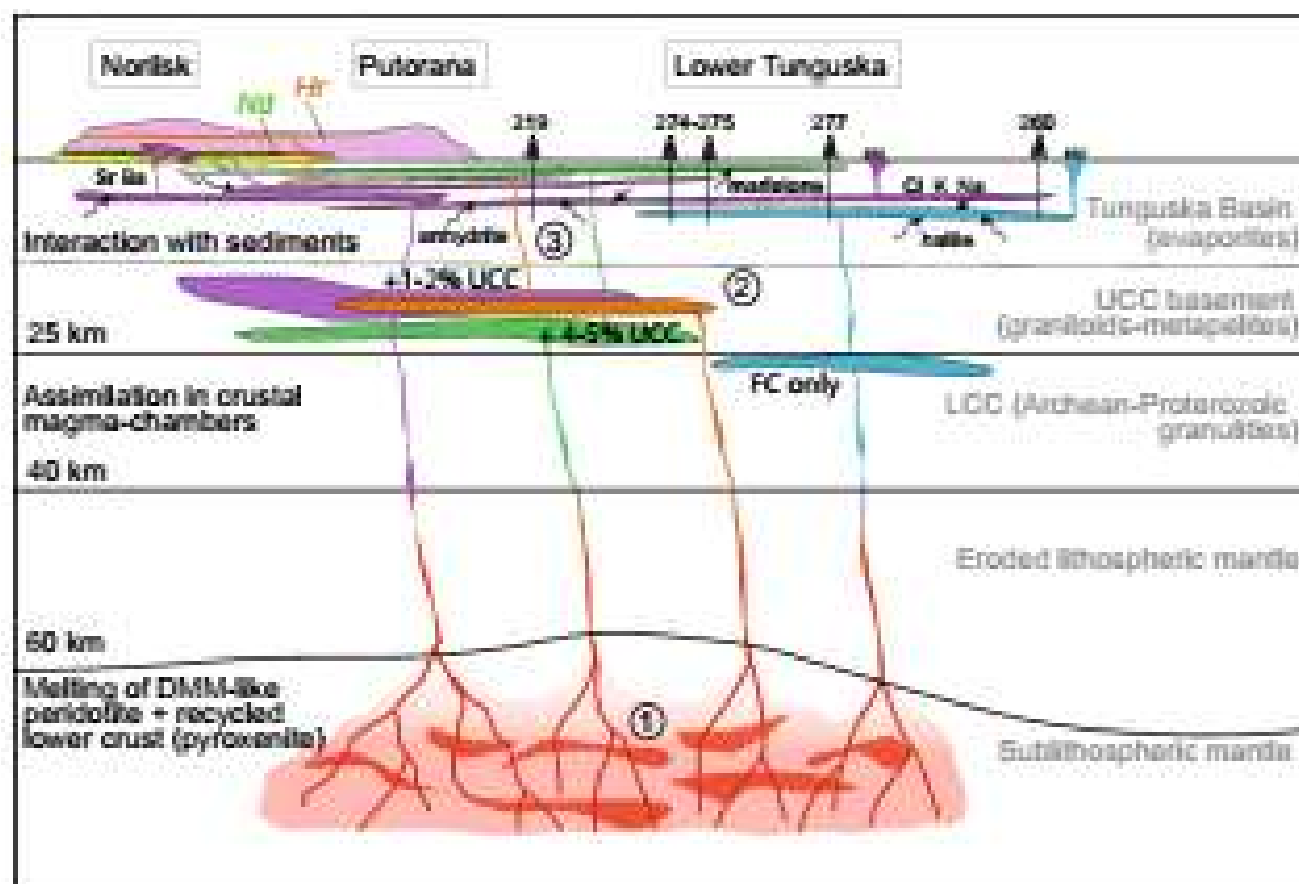
for its detached southern position. Sampled sills are indicated by black stars, sampled host rocks by white stars. c Lava formations and chemostratigraphic classification of STLIP tholeiites in the Norilsk area—simplified stratigraphic log (modified after Ivanov et al. 2008). Names of the formations: iv – Ivakinsky; sv – Syverminsky; gd – Gudchikhinsky; bk – Khakanchinsky; tk – Tuklonsky; nd – Naderzh-dinsky; mr – Morongovsky; mk – Mokulaevsky; hr – Kharavelakhsky; km – Kumginsky; sm – Samoedsky. Nrl – Norilsk 1 intrusion, positioned after Pavlov et al. (2019)



Geochemistry of deep Tunguska Basin sills, Siberian Traps: correlations and potential implications for the end-Permian environmental crisis

S. Callegaro¹ · H. H. Svensen¹ · E. R. Neumann¹ · A. G. Polozov² · D. A. Jerram^{1,3} · F. M. Deegan⁴ · S. Planke^{1,5} · O. V. Shiganova⁶ · N. A. Ivanova⁶ · N. V. Melnikov⁶

Fig. 9 Schematic N–S cross-section across the Tunguska basin illustrates the petrogenesis of the TB dolerites (horizontal and vertical scales non homogeneous). Melting of a mixed peridotitic and pyroxenitic source with recycled lower crustal domains (1) produced picrites that assimilated small amounts of granitoids and metapelites while ponding in upper crustal magma chambers (2). Further interaction with host rocks (marlstones and evaporites) after emplacement within the sedimentary basin enriched the dolerites in Sr, Cl, Na (3). The sills are color-coded suggesting the proposed correlations with the Norilsk chemostratigraphy



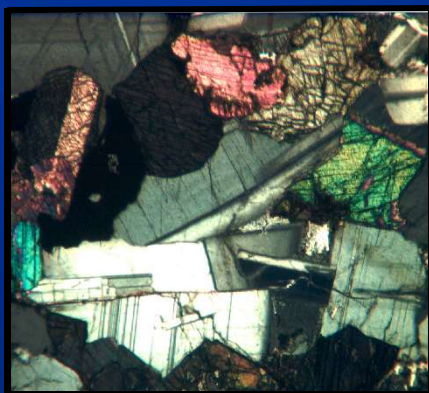
СТРОЕНИЕ ИНТРУЗИВНЫХ ТРАПТОВ



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 Cpx 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 Px 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.



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

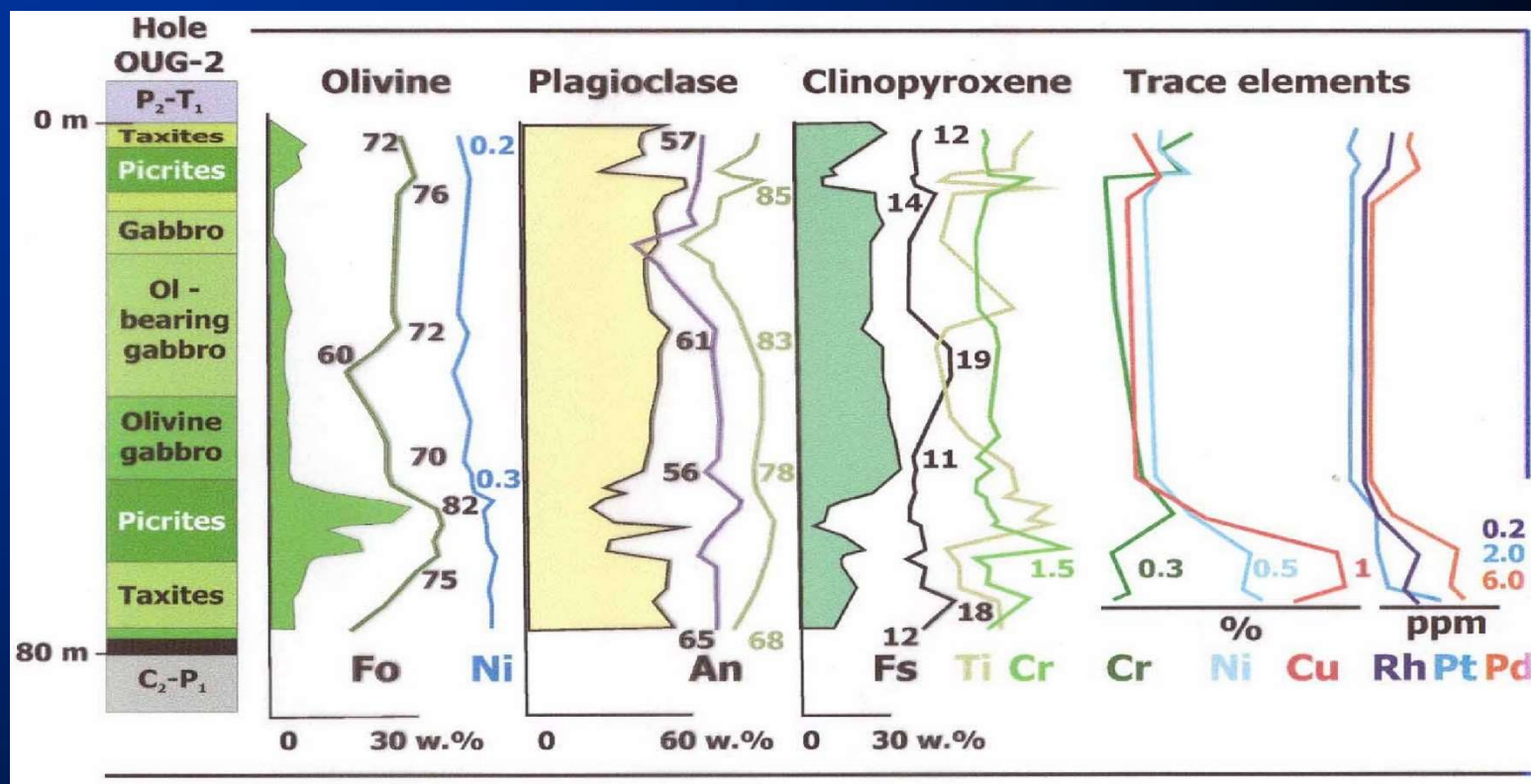


• Пойкилоофитовый долерит: ажурные крупне (до 1 см) ойкокристаллы Cpx заполняют объем породы на 70-80% и заключают многочисленные идиоморфные хадакристаллы Pl и редкие Ol. Pl равномерно распределен в породе, а Ol концентрируются между ойкокристаллами. К этим интерстициям приурочены выделения ОРх и рудного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

ГЛАВНЫЕ ТИПЫ ДОЛЕРИТОВЫХ СИЛЛОВ

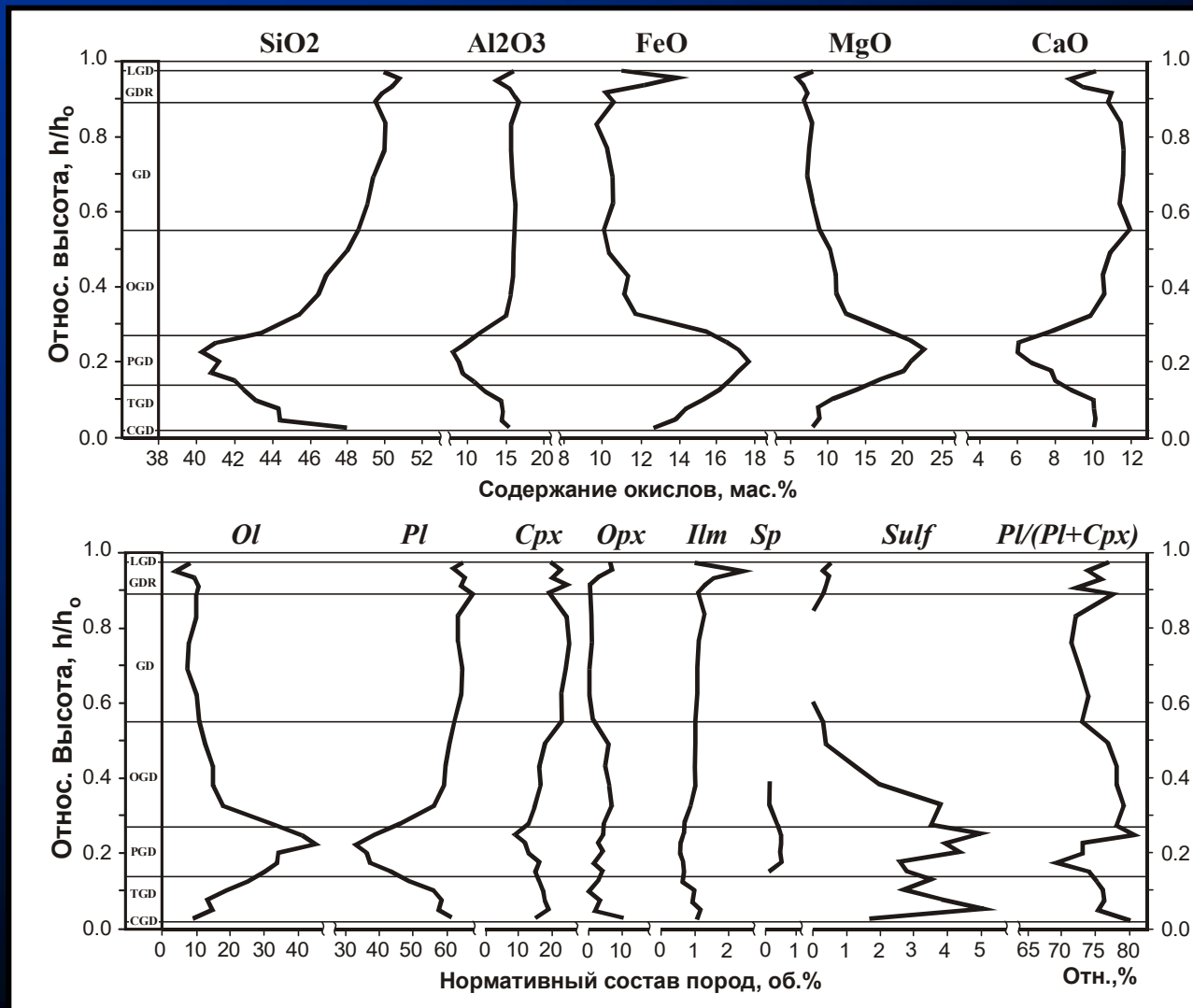
1. **Норильский:** интрузивы этого типа распространены на северо-западе Сибирской платформы (например, Талнахский интрузив) и очень хорошо изучены, поскольку с ними связано промышленное медно-никелевое оруденение. Их главным признаком является присутствие в придонных частях горизонта пикритового состава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

СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕ-ТАЛНАХСКОГО ИНТРУЗИВА

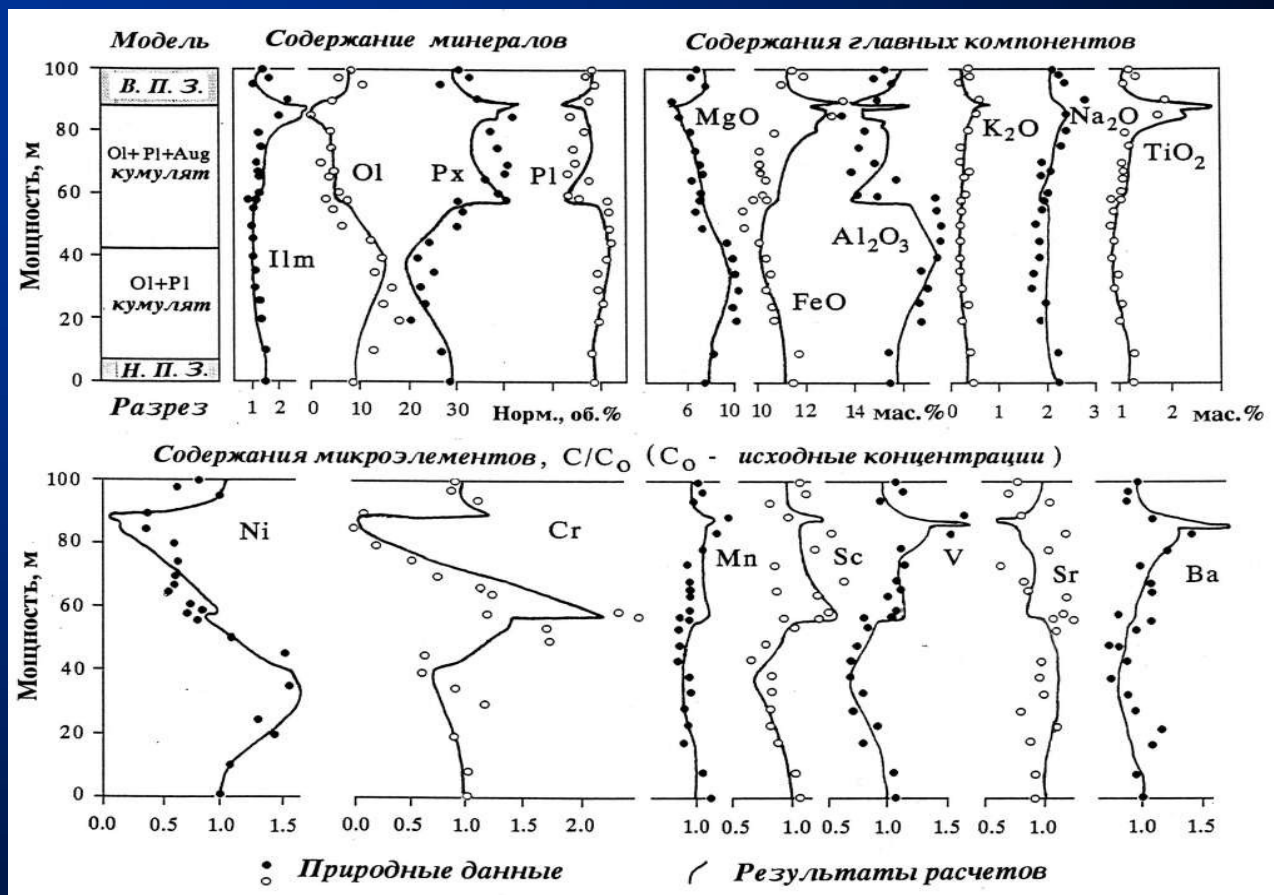


Обобщенный разрез интрузивов Норильского типа: Вдоль нижнего контакта протягиваются контактовые долериты, выше залегают такситовые долериты, которые образуют нижнюю приконтактовую зону. Выше - горизонт пикродолеритов, который перекрывается пойкило-офитовыми ОI-ми долеритами, сменяющимися вверх по разрезу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

СТРОЕНИЕ ТАЛНАХСКОГО ИНТРУЗИВА (по данным Днепровской)

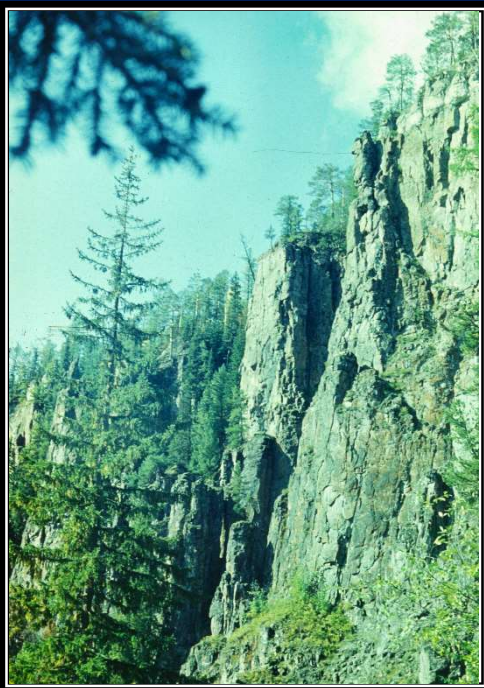


СТРОЕНИЕ ВАВУКАНСКОГО ИНТРУЗИВА



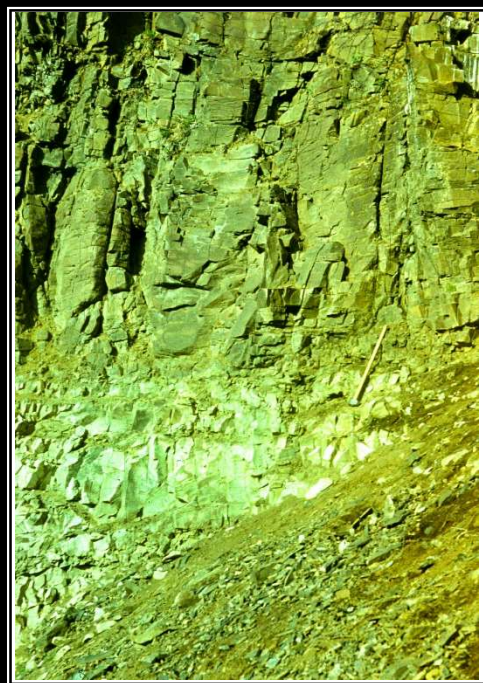
Для интрузивов аламджахского типа также характерна расслоенность и асимметрия строения, но, в отличие от норильских, они лишены горизонтов пикродолеритов. Главным типоморфным признаком этих силлов является присутствие горизонта призматически-зернистых габбро-долеритов. Вавуканский интрузив имеет мощность 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

