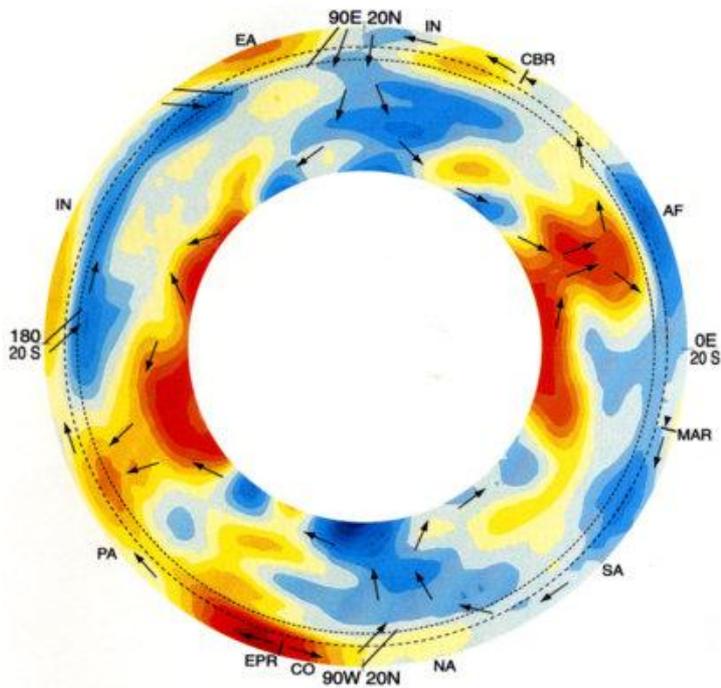
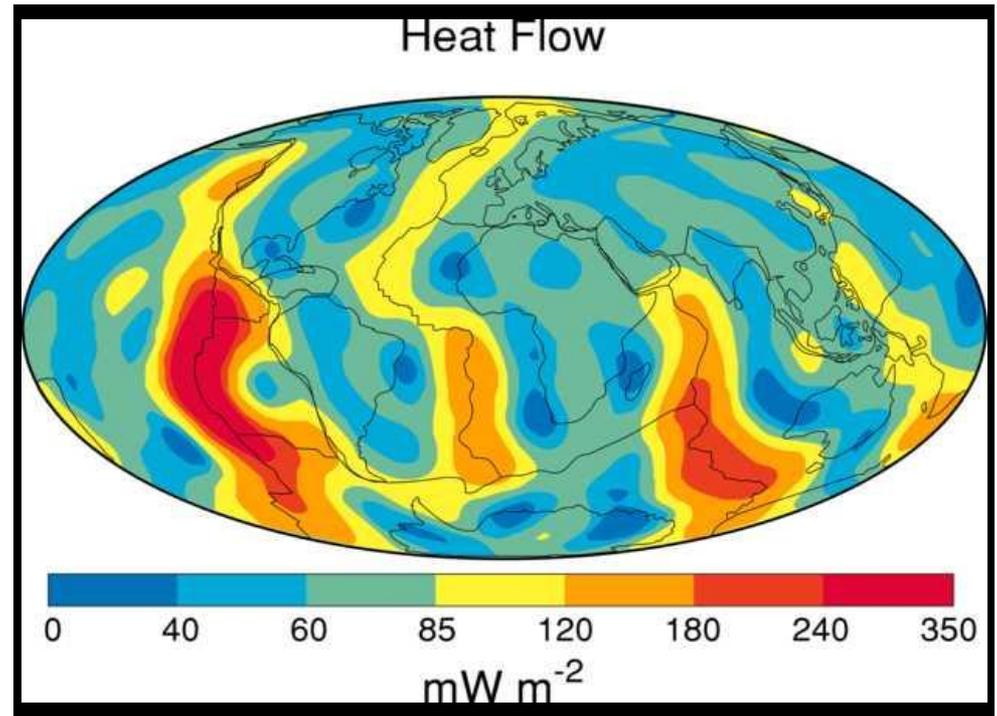


Геохимия природных процессов

Редкие элементы как индикаторы геодинамических обстановок формирования магматических комплексов

- Каждой геодинамической обстановке отвечает специфический тип рудообразования.

Геотермический градиент



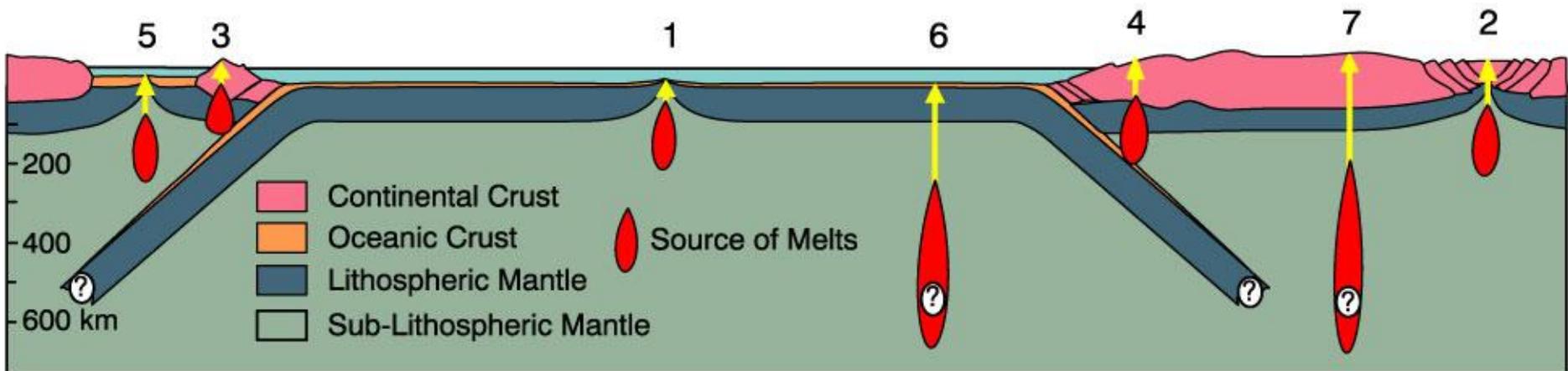
Pattern of global heat flux variations compiled from observations at over 20,000 sites and modeled on a spherical harmonic expansion to degree 12. From Pollack, Hurter and Johnson. (1993) *Rev. Geophys.* 31, 267-280.

Cross-section of the mantle based on a seismic tomography model. Arrows represent plate motions and large-scale mantle flow and subduction zones represented by dipping line segments. EPR = East Pacific Rise, MAR = Mid-Atlantic Ridge, CBR = Carlsberg Ridge. Plates: EA = Eurasian, IN = Indian, PA = Pacific, NA = North American, SA = South American, AF = African, CO = Cocos. From Li and Romanowicz (1996). *J. Geophys. Research*, 101, 22,245-72.

Геодинамические обстановки

1. Mid-ocean Ridges
2. Intracontinental Rifts
3. Island Arcs
4. Active Continental Margins

5. Back-arc Basins
6. Ocean Island Basalts
7. Miscellaneous Intra-Continental Activity
 - kimberlites, carbonatites, anorthosites...



Список используемых сокращений

Аббревиатура	Расшифровка
MORB	Mid-Ocean Ridge Basalts – базальты срединно-океанических хребтов
OFB	Ocean Floor Basalts – базальты океанического дна
IAB	Island-Arc Basalts – островодужные базальты
IAT	Island-Arc Tholeiites – островодужные толеиты
VAB	Volcanic-Arc Basalts – базальты вулканических дуг
OIB	Ocean Island Basalts – базальты океанических островов
OIT	Ocean Island Tholeiites – толеиты океанических островов
OIA	Ocean Island Andesites – андезиты океанических островов
BABV	Back-Arc Basin Basalts – базальты задуговых бассейнов
WPT	Within-Plate Tholeiites – внутриплитные толеиты
WPB	Within-Plate Basalts – внутриплитные базальты
LKT	Low Potassium Tholeiites – низкокалиевые толеиты
CAB	Calc-Alkaline Basalts – известковощелочные базальты

DM – деплетированная мантия, обедненная несовместимыми элементами; EM – обогащенная мантия; HIMU – высокое содержание радиогенного свинца (высокое отношение U/Pb).

Explanation

WBP within-plate basalts
IAT island-arc tholeiites
CAB calc-alkaline basalts
MORB mid-ocean ridge basalts
OIT ocean island tholeiite
OIA ocean island alkaline basalt

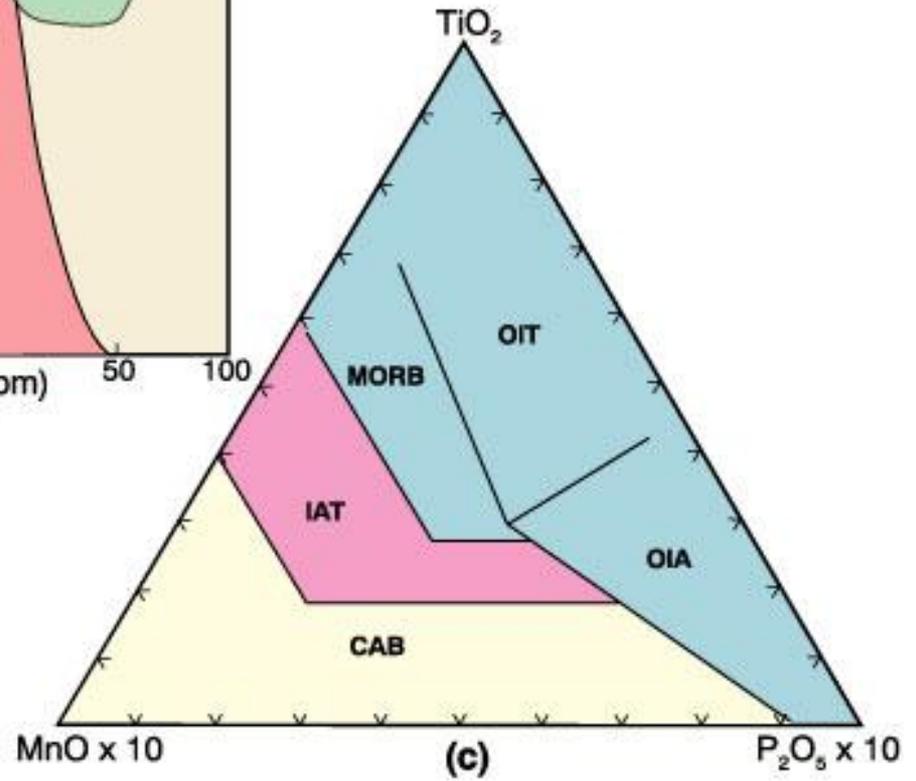
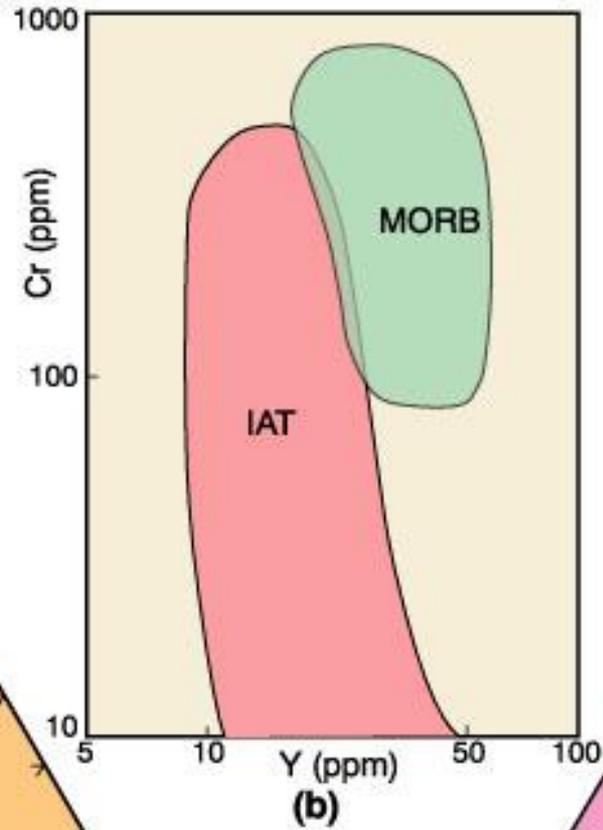
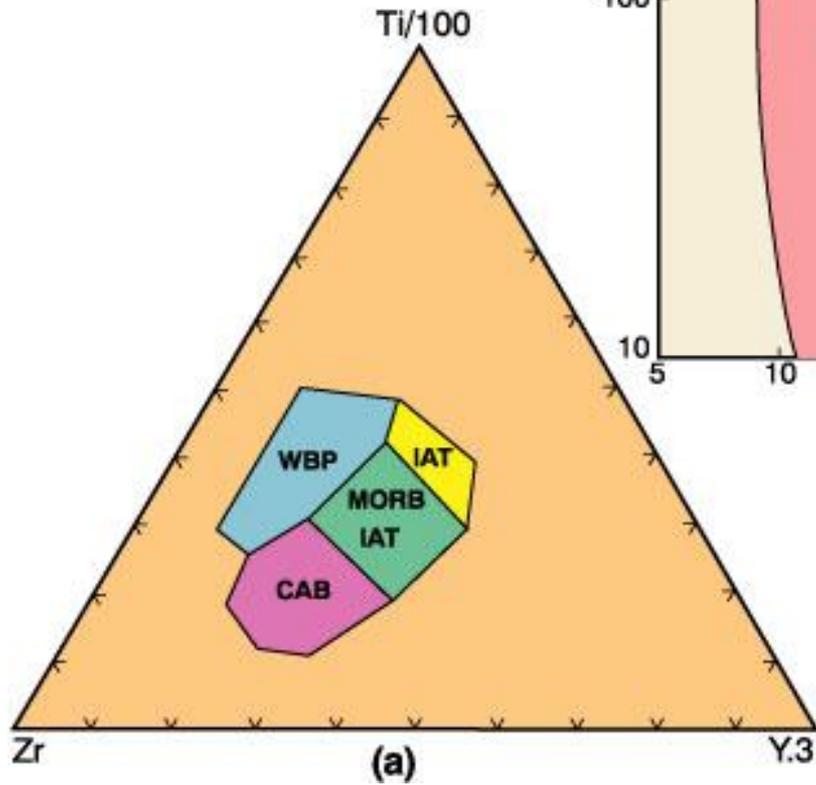


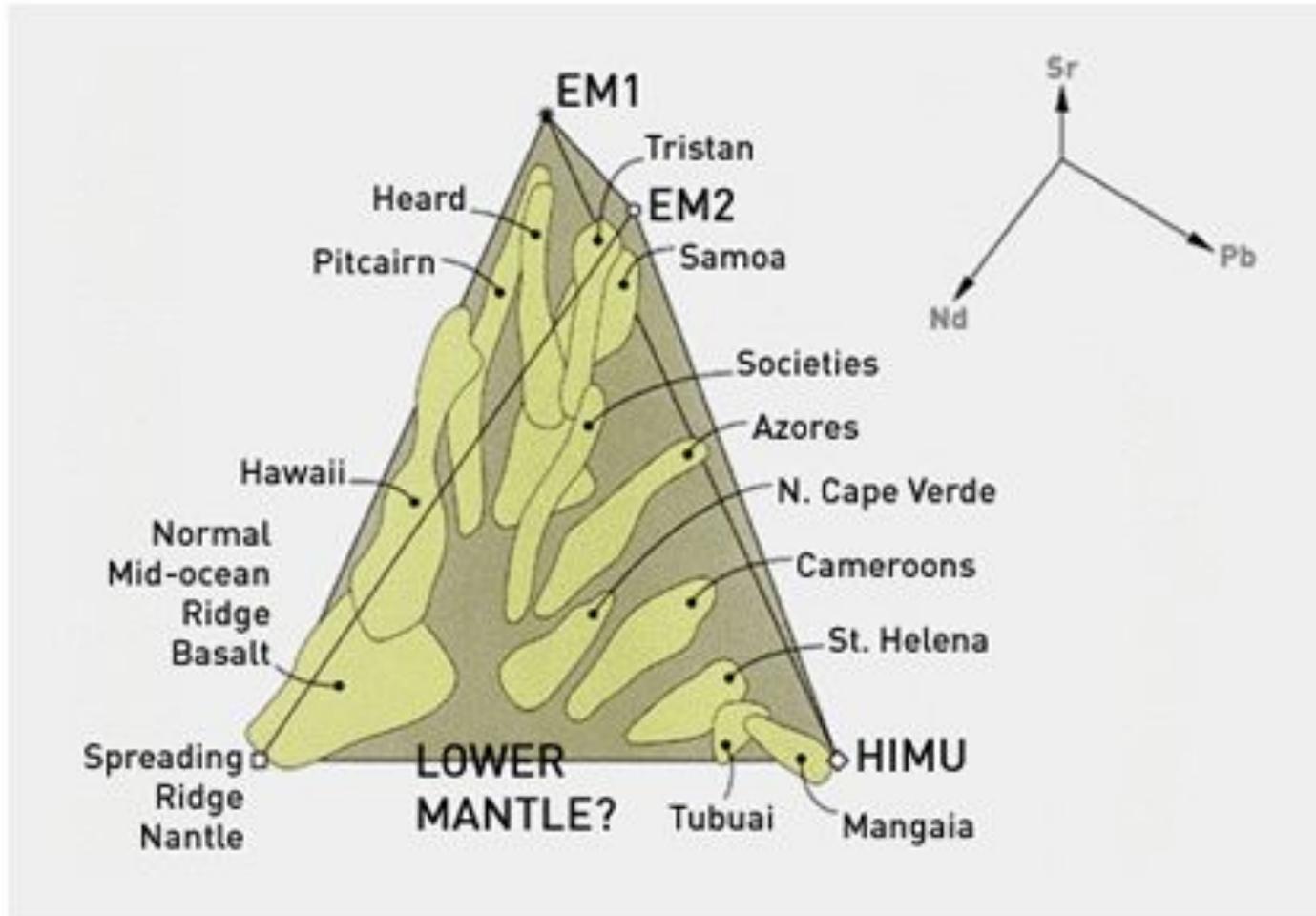


Рис. 5.30. Плитно-тектоническая модель, объясняющая формирование обогащенных конечных компонентов (EM1, EM2 и HIMU) в мантии Земли. Компонент EM2 формируется при крутопадающей субдукции, тогда как компонент EM1 при пологопадающей (изменено после работы [234])



Рис. 5.31. Мантийный тетраэдр: конечные компоненты DMM, EM1, EM2 и HIMU расположены в его вершинах; тренды изотопных отношений стронция, неодима и свинца показывают основной вклад тех или иных изотопных отношений при выделении этих компонентов; относительное смещение составов многих базальтов различных океанических островов от линии смещения компонентов EM2 и HIMU может быть объяснено существованием некоего гипотетического компонента мантийных плюмов FOZO [152]

Магматический процесс. Источники вещества. Изотопная геология Sr, Nd и Pb.



DMM

FOZO

CLASSIFICATION PLOTS

Menu item	Module name	Scope ¹	Plot description	Details (reference)
AFM (Irvine + Baragar 1971)	AFM	G	(Na ₂ O+K ₂ O) – FeO ^t – MgO ternary	AFM plot that serves to discriminate between calc-alkaline and tholeiitic subalkaline series (Irvine & Baragar, 1971).
SiO ₂ - FeO ^t /MgO (Miyashiro 1974)	Miyashiro	G	SiO ₂ vs. FeO ^t /MgO binary	Diagram of Miyashiro (1974) distinguishing between tholeiitic and calc-alkaline igneous rocks.
SiO ₂ - K ₂ O (Peccerillo + Taylor 1976)	PeceTaylor	G	SiO ₂ vs. K ₂ O binary	Diagram proposed by Peccerillo & Taylor (1976) to distinguish various series of tholeiitic, calc-alkaline and shoshonitic rocks.
Co – Th (Hastie et al. 2007)	Hastie	G	Co vs. Th	Replacement for the previous plot of Peccerillo & Taylor (1976) using less mobile elements, designed by Hastie <i>et al.</i> (2007).
A/CNK - A/NK (Shand 1943)	Shand	G	Al ₂ O ₃ /(CaO+Na ₂ O+K ₂ O) vs. Al ₂ O ₃ /(Na ₂ O+K ₂ O) (mol. %)	Classic A/CNK vs A/NK plot of Shand (1943) discriminating metaluminous, peraluminous and peralkaline compositions.
TAS (Le Bas et al. 1986)	TAS	V	SiO ₂ vs. (Na ₂ O + K ₂ O) binary	The principal variation of the TAS diagram, as proposed by Le Bas <i>et al.</i> (1986) and codified by Le Maitre (1989). Dividing line between alkaline and subalkaline series is that of Irvine & Baragar (1971).
TAS (Cox et al. 1979)	CoxVolk CoxPlut	V P	SiO ₂ vs. (Na ₂ O + K ₂ O) binary	Variation of the TAS diagram proposed by Cox <i>et al.</i> (1979) and adopted by Wilson (1989) for plutonic rocks.
TAS (Middlemost 1994)	TASMiddlemostVolk TASMiddlemostPlut	V P	SiO ₂ vs. (Na ₂ O + K ₂ O) binary	Variation of the TAS diagram proposed by Middlemost (1994).
Jensen (1976)	Jensen	V	Al – (Fe ^t + Ti) – Mg ternary	Ternary plot of Jensen (1976).
R ₁ -R ₂ (De la Roche et al. 1980)	LarocheVolk LarochePlut	V P	R ₁ -R ₂ binary (in millications).	Multicationic classification plot of De La Roche <i>et al.</i> (1980) (R ₁ : 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti); R ₂ : 6Ca + 2Mg + Al).
Nb/Y - Zr/TiO ₂ (Winchester + Floyd 1977) Zr/TiO ₂ - SiO ₂ (Winchester + Floyd 1977)	WinFloyd1 WinFloyd2	V	log Nb/Y vs. log Zr/TiO ₂ log Zr/TiO ₂ vs. SiO ₂ binary	Diagrams proposed by Winchester & Floyd (1977) for classification of volcanic rocks using incompatible element ratios.
Nb/Y - Zr/Ti (modified by Pearce 1996)	Pearce1996	V	log Nb/Y vs. log Zr/Ti	The log Nb/Y vs. log Zr/TiO ₂ plot of Winchester & Floyd (1977) modified by Pearce (1996).
QAPF diagram (Streckeisen 1978)	QAPFVolk	V	QAPF – modal compositions	Modal QAPF diagram of Streckeisen (1978)
QAPF diagram (Streckeisen 1974)	QAPFPlut	P	QAPF – modal compositions	Modal QAPF diagram of Streckeisen (1974)

¹Scope: G: general diagram, V: designed for volcanic rocks, P: designed for plutonic rocks

CLASSIFICATION PLOTS (CONTD.)

<i>Menu item</i>	<i>Module name</i>	<i>Scope¹</i>	<i>Plot description</i>	<i>Details (reference)</i>
Feldspar triangle (O'Connor 1965)	O'ConnorVolc O'ConnorPlut	V P	Ternary plot Ab-An-Or	Classification diagram after O'Connor (1965) for silica-rich rocks (quartz > 10%). It is based on CIPW-normative (volcanic, plutonic rocks) or modal (plutonic rocks) contents of albite, anorthite and K-feldspar.
P-Q (Debon + Le Fort 1983)	DebonPQ	P	P-Q binary (in millications)	Nomenclature diagram of Debon & Le Fort (1983). Its coordinates correspond to proportions of Kfs and Pl to Qtz (P: $K - (Na + Ca)$, Q: $Si/3 - (K + Na + 2Ca/3)$).
B-A (Debon + Le Fort 1983)	DebonBA	P	B-A binary (in millications)	The B-A diagram (Debon & Le Fort 1983) defines six sectors (I - VI), reflecting alumina balance of samples (B: $Fe + Mg + Ti$, A: $Al - (K + Na + 2Ca)$).
B-A (modified by Villaseca et al. 1998)	Villaseca	P	B-A binary (in millications)	The B-A diagram (Debon & Le Fort 1983) with fields of various types of peralkaline rocks as outlined by Villaseca <i>et al.</i> (1998)
Middlemost (1985)	MiddlemostPlut	P	SiO ₂ vs. (Na ₂ O + K ₂ O) binary	Classification diagram of Middlemost (1985) for plutonic rocks.

¹Scope: G: general diagram, V: volcanic rocks, P: plutonic rocks

GEOTECTONIC PLOTS (CONTD.)

<i>Menu item</i>	<i>Module name</i>	<i>Scope¹</i>	<i>Plot description</i>	<i>Details (reference)</i>
Meschede (1986) Zr/4-2Nb-Y	Meschede	B	Zr/4 - 2Nb - Y ternary	(Meschede, 1986)
Mullen (1983) 10MnO-TiO ₂ -10P ₂ O ₅	Mullen	B	10 MnO - TiO ₂ - 10 P ₂ O ₅	(Mullen, 1983)
Pearce + Cann (1973)	Pearce_and_Cann	B	Zr - Ti/100 - 3 Y ternary, Zr - Ti/100 - Sr/2 ternary, log Zr - log Ti binary	(Pearce & Cann, 1973)
Pearce + Norry (1979)	Pearce_and_Norry	B	log Zr vs. log Zr/Y	(Pearce & Norry, 1979)
Pearce et al. (1977) MgO-FeO-Al ₂ O ₃	Pearce_et_al_1977	B	MgO - FeO - Al ₂ O ₃ ternary	(Pearce et al., 1977)
Shervais (1982)	Shervais	B	log Ti/1000 vs. log V	(Shervais, 1982)
Wood (1980) Th-Hf/3-Ta Wood (1980) Th-Hf/3-Nb/16 Wood (1980) Th-Zr/117-Nb/16	Wood Wood2 Wood3	B	Th - Hf/3 - Ta Th - Hf/3 - Nb/16 Th - Zr/117 - Nb/16	(Wood, 1980)

¹Scope: Gr: granitoids, B: basaltoids.

Геохимия пегматитового процесса

Термин “пегматит” был введен в научную номенклатуру в 1801 году знаменитым минералогом и кристаллографом Р. Ж. Гаюи и означал “...пластинчатый полевой шпат с включениями кристаллов кварца”. Сам ученый отнес термин только к определенной разновидности гранитного пегматита, который сегодня носит название “графический пегматит” или “письменный гранит”.

Позднее, в работах А. Делесе (Delesse, 1853) появляется углубленный анализ парагенетических ассоциаций пегматитов, и выстраивается последовательность формирования пегматитовых минералов.

Здесь же показано, что графические структуры в пегматитах отражают лишь часть процесса в целом.

Более поздние исследования, которые вкратце описываются А. Е. Ферсманом (Ферсман, 1940, 1960), подчеркнули важную роль водных растворов в процессах пегматитообразования и характерное для пегматитов зональное строение.

К началу XX века оформились две важнейшие научные концепции, объяснявшие происхождение гранитных пегматитов и особенности их минералогии:

- 1) происхождение пегматитов из остывающей магмы (Delessee, 1853; Brogger, 1890);
- 2) пневматолитовое происхождение пегматитов (Rosenbusch, 1901, 1907).

К началу XX века формируется одно из важнейших направлений в исследованиях процессов флюидно-магматического взаимодействия при кристаллизации магм – направление физико-химического анализа. Первыми объектами исследования в этом направлении были гранитные пегматиты (Vogt, 1930).

Приблизительно в это же время А. Е. Ферсманом формулируются основные черты пегматитового процесса, и дается определение пегматита.

Под пегматитовым процессом в гранитных магмах он понимает
“... их конечную, остаточную кристаллизацию, начиная с высокотемпературной аплитовой фазы и кончая последними выделениями гидротермальных геофаз...”.

В своей знаменитой обобщающей работе “Гранитные пегматиты” (Ферсман, 1940) он указывает на промежуточное положение пегматитового процесса между собственно кристаллизацией гранитной магмы и образованием продуктов осаждения из отделяющихся от нее флюидов.

Им особенно подчеркивается, что провести определенную границу между пегматитовым и магматическим процессом и пегматитовым и гидротермальным процессом невозможно.

В своих “Гранитных пегматитах” А. Е. Ферсман пишет, что с геохимической точки зрения пегматитовый процесс

“...характеризуется накоплением в остаточном расплаве трех типов элементов: основных элементов остатка, элементов летучих, но по условиям равновесия сохранившихся в расплаве, и элементов рассеянных, которые остались в конечных стадиях, не выпали в более ранние стадии затвердевания гранита”.

Таким образом, с точки зрения петрологии, пегматитовый процесс иллюстрирует именно те магматические процессы, которые связаны с возникновением и развитием фазы, основной состав которой являются легколетучие компоненты: H_2O , CO_2 , F, Cl и B. Параллельное накопление в протопегматитовом веществе рассеянных элементов, среди которых большую роль начинают играть компоненты редкометалльных руд (Li, Cs, Be, Ta, Nb, Mo, W и Sn), ставит перед геохимиками задачу - на примере пегматитов исследовать процесс накопления и отделения флюидной фазы, обогащенной рудными элементами.

Таким образом, пегматиты фактически являются уникальным природным объектом, позволяющим исследовать ту часть магматических процессов, которые непосредственно ведут к формированию рудообразующих сред и систем.

Семейства пегматитов

Продукты конечной кристаллизации соответствующих магматических систем.
Разные по составу магмы продуцируют разные пегматитовые субстанции.

1. У/о – редки. Пример: диопсид-флогопитовые пегматиты Ковдорского массива.
Гигантозернистые пегматиты.
2. Основные - габбро-пегматиты. Состав: плагиоклаз, пироксены, амфиболы.
3. Сиенитовые пегматиты (Урал).
4. Щелочные пегматиты (нефелиновые сиениты Хибинского щелочного массива).
4. Гранитные пегматиты. Самые распространённые.

Чем кислее и щелочнее породы, тем больше летучих в магмах, следовательно чаще образуются пегматитовые системы.

Внутреннее строение пегматитов

1. Обычно подчёркивается ***гигантозернистое строение*** пегматитов. Это главная их черта, но не обязательная. Более точно – крайне неравномерная зернистость и различные структуры пегматитовых пород: в результате возникает много различных парагенезисов в пегматитах, отражающих сложность и длительность пегматитового процесса (многостадийность).
2. Характерная особенность пегматитов присутствие в них ***внутренней концентрической зональности***.
В целом – это жильные образования очень пёстрые по структурно-текстурным признакам и составу, но эта пестрота подчинена определённым закономерностям в пространстве и времени.

Зональность пегматитов

Пегматитовые жилы часто имеют концентрически-зональное строение: от вмещающих пород к центру пегматитовой жилы выделяются:

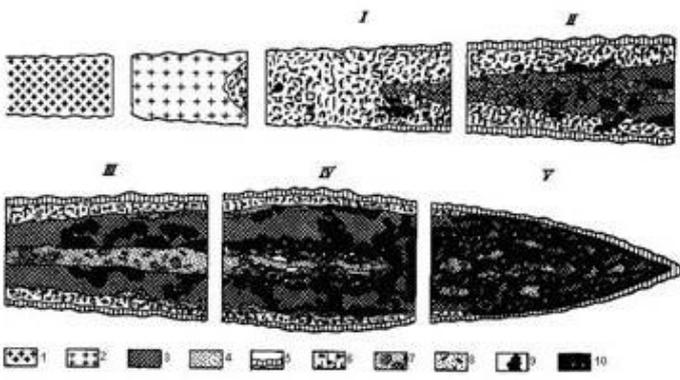
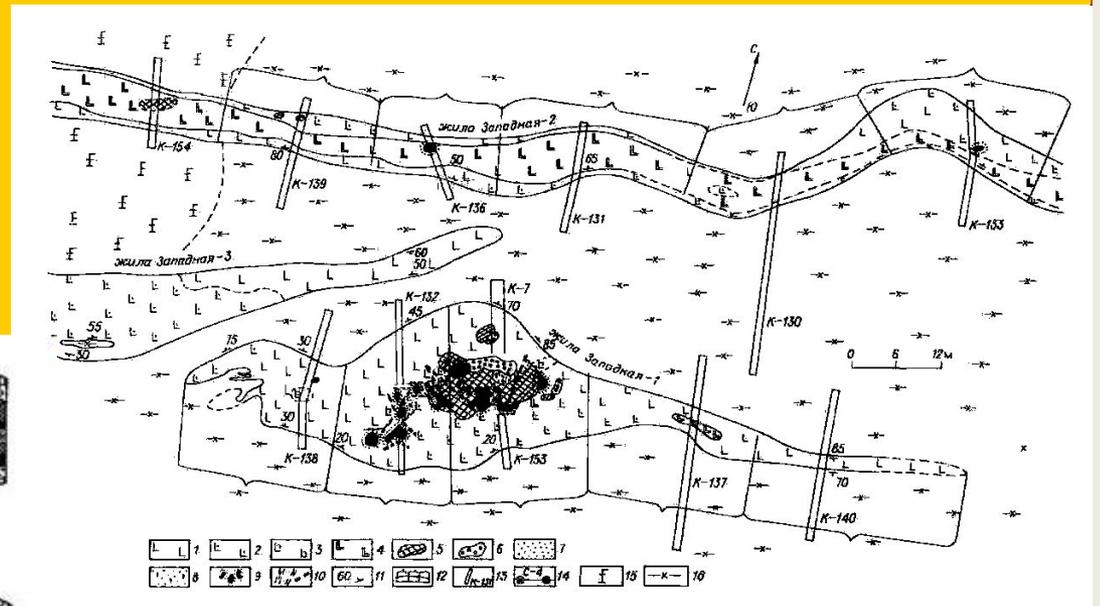
Аплит

Кварц-полевошпатовый графический агрегат

Кварц-турмалин-полевошпатовый апографический агрегат

Блоковая полевошпатовая зона

Кварцевое ядро



Гранитные пегматиты представляют собой класс пород, характеризующийся многообразием минерального и химического состава. Как следствие различные типы пегматитов резко различаются и P-T параметрами кристаллизации и флюидным режимом.

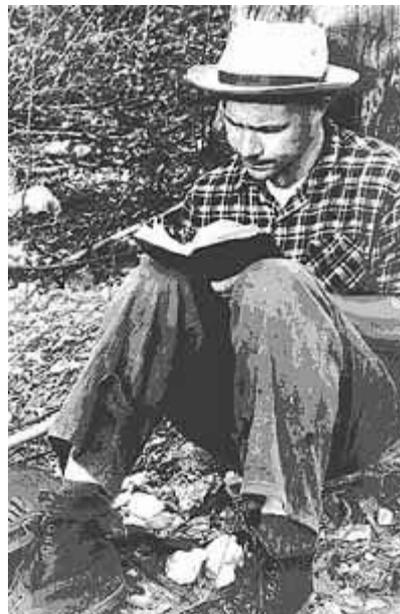
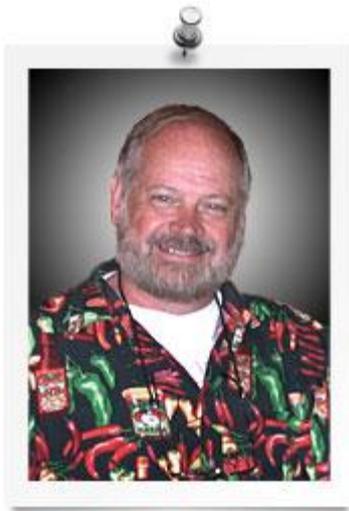
Множество классификаций гранитных пегматитов.

В.В. Гордиенко (СПб)

Б.М. Шмакин (Иркутск)

P.Cerny (Канада)

S. Simmons (США)



Классификация гранитных пегматитов

Первая классификация А.Е. Ферсмана (разработана в 1929-1938 гг).

В настоящее время выделяют **формации пегматитов по глубинности их образования** (по В.В. Гордиенко, 1996):

- **Керамическая** (более 25 км) – состоят из полевых шпатов и кварца. Керамическое сырьё.
- **Слюдоносная** (14-25 км) – состоят из плагиоклаза, микроклина, кварца, мусковита, биотита, шерла, граната, апатита, берилла. Мусковит, керамическое сырьё.
- **Редкометалльно-слюдоносно-керамическая** (10-20 км). Керамическое сырьё, мусковит + берилл, колумбит-танталит.
Редкометалльная (глубина 3-15 км) – микроклин (амазонит), кварц, альбит, сподумен, мусковит, лепидолит, берилл, турмалин, колумбит, танталит, касситерит, поллуцит, топаз. Сподуменовые, литиевые пегматиты. Пегматиты с камнесамоцветным сырьём. Сырьё – Li, Cs, Rb, Ta, Be, Sn.
- **Редкометалльно-редкоземельная (амазонитовая)** (3-10 км) – амазонит.
- **Хрусталеносная** (миароловые пегматиты) (глубина 1,5 -6 км) – микроклин, альбит, кварц, мусковит, биотит, в полостях (занорышах) – топаз, золотистый берилл, флюорит, аметист, горный хрусталь. Сырьё – пьезокварц, самоцветы.

Текстурно-минеральные типы гранитных пегматитов и их распространённость в отдельных рудных формациях

Надтипы пегматитов	Типы пегматитов по минеральному составу		Рудные формации							Рудная специализация	
	Названия типов по главным породообразующим минералам (содержание >0,5%)	Второстепенные минералы (0,5-5%)	Керамическая (1)	Слюдянистая (2)	Редкометалло-сподуменово-керамическая (3)	Редкометаллическая (4)			Редкометалло-редкоземельная (5)		Хрусталеносная (6)
						Подформации					
						4а Li-Cs	4б Li	4в F-Li			
Распространённость типов пегматитов											
Полевкошатовый (безмусковитовый)	Плагноклазовый, с	Бт	3	1	1	1	1		1		Керамическое сырьё
	Микроклиновый, с	Бт Эг, Амф	2	1	1				1	3	
	Плаггиомикроклиновый, с	Бт	2	2	2	1	1	1	1		Амз
	Микроклин-плагноклазовый, с	Эг, Амф Эг, Амф, Аб, Амз			1				2		
	Альбит-плаггиомикроклиновый, с	±Бт			1	1	1	1	1		Амз, Та, Y, Тг
	Альбит-амазонитовый, с	Амз, Li-Бт							2		
	Микроклин-альбитовый, с	Li-Бт							2		Керамическое сырьё, пьезоэлектрические самоцветы
	Альбит-микроклиновый, с	±Бт				2	2	2		1	
Альбит-микроклиновый, с	Li-Бт, Топ, Фл										

Рудная специализация

Керамическое сырьё

Амз

Амз, Та, Y, Тг

Керамическое сырьё, пьезоэлектрические самоцветы

Надтипы пегматитов	Типы пегматитов по минеральному составу		Рудные формации							Рудная специализация	
	Названия типов по главным породообразующим минералам (содержание >0,5%)	Второстепенные минералы (0,5-5%)	Керамическая (1)	Слюдянистая (2)	Редкометалло-сподуменово-керамическая (3)	Редкометаллическая (4)	Редкометалло-редкоземельная (5)	Хрусталеносная (6)			
Мусковитосодержащий (Му > 5%)	Плагноклазовый, с	Му±Бт		2	1						Мусковитосодержащее сырьё
	Микроклин-плагноклазовый, с	Му, Бт	1	2	1	1	1	1	1		
	Плаггиомикроклиновый, с	Му		3	2						Ве, керамическое сырьё
	Альбит-плаггиомикроклиновый, с	Аб, Му			2						
	Альбит-микроклиновый, с	Му (Бер)				1	1	1			Ве, Та, Li, керамическое сырьё
	Альбит-микроклиновый, микроклин-альбитовый, с	Му (Бер)			3	1	1	1	1	2	
Альбитовый, с	Ми, Му (Бер)				1	1	1	3			
С, Li-силикатами (сподуменовосодержащий, Сп > 5%)	Микроклин-плагноклазовый, с	Аб, Сп			1						Li, Cs, Ве, керамическое сырьё, самоцветы
	Микроклин-альбитовый, альбит-микроклиновый, с	Сп, Бер				2	2	2			
	Сподуменовый (Ми-Аб, Аб-Ми), с	±Му				2	3	2			Li, Та, Ве, самоцветы
	Сподумен-микроклин-альбитовый, с	Леп, Ам Пол, Леп Ам				2	1	1			
	Поллуцит-сподумен-микроклин-альбитовый, с	±Ам				1					Li, Та, Ве, самоцветы
	Поллуцит-лепидолит-сподумен-микроклин-альбитовый, с	±Ам, Пет				1					
	Лепидолит-альбитовый, с	±Сп, Пол						3			Li, Та, Ве, самоцветы
	Петалит-микроклин-альбитовый, с	Му, Леп ±Сп, Пол				1		1		1	

Му
Му, керамическое сырьё

Ве, керамическое сырьё

Ве, Та, Li, керамическое сырьё

Li, Cs, Ве, Та, Sn, керамическое сырьё, самоцветы

Li, Та, Ве, самоцветы

Распространённость типов пегматитов по текстуре (степени дифференциации): 1) □ – слабо дифференцированные, 2) ■ – полно дифференцированные

THE FOUR CLASSES OF GRANITIC PEGMATITE ČERNÝ, 1991

Class	Family	Typical Minor Elements	Metamorphic Environment	Relation to Granite	Structural Features	Examples
Abyssal	—	U, Th, Zr, Nb, Ti, Y, REE, Mo poor (to moderate) mineralization	(upper amphibolite to) low- to high-P granulite facies ~4-9 kb ~700-800°C	none (segregations of anatectic leucosome)	conformable to mobilized cross-cutting veins	Rae and Hearne Provinces, Sask. (Tremblay, 1978); Aldan and Anabar Shields, Siberia (Bushev and Koplus, 1980); Eastern Baltic Shield (Kalita, 1965)
	—	Li, Be, Y, REE, Ti, U, Th, Nb > Ta poor (to moderate) mineralization, micas and ceramic minerals	high-P, Barrovian amphibolite facies (kyanite-sillimanite) ~5-8 kb ~650-580°C	none (anatectic bodies) to marginal and exterior	quasi-conformable to cross-cutting	White Sea region, USSR (Gorlov, 1975); Appalachian Province (Jahns <i>et al.</i> , 1952); Rajahstan, India (Shmakin, 1976)
Rare - Element	LCT	Li, Rb, Cs, Be, Ga, Nb <, > Ta, Sn, Hf, B, P, F poor to abundant mineralization, gemstock industrial minerals	low-P, Abukuma amphibolite to upper greenschist facies (andalusite-sillimanite) ~2-4 kb ~650-500°C	(interior to marginal to) exterior	quasi-conformable to cross-cutting	Yellowknife field, NWT (Meintzer, 1987); Black Hills, South Dakota (Shearer <i>et al.</i> , 1987); Cat Lake-Winnipeg River field, Manitoba (Černý <i>et al.</i> , 1981)
	NYF	Y, REE, Ti, U, Th, Zr, Nb > Ta, F poor to abundant mineralization, ceramic minerals	variable	interior to marginal	interior pods, conformable to cross-cutting exterior bodies	Llano Co., Texas (Landes, 1932); South Platte district, Colorado (Simmons <i>et al.</i> , 1987); Western Keivy, Kola, USSR (Beus, 1960)
Miarolitic	NYF	Be, Y, REE, Ti, U, Th, Zr, Nb > Ta, F poor mineralization, gemstock	shallow to sub-volcanic ~1-2 kb	interior to marginal	interior pods and cross-cutting dikes	Pikes Peak, Colorado (Foord, 1982); Sawtooth batholith, Idaho (Boggs, 1986); Korosten pluton, Ukraine (Lazarenko <i>et al.</i> , 1973)

LCT:
Li, Cs, Ta

NYF: Nb,
Y, F

Цикличность пегматитового процесса (Гордиенко)

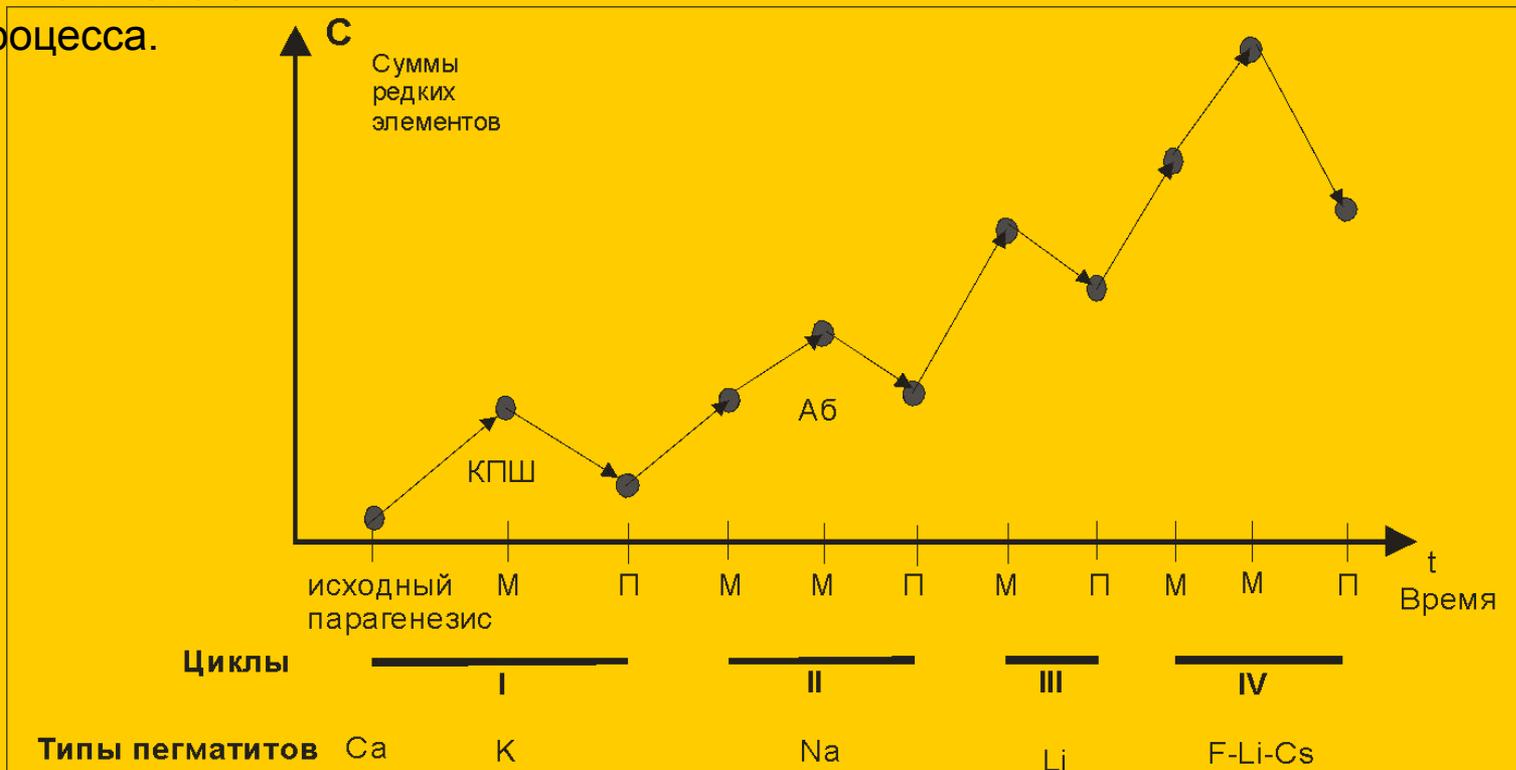
Два типа минеральных парагенезисов:

П – кристаллизационно-перекристаллизационный
(неравномернозернистые)

М – метасоматический (равномернозернистые стр-ры)

Если построить график (числовую ось времени), связывающий время образования

отдельных минеральных парагенезисов (П-тип – перекристаллизационный, М –метасоматический), то получим картину явной цикличности пегматитового процесса.



Цикличность пегматитового процесса

Конец каждого цикла заканчивается перекристаллизационным парагенезисом,
а начинается – метасоматическим.

Вещество привносится на М-этапе, а на П-этапе система вызревает.

Содержание редких элементов на метасоматическом этапе растёт,
а на перекристаллизационном – падает по сравнению с предыдущим парагенезисом.

А в целом по времени – прогрессивный рост содержаний флюофильных элементов
(Li, Rb, Cs, Ta, Be, Nb, Sn, Tl).

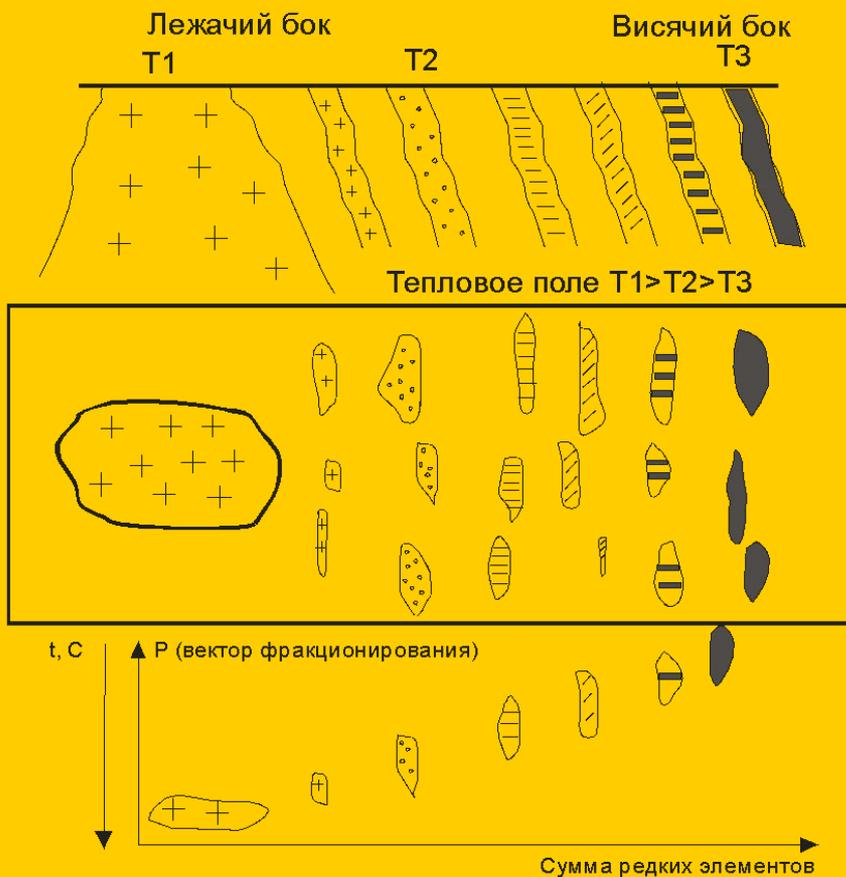
Всё это позволяет назвать пегматитовый процесс – **субмагматической многокамерной полициклической кристаллизационной дистилляцией** (В.В. Гордиенко, 70-80 гг.).

Движущая сила процесса – направленное изменение теплового и динамического полей в заключительный этап магматического процесса.

Миграция химических элементов – физико-химическая.

Пространственная региональная зональность пегматитовых полей

Пространственная стержневая зональность пегматитовых полей



Чем гуще штриховка, тем более тело минерализовано и сложнее минеральный парагенезис. Эта система распределения элементов определяется избыточной температурой магматического очага и тепловым полем.

Стержневая зональность – концентрация наиболее зрелых типов пегматитов в узких линейных зонах – ослабленных направлений, благоприятных для продвижения кристаллизационного остатка.

Главной особенностью, которая позволяет процесс образования пегматитов рассматривать как **модель кристаллизации насыщенных летучими кислых расплавов**, является то, что для них характерен этап совместной эволюции силикатного расплава и флюидной фазы. Под *флюидной* здесь и далее будет подразумеваться фаза, основу которой составляют легколетучие компоненты: H₂O и CO₂. И другие элементы, снижающие температуры кристаллизации магмы – F, B, Cl, P – флюирующие компоненты. С развитием гетерогенных флюидно-магматических гранитоидных систем связано накопление рудных элементов.

Несмотря на то, что происхождению пегматитов посвящено огромное количество работ, до сих пор объектами горячих дискуссий петрологов и экспериментаторов остаются **вопросы происхождения и эволюции пегматитообразующих сред, P-T параметров процессов пегматитообразования и последовательность фазовых превращений при формировании пегматитовых тел.**

I. Субмагматическая модель.



А.Е. Ферсман

А.Е. Ферсман (30- гг XX века)

Одноактное внедрение остаточного специализированного расплава, распределение парагенезисов в соответствии с тепловым полем материнской интрузии (в пространстве).

Система закрытая полностью. Метасоматические явления исключительно

– «автометасоматоз», внутри закрытых камер под влиянием низкотемпературных условий.

Главный фактор равновесий – температурный режим.

Зональные пегматиты мира – фактологическая основа.

Основываясь на детальном исследовании структурно-текстурных особенностей пегматитовых тел, геохимии и последовательности минералообразования в них, А. Е. Ферсман разработал **теорию пегматитообразования, опирающуюся на два фундаментальных положения.**

Одним из них и является фазовая диаграмма системы **нелетучий компонент – вода**, предложенная в трудах И. Фогта и П. Ниггли (Niggli, 1920; Vogt, 1926a, 1926b, 1926v).

Вторым положением является реакционный принцип Боуэна (Bowen, 1928) из которого следует, что

“...процесс кристаллизации пегматитов, ... для магматических выделений, идет отдельными этапами, связанными с изменением, иногда довольно резким, физико-химического равновесия системы и с растворением ранее выделившихся компонентов”

(Ферсман, 1960, стр. 37).

Работы Александра Евгеньевича Ферсмана начинают последовательное развитие идеи формирования гранитных пегматитов из специфического по составу магматического расплава.

Вслед за П. Ниггли А. Е. Ферсман называл его огненно-жидким, подчеркивая одновременную высокую подвижность и высокие температуры кристаллизации.

Он разделил весь процесс на пять этапов – магматический, эпимагматический, пневматолитический, гидротермальный и гипергенный.

Первые два этапа А. Е. Ферсман связывал с кристаллизацией силикатной магмы до (**магматический этап**) и в процессе (**эпимагматический этап**) обособления газовой фазы.

По мнению А. Е. Ферсмана, главными минералами, которые образуются на этом этапе, являются кварц и полевой шпат, а структуры ими образуемые соответствуют обычному граниту, аплиту (вдоль зальбандов жил) и графическому пегматиту, который в конце эпимагматического этапа переходит в пегматоидные структуры, окаймляющие полости в пегматитах.

Пегматоидные структуры характеризуются как крупнозернистый беспорядочный агрегат одновременно выпадающих кварца и полевого шпата (Ферсман, 1960, стр. 38).

Третий этап соответствует кристаллизации силиката из надкритического водного раствора, который в зависимости от давления находится в газообразном или жидкообразном состоянии с постепенными переходами между этими состояниями при изменении температуры и давления или при изменении состава системы.

По температурам этот этап соответствует диапазону между водонасыщенным солидусом гранита и критической точкой водных растворов.

Надкритический флюид с понижением температуры постепенно трансформируется в жидкий или газообразный водный раствор.

На этом этапе, по мнению А. Е. Ферсмана, происходит образование минералов, характеризующих пегматитовую специфику – крупных кристаллов шерла, берилла, топаза, крупнолистовых выделений мусковита, гигантских кристаллов калиевого полевого шпата и кварца.

В тех случаях, когда в пегматите присутствуют миароловые полости, продуктом третьего пневматолитического этапа следует считать породу, непосредственно примыкающую к их стенкам и, по крайней мере, основания кристаллов друзового комплекса.

Вслед за ними образуются минералы замещающих комплексов, к которым отнесены некоторые слюды, альбит, литиевые турмалины и слюды, последние генерации топаза, т. е. те минералы, которые нарастают на кристаллы друзового комплекса, замещают их и заполняют интерстициальное пространство.

Четвертый и пятый этапы по А. Е. Ферсману соответствовали кристаллизации силикатов из **субкритических водных растворов**.

При давлениях превышающих критическую точку водного раствора кристаллизация должна была протекать из гомогенных растворов, в то время как при более низких – становится возможным сосуществование жидкой и паровой фаз в присутствии кристаллического силиката или кристаллизация из паровой фазы.

Минералами этого этапа являются поздние слюды, хлориты, цеолиты и карбонаты, вслед за которыми следуют продукты гипергенного изменения всех ранее образованных парагенезисов – глинистые минералы, вторичный кальцит, халцедон и кварц.

Этапы были разбиты на геофазы, которым приписывались определенные минеральные парагенезисы. А. Е. Ферсман произвел температурную градуировку геофаз в соответствии с имевшимися тогда экспериментальными данными.

Таблица 2
Развитие пегматитового процесса гранитной магмы (по А. Е. Ферсману)

Этап	Эпимагматический		Пнеуматолитовый			Гидротермальный	Гипергенный
Геофаза	Магматическая А	Эпимагматическая В	Пегматитовая С	Пегматонидные D—E	Надкритические F—G	Гидротермальные H—I—K	Гипергенная L
Температура °C	900	800	700	600	500	400	50
Процесс	До pegматитовый		Пегматитовый			После pegматитовый	
Среда кристаллизации	Расплав (3 фазы)			Флюидный раствор (2 фазы)		Гидротермальный раствор (3 фазы)	
Тип пегматитов			I, II	III, IV	V, VI, VII	VIII, IX, X	

Дальнейшее развитие теоретических представлений о пегматитообразовании связано с большим количеством экспериментальных исследований и моделей магматической кристаллизации.

1. Магматическая природа пегматитов была поддержана работами В. А. Николаева, А. И. Гинзбурга, И. Б. Недумова и др. (Николаев, Доливо-Добровольский, 1961; Гинзбург, 1960; Недумов, 1975; Ермаков, 1960 и др.).

2. Однако в отличие от типичных магматических тел, пегматиты довольно часто обладают четко выраженной зональностью, дифференцированы по минеральному составу и во взаимоотношениях минералов присутствуют признаки замещения.

Эти черты послужили основой для предложения теоретических моделей, подразумевающих возникновение пегматитов **в результате постмагматического или метасоматического замещения** (Заварицкий, 1947; Коржинский, 1952; Никитин, 1960).

•II. Магматогенно-метасоматическая.



- А.Н. Заварицкий (30 – 40-е годы).

Двухэтапный характер пегматитогенеза:

1 – кристаллизация остаточных расплавов в закрытой системе;

2 – сначала перекристаллизация, а затем метасоматоз в открытой для выноса, частично для привноса системе под влиянием газовой-водной фазы, возникающей за счёт ограниченной растворимости H_2O в любом силикатном расплаве.

Фактологическая основа – щелочные пегматиты Ильменских гор.

Обе гипотезы исходят из существования специализированных остаточных материнских магм.

•III. *Перекристаллизационно-метасоматическая* В.Д. Никитина (50-60-е гг).



В.Д. Никитин - ученик А.Н. Заварицкого, ЛГУ.

Специализированные магмы отрицаются.

Процесс развивается за счёт глубинных растворов «неясного» происхождения, которые попадают в ранее сформировавшуюся систему жильных гранитоидных пород и их перерабатывают.

Система пегматитообразования полностью открытая всё время.

Два основных этапа развития:

- 1 – перекристаллизация (ранний этап) с образованием гигантозернистых агрегатов,
- 2 – аллометасоматоз (поздний). Пегматиты Карелии – фактологическая основа.

3. Возникли модели, предусматривающих постепенную трансформацию водосодержащего силикатного расплава в водонасыщенный, богатый летучими и флюсующими компонентами пегматитовый расплав (Jahns, 1953; Ермаков, 1960; Никитин, 1960; London, 2005, 2009).

4. Для объяснения резких различий в составе пегматитовых тел привлекают **ликвацию силикатных расплавов**.

Первые работы, в которых ликвация рассматривается как один из процессов дифференциации кислых магм, появились в 70-х годах XX в. Так, например, И. Б. Недумов считал ликвацию ведущим видом дифференциации пегматитового расплава, приписывая практически каждому минеральному комплексу собственный ликват (Недумов, 1975).

Д. Лондон (London, 2005) рассматривает ликвацию как возможный вариант эволюции гранитной пегматитовой магмы, не отождествляя, однако, ее с процессом образования исходных пегматитовых расплавов или с возникновением каких-нибудь минеральных парагенезисов или структурных зон пегматитовых тел.

Д. Лондон поставил под сомнение существенную роль **водного флюида** при формировании гигантозернистых структур в пегматитах (London, 2005, 2009).

Основу предложенной им модели составляет тезис о том, что **кристаллизация пегматитовых тел начинается при существенных переохлаждениях, достигающих нескольких сотен градусов** (London, 2005). **Вязкость гранитных расплавов**, которые, по мнению автора, недосыщены на ранних стадиях водой, **настолько велика**, что **основные летучие и флюсующие компоненты накапливаются на фронте роста, формируя диффузионный пограничный слой**.

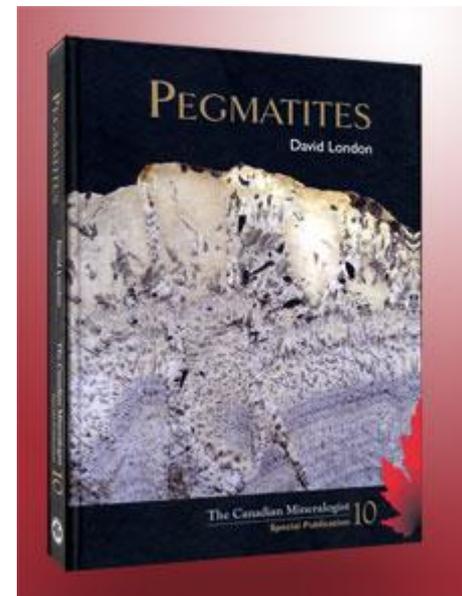
Увеличение их концентраций приводит к тому, что вязкость в его пределах резко снижается, давая кристаллам возможность достигать довольно больших размеров. Автор признает, что **на финальных стадиях кристаллизации диффузионные слои двух движущихся навстречу друг другу фронтов могут слиться, и тогда их вещество можно рассматривать как пегматитообразующее** (London, 2009).

Д. Лондон не считает, что водная флюидная фаза могла играть сколько-нибудь заметную роль в процессах минералообразования в пегматитах в силу низкой растворимости большинства силикатов в водных растворах!!!

Модель Д. Лондона, несмотря на некоторые положительные моменты, выглядит не достаточно адекватной для пегматитового процесса в целом.

В ней игнорируются данные, полученные по флюидным включениям различными авторами, а термометрические оценки не согласованы.

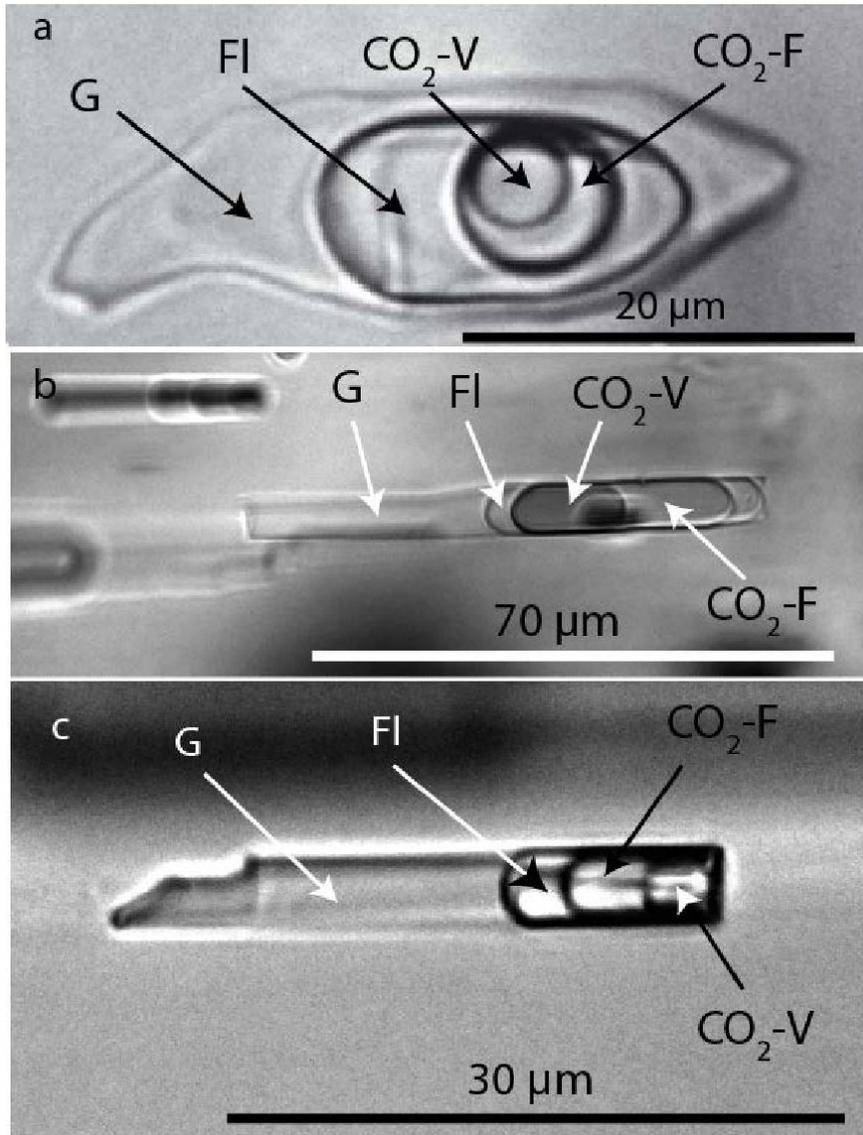
Например, температуры кристаллизации пегматита определяются по полевошпатовому геотермометру, температуры вмещающих пород предполагаются, исходя из представлений о глубине залегания горных пород (геотермический градиент), а исходная температура расплава – из общих представлений о плавлении гранитов



Исследованию роли ликвации в формировании пегматитов и вообще в процессах, сопровождающих переход от магматической кристаллизации к гидротермальной, посвящен ряд экспериментов и исследований включений минералообразующих сред И. Векслера и Р. Томаса.

Первый тип (А) включений при комнатной температуре представлен главным образом раскристаллизованными расплавленными включениями и после гомогенизации закаливается в гомогенное стекло, в то время как второй тип (В) при комнатной температуре содержит наряду с агрегатом кристаллических фаз значительное флюидное обособление и после прогрева представляет собой включения, содержащие стекло, жидкость и газ.

Авторы посчитали, что гетерогенность включений расплавов В-типа является результатом того, что они не способны к закалке и **расслаиваются при быстром охлаждении на силикатную и водную составляющие**. На этом основании они объединили составы водной и силикатной частей, получив вещество, отвечающее **водно-солевому расплаву (рассолу)**.

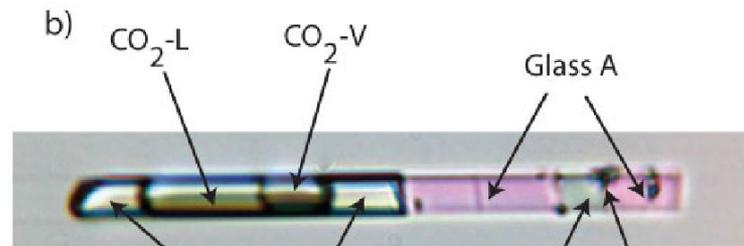
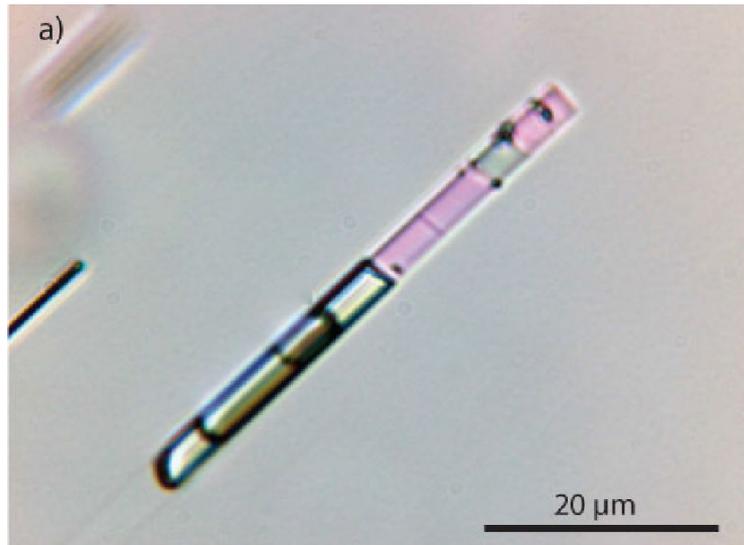


a Complex volatile-rich type-B melt inclusion in the (0001) plane of a large beryl crystal containing aluminosilicate glass (G), a water-rich solution (FI), liquid carbon dioxide – (CO₂-F), and a CO₂-rich vapor bubble (CO₂-V).

b and **c** Type-B melt inclusions in a plane parallel to the c-axis of the same beryl crystal (G – glass, FI – aqueous fluid, CO₂-F – liquid CO₂, CO₂-V – CO₂ - vapor).

Such volatile-rich type-B melt inclusions can be considered as microscopic proxies for pegmatite systems in some high-level granite plutons.

Untreated natural melt inclusions in a beryl crystal from a stockscheider pegmatite in the amazonite granite Orlovka/Transbaikalia



Analysis of equivalent inclusions after re-homogenization:

**Composition
in % (g/g)**

SiO₂ 51.58

Al₂O₃ 10.33

B₂O₃ 0.17

Fe₂O₃ 0.32

BeO 4.42

MgO 0.86

Na₂O 3.27

K₂O 2.35

F 2.93

Cl 0.16

S 0.96

H₂O 11.00

CO₂ 9.82

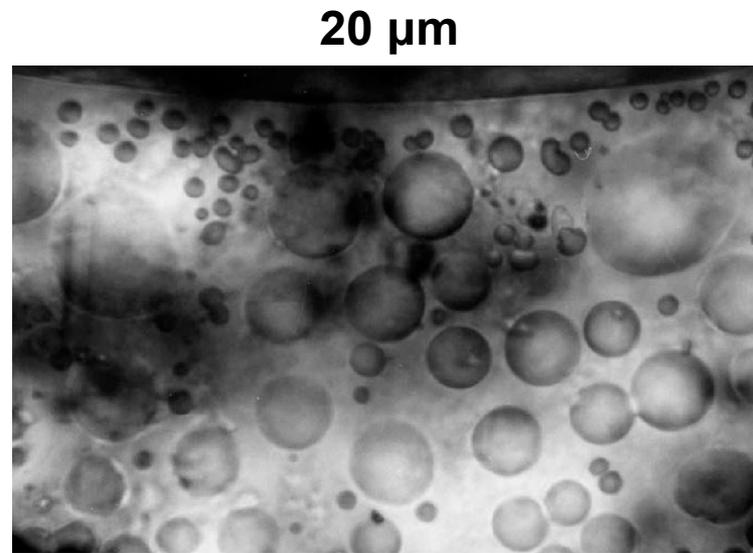
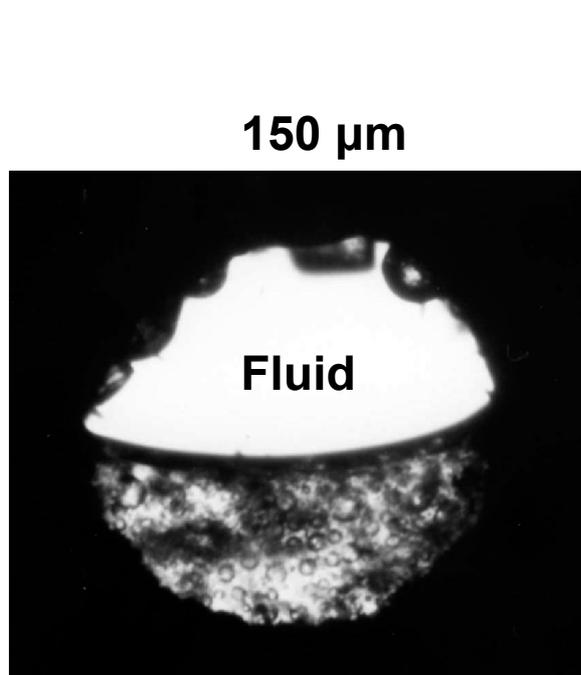
Sum 101.44

Sum* 100.17

ASI 0.54

Evidence of three coexisting immiscible fluids in a synthetic granite pegmatite (Veksler, Thomas, Schmidt 2002)

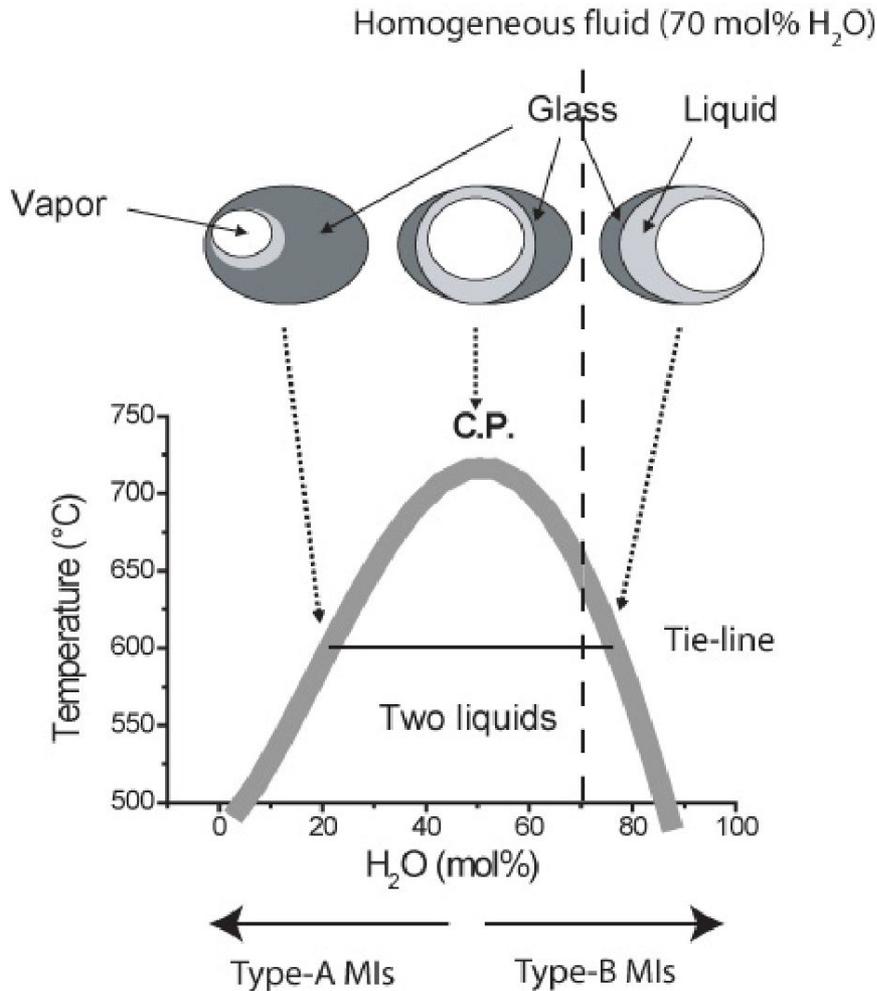
Result of an experiment with a Bassett-type hydrothermal diamond-anvil cell (HDAC) on a synthetic melt from the pegmatite system.



Melt 2 (31.2 %) (g/g) H₂O

Melt 1 (10.2 %) (g/g) H₂O

The photomicrographs show the formation of two mutually immiscible silicate melts at 810°C and 4 kbar.

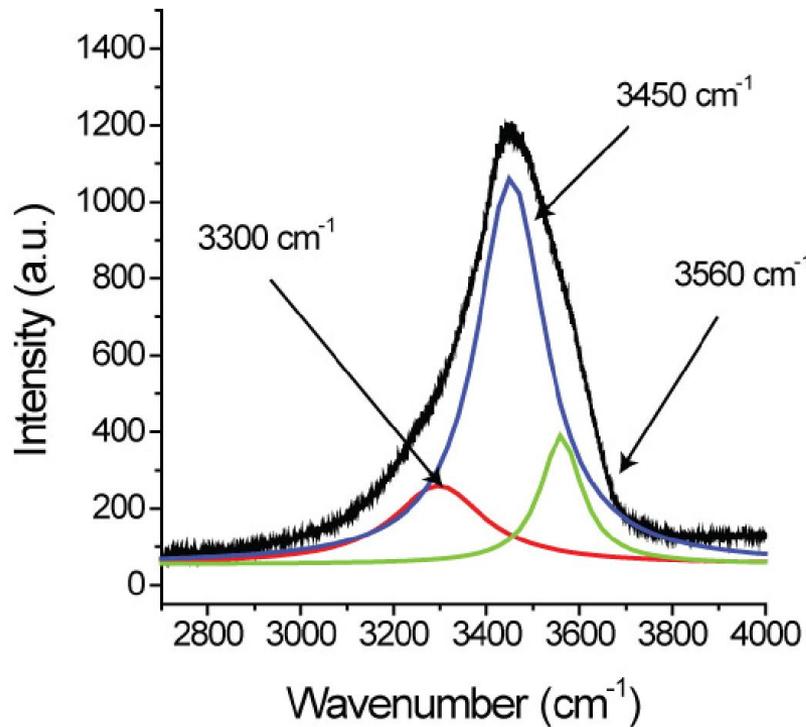


Relationship of type-A and type-B melt inclusions in a temperature versus H₂O concentration plot of the pseudo-binary silicate melt-H₂O system. The diagram was derived from data obtained for the Ehrenfriedersdorf granite-pegmatite system.

C.P. – is the critical point, in this case 720°C. Melts above the solvus are homogeneous or supercritical and melts inside the solvus curve are heterogeneous.

The three different types of melt inclusions are shown schematically in the upper portion of this figure (type-A, near critical, and type-B) at room temperature after rehomogenization. Note that at trapping conditions the three inclusion types were homogeneous.

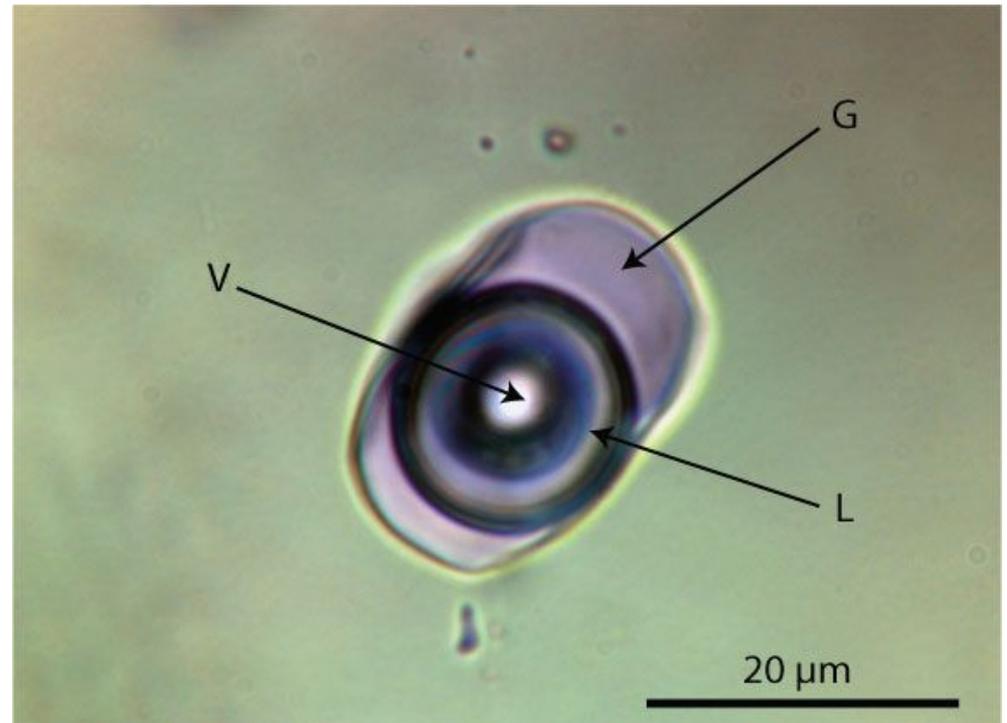
Supercritical fluids



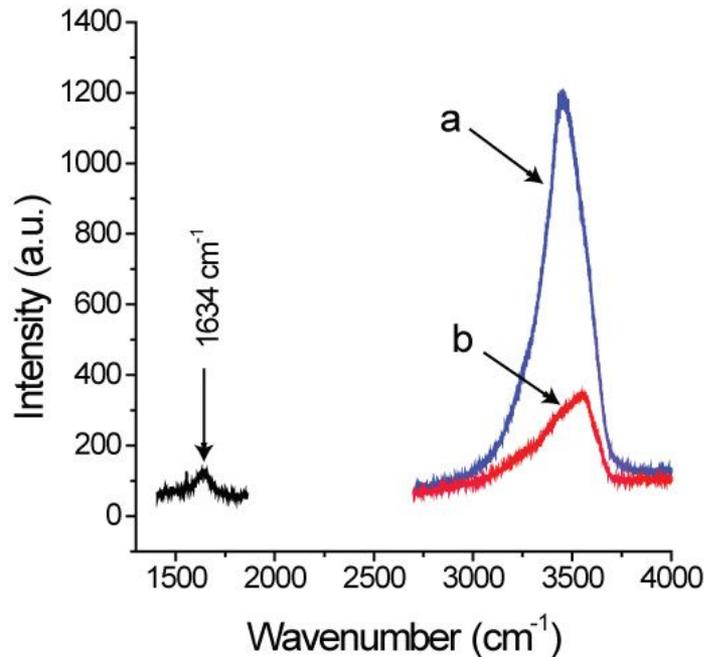
The Raman spectra of a completely homogenized type-B melt inclusion (31.8 % (g/g)) immediately after quenching from 650°C to room temperature.

□ Note the symmetric main ν_1 component of the H₂O-rich melt immediately after quenching

Homogenized, very volatile-rich inclusions are typically metastable because of their high volatile concentration, and after a short but random time at room temperature (especially if triggered by the laser energy during Raman analyses) the homogeneous glass usually separates into a fluid phase and a more stable glass giving the usual appearance of such melt inclusions:

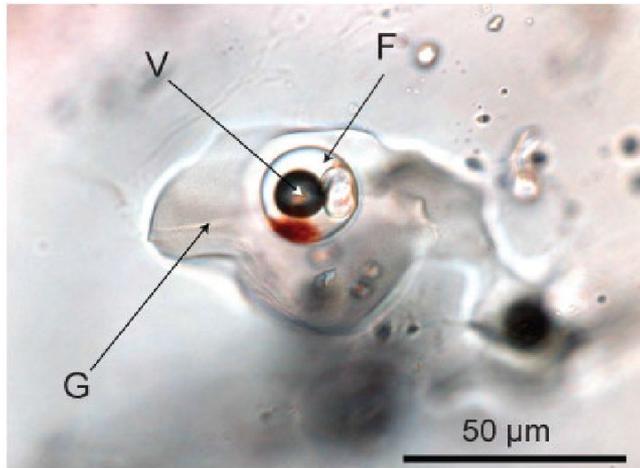


Raman spectrum of a metastable glass after quenching

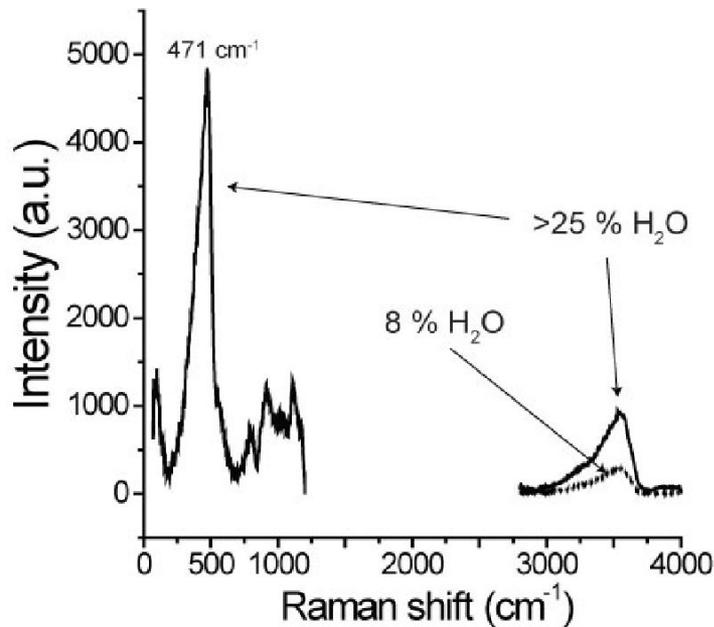


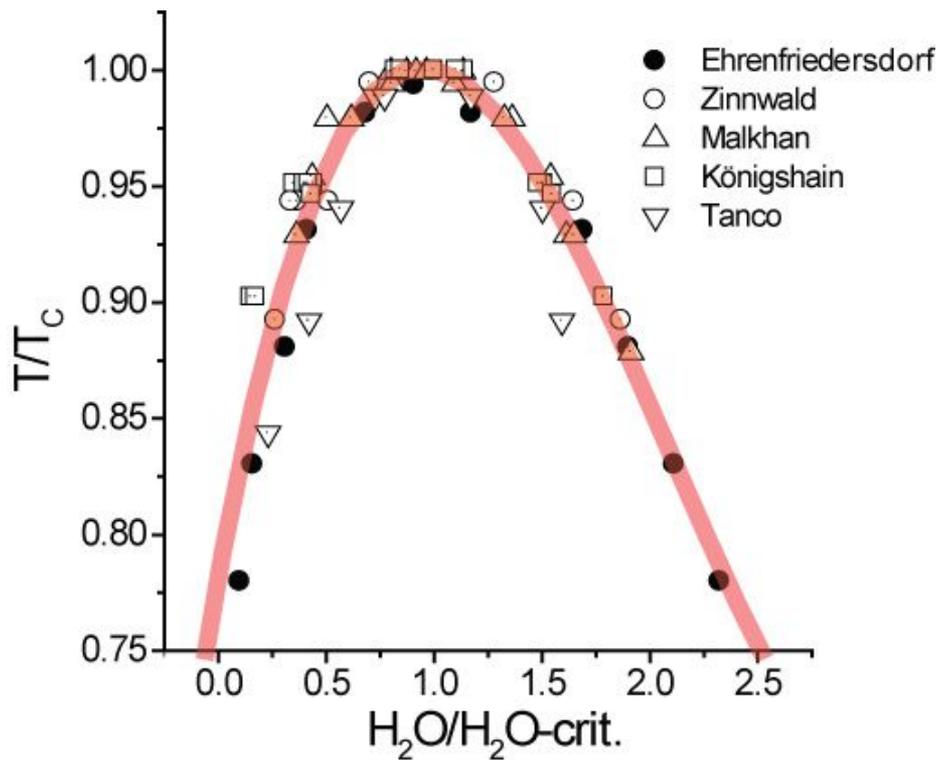
a) Initially 31.8 % (g/g) H₂O

□ b) The red band in the high frequency range is the result of the separating into a fluid phase and a more stable glass which now has only 10 % (g/g)H₂O. The remainder is now in the newly generated fluid phase



A melt inclusion in quartz of the Eldzhurtinsk granite/Caucasus (Russia) with a metastable hydrous sodium tetrasilicate glass. The bubble was formed during the Raman measurement and continued to expand up to the point of decrepitation





General results on melt inclusions in quartz of 5 different pegmatites plotted as a pseudo-binary solvus, a reduced temperature versus the reduced water concentration plot, values have been reduced to the critical temperature for each system (Ehrenfriedersdorf = 718 C, Zinnwald = 705 C, Malkhan = 721 C, Königshain = 750 C, and Tanco = 762 C) so that the data from different systems can be shown on the same plot. TC is the critical temperature, H₂O-crit is the water concentration at the critical point

The following conclusions can be derived from this plot:

- 1. Despite of some skeptical discussions to the possibility of liquidliquid-fluid immiscibility in the past, the processes are real and widespread in nature.**
- 2. Independently of the different host granites the homogenization temperatures and the water concentration of melt inclusions in quartz of the related pegmatites plot in a consistent manner, which is inconsistent with the assumption that such inclusions are the result of random co-trapping of phases.**
- 3. For the critical temperature t_C we obtain a value of $731 \pm 21^\circ\text{C}$, valid for the pressure range from 1 to 5 kbar. That means that different run conditions fall within the given standard deviation of 1σ .**

4. The critical water concentration (H₂O-crit.) for the five systems (Ehrenfriedersdorf , Zinnwald, Malkhan, Königshain, and Tanco) are 26.5 ± 1.5 %.

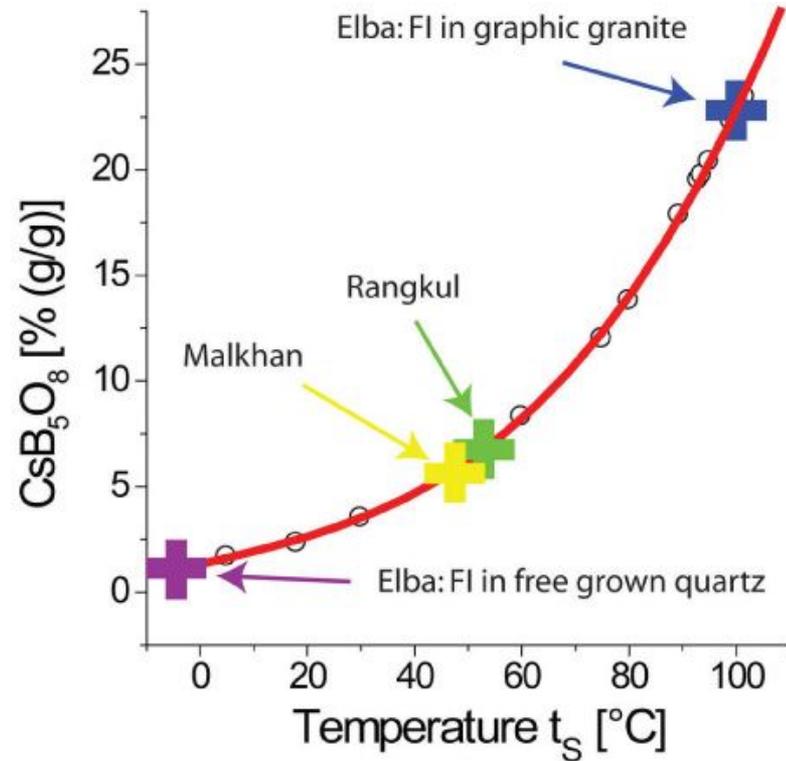
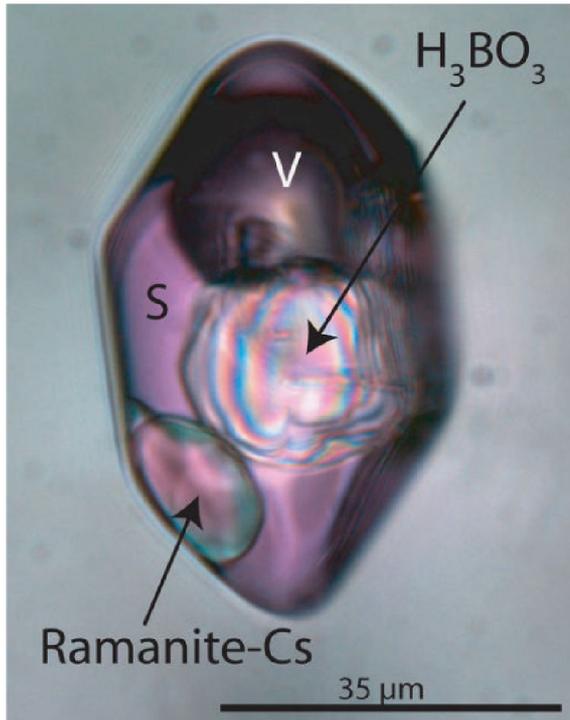
□5. Type-A and type-B melt inclusions represent conjugate melts resulting from melt-melt immiscibility along a pseudobinary solvus boundary.

□6. The two conjugate melt fractions evolve to more peraluminous and less water-rich compositions (type-A melts) and to more peralkaline and very water-rich compositions (type-B melts) according to the nomenclature of Thomas et al. (2000) and Thomas and Davidson (2012a).

7. Compared to standard melt systems the supercritical state is characterized by properties such as diffusion rate, density and viscosity which are completely unusual.

8. The maximum rate of isotope fractionation is achieved at the critical region (to this see Gorbaty and Bondarenko 1998 and Driesner 1997).

Extreme enrichment of B and Cs during pegmatite-forming processes

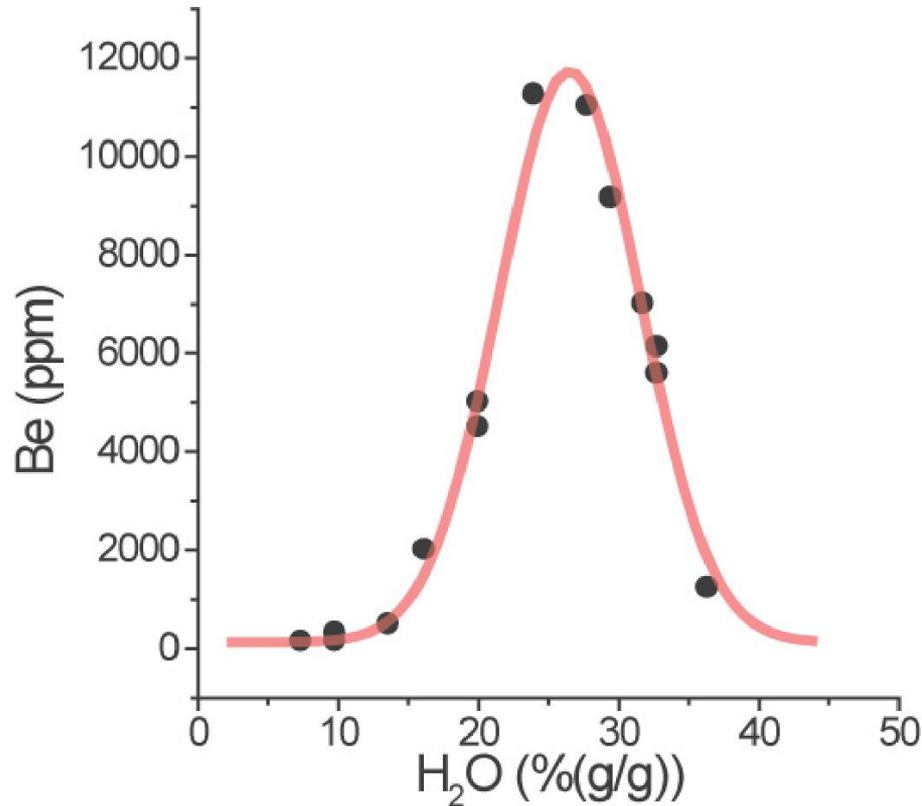


23.7 % Cs-pentaborate corresponds to 10 % (g/g) Cs, an an approximately 20000-fold enrichment!

The behavior of beryllium in the granite-pegmatite system
Ehrenfriedersdorf/Germany (see Thomas, Webster, Davidson 2011):

□ Note, that Be in the high concentration range is related to two daughter mineral phases, beryllonite [NaBePO₄] and hambergite [Be₂BO₃(OH,F)], which are highly soluble at high temperatures – meaning that heterogeneous trapping is not feasible.

Behavior of Be in the Ehrenfriedersdorf granite-pegmatite system



The concentration of Be is dependent on the water concentration determined by the pseudo-binary solvus:

Assignment of the determined or estimated Be concentrations to the conjugate type-A and type-B melt inclusions in pegmatite quartz from Ehrenfriedersdorf

Temperature (°C)	Type-A melt inclusions	Beryllium (ppm)		n
		n	Type-B melt inclusions	
600	142 ± 76	10	1234	2
640	152 ± 23	4	6120	2
650	312 ± 46	10	7000 ± 1800	35
680	492	2		
700			11025	5
712	2000	5		
712	4500	5	11250	5
720	5000			5

n – number of determinations

* - Beryl-quartz vein

В работах, выполненных на рубеже XX и XXI столетий, вновь возник вопрос о роли водной флюидной фазы в процессах эволюции флюидонасыщенных гранитных магм и образовании пегматитов.

Обращаясь к модели А. Е. Ферсмана можно заключить, что образование пегматитов связано с самим процессом гетерогенизации магмы – ретроградным кипением.

Если принять, что кристаллизация пегматита происходит в пределах материнского интрузивного тела (сингенетические пегматиты), то проблем с интерпретацией не возникает.

Однако многие пегматитовые тела, даже те, которые характеризуются высокой степенью дифференцированности, сами являются интрузивными (эпигенетические пегматиты). У некоторых из них присутствуют участки, обладающие гранитной или аплитовой структурой, но у многих они отсутствуют.

Модель Ферсмана реализована в работе (Jahns, Burnham, 1969), ее авторы опираются на общую последовательность процессов, изложенную А. Е. Ферсманом вслед за работами И. Фогта и П. Ниггли.

Накопление летучих и воды, в частности, в модели (Jahns, Burnham, 1969), происходит в результате кристаллизации безводных минералов гранита (кварц и полевые шпаты). Кристаллизация магмы в ненасыщенных водой условиях приводит к формированию **аплитов или гранитов**.

Результатом насыщения водой становится ее обособление в виде флюидной фазы. Быстрая диффузия через водный флюид способствует росту более редких и крупных кристаллических индивидов, а также протеканию реакций замещения более ранних минералов поздними.

По мнению **Р. Джанса и В. Барнема**, резкая граница между аплит-гранитными и крупнозернистыми частями пегматитовых тел является индикатором гетерогенизации системы и образования флюидной фазы.

Как видно, современные представления об образовании пегматитовых тел, его связи с явлениями дегазации и расслоения силикатных расплавов характеризуются отрывочностью и противоречивостью.

Одним и тем же процессам и фазовым превращениям различными авторами приписываются разные роли.

Со времени разработки первых моделей эволюции силикатных расплавов, обогащенных водой, в науке появилось много экспериментальных и природных данных, свидетельствующих о более сложных преобразованиях фазового состава, чем предполагалось ранее.

Работы продолжают новосибирская (Смирнов) и иркутская (Перетяжко) школы.

Хороший способ визуализировать частичное плавление – это представить холодную тарелку макарон и сыр в холодильнике. Ужин из макарон и сыра начинается с гибкой, но твердой лапши и жесткого, холодного сырного соуса. Если блюдо подогреть, сырный соус станет мягким и расплавленным, лапша испытывает то же самое. После того, как блюдо будет разогрето, если тарелку наклонят и вкусную закуску прижмут кухонной лопаткой, богатый, масляный сырный соус, очень отличающийся по составу от твердой лапши, не будет с ней смешиваться, а сформирует нечто вроде лужицы сырной магмы. Если блюдо остынет, минералы, когда-то бывшие макаронами и сыром, будут разделены процессом частичного плавления, который сформирует два новых минерала: «лапшит» и «сырит». Если рассматривать эту аналогию как описание частичного плавления силикатных пород, то РЗЭ всегда будут предпочитать перемещаться со сплавом, и всегда будут обогащаться в магме, которая движется отличной от своего первичного состава или остается как нерасплавленный минерал.