



Плавление щелочных карбонатитов в мантии Земли по результатам экспериментов при давлениях до 21 ГПа

Литасов К.Д., Шацкий А.Ф., Отани Е.

*Институт геологии и минералогии СО РАН им В.С. Соболева,
г.Новосибирск*

Университет Тохоку, Сэндай, Япония

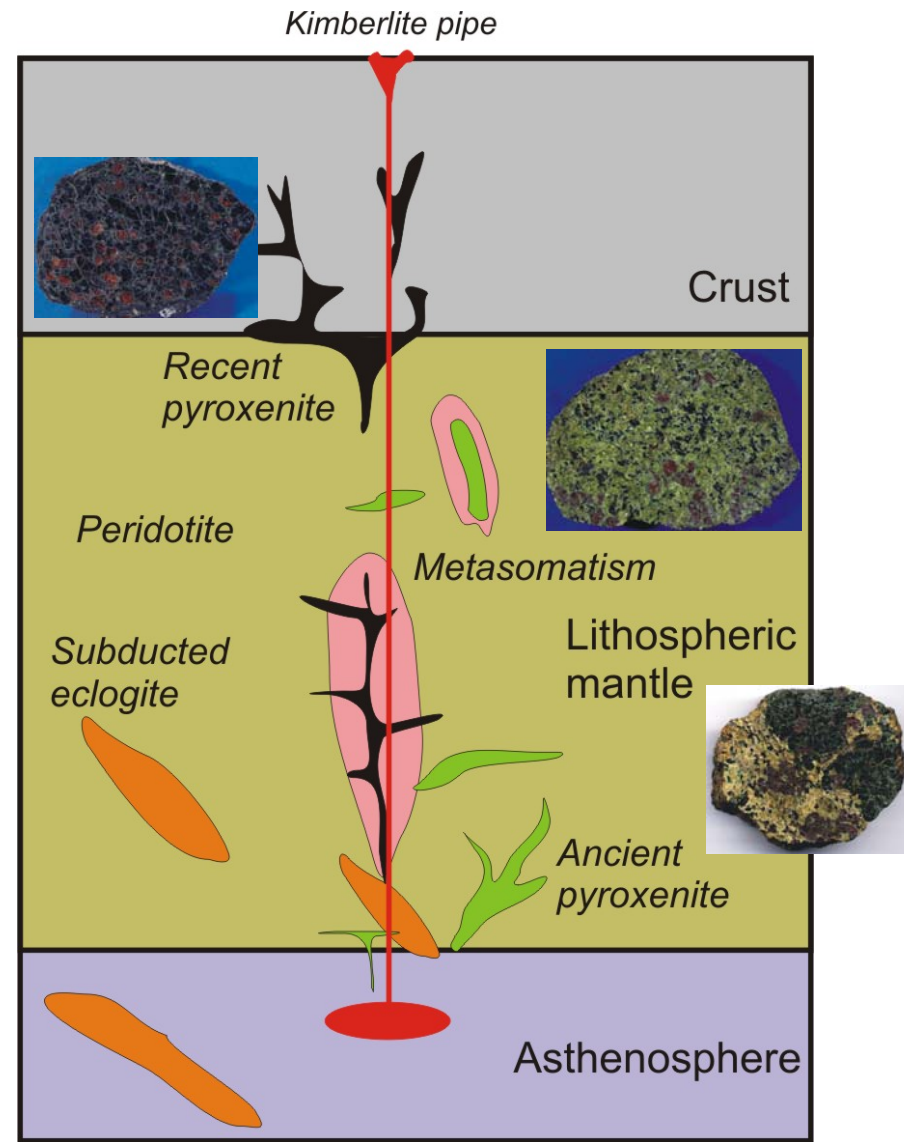
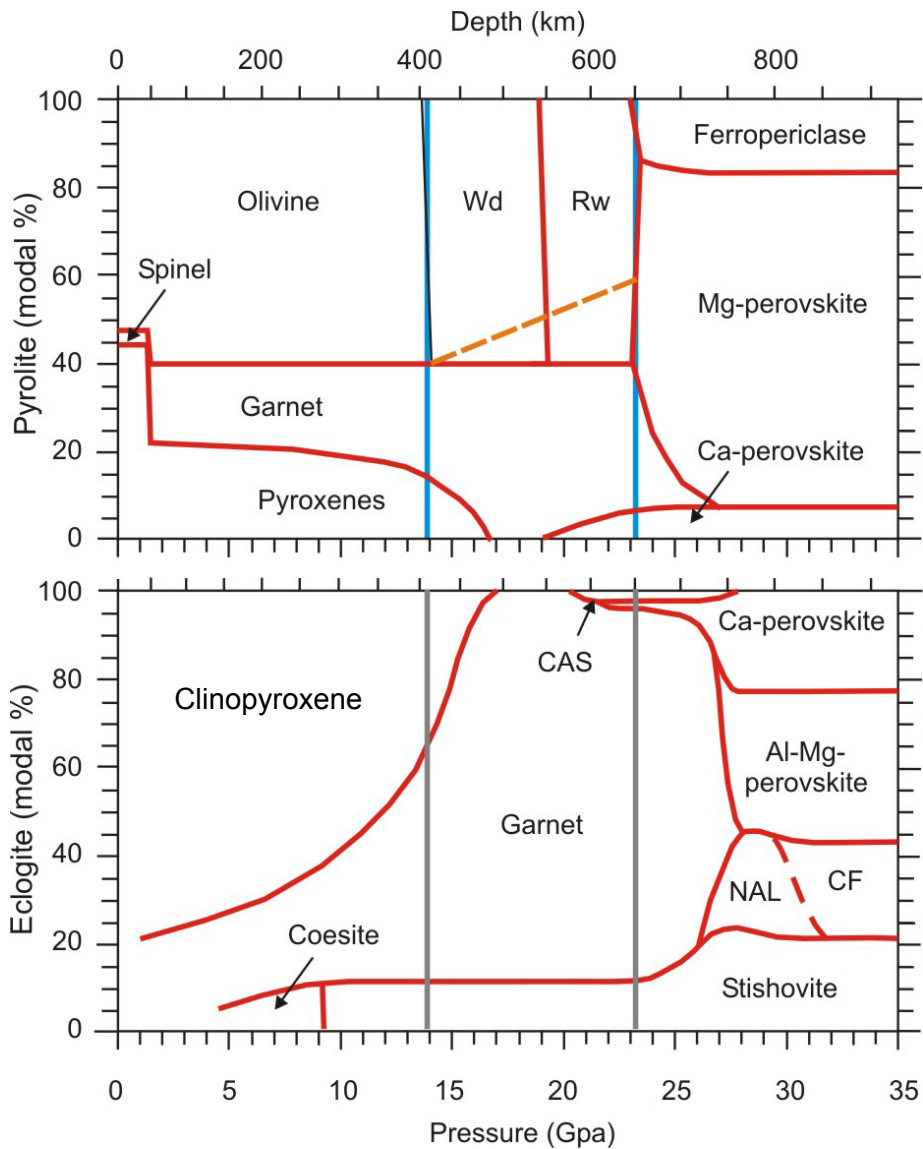
Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск



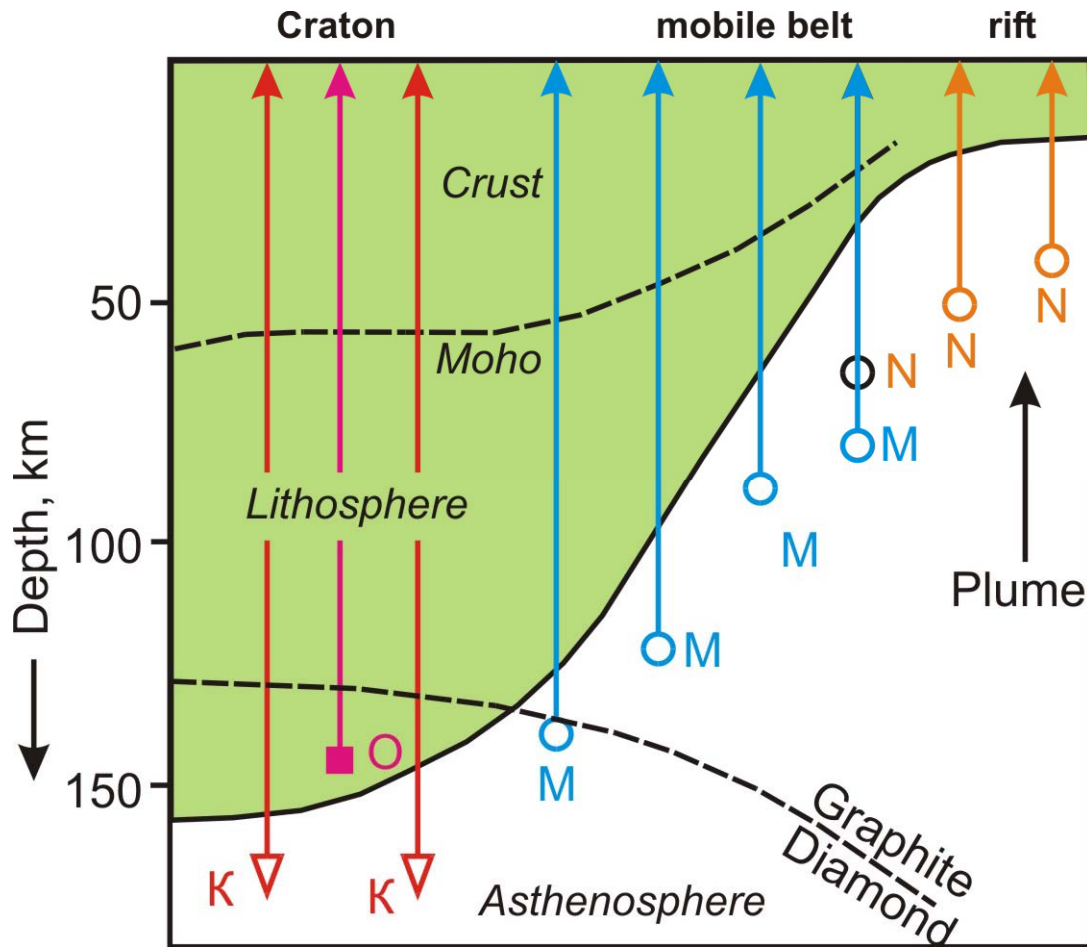
INSTITUTE OF GEOLOGY
AND MINERALOGY SB RAS

*Современные проблемы геохимии,
Институт геохимии им А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск
23 октября 2012 г.*

Минералогия мантии



Кимберлиты - карбонатиты



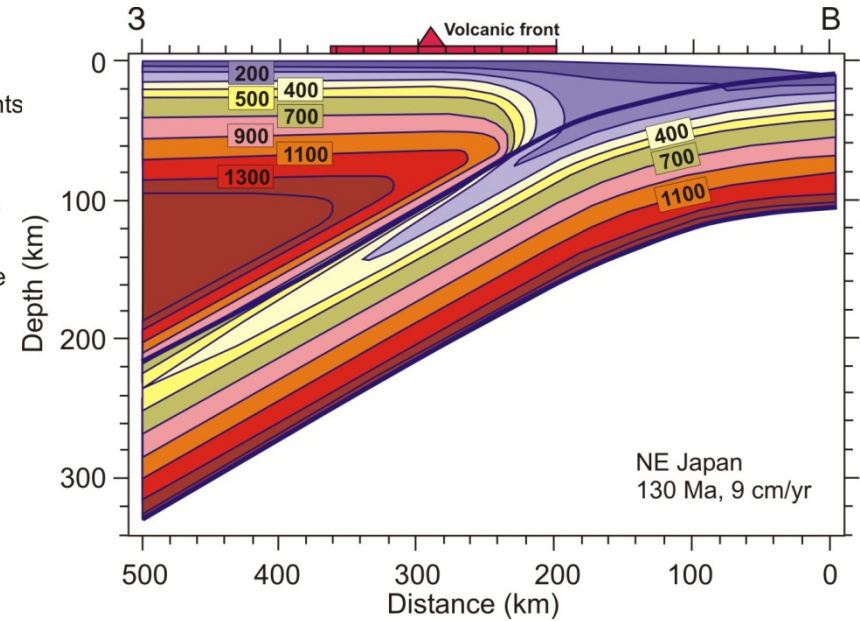
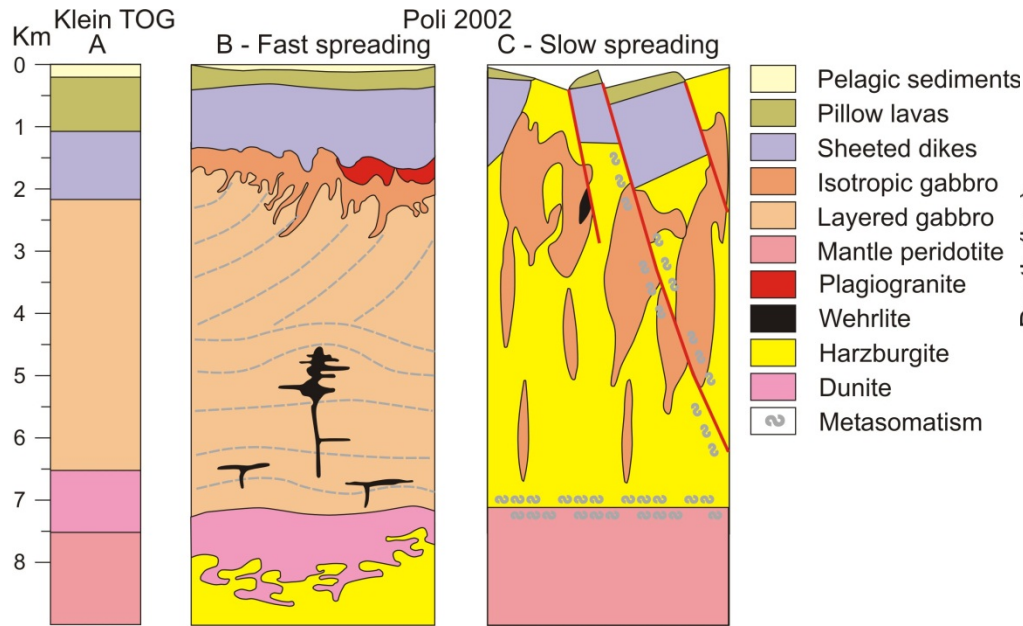
К – кимберлиты (гр.1)
О – оранжеиты
(гр.2 - слюдяные)
М – мелилититы
Н – нефелиниты

Все эти типы пород
включая лампроиты и
карбонатиты связаны с CO_2
и H_2O в источнике в
различных пропорциях

Кимберлиты и карбонатиты
= H_2O -недосыщенные

Mitchell 2005, Canad. Mineral.

Субдукционные плиты



Т-структура слэба:

Наиболее холодная часть –
Мохо слэба

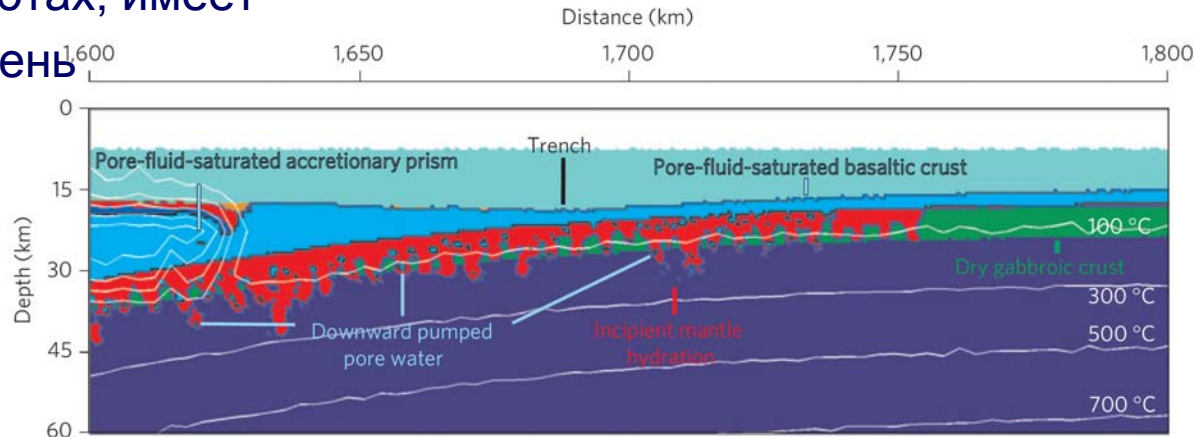
Океаническая кора, образующаяся в
Срединно-Океанических хребтах, имеет
неоднородный состав и степень
вторичного изменения

Осадки 0-2 км

Базальты 0-2 км

Габбро 2-7 км

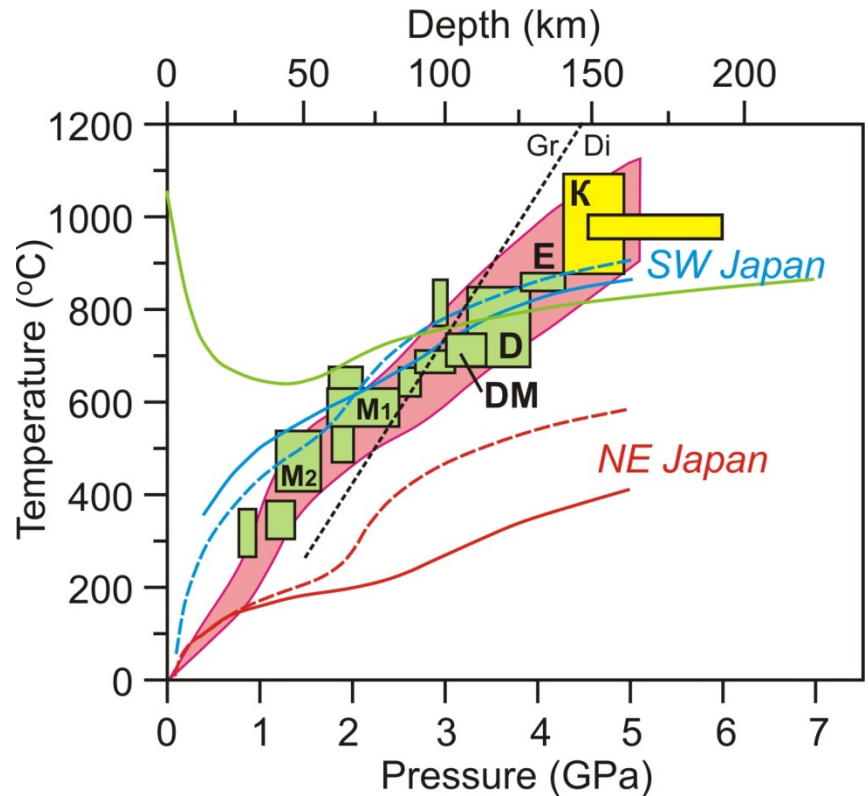
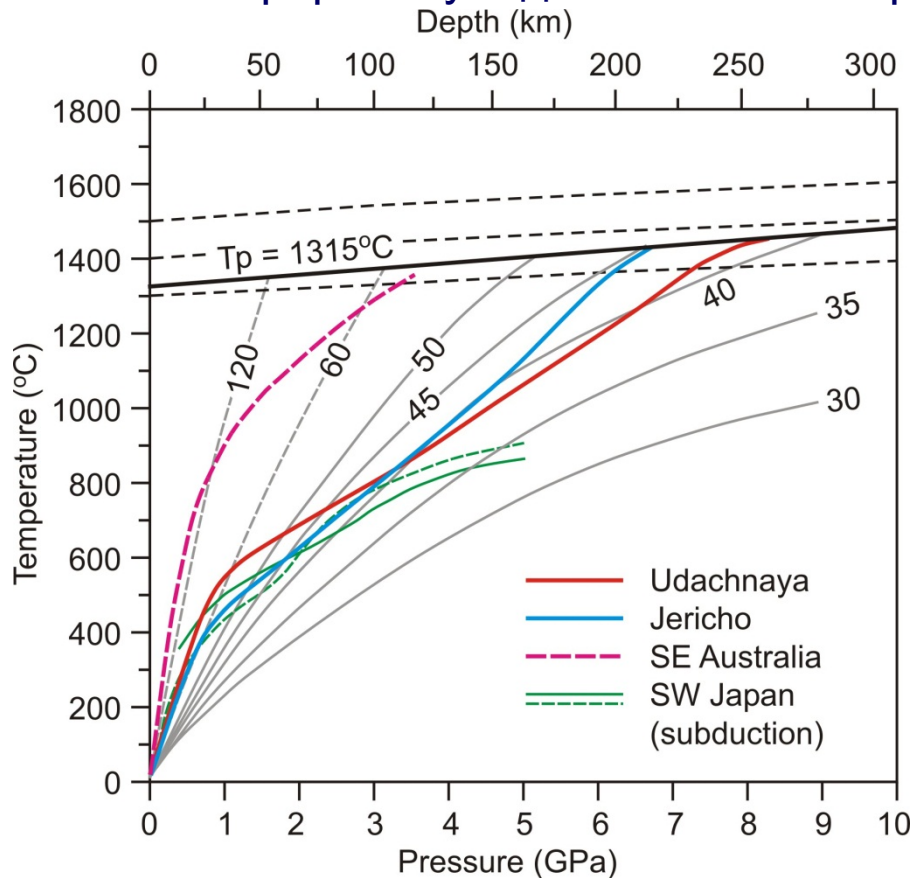
Faccenda et al.. Nat Geosci 2009



PT-профили в мантии

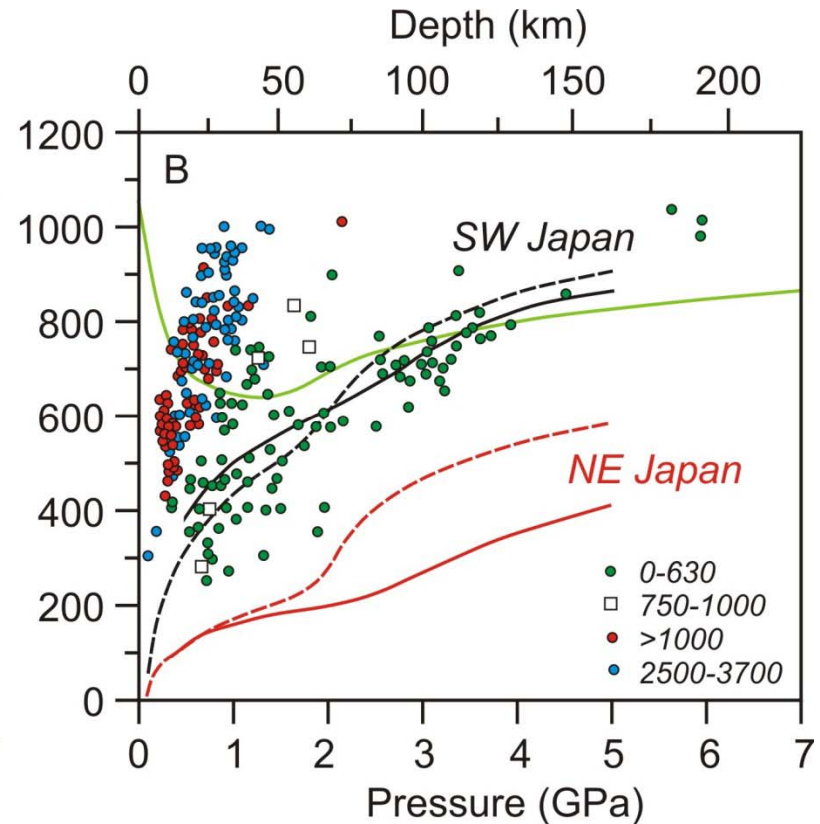
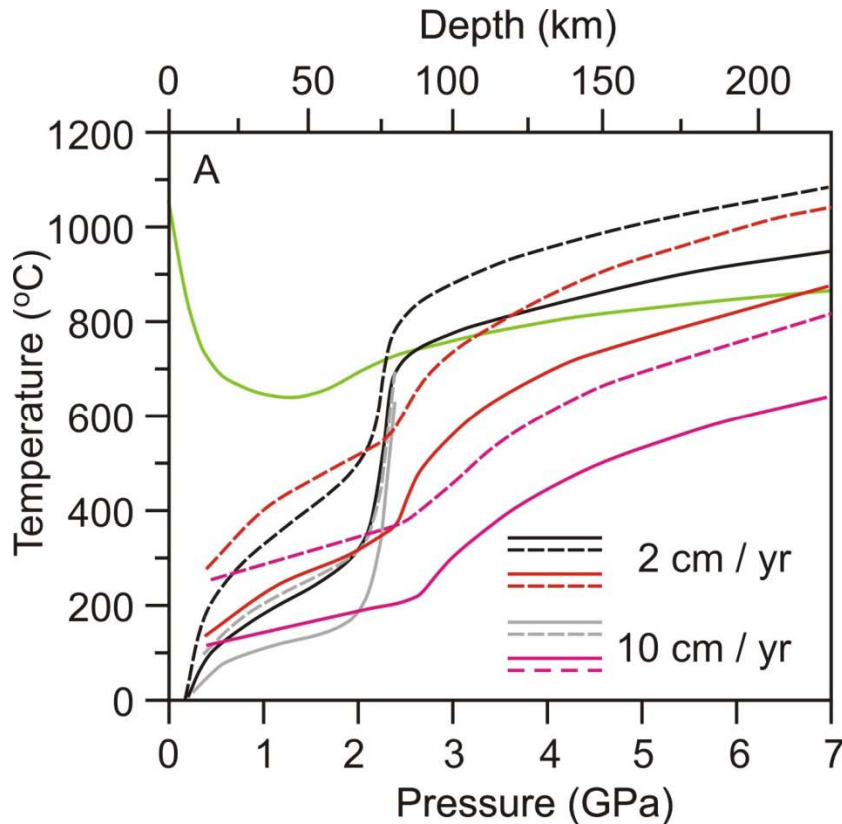
Литосфера – резкий T-градиент, кондуктивный теплоперенос

Астеносфера – субадиабатический градиент, конвектирующая мантия



Геотермы субдукции по породам метаморфических комплексов соответствуют горячим современным слэбам (напр. Dobretsov et al., 2001, 2010; Peacock, Wang, 1999; Korsakov, Hermann, 2006).

PT-профили субдукции

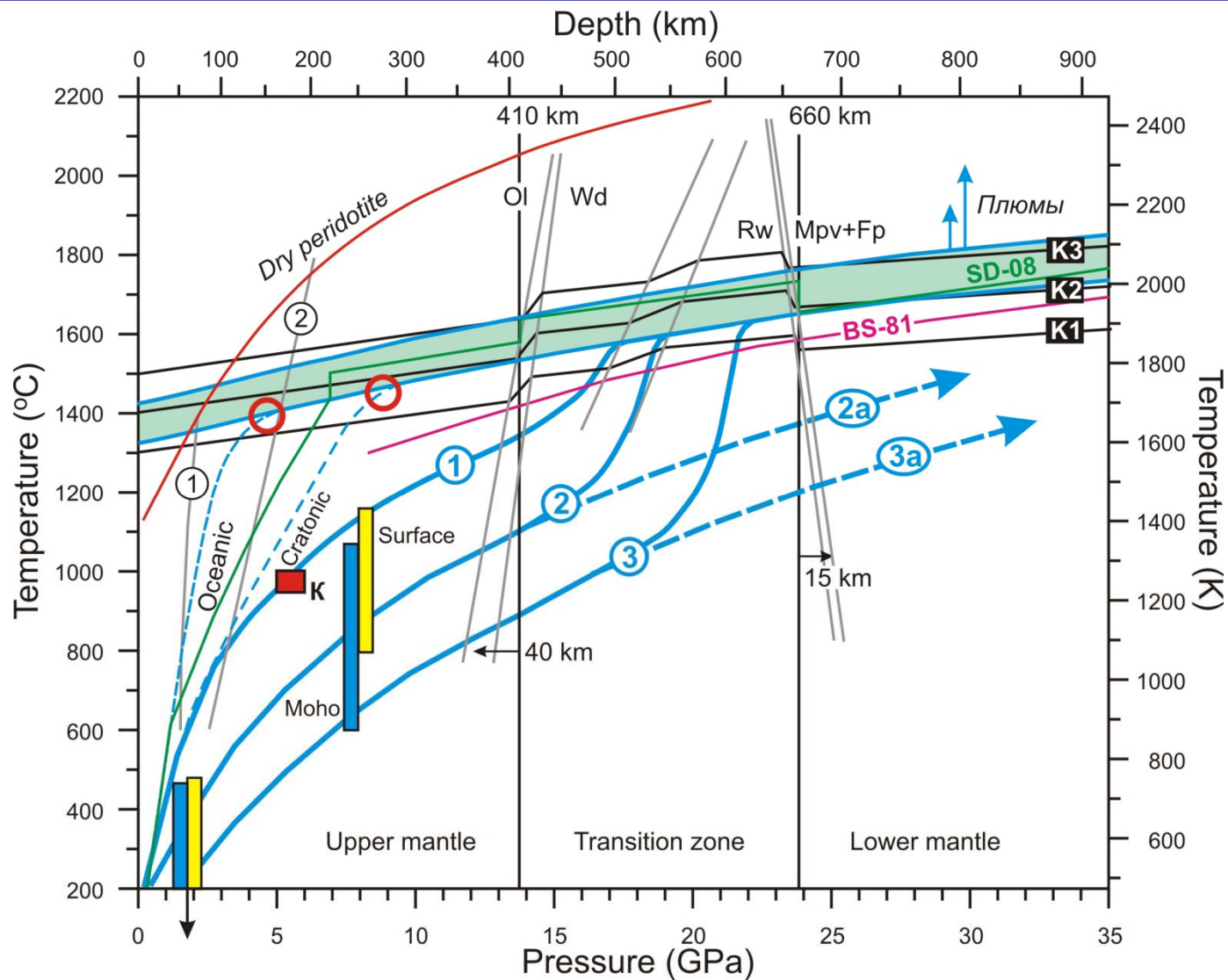


Модельные (van Keken et al., 2002):
Dashed – 20 Ма плита,
Bold – 100 Ма плита,
Black and Grey – поверхность слэба,
Red and Pink – Мохо слэба.

По природным слэбам (Peacock and Wang, 1999, Science).
 PT-параметры древних зон субдукции (эклогиты, гранулиты, глаукофановые сланцы) (Maruyama and Liou, 2005).

Зеленая линия – солидус мокрого базальта

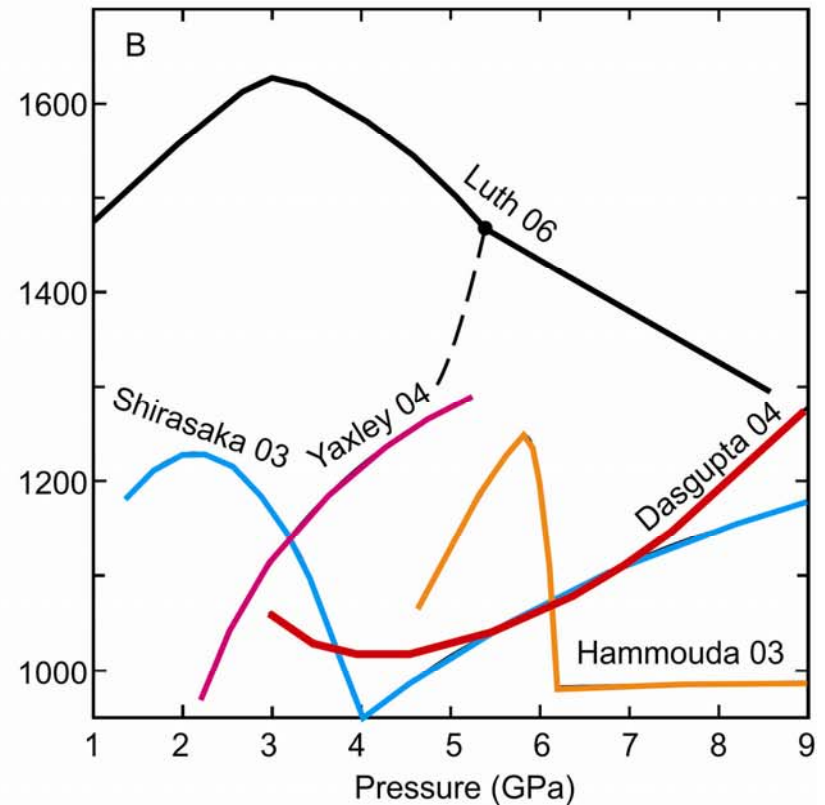
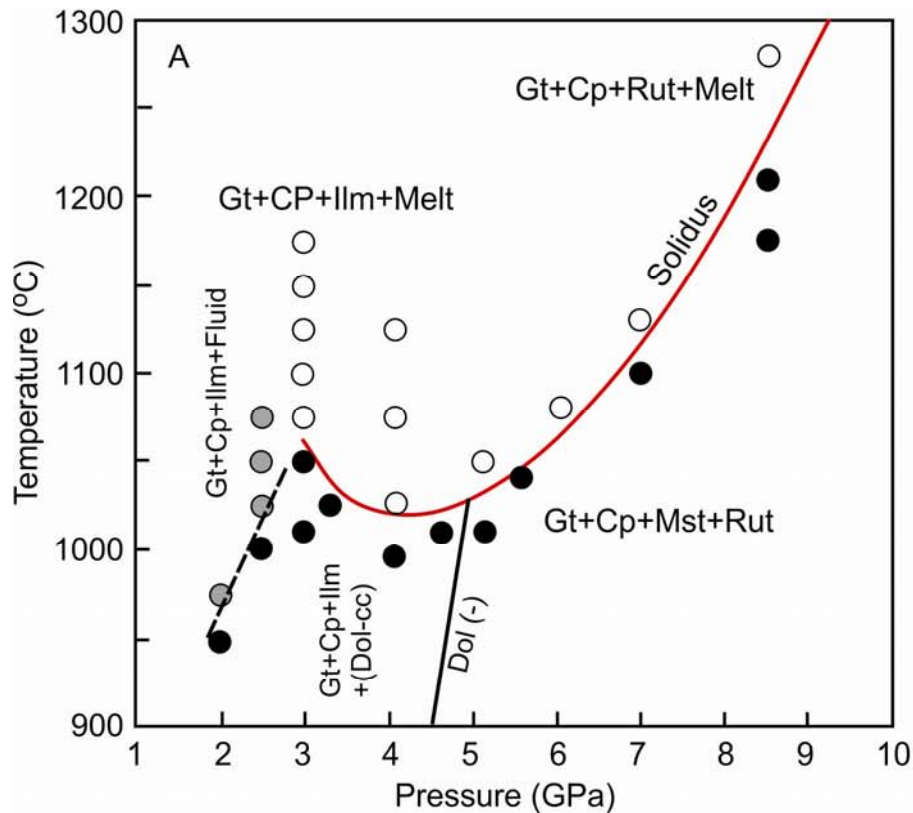
Мантийные РТ-профили



Средняя мантийная адиабата – MORB с $T_p = 1315^\circ\text{C}$

РТ-профили субдукции (1-3 для стагнирующих слэбов. 2а-3а для слэбов в ниж.м.)

Эклогит – CO₂



Dasgupta et al. 2004

Солидус карбонатсодержащего эклогита зависит от состава системы, в частности от содержания щелочей и доминантной карбонатной фазы (магнезит, арагонит, доломит)

Плавление карбонатсодержащих перидотитов и ЭКЛОГИТОВ

ELSEVIER

Earth and Planetary Science Letters 227 (2004) 73–85

www.elsevier.com/locate/epsl

Deep global cycling of carbon constrained by the solidus of anhydrous, carbonated eclogite under upper mantle conditions

Rajdeep Dasgupta*, Marc M. Hirschmann, Anthony C. Withers

Vol 440|30 March 2006|doi:10.1038/nature04612

nature

LETTERS

Melting in the Earth's deep upper mantle caused by carbon dioxide

Rajdeep Dasgupta¹ & Marc M. Hirschmann¹

Chemical Geology 262 (2009) 17–28

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/chemgeo



Во всех статьях отмечается дефицит Na_2O и K_2O в измеренных составах расплавов, а также и в субсолидусных ассоциациях

Следовательно, солидусы систем не установлены! Речь может идти только о видимых или мнимых солидусах.

Solidus of carbonated peridotite from 10 to 20 GPa and origin of magnesiocarbonatite melt in the Earth's deep mantle

Sujoy Ghosh^{a,*}, Eiji Ohtani^a, Konstantin D. Litasov^{b,c}, Hidenori Terasaki^a

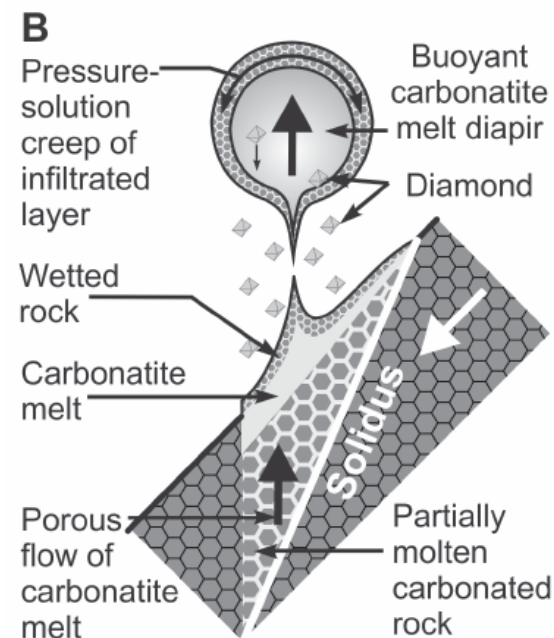
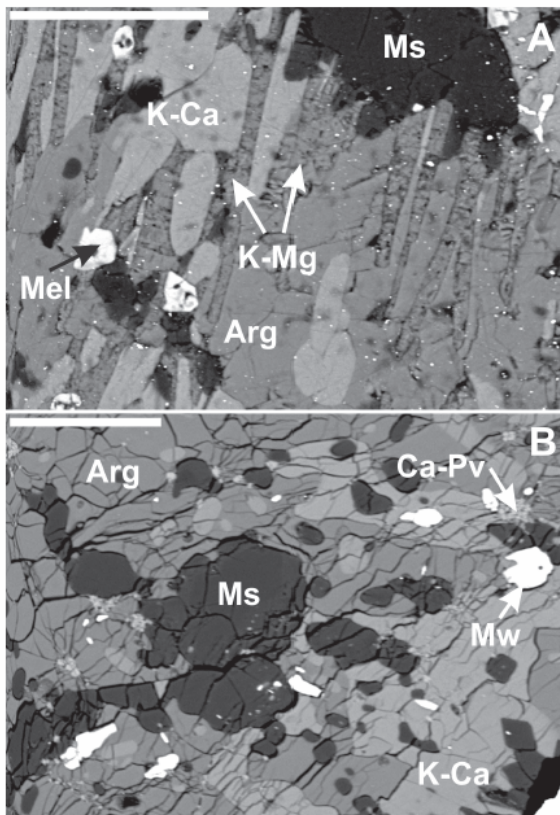
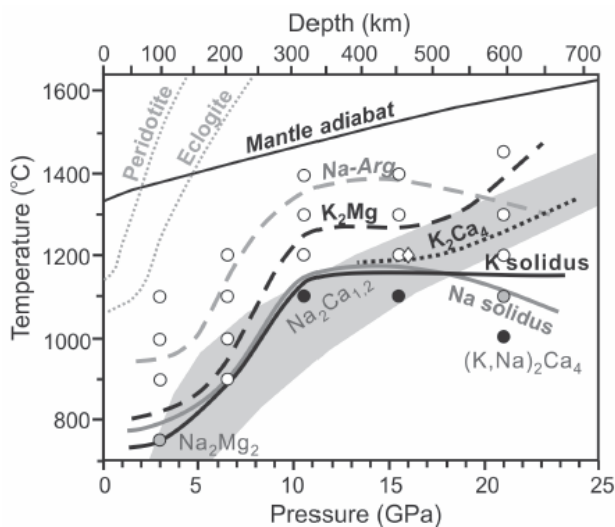
Фазовые соотношения в модельных карбонатитовых системах

Solidus of alkaline carbonatite in the deep mantle

Konstantin D. Litasov^{1,2}, Anton Shatskiy^{1,2}, Eiji Ohtani¹, Gregory M. Yaxley³

Geology, 2013, #1
in press

Цель работы – показать истинные солидусы карбонатсодержащих систем в мантии



Состав исходных смесей

	Na	K	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	4.0	4.0	3.17	2.57	12.73	6.39	10.24	8.16	1.15	2.62
TiO ₂	---	---	0.52	0.72	1.05	1.04	0.60	0.69	0.29	0.10
Al ₂ O ₃	---	---	2.10	0.38	3.48	1.53	2.20	1.56	0.16	0.11
Cr ₂ O ₃	---	---	0.24	---	0.21	---	0.32	0.08	---	0.05
FeO	4.0	4.0	4.96	4.54	5.52	5.99	4.02	4.07	13.74	4.13
MnO	---	---	---	0.16	---	---	---	---	0.08	0.21
MgO	14.0	20.2	15.17	15.12	16.79	15.24	16.26	13.93	14.03	16.53
CaO	27.0	20.2	22.59	21.60	18.63	21.40	20.46	21.91	26.06	20.10
Na ₂ O	7.0	2.0	5.40	4.93	4.44	5.01	0.40	2.10	2.76	3.28
K ₂ O	2.0	7.0	0.38	7.01	2.13	2.20	4.04	5.35	1.00	7.52
P ₂ O ₅	---	---	0.52	---	0.41	0.74	0.44	---	---	---
CO ₂	42.0	42.6	---	40.31	34.60	---	41.00	---	40.70	40.80
H ₂ O	---	---	---	2.66	0.85	---	2.12	---	---	---
Total	100.0	100.0	55.1	100.0	100.0	59.5	100.0	57.9	100.0	95.5

1 – Карбонатитовый расплав из **амфиболового перидотита** при 2.5-3.0 ГПа и 1000°C (Wallace&Green,1988).

2 – Карбонатитовый расплав из **флогопитового перидотита** при 3 ГПа и 1100°C (Thibault et al., 1992).

7 - 10% плавления карбонатсодержащего **эклогита** при 8.5 ГПа и 1280°C (Dasgupta et al., 2004).

8 - ~5% плавления карбонатсодержащего **перидотита** при 20 ГПа и 1400°C (К. Litasov).

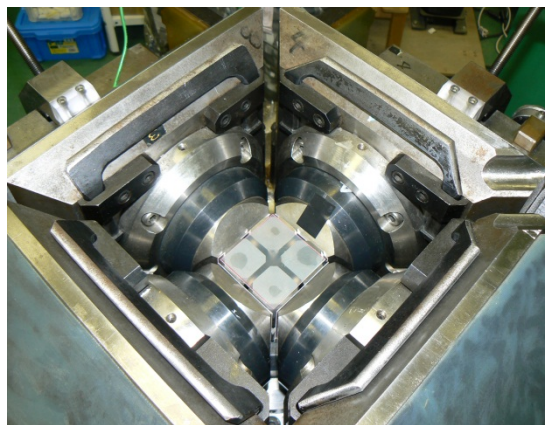
Методика эксперимента

Давление = 3-21 GPa

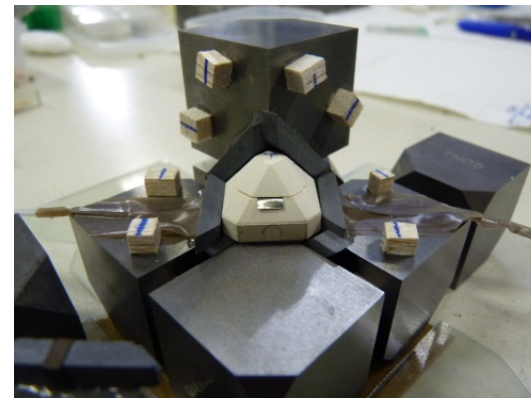
Температура = 750–1400°C



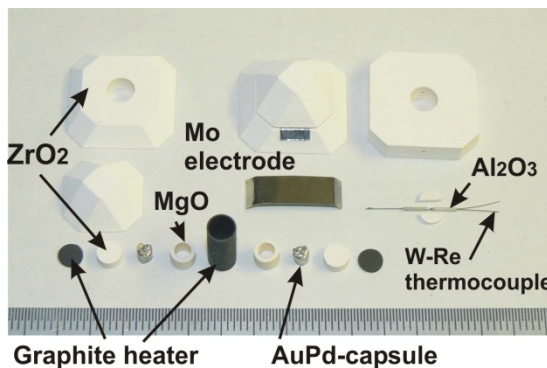
Spirit-3000 т
многопуансонный пресс
в университете Тохоку



Пуансоны первой ступени
в прессе типа DIA

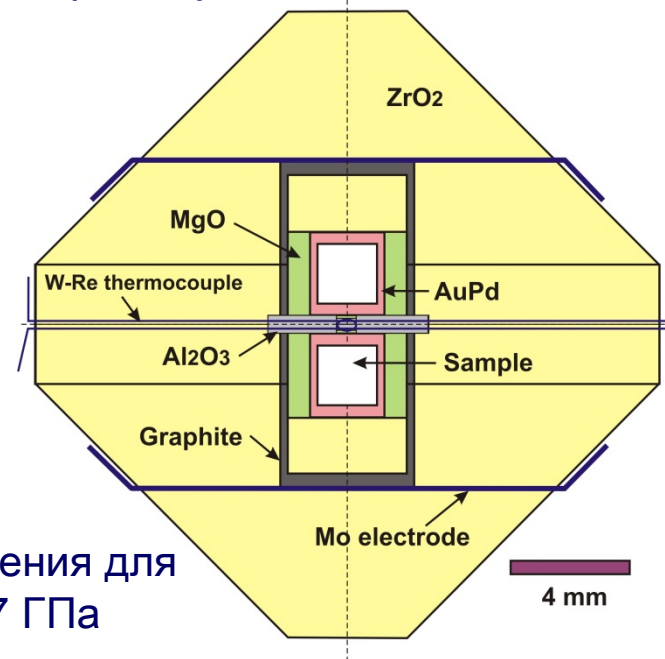


Твердосплавные пуансоны
второй ступени с ячейкой

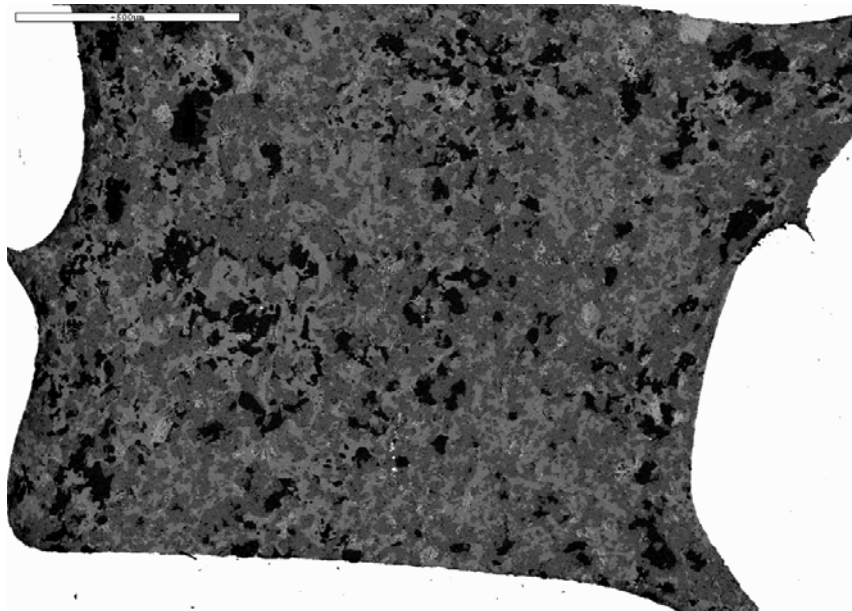


Составные части ячейки
высокого давления

Ячейка высокого давления для
экспериментов при 3-7 ГПа
(TEL 12.0 мм)



Результаты экспериментов при 3 ГПа и 750°C



Na-карбонатит

Доломит

Na-арагонит

$\text{Na}_2\text{Mg}_2(\text{CO}_3)_3$

(черные зерна)

Клинопироксен

К-карбонатит

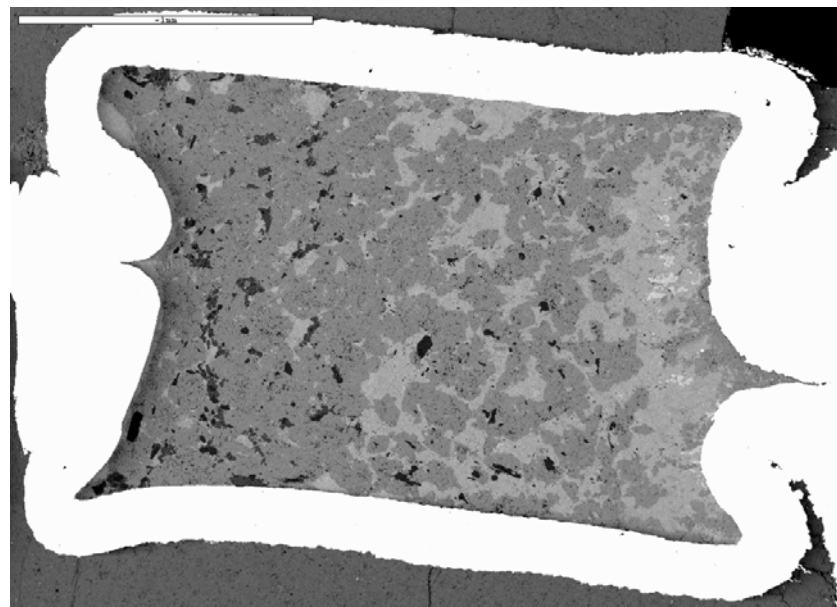
Доломит

Магнезит

$\text{K}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$

$\text{K}_2\text{Ca}_4(\text{CO}_3)_5$ (светлые
зерна)

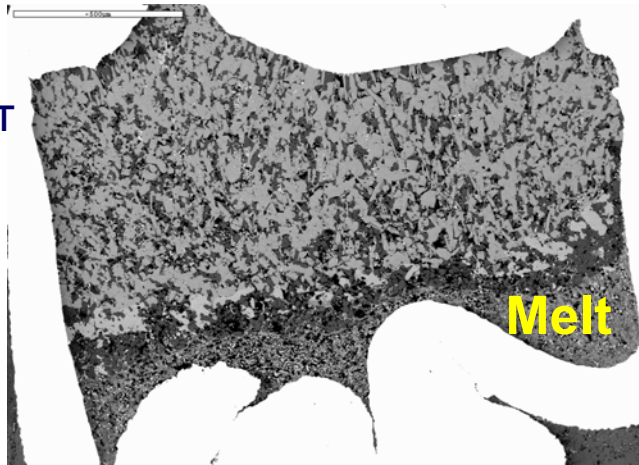
Si-расплав



Результаты экспериментов при 6.5 ГПа и 1000 °С

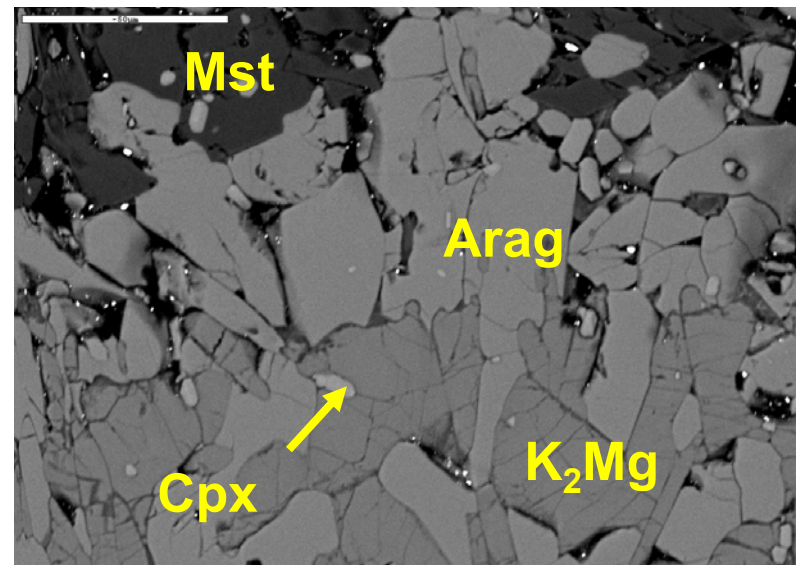
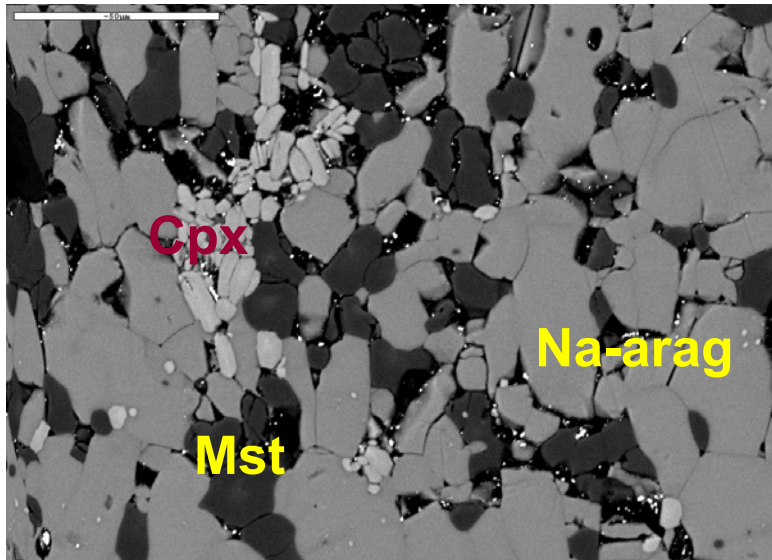
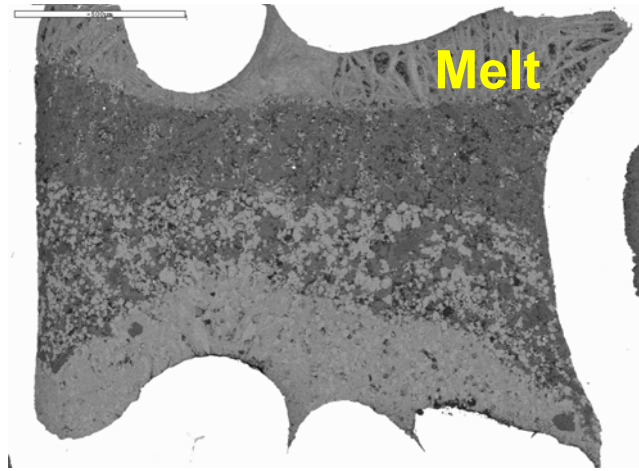
Na-карбонатит

Na-арагонит
Магнезит
Клино-
пироксен
Расплав



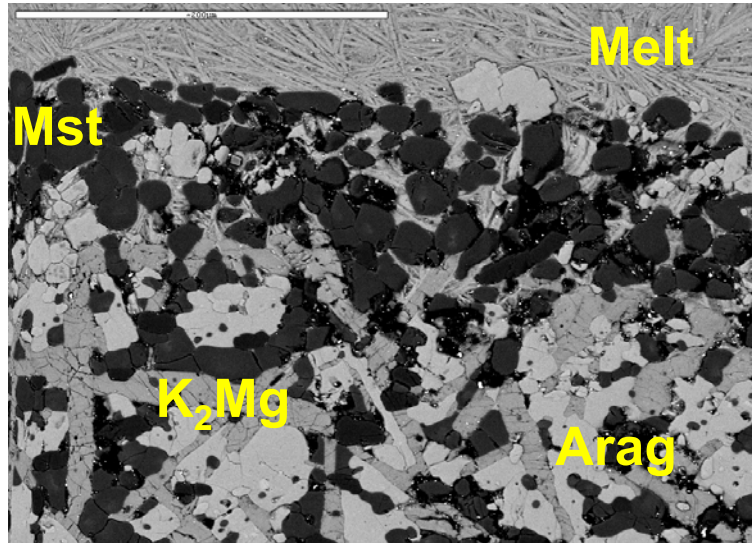
K-карбонатит

$K_2Mg(CO_3)_2$
Арагонит
Магнезит
Клино-
пироксен
Расплав



Результаты экспериментов при 15-21 ГПа

К-карбонатит 15 ГПа. 1200°C

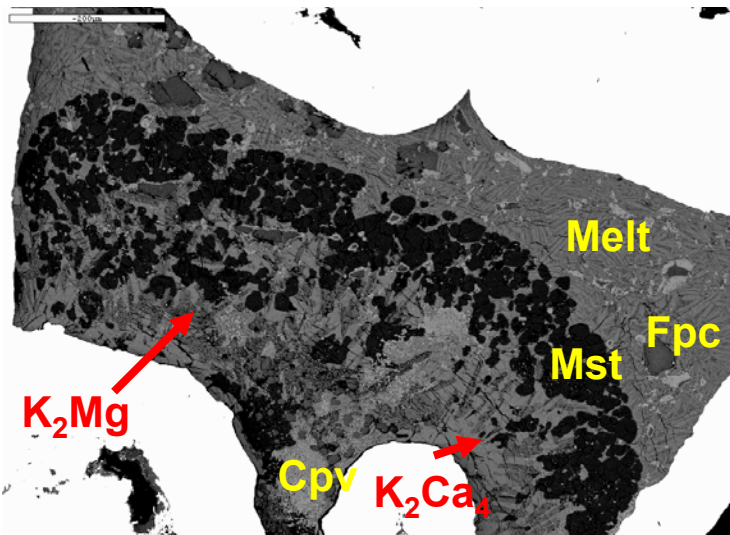


Ассоциация ниже солидуса
при 21 ГПа

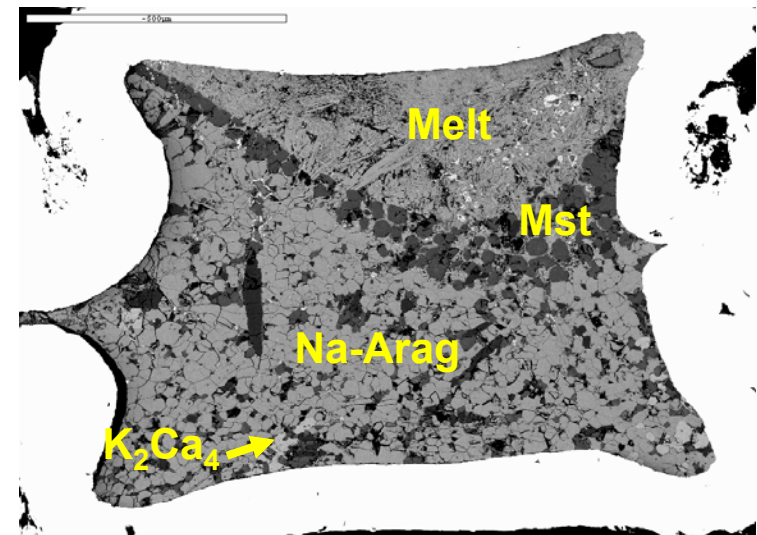
Na-система
 $K_2Ca_4(CO_3)_5$
Na-арагонит
Магнезит
Са-перовскит

К-система
 $K_2Ca_4(CO_3)_5$
 $K_2Mg(CO_3)_2$
Магнезит
Са-перовскит

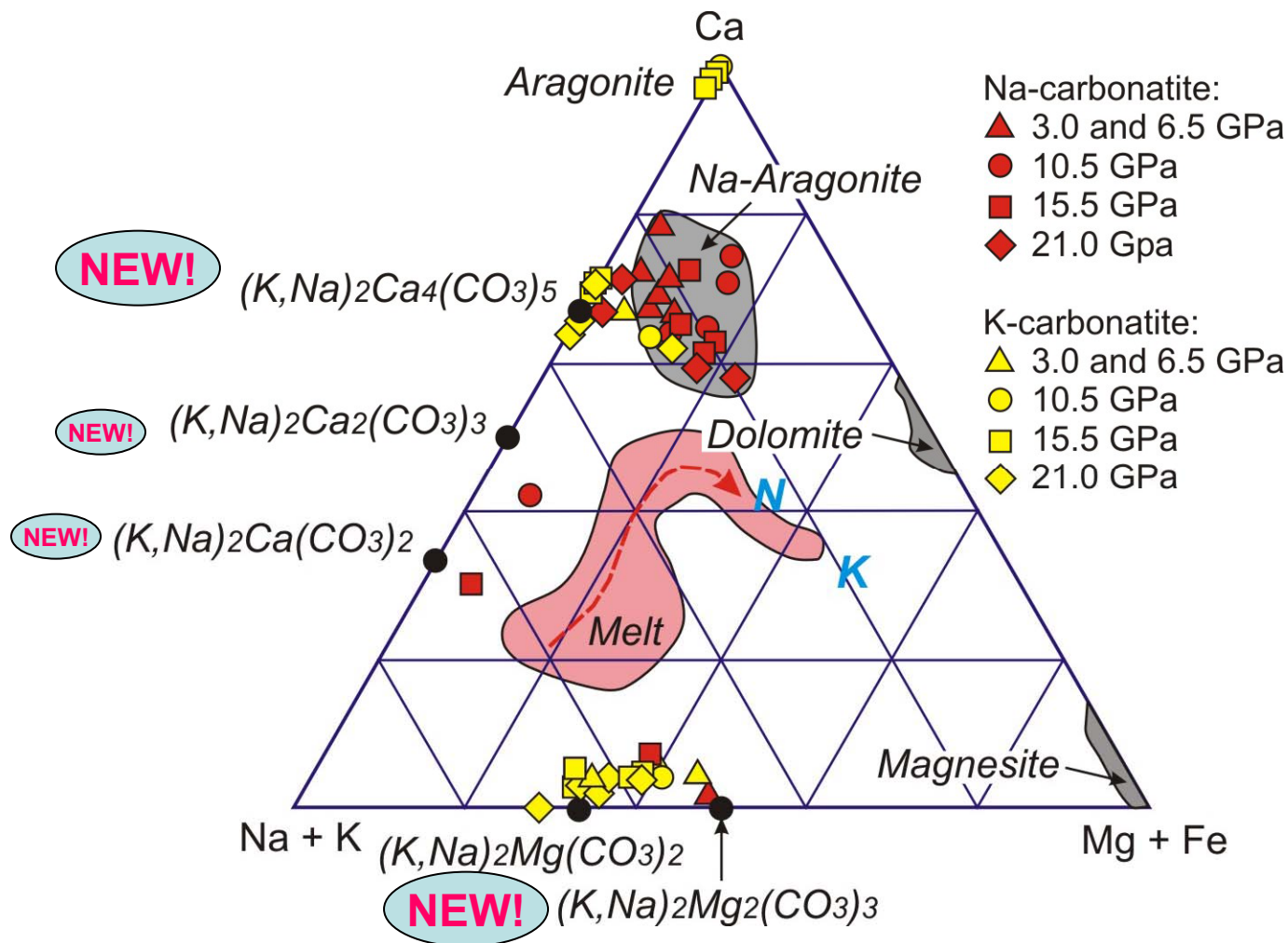
К-карбонатит 21 ГПа, 1300°C



Na-карбонатит 21 ГПа, 1200°C

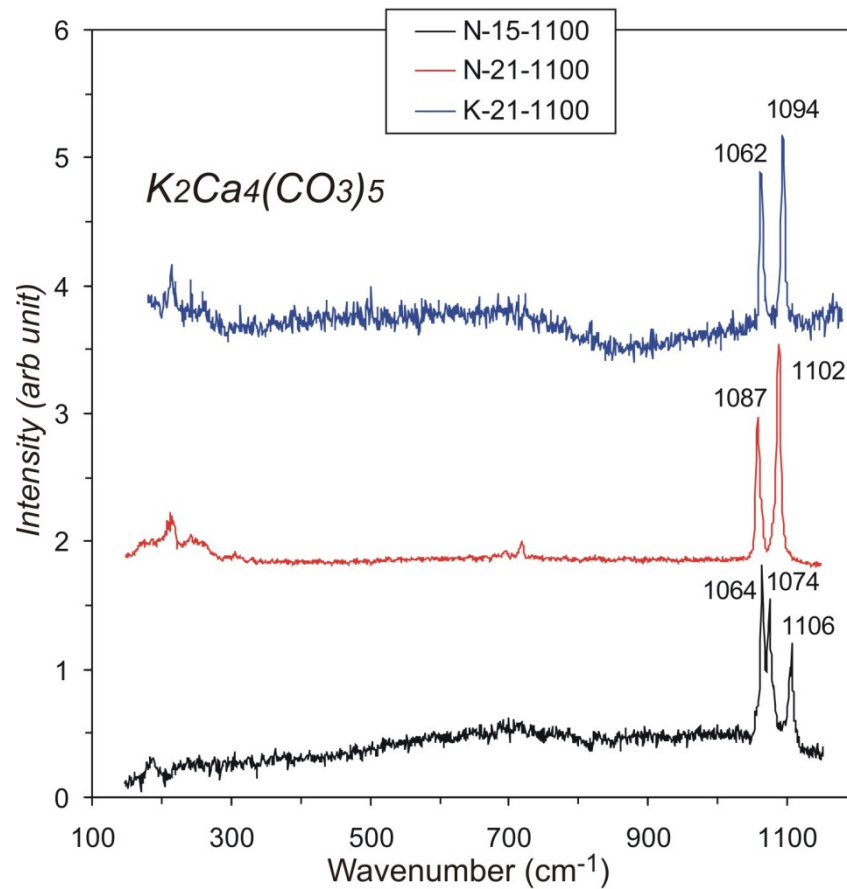
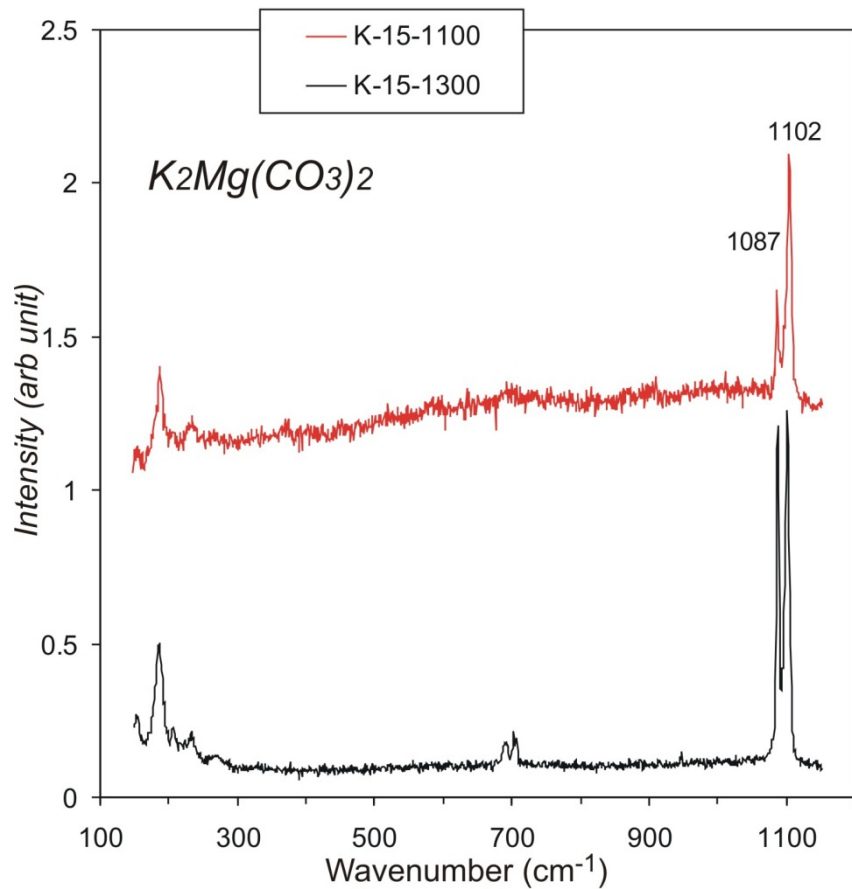


Состав карбонатов и экспериментальных расплавов

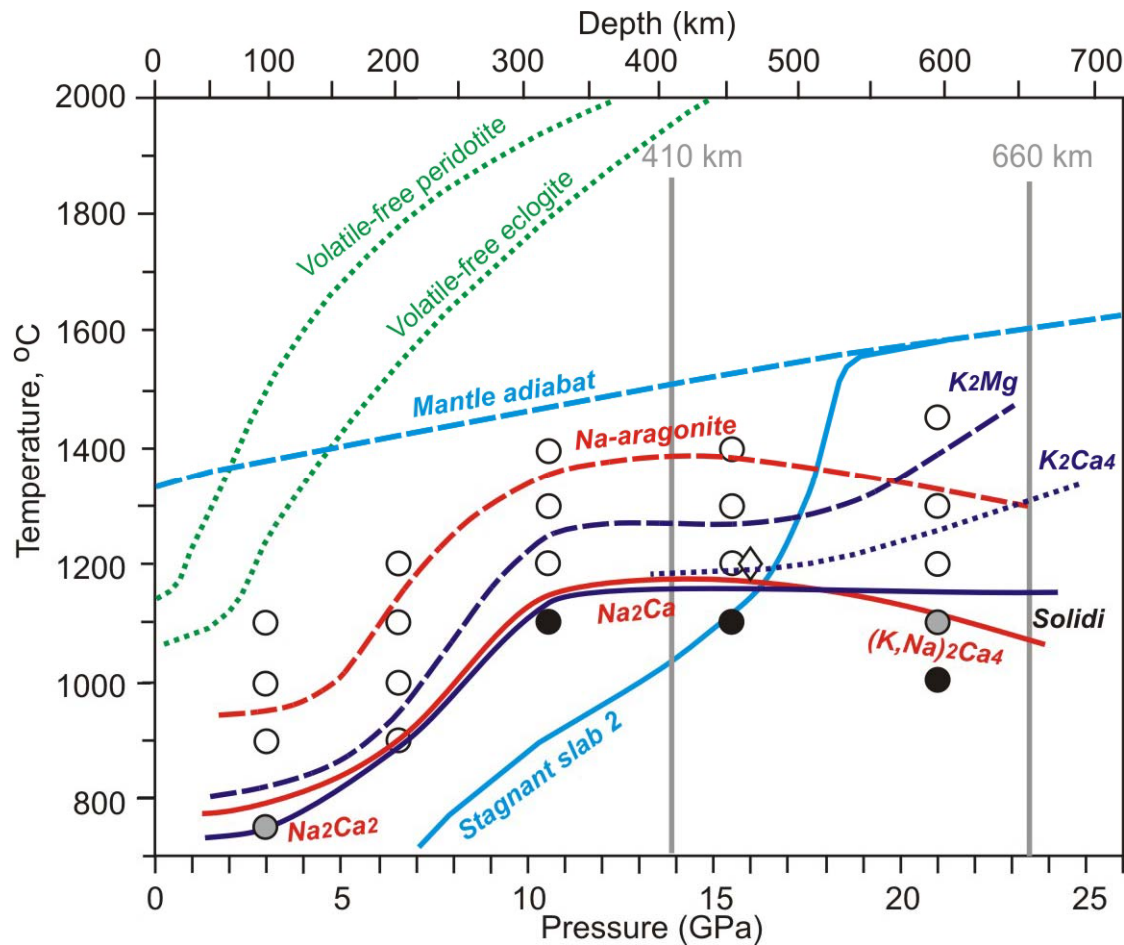


Изгиб тренда расплавов связан с началом плавления доломита / магнезита
 Na-арагонит по составу близок к фазе $(K,Na)_2Ca_4(CO_3)_5$
N и **K** – стартовые составы

Рамановские спектры двойных карбонатов



Солидусы и стабильность карбонатов в Na- и K-карбонатитах

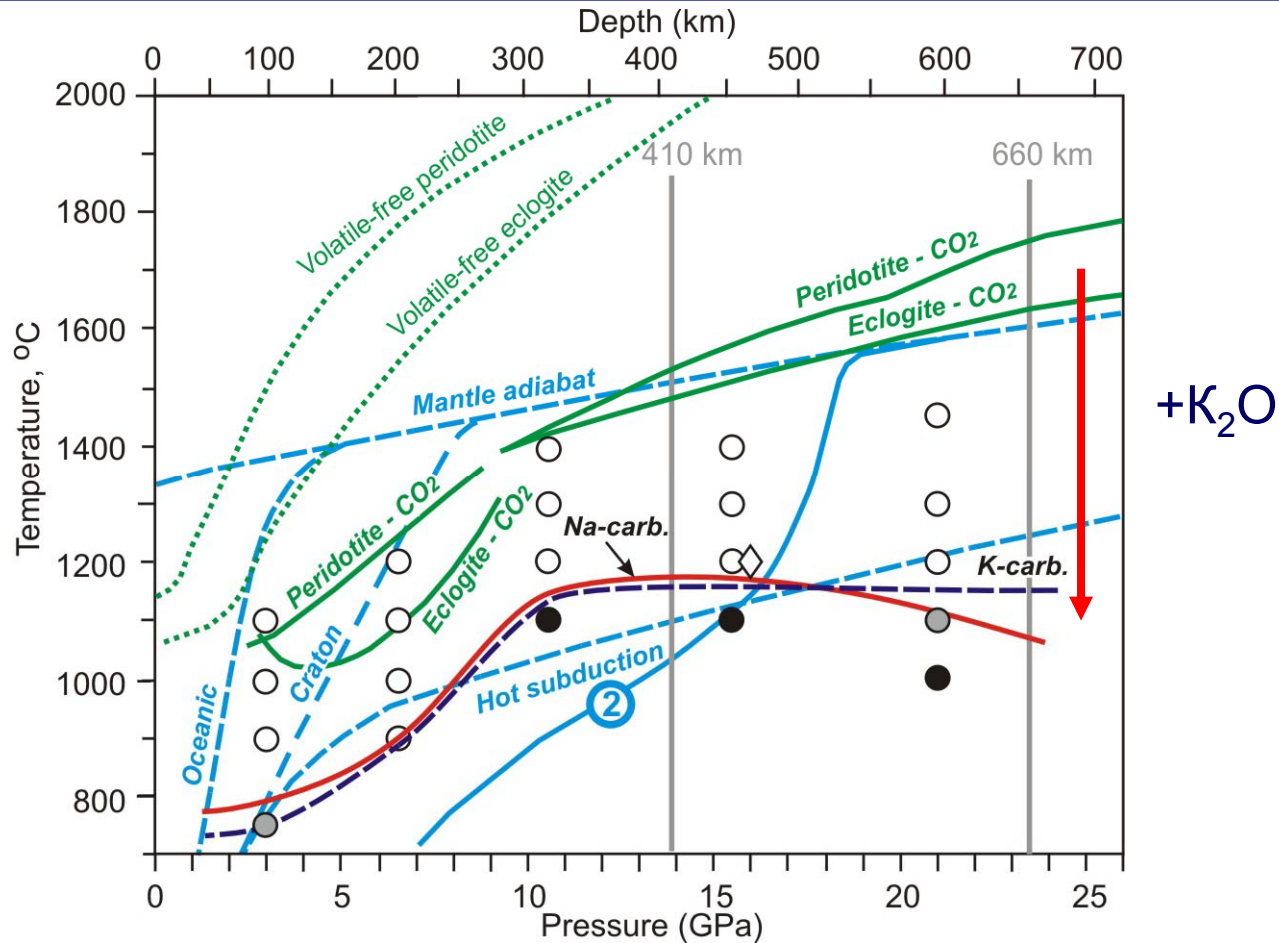


Красные = Na-карбонатит

Синие = K-карбонатит

Показана стабильность Na-арагонита и новых двойных карбонатов.

Солидусы и стабильность карбонатов в Na- и K-карбонатитах



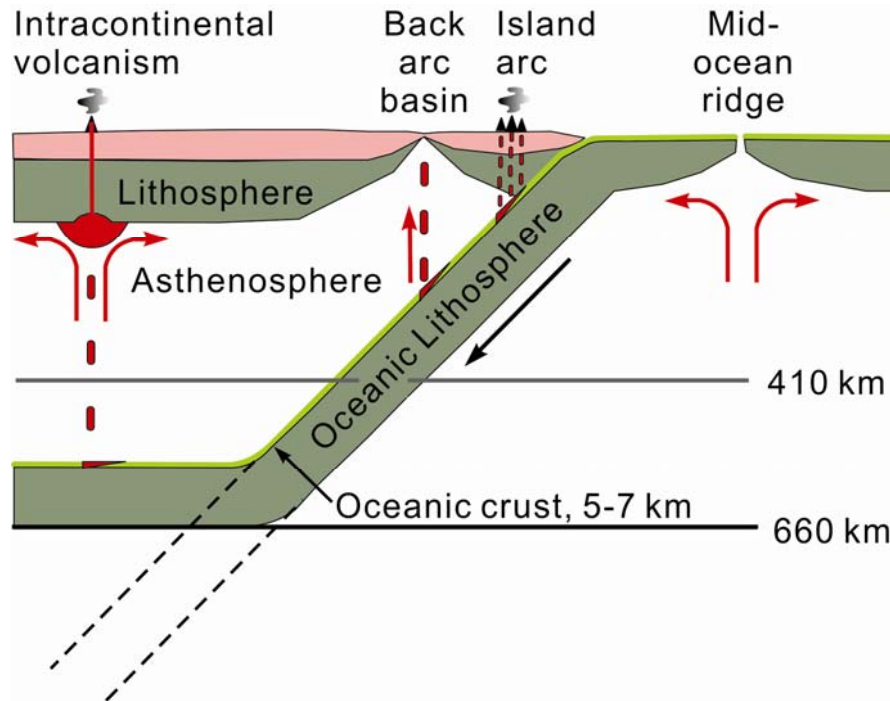
Перидотит и эклогит ниже 10 ГПа по

Dasgupta and Hirschmann 2004 CMP and 2006 Nature

Перидотит и эклогит без K_2O при 10-30 ГПа по

Litasov and Ohtani 2009 PEPI and 2010 EPSL

Субдукция углерода ниже уровня островных дуг



Три сценария субдукции CO_2 (углерода) и H_2O :

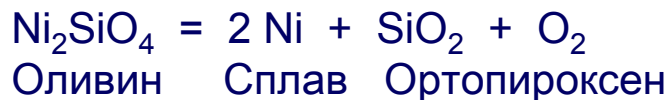
- 1) Нет H_2O - Нет CO_2 (в особенности, древняя субдукция)
- 2) Нет / мало H_2O – много CO_2
- 3) H_2O в перидотите – CO_2 в океанической коре.

Температура плит уменьшается от (1) к (3).

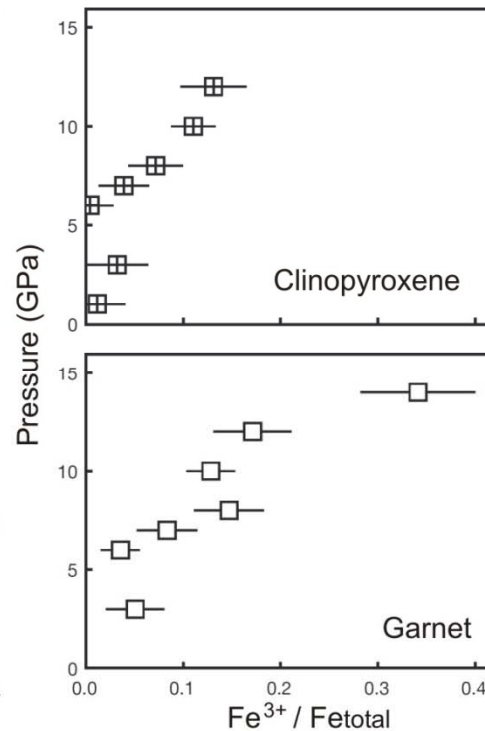
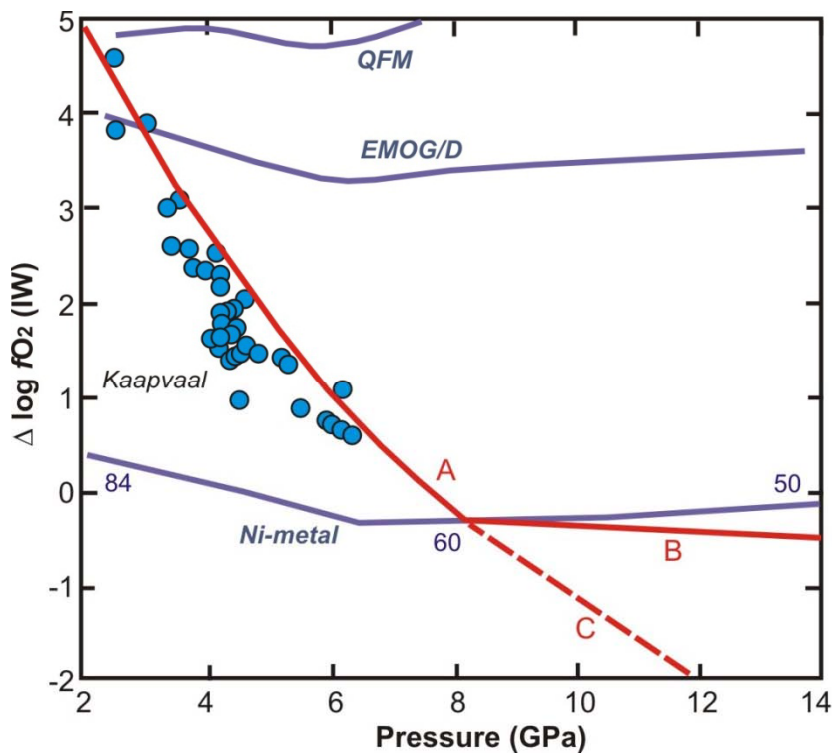
Окислительно-восстановительные условия в мантии

f_{O_2} вдоль геотермы щита для гранатового перидотита с 2% $Fe^{3+}/\Sigma Fe$.

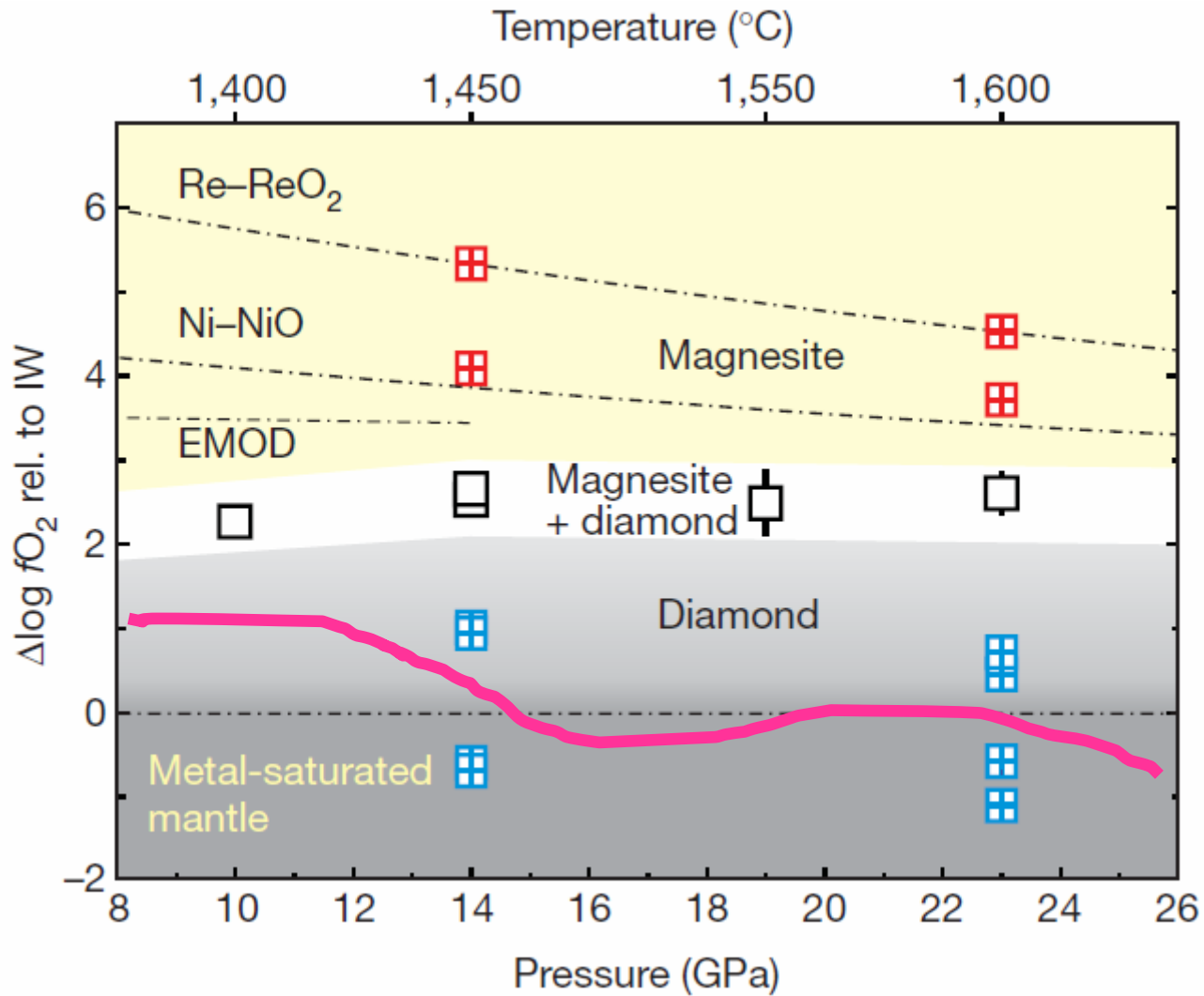
Ni-metal – линия осаждения свободного металла (Ni мол % в FeNi-сплаве):



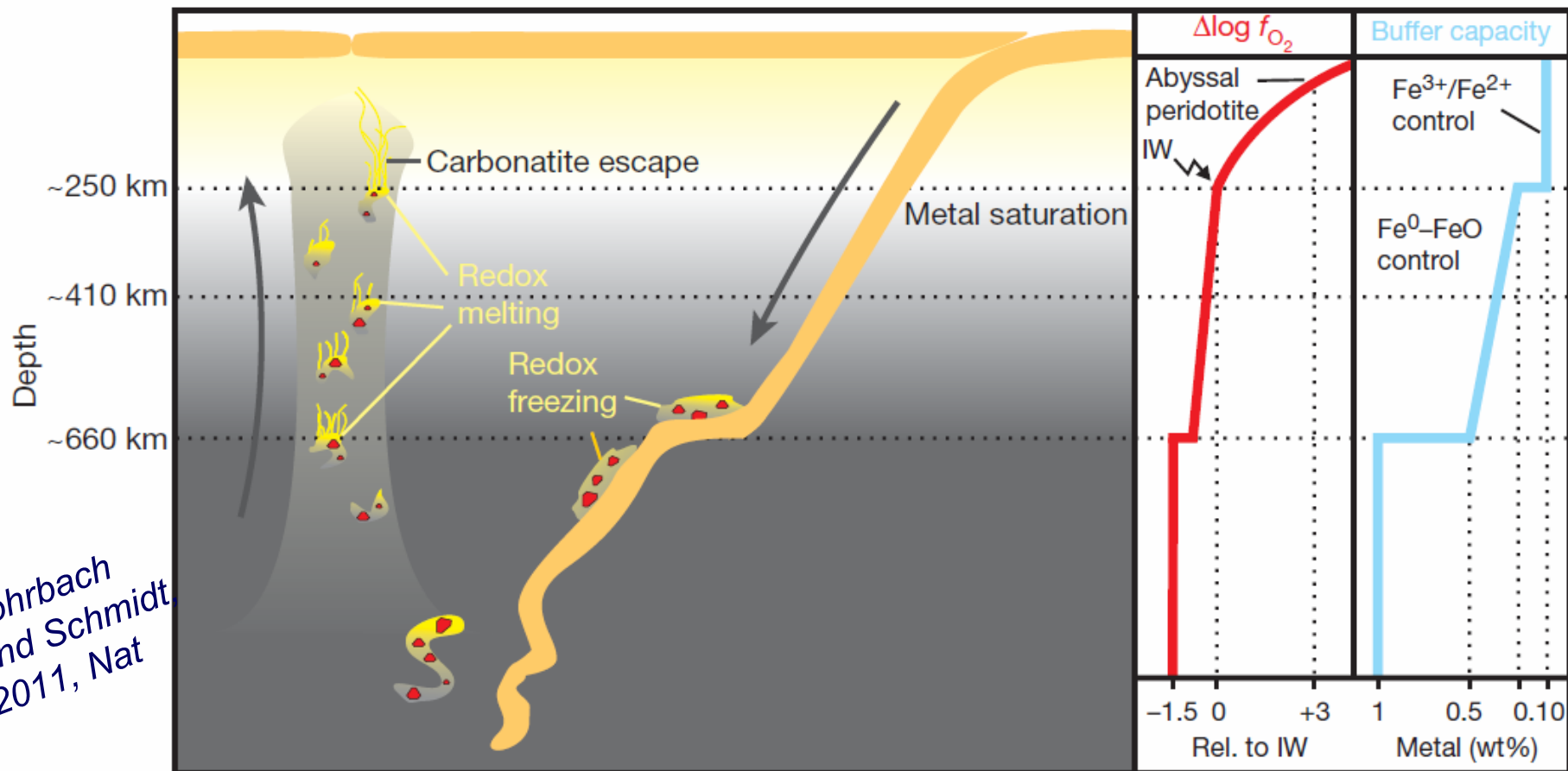
FeNi-сплав может быть стабилен в нижней части верхней мантии за счет диспропорционирования Fe^{2+} на Fe^{3+} в гранате и Fe^0 (Rohrbach et al., 2007, Nature)



Стабильность углеродсодержащих фаз в зависимости от fO_2

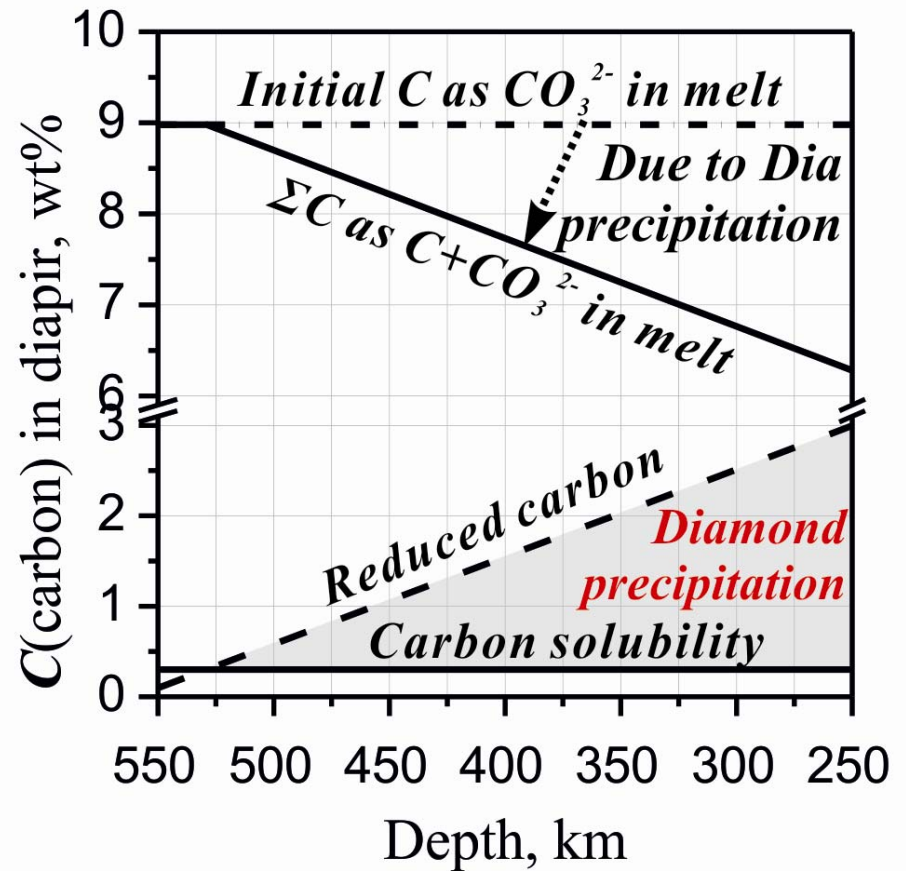
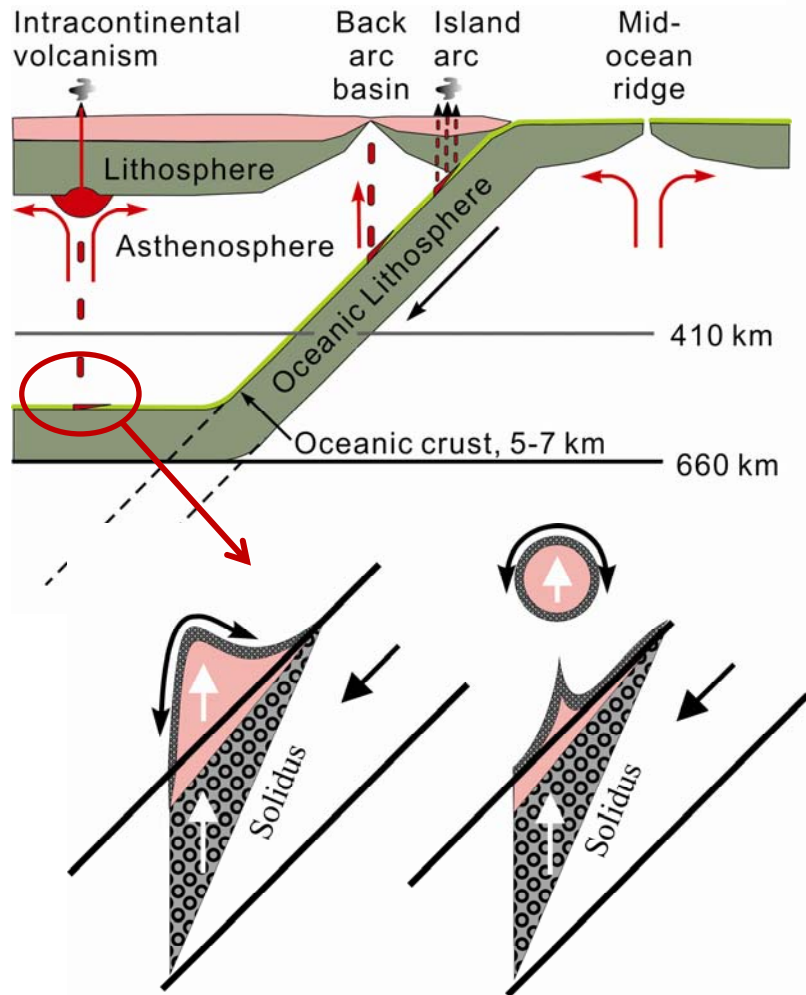


Редокс-плавление/затвердевание карбонатов в мантии



Субдукция плит приводит к редокс-затвердеванию и восстановлению карбонатов и формированию участков, обогащенных алмазами. В свою очередь, эти участки попадая в зону влияния восходящих потоков, являются источником углерода для легкоплавких флюидов. Расплав не может проникать и передвигаться по восстановленной мантии пока она не потеряет контроль со стороны свободного металла и не окислится до уровня 23 контроля со стороны Fe^{2+}/Fe^{3+} -отношения на глубине около 250 км.

Модель карбонатитового диапира



При подъеме карбонатитового диапира через восстановленную мантию с глубины 660 км до 250 км восстановление карбоната в первом диапире составляет около 30% (при содержании $\text{C}(\text{Fe}^0) = 0.1$ мас.%)

Выводы

- Моделирование субдукции показывает, что дегидратация слэбов происходит более эффективно, чем их декарбонатизация. От 20 до 75% CO_2 транспортируется ниже уровня островодужного вулканизма. Соответственно, верхняя часть (1-5 км) многих слэбов содержат до 1-2 мас.% CO_2 на уровне 300-400 км.
- Исследование фазовых соотношений в щелочесодержащих карбонатитах при давлениях 3-21 ГПа позволило определить потенциальные солидусы карбонатсодержащих перидотитов и эклогитов. Солидусы Na- и K-карбонатитовых систем выполаживаются при давлениях выше 10 ГПа. Установлено несколько стабильных двойных карбонатов, наиболее важным является $\text{K}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$, температурная стабильность которого увеличивается с давлением.
- Выполаживание солидусов карбонатсодержащих перидотитов и эклогитов при давлениях 6-10 ГПа должно вызывать плавление карбонатов, включая арагонит и частично магнезит, на уровне переходного слоя мантии. Это приводит к формированию карбонатитовых диапиров. Такие химические диапиры способны проникать сквозь переходный слой и верхнюю мантию, вызывать плавление в основании литосферы и магматизм на поверхности.

- END

Summary 2

- Solidi of carbonated peridotite and eclogite have much gentler slopes at 10-32 GPa than at lower pressures and are located close to average mantle geotherm. Peridotite and eclogite have nearly similar storage capacity to be the host for carbonates in the deep mantle.
- Minor addition of alkalis and K_2O in particular reduces solidus for 300-500°C at 20 GPa.
- Solidus for peridotite – H_2O can be variable depending on the H_2O content in the system. Partial melting at 410 km occurs if H_2O content in the system is above about 0.1 wt.%.
- Stable alkali carbonates were found in Na- and K-bearing carbonatite systems at pressures 3-21 GPa. Solidi are flat above 10 GPa. $K_2Mg(CO_3)_2$ becomes increasingly stable with pressure.

Мотивация исследования

Для выяснения роли водорода и углерода в глубинных частях Земли необходимы экспериментальные исследования при высоких давлениях систем перидотитового и эклогитового состава в равновесии с С-О-Н флюидом в интервале значений fO_2 .

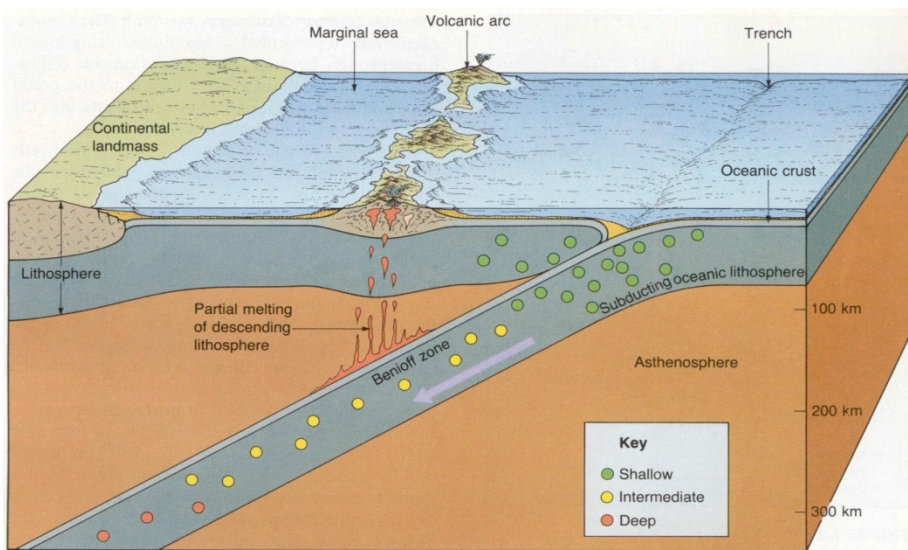
Перидотит и эклогит с CO_2 и H_2O исследованы достаточно надежно с помощью многопуансонной техники до давлений 30 ГПа. Системы с CO_2+H_2O не исследованы при давлении выше 5 ГПа. Системы с восстановленным С-О-Н флюидом (CH_4 , H_2O , H_2) не исследованы при давлениях выше 6 ГПа.

Изучение сложных систем с летучими компонентами является технически сложной задачей, так как требует использования метода двойной капсулы в малом объеме экспериментальной ячейки. Некоторые простые системы могут быть использованы вместо сложных на первом этапе.

Одним из основных вопросов, который можно рассмотреть в простых системах карбонат-силикат и карбонат-металл, является субдукция карбонатов в мантию и их реакции с силикатами и фазами железа (Fe, FeS, FeSi) в восстановительной обстановке.



Субдукция карбонатов



Субдукционная плита:

0-1 км – осадки

(до 10% CaCO_3 и органики)

1-7 км – измененные базальты

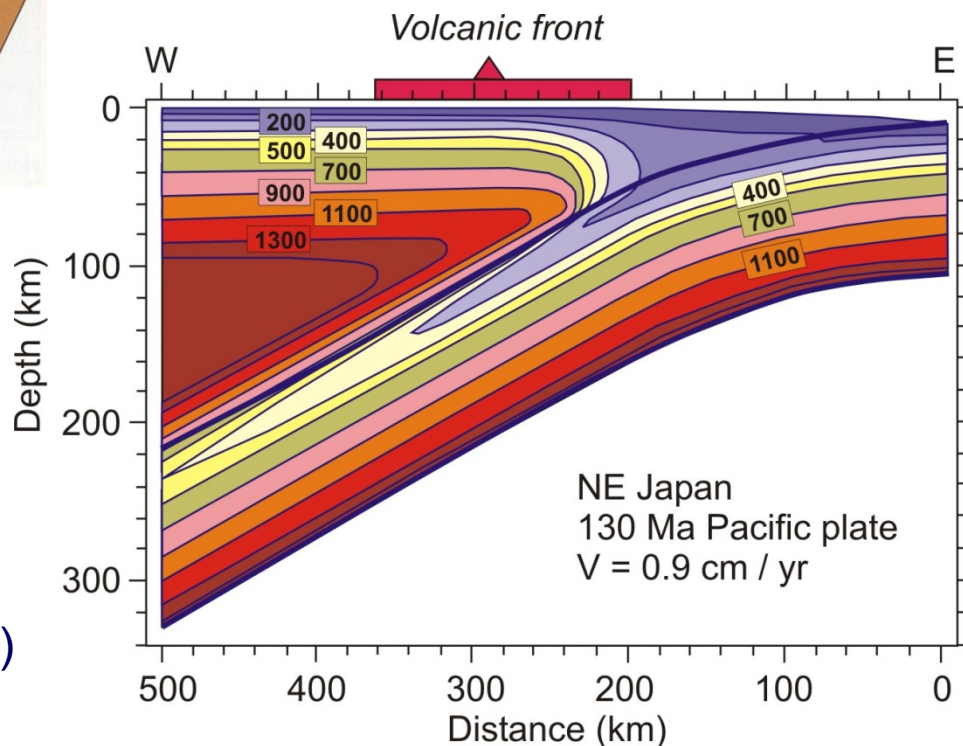
(до 5% CaCO_3)

>30 км – перидотиты

($\leq 1\%$ CaCO_3 в самой верхней части)

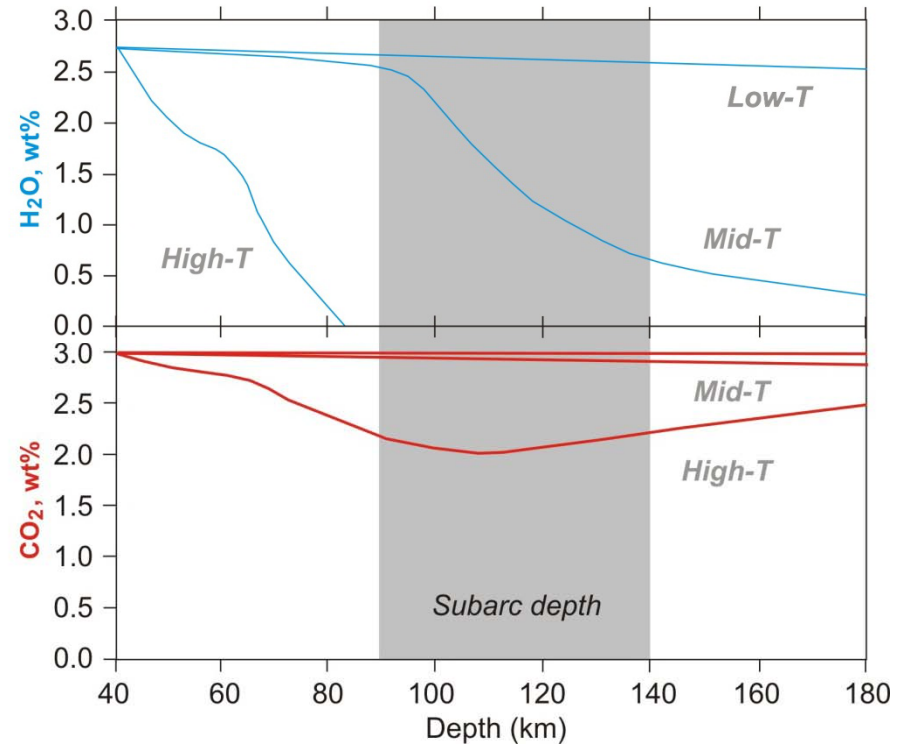
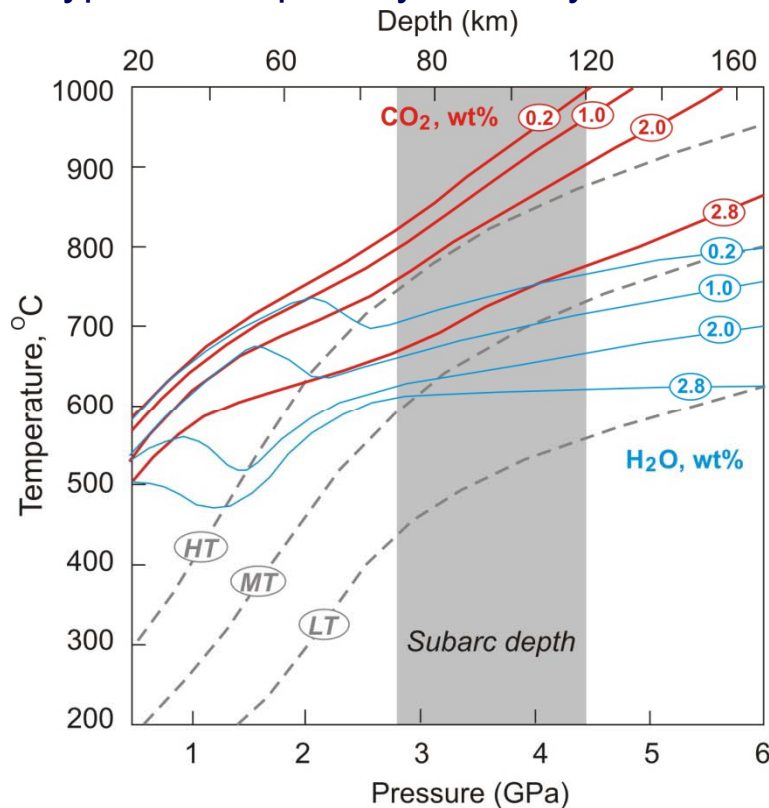
Температурный разрез зоны субдукции

Peacock (2003, Subduction Factory Book)



Субдукция карбонатов

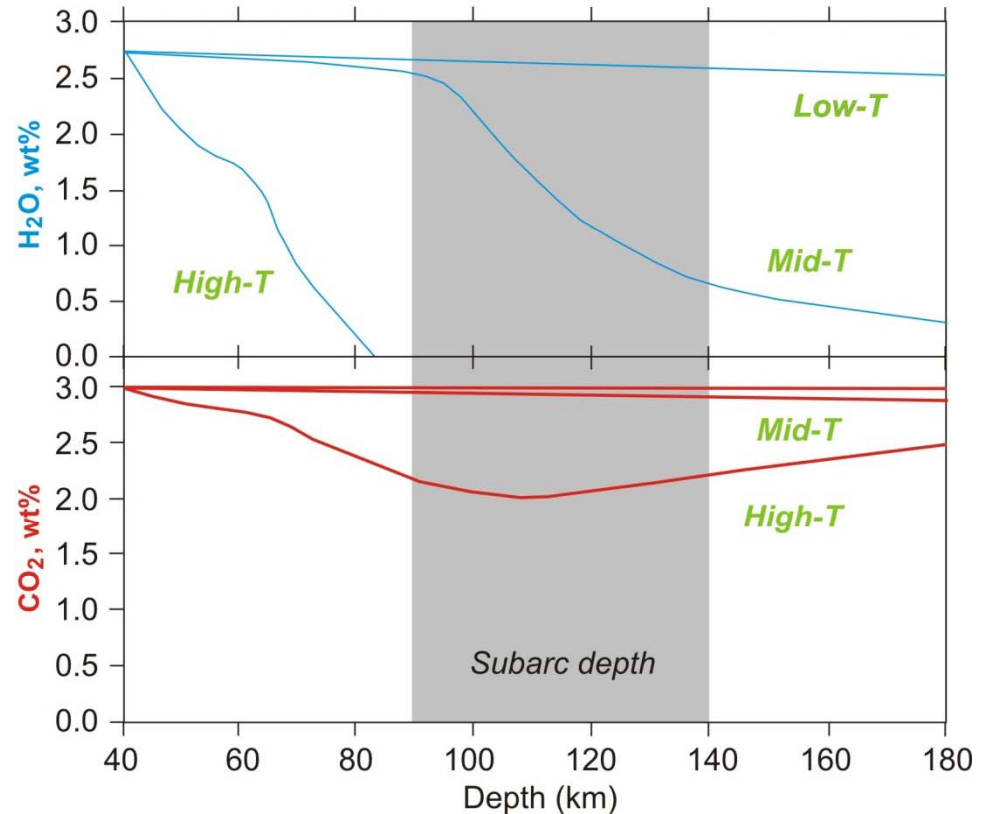
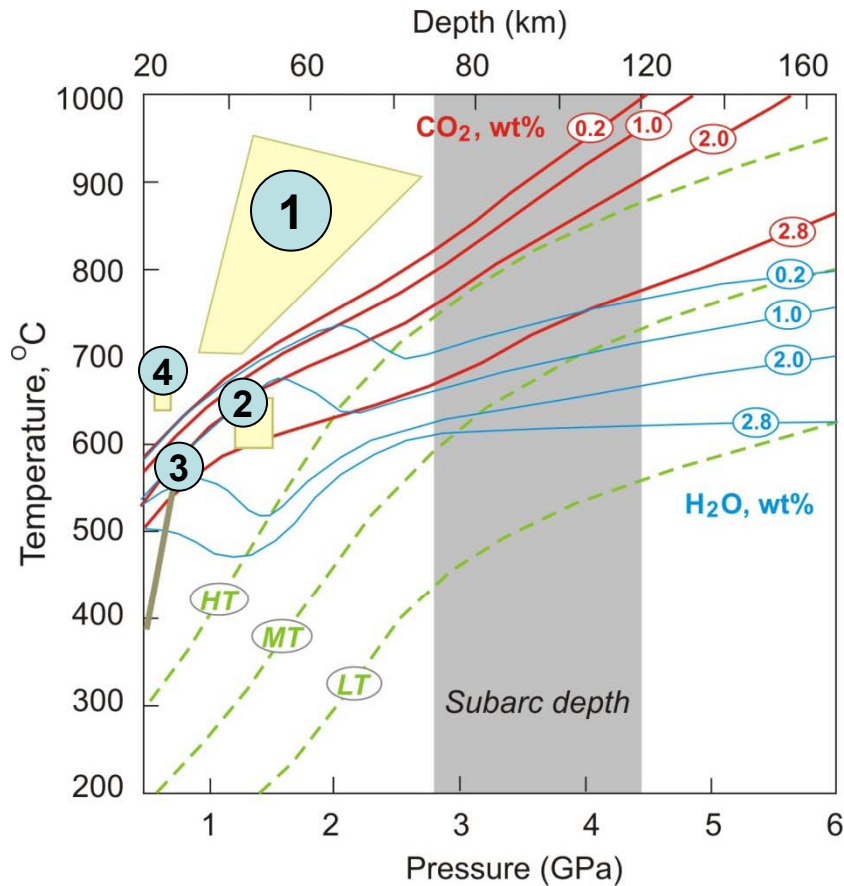
Количество CO_2 и H_2O в составе metabasalts вдоль трех субдукционных геотерм. Показана возможность эффективной субдукция карбонатов в глубинные части мантии ниже уровня островодужного вулканизма (*Kerrick and Connolly, 2001, EPSL*)



2-3 мас.% CO_2 могут переноситься в мантию измененными базальтами COX. H_2O субдуцируется гораздо хуже (!)



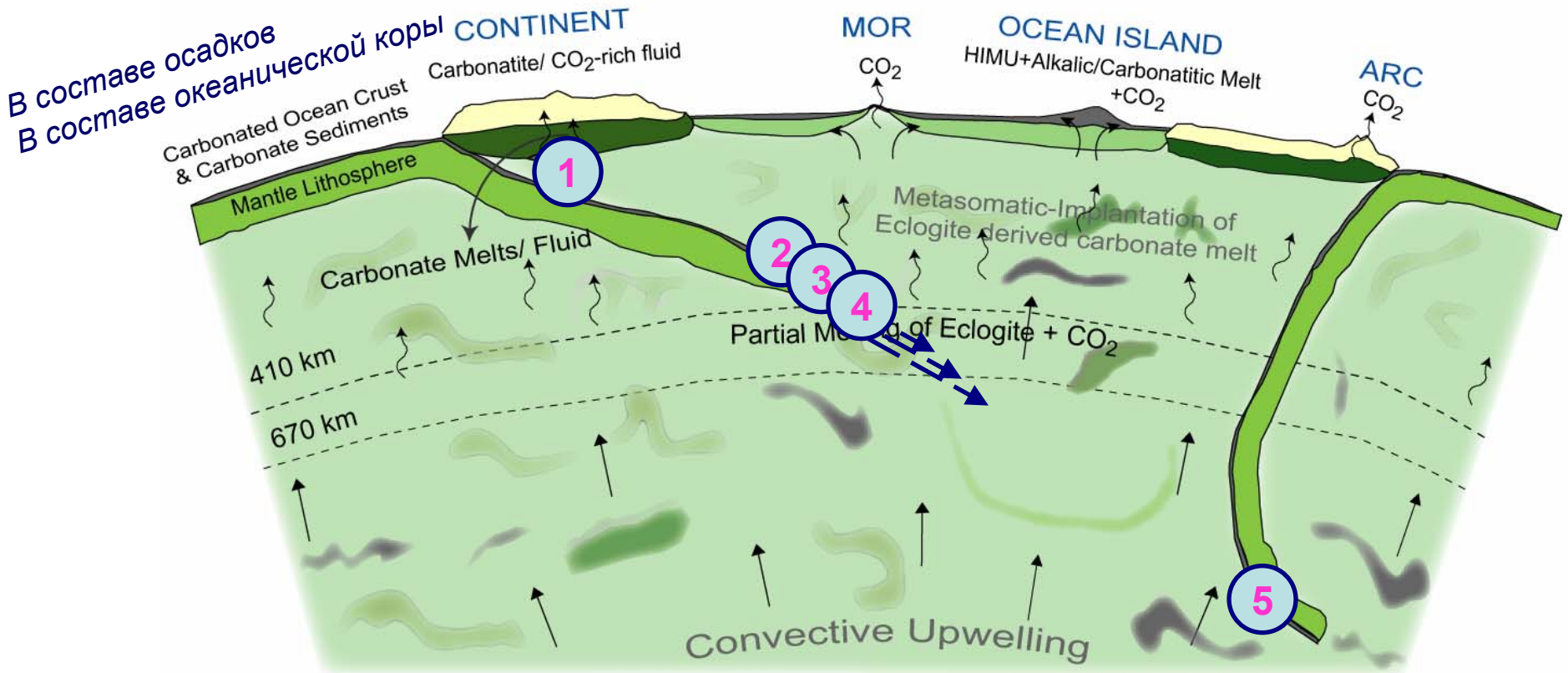
Древняя субдукция



- 1) Докембрийская субдукция, 2.8 – 0.7 млрд. лет (Brown et al., 2006)
- 2) Барбертон, Юж. Африка – 3.2 млрд. лет (Moyen et al., 2006)
- 3) Исуа, Гренландия – 3.8 млрд. лет (Komiya et al., 2002)
- 4) Джэк Хиллс, Австралия - > 4.0 млрд. лет (Hopkins et al., 2008)

CO₂ и H₂O практически не возвращались в мантию при субдукции в докембрийское время

Последующая судьба карбонатов в мантии



1. Плавление в островодужной обстановке
2. Глубинное плавление при пересечении мантийной геотермы
3. Восстановление при реакции с мантийными породами
4. Самовосстановление за счет диспропорционирования железа в силикатах
5. Погружение вплоть до уровня нижней мантии и границы с ядром

