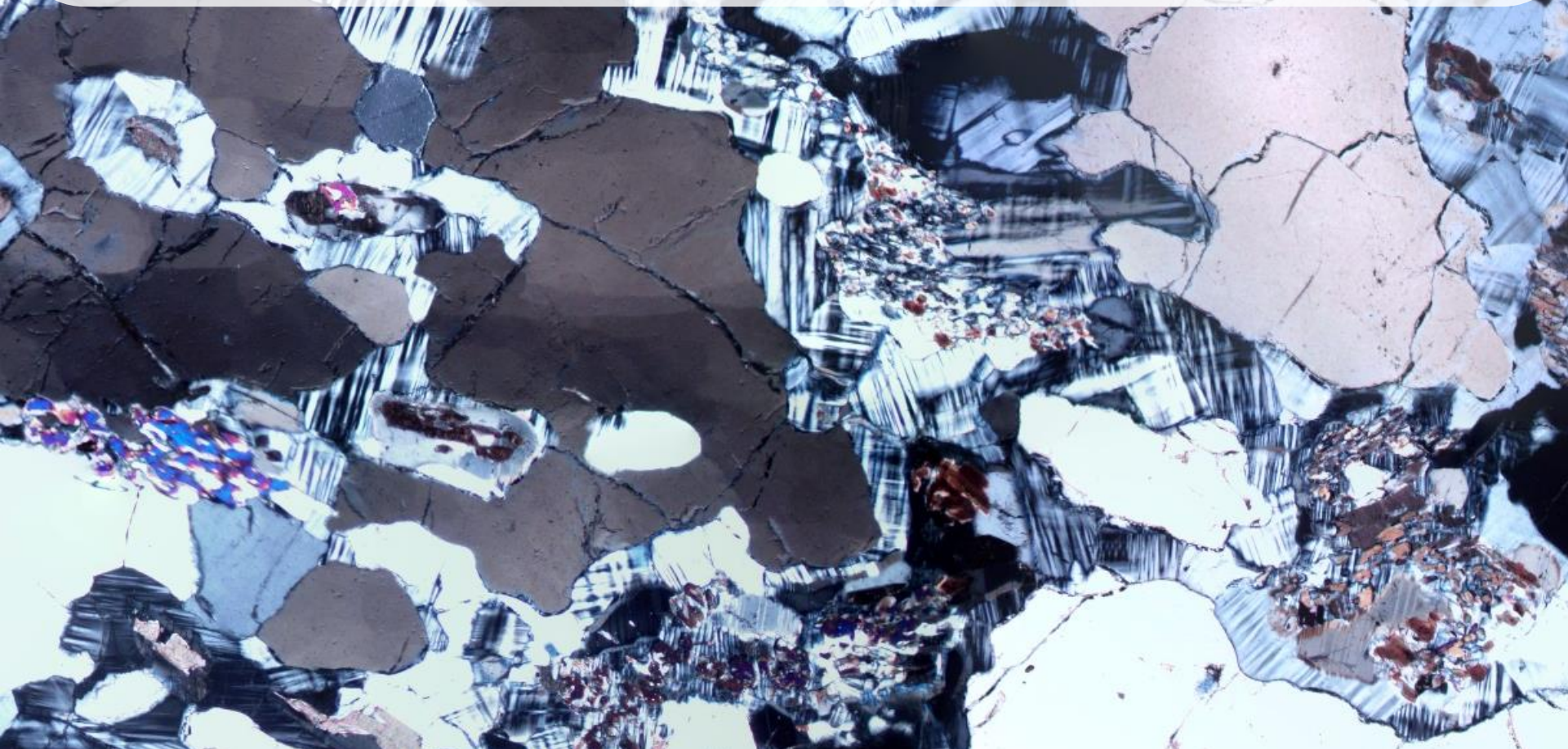


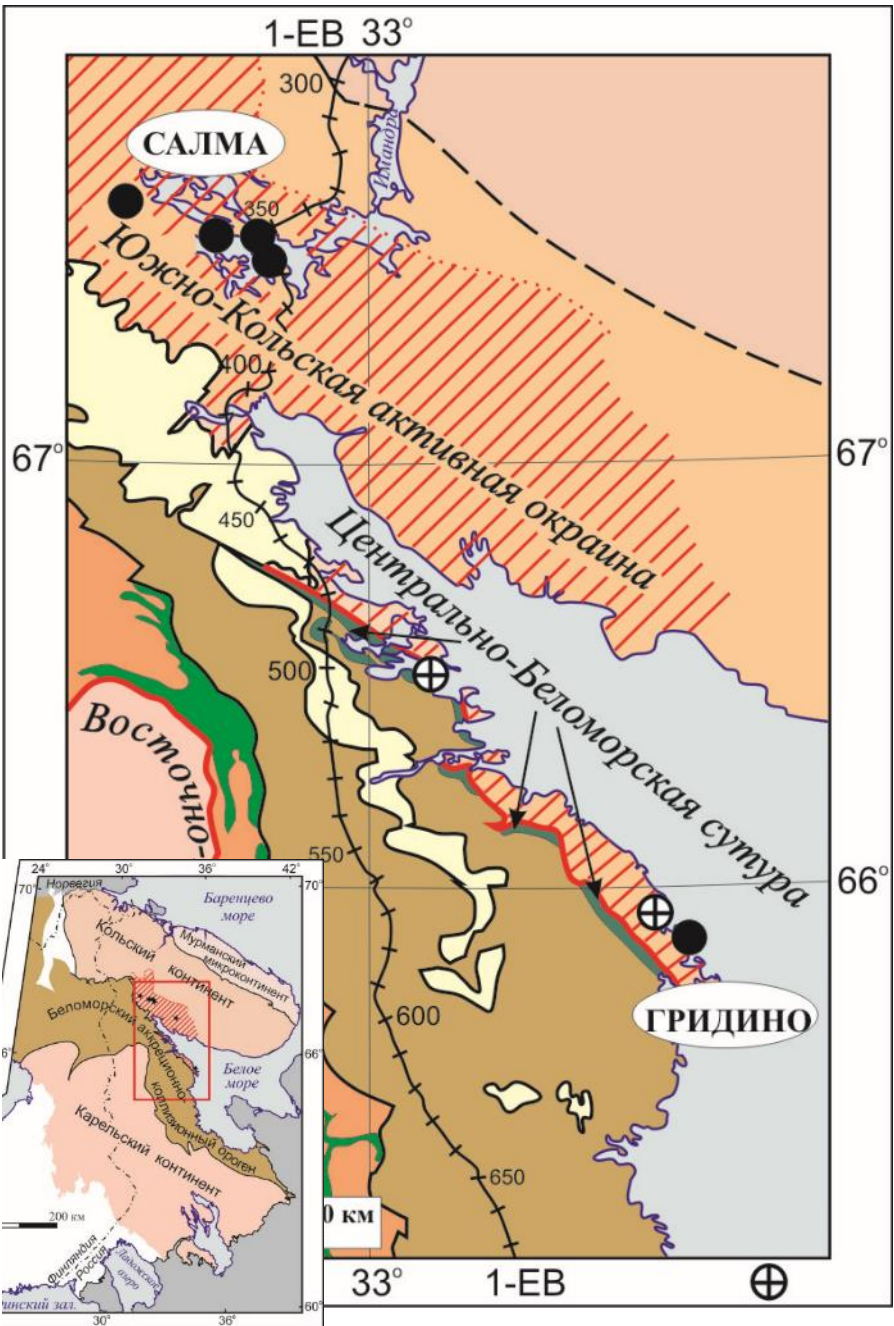
К.А.Докукина¹, А.Н.Конилов^{1,2}, К.В.Ван², Т.Б.Баянова³, В.С.Шешуков¹, В.Б.Хубанов⁴, Голованова Т.И.⁵

ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ГРАНУЛИТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ С ВОЗРАСТОМ ~ 2.45 МЛРД ЛЕТ В ПОРОДАХ БЕЛОМОРСКОЙ ЭКЛОГИТОВОЙ ПРОВИНЦИИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА, РОССИЯ

¹ Геологический институт РАН, Москва, ² Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка, ³ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, ⁴ Геологический институт БНЦ СО РАН, Улан-Уде, ⁵ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

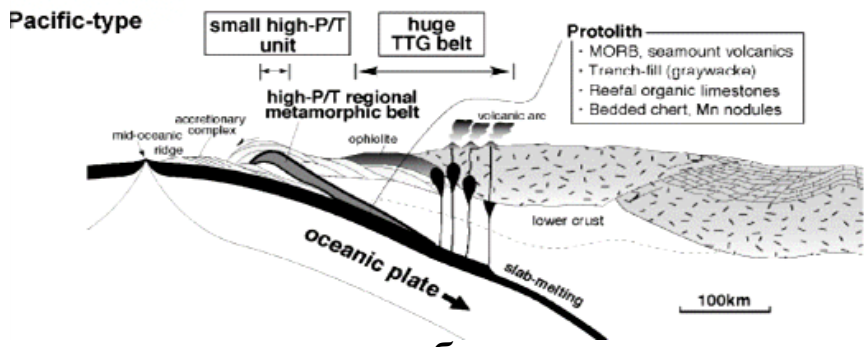


МЕЗО-НЕОАРХЕЙСКАЯ БЕЛОМОРСКАЯ ЭКЛОГИТОВАЯ ПРОВИНЦИЯ



АССОЦИАЦИЯ САЛМА

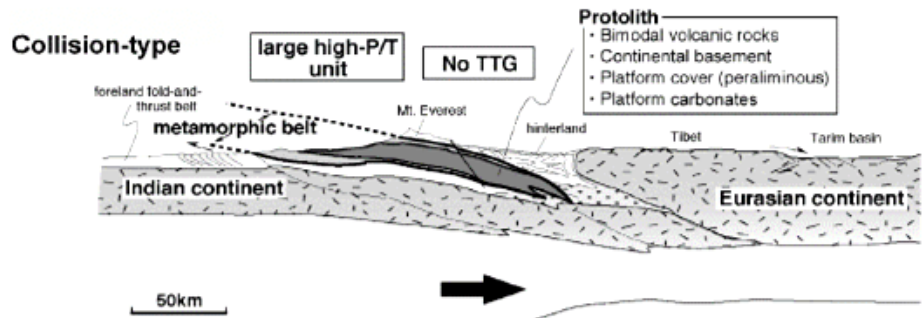
– тихоокеанский тип субдукции



включает эклогиты, образовавшиеся при субдукции океанической коры

АССОЦИАЦИЯ ГРИДИНО

– коллизионный тип субдукции

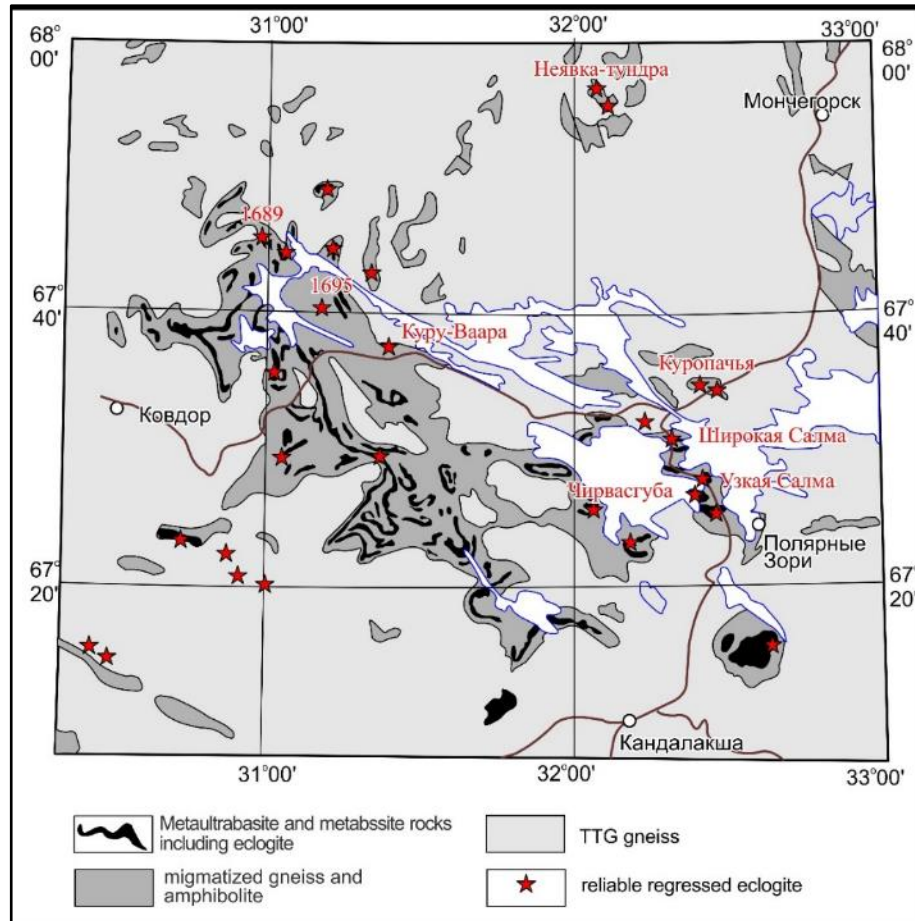


включает в себя эклогитизированные мафические и кислые породы континентальной коры и пересекающие ее эклогитизированные дайки

Liou J.G., Tsujimori T., Zhang R.Y., Katayama I., Maruyama S. *Global UHP Metamorphism and Continental Subduction/Collision: The Himalayan Model. International Geology Review*, Vol. 46, 2004, p. 1–27.

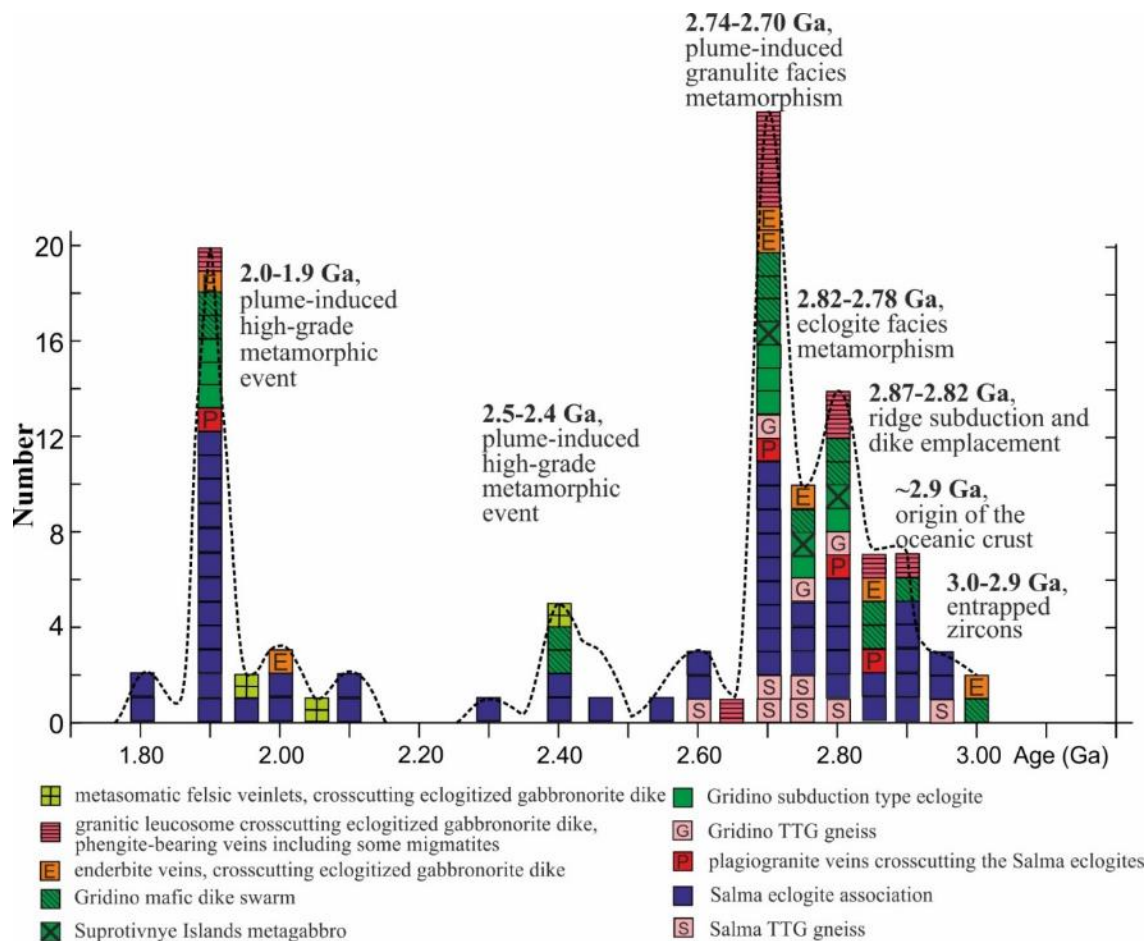
СХЕМАТИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ЕНСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА, ГДЕ ПОКАЗАНЫ ПОДТВЕРЖДЕННЫЕ ЭКЛОГИТОВЫЕ ТЕЛА

(карта составлена по материалам В.И. Пожиленко и А.Н. Конилова)



Значительная часть тел основного состава в пределах северо-восточного края Беломорского орогена, которые на протяжении многих лет было принято рассматривать в качестве архейских гранатовых амфиболитов, в действительности являются эклогитами. Линзы, прослои и пачки эклогитов и амфиболитов вмещают мигматизированные ТТГ гнейсы. Эту ассоциацию, которую ранее было принято относить к керетьской толще Беломорского пояса, мы рассматриваем в качестве комплекса пород Южно-Кольской активной окраины архейского Инари-Кольского микроконтинента и Кольского континента в целом (Mints et al., 2010; 2014). Две ассоциации эклогитов в пределах Беломорской эклогитовой провинции различаются по природе протолитов. Эклогиты ассоциации Салмы формировались по породам океанической коры. В районе Гридино эклогитизации подвергались дайки и фрагменты пород основного состава.

ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ (U-Pb циркон) ДЛЯ ПОРОД БЕЛОМОРСКОЙ ЭКЛОГИТОВОЙ ПРОВИНЦИИ



Дискуссии о возрасте и природе эклогитов Беломорской эклогитовой провинции в настоящий момент актуальны и рассматриваются в многочисленных публикациях, посвященных петрологии, геохимии, геохронологии и геодинамике данного региона. Детальные исследования привели нас к выводу о том, что эклогитовый метаморфизм всех пород Беломорской эклогитовой провинции был не позднее 2.7 млрд лет назад, а вероятнее всего в интервале 2.82-2.74 млрд лет назад (Dokukina et al., 2012; Dokukina et al., 2014; Mints et al., 2014; 2015). В регионе установлено не менее трех наложенных высокотемпературных событий плюмового генезиса с возрастaми 2.72-2.70, 2.4-2.5 и 1.9 млрд лет (Mints et al., 2014; 2015).

Нашей первоначальной оценке мезо-неоархейского возраста метаморфизма эклогитовой фации в БЭП (Mints et al., 2010a, 2010b, 2014, 2015; Dokukina et al., 2011, 2014; Konilov et al., 2011) противопоставлена модель, утверждающая поздне-палеопротерозойский возраст этого события (Skublov et al., 2010a, 2010b, 2011a, 2011b; Mel'nik et al., 2013; Li et al., 2017; Imayama et al., 2017; Yu et al., 2018). Критика модели позднепалеопротерозойского возраста эклогитового метаморфизма в БЭП приведена в работе (Dokukina and Mints, 2019; Минц, Докукинаб 2020).

Магнезиодюмортьерит-, гранат- кианит- и корунд-содержащие фенгит-кварцевые породы в эклогитах ассоциации Салма, местоположение карьер Куру-Ваара



Гранат-фенгит-кианит-кварцевые породы имеют жильную или линзовидную форму (мощностью первые сантиметры – первые метры), характеризуются прямолинейными или плавно искривленными контактами, или формируют сеть, разделяющую эклогиты на отдельные округлые или угловатые блоки размерами первые десятки сантиметров.

Гранат-фенгит-кварцевые породы структура породы по форме и по размерности почти точно повторяет структуру пиллоу-лав с межподушечным заполнением, образованным гиалокластитами и осадками, в пределах Ведлозерско-Сегозерской системы зеленокаменных поясов мезоархейского возраста.



Полевая фотография взаимоотношений между эклогитами и телами гранат-фенгит-кварцевых пород в карьере Куру-Ваара, Беломорская эклогитовая провинция

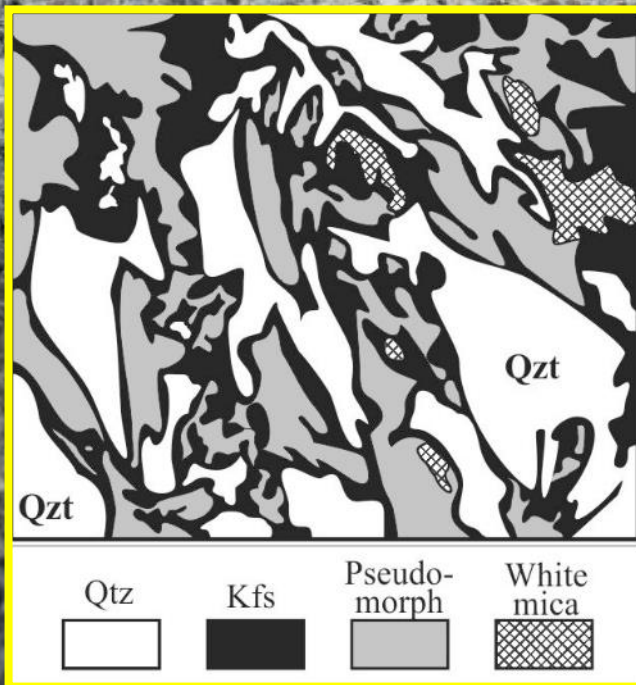
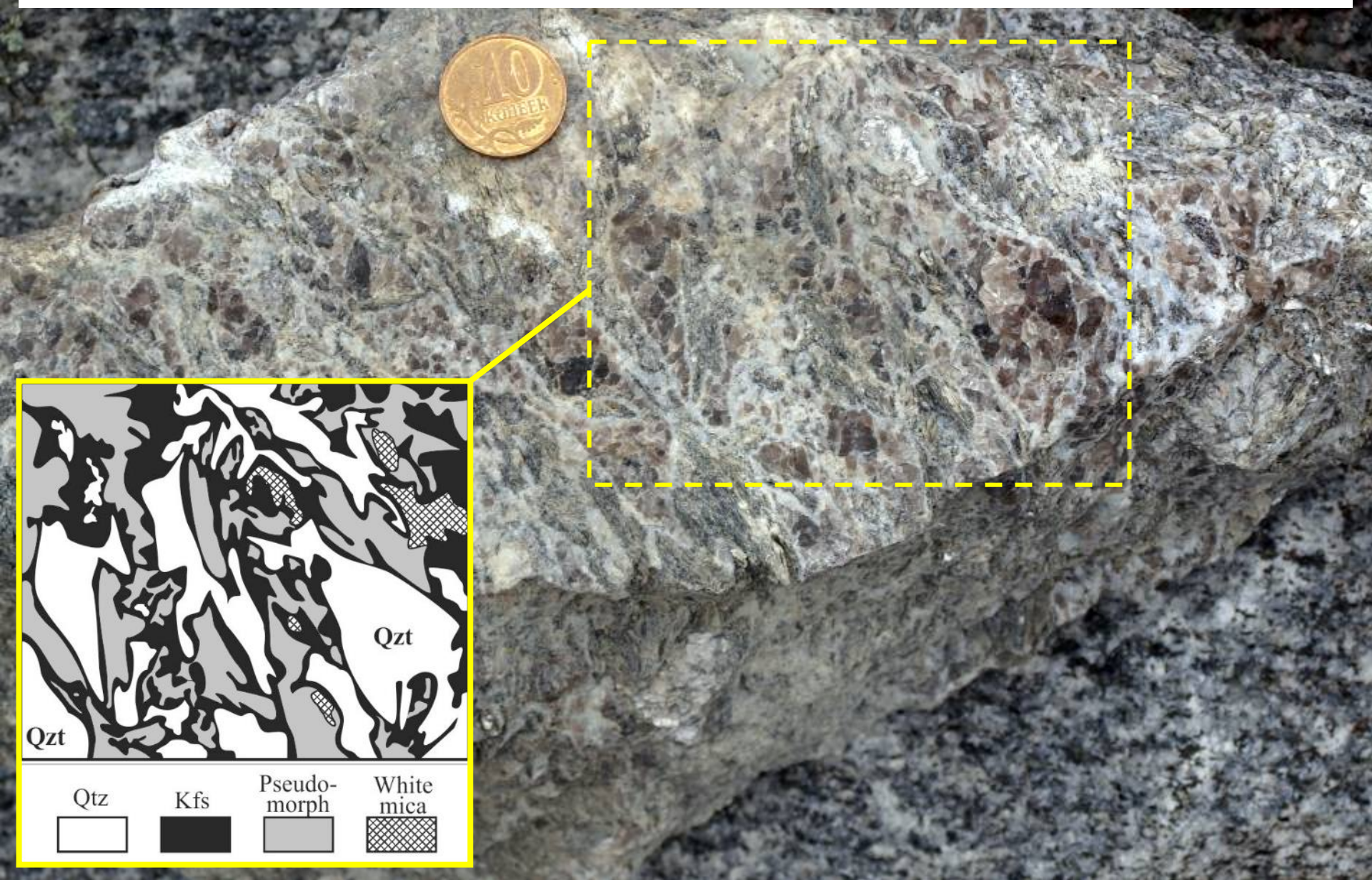
Полевая фотография мезоархейских пиллоу-лав пироксеновых коматиитов, межподушечное пространство в которых заполнено серицит-кварцевым осадочным материалом (Ведлозеро-Сегозерская зеленокаменная область, Светов, 2005).

Магнезиодюмортьерит-, гранат- кианит- и корунд-содержащие фенгит-кварцевые породы в эклогитах карьера Куру-Ваара

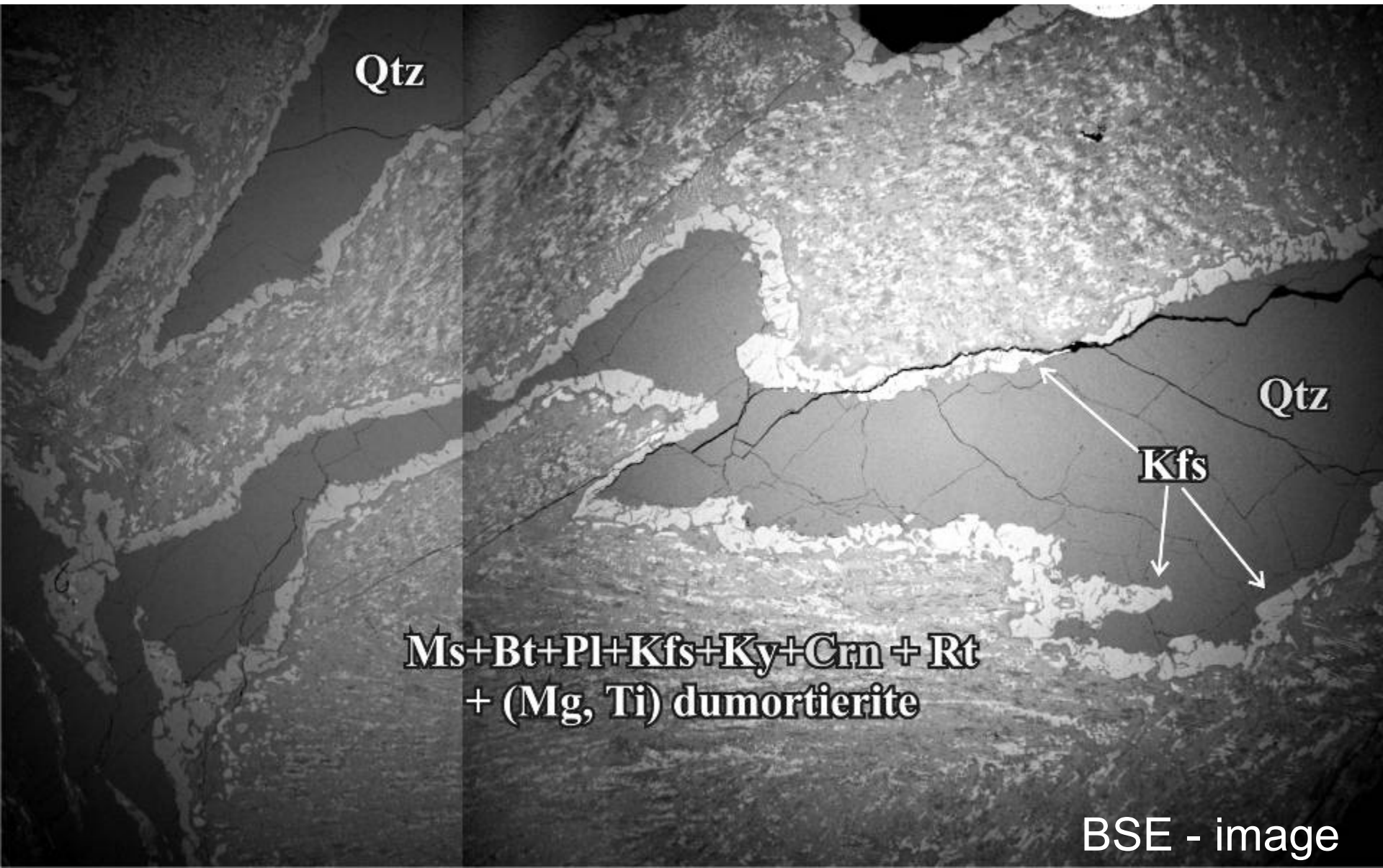


Гранат-фенгит-кианит-кварцевые породы имеют жильную или линзовидную форму (мощностью первые сантиметры – первые метры), характеризуются прямолинейными или плавно искривленными контактами, или формируют сеть, разделяющую эклогиты на отдельные округлые или угловатые блоки размерами первые десятки сантиметров.

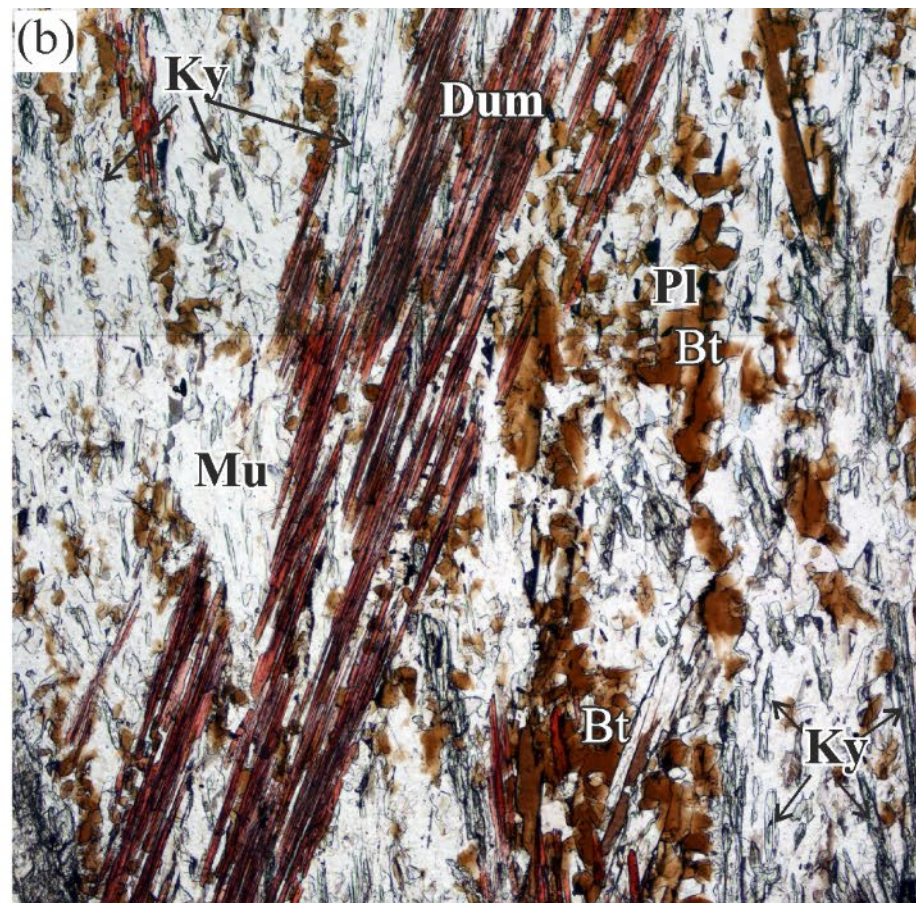
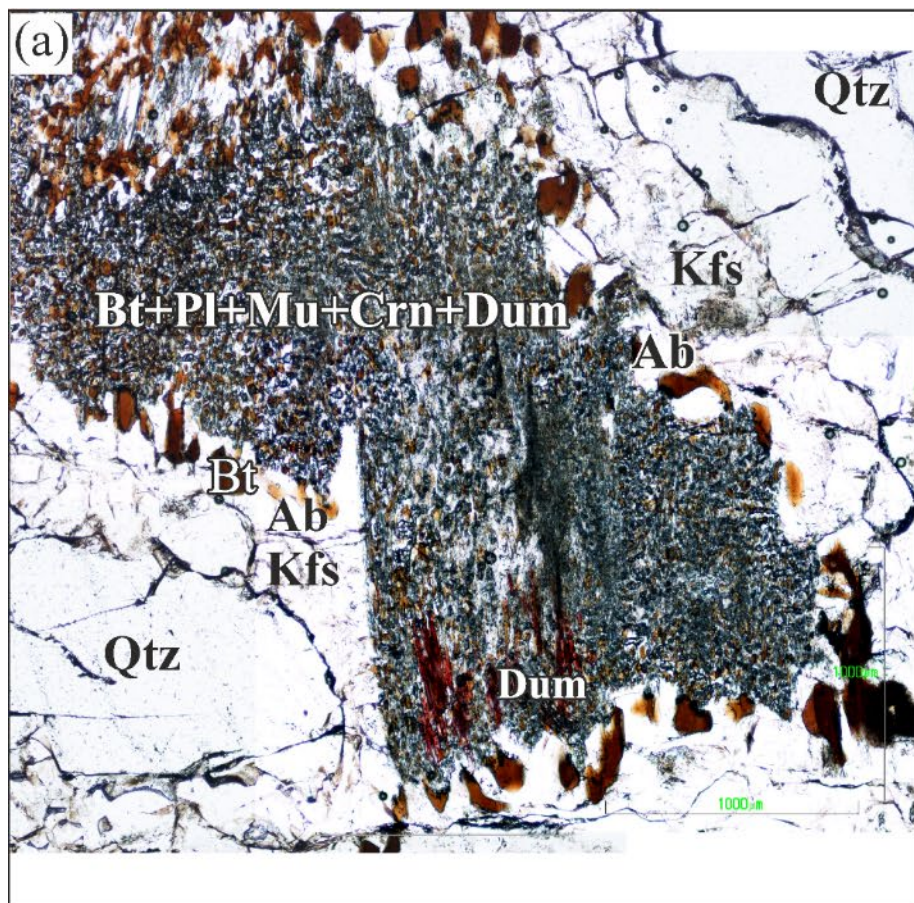
Grt-Ky-Ph-Qtz породы имеют характерную очковую структуру – крупные полиминеральные псевдоморфозы иррегулярной и эвгедральной формы на границе с кварцем окружены короной К-полевого шпата



Порода имеет очковую текстуру, образованную моно- и поликристаллическими крупными (до 5 см) угловатыми агрегатами кварца (40-60 % от объема породы), монокристаллами и гломеросростками идиоморфного фенгита в кварце и/или полиминеральными агрегатами (50-35 %), которые отделяются от кварца коронами полевого шпата (10-25 %)



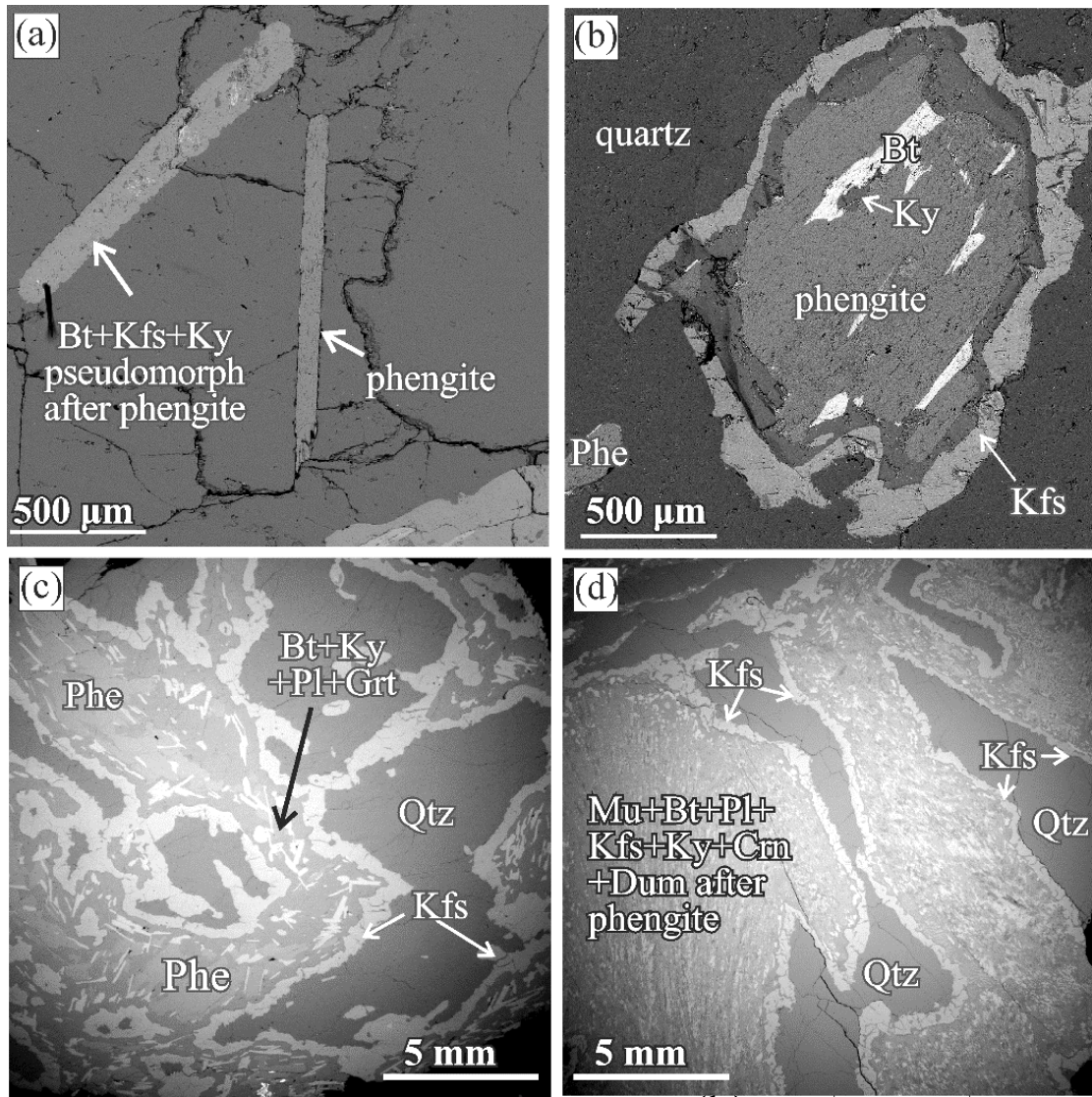
Внутри псевдоморфоз встречается боросодержащий алюмосиликат дюмортьерит*



(a) Bt + Pl + Ms + Cor + Dum + Ksp and (b) Ms + Bt + Pl + Ksp + Ky + Cor + Dum
Микрофотография шлифов в проходящем свете.

* Дюмортьерит - бороалюмосиликат $[\square(\text{Al},\square)\text{Al}_6(\text{BO}_3)\text{Si}_3\text{O}_{16}(\text{O},\text{OH})_2]$. – наиболее распространен в пегматитах, глиноземистых метаморфических породах и метасоматических породах. Дюмортьерит был описан как минерал из лейкогранитов и в пневматолитически-гидротермальных системах.

Стадии формирования псевдоморфоз по фенгиту



(a) – неизменный монокристалл фенгита; (b) - начало плавления фенгита с формированием полевошпатовой короны; (c) псевдоморфозы, содержащие в центре реликты недоплавленных монокристаллов фенгита; (d) полная псевдоморфоза по фенгиту.

Эксперименты по плавлению фенгита в кварце

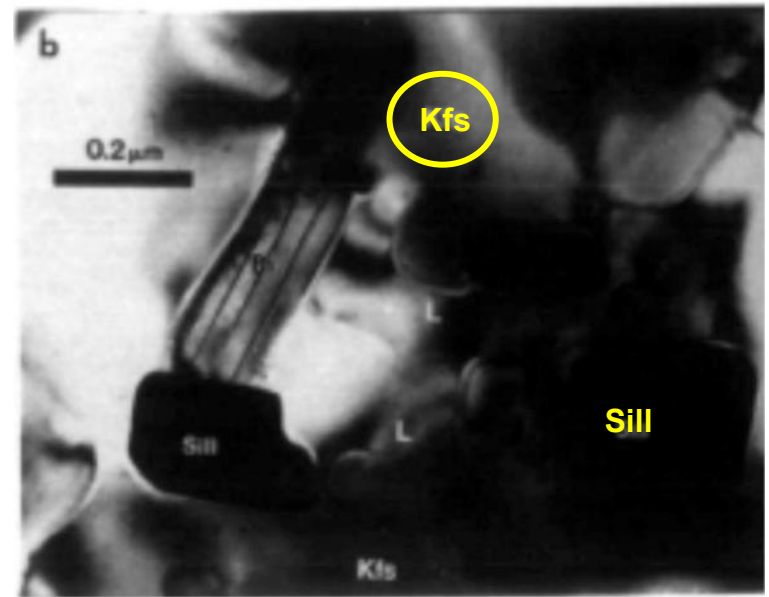
Brearley, A. J., & Rubie, D. C., 1990. Effects of H₂O on the disequilibrium breakdown of muscovite + quartz. *Journal of Petrology*, **31**, 925–956.

H₂O-насыщенные условия



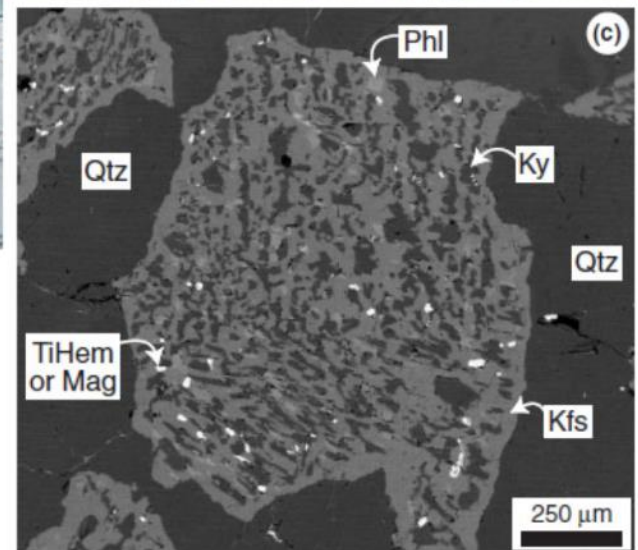
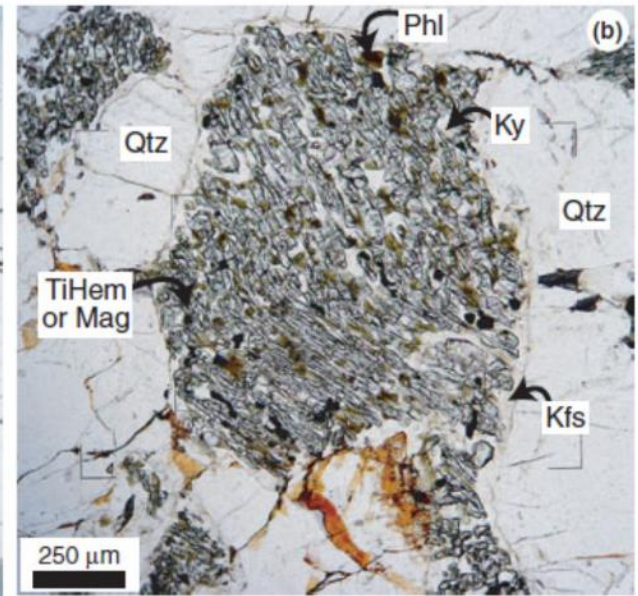
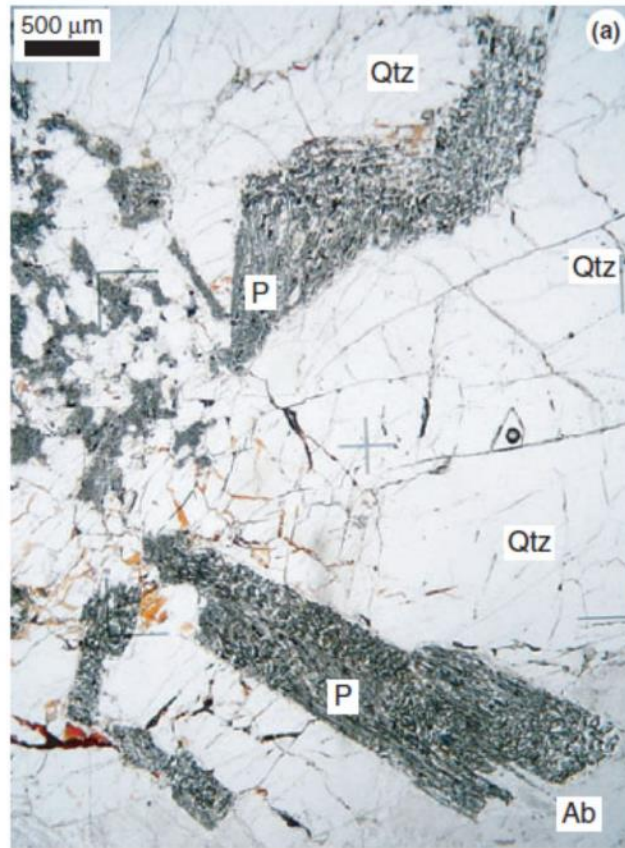
BSE изображение частично расплавленного мусковита после 29 часов нагрева до температуры 757°C в системе насыщенной водой. Внутри мусковита формируются вытянутые области параллельные (001) где находится расплав (L), мелкозернистый муллит (Mull), корунд (Co), и биотит (Bi).

H₂O-ненасыщенные условия



Пример природного плавления фенгита в мигматитах рядом с озером Вилсон в гренвильской провинции Центрального Лабрадора

Korhonen, F.J., & Stout, J.H., 2005. Undeformed **kyanite- and borosilicate-bearing veins** from the Grenville Province of Labrador: Evidence for rapid uplift. *Journal of Metamorphic Geology*, **23**, 297-312.



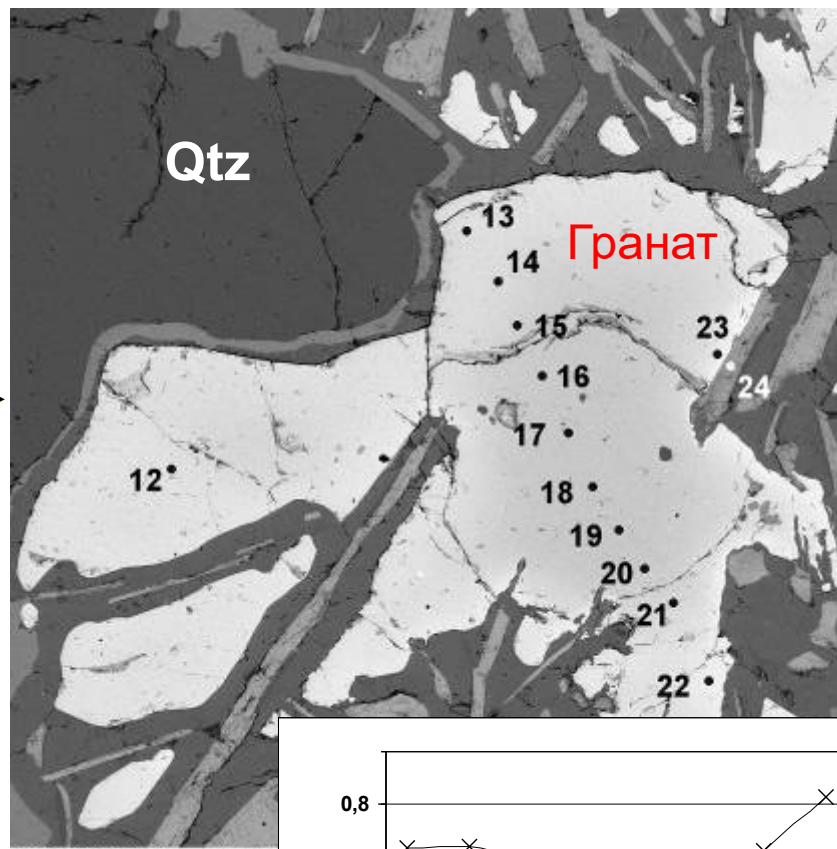
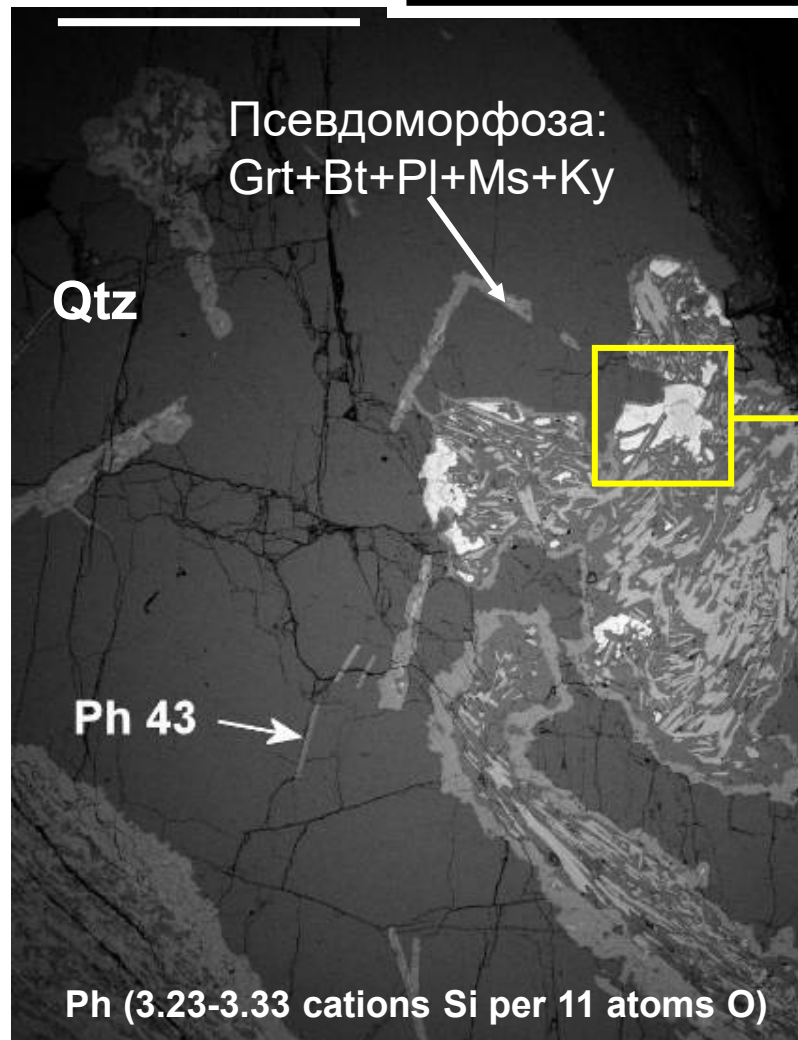
Микрофотографии и BSE изображение псевдоморфоз по фенгиту, состоящих из калиевого полевого шпата (Kfs), киянита (Ky), флогопита (Phl) и небольшого количества магнетита (Mag)

Реакции плавления фенгита:

- $\text{Phe} + \text{Qtz} \rightarrow \text{Ky} + \text{Kfs} + \text{Bt} + \text{melt}$ (1)
- $\text{Phe} + \text{Qtz} \rightarrow \text{Ky} + \text{Kfs} + \text{Grt} + \text{Rt} + \text{melt}$ (2)
- $\text{Phe} \rightarrow \text{Crn} + \text{Kfs} + \text{Bt} + \text{H}_2\text{O} + \text{melt}$ (3)

1. Появление **калиевого полевого шпата** в этой реакции является важным свидетельством **H₂O-ненасыщенных условий**, так как в присутствии воды Kfs в экспериментах не формировался [Brearley & Rubie, 1990].
2. Небольшое количество **дюмортьерита** в псевдоморфозах хорошо согласуется с наличием в первичном фенгите компонента **боромусковита** [Jung & Schreyer, 2002].
3. **Короны калиевого полевого шпата**, являющиеся перитектической фазой реакции (1) **сыграли роль природного контейнера**, ограничившего приток кремнезема в область псевдоморфозы для реакции (3).
4. При плавлении фенгита **расплав в продемонстрированных примерах не удалялся из места зарождения**. Этот эффект, по-видимому, связан с бронирующим эффектом вмещающего кварца. В настоящий момент фазе расплава отвечают плагиоклазы переменного состава и возможно некоторая часть калиевых полевых шпатов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ *PT* УСЛОВИЙ

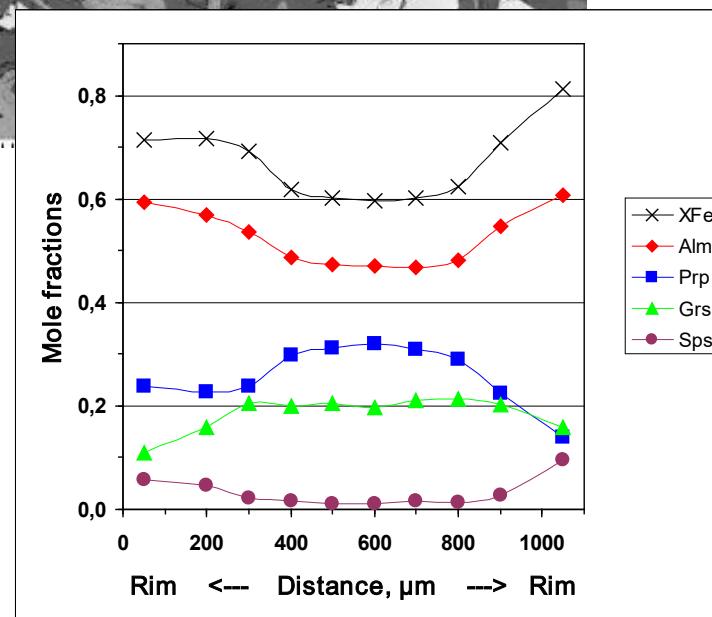


Ph, Ph+Grt+Ky

≥ 19 кбар 650°C

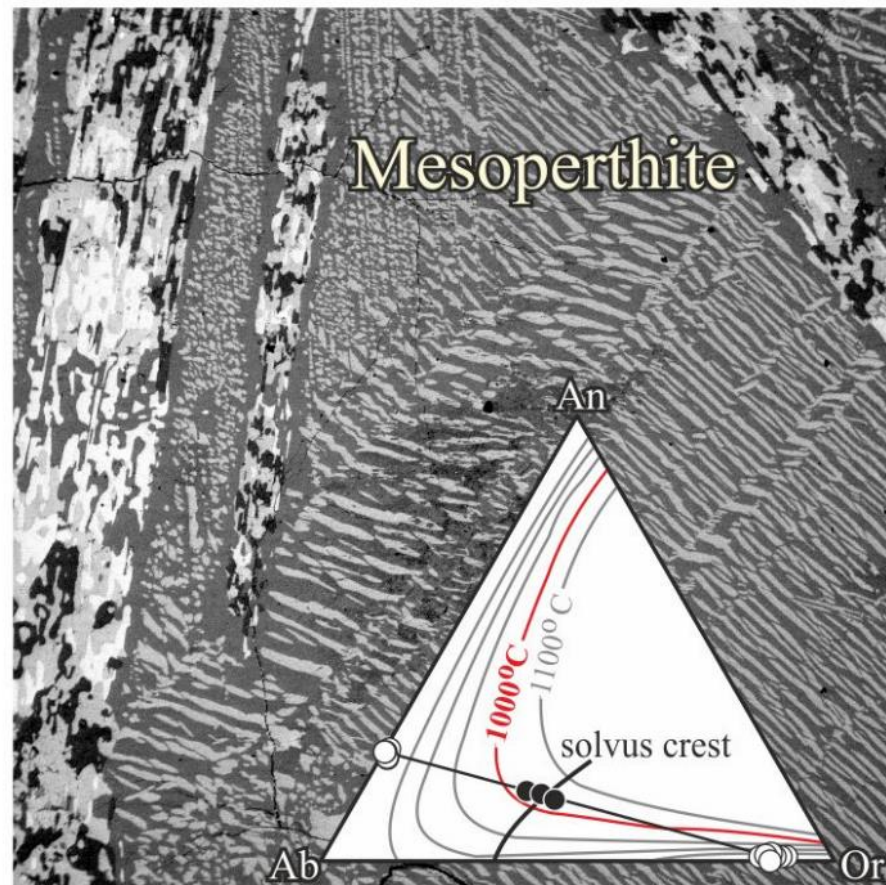
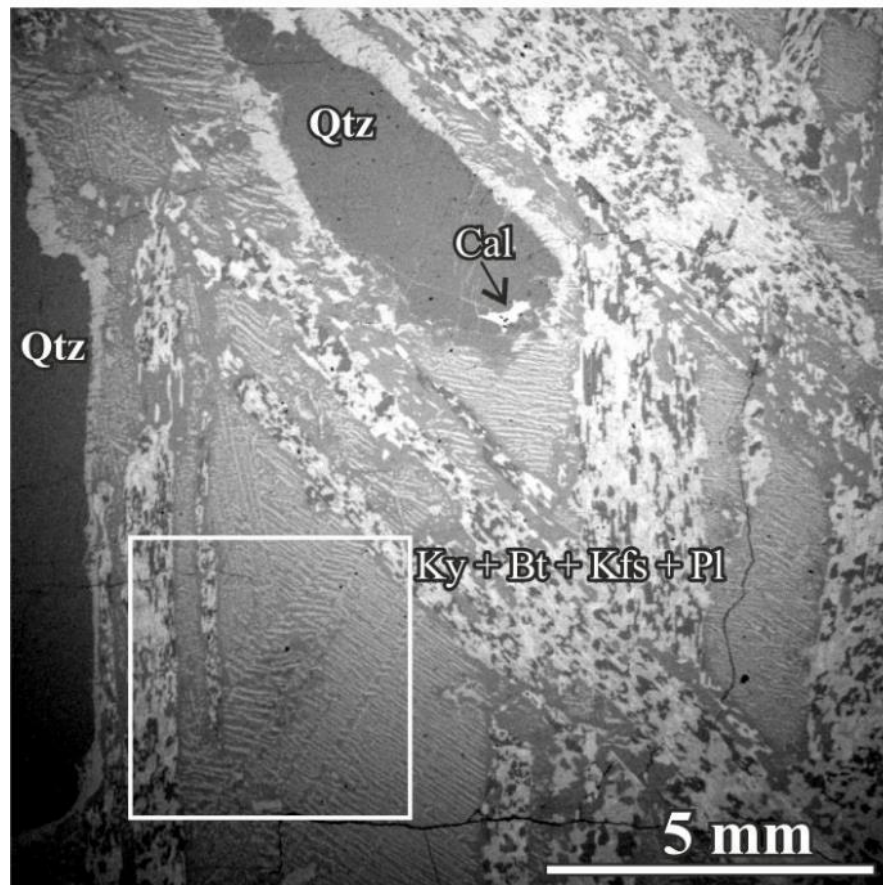
[Caddick & Thompson, 2008; Green & Hellman, 1982]

Ретроградная стадия 750 °C at 10 кбар



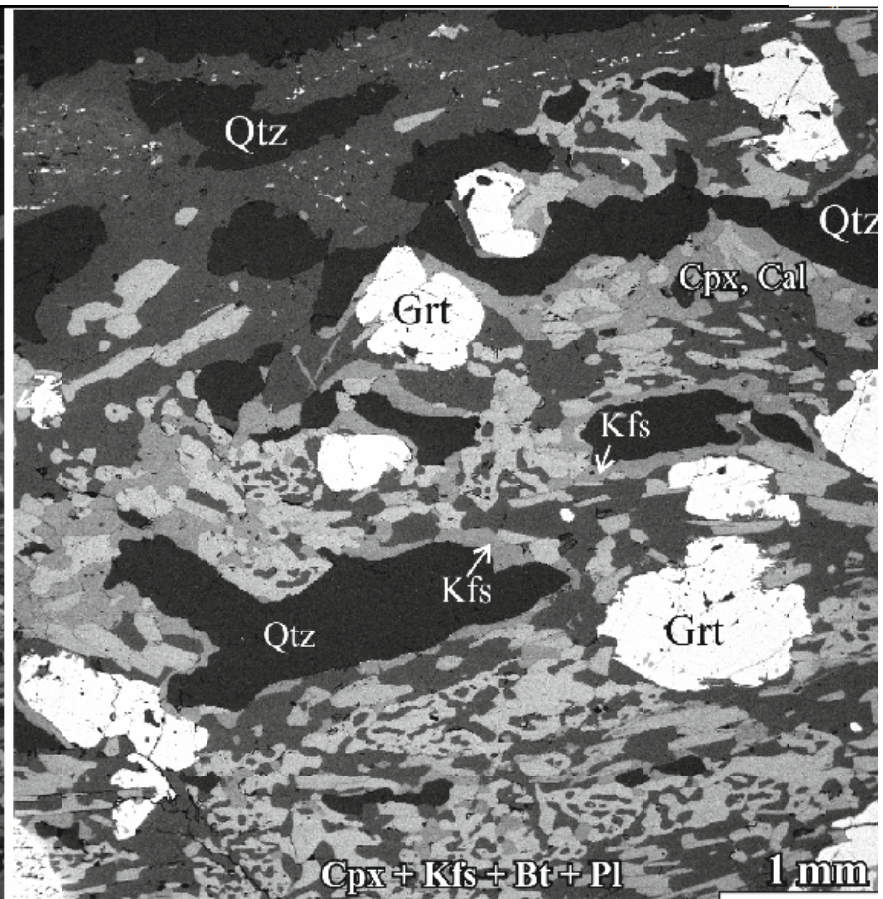
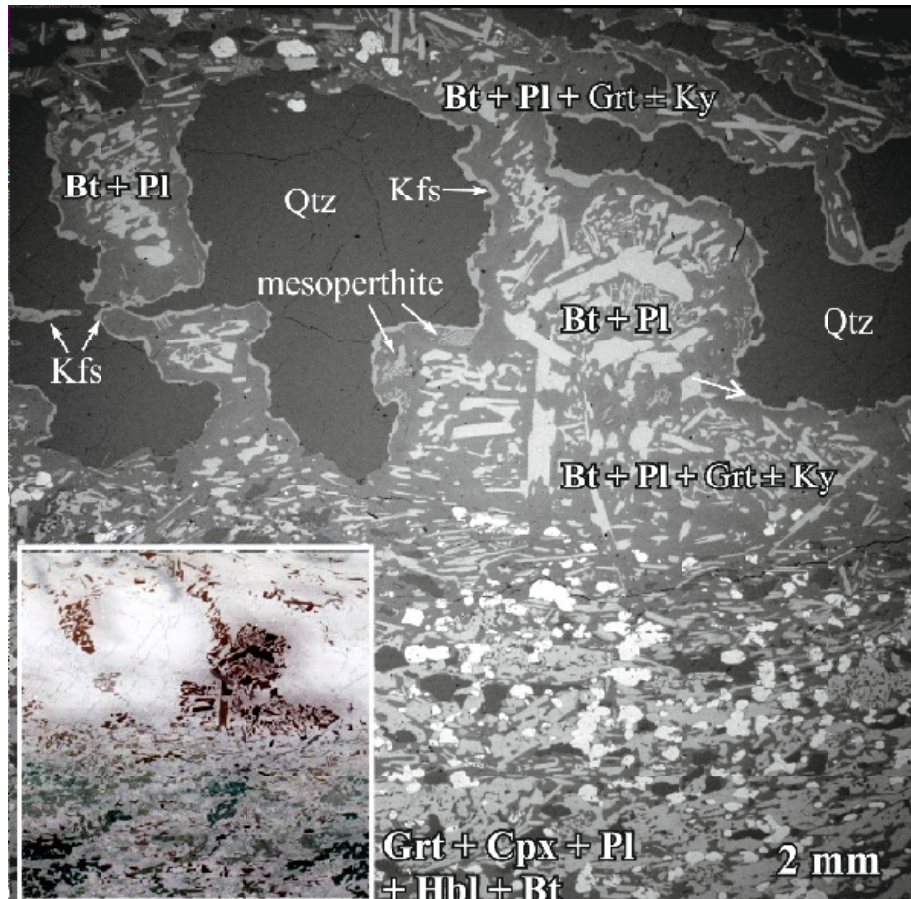
ОПРЕДЕЛЕНИЕ *PT* УСЛОВИЙ

BSE изображения мезопертитов



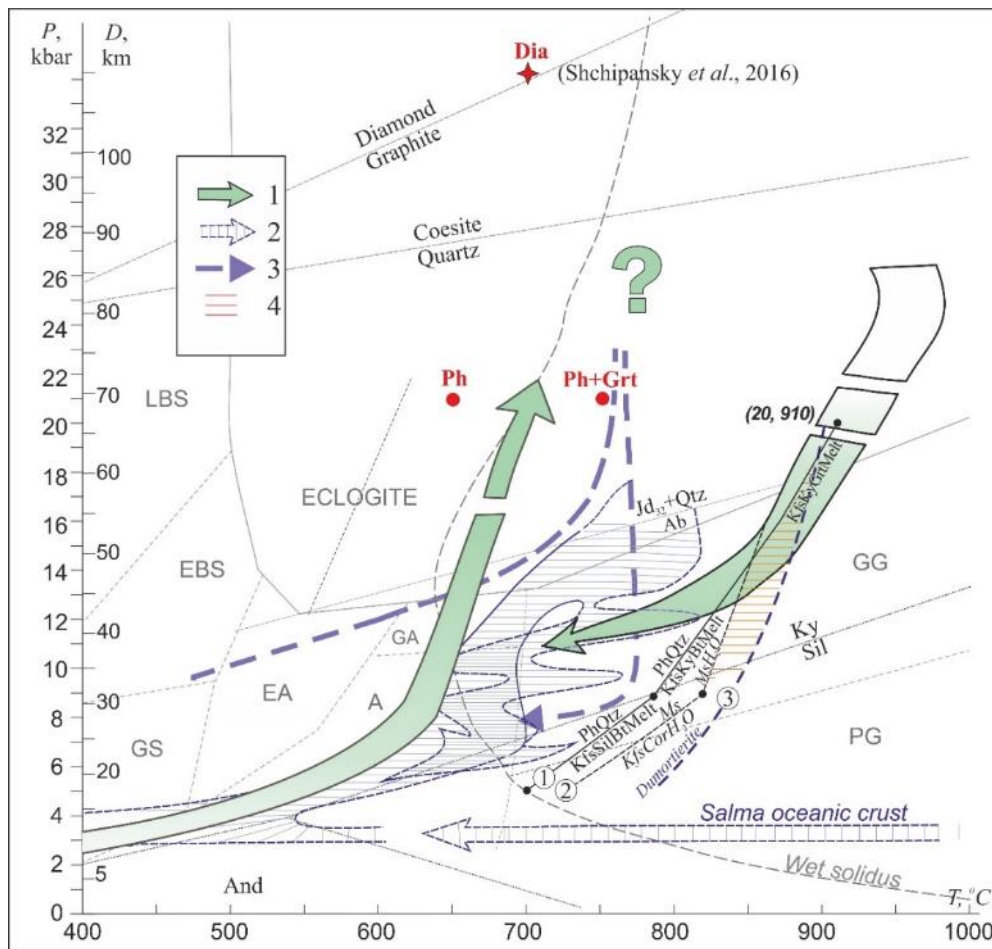
Треугольная диаграмма реинтегрированного состава субсоллюдусного полевого шпата с кривой сольвуса, рассчитанной для 8 кбар по [Hokada, 2001]. 1 – составы полевых шпатов в мезопертитах, 2 – реинтегрированный состав первичного полевого шпата.

Граница между Grt-Ky-Ph-Qtz породами и мафическим гранулитом, сформированным по эклогиту



Пост-эклогитовый минеральный парагенезис в эклогитах представлен гранат-клинопироксен-плагиоклазовой ассоциацией, оценка формирования которой дает **13.5–15.7 кбар** при температурах **850–900°C**, соответствующий оценкам температуры плавления фенгита

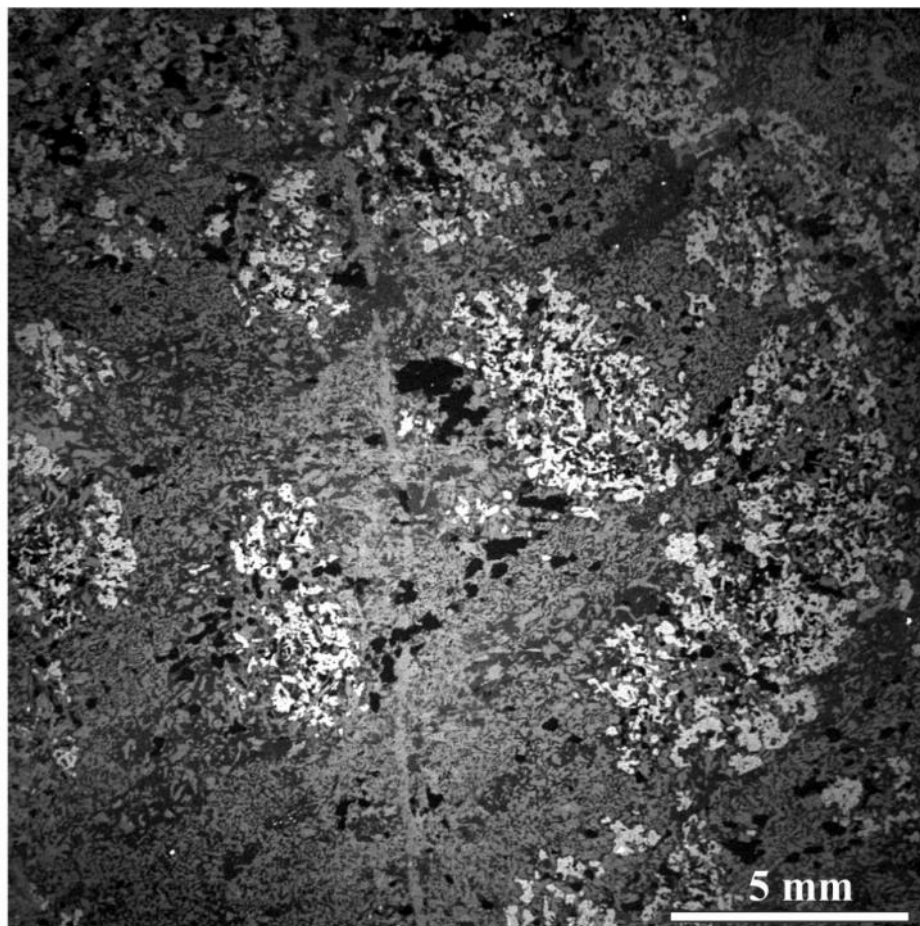
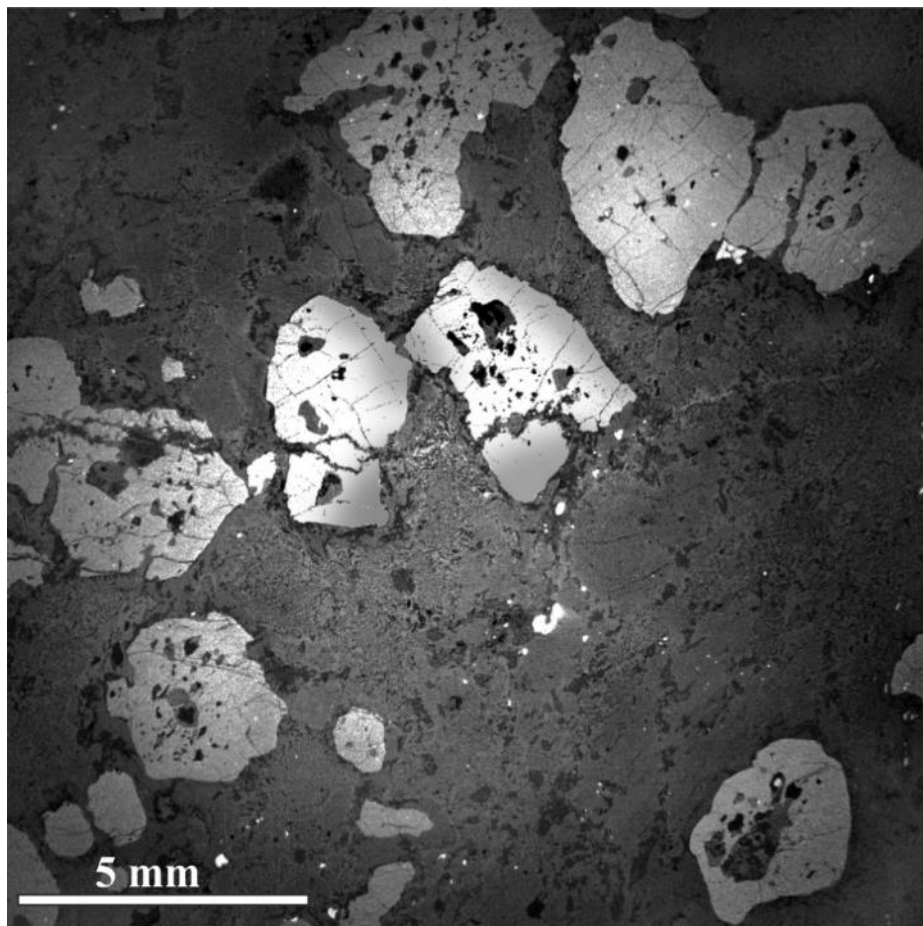
РЕКОНСТРУКЦИЯ РТ ТРЕНДА ИССЛЕДОВАННЫХ ПОРОД



1 – Possible *PT* paths of garnet-phengite-quartz rock and host eclogite from Kuru-Vaara quarry (Dokukina *et al.*, 2017); 2 – *PT*-paths of metamorphic evolution of Salma eclogite association after Mints *et al.* (2014); 3 – *PT*-paths of the metamorphic evolution of the Kuru-Vaara eclogites after Shchipansky *et al.* (2012); 4 – stability field of pseudomorph mineral assemblage. Numbers in circles are relevant phengite reactions: 1 – under water-undersaturated conditions after Thompson (1982), Vielzeuf & Holloway (1988); 2 – water-saturated conditions after Brearley & Rubie (1990) and references therein; 3 – stability fields of dumortierite, after Schreyer & Werding (1997).

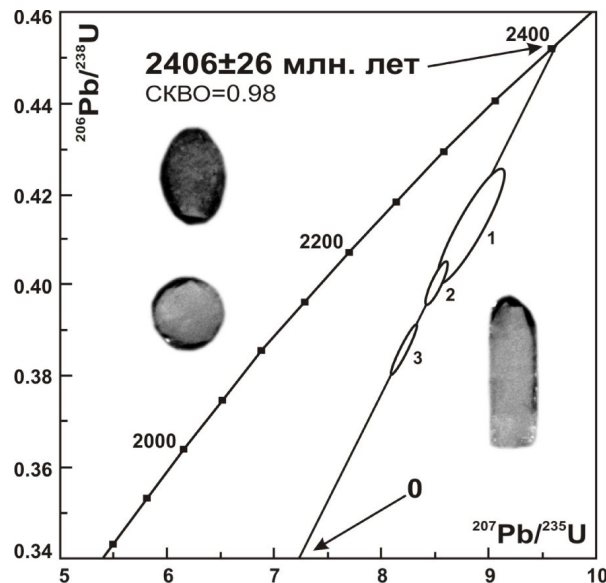
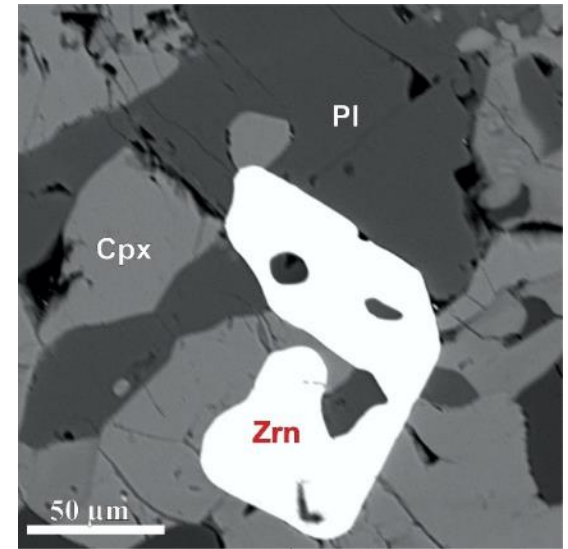
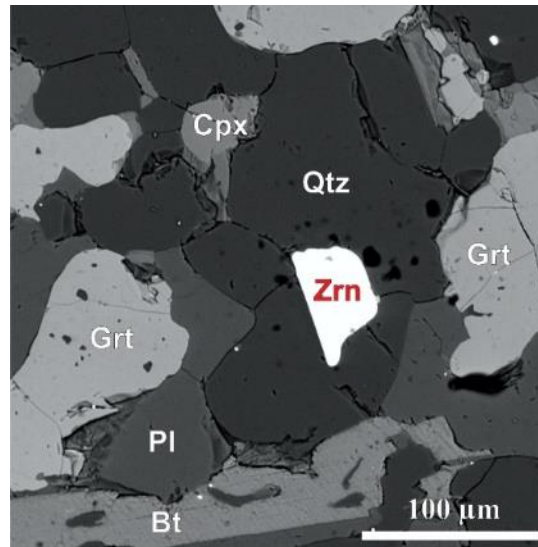
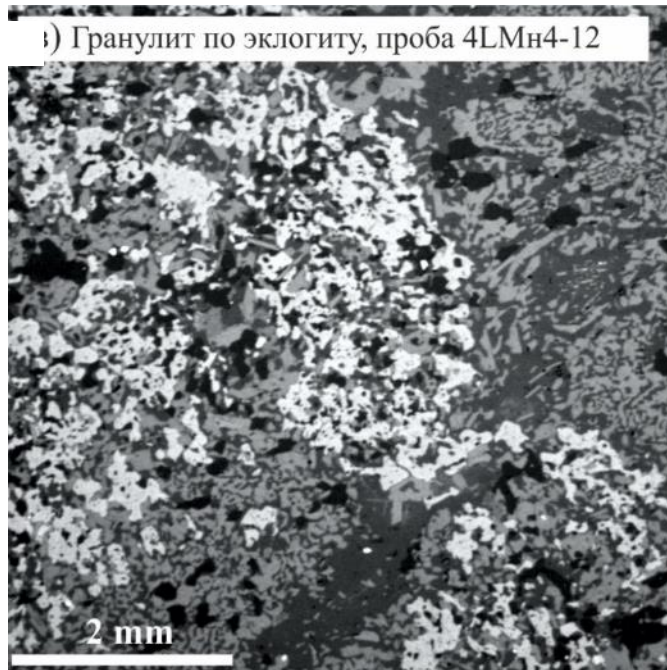
Первичная метаморфическая минеральная ассоциация Grt-Ky-Ph-Qtz формировалась при давлениях не меньше, чем 21 кбар и температурах 650-750°C. Мы предлагали сценарий формирования Grt-Ky-Ph-Qtz, как продукта метаморфической трансформации океанического глинисто-кремнеземистого осадка (Dokukina et al., 2017). В процессе эклогитового метаморфизма, глиноземистые осадки были преобразованы в крупнозернистые Grt-Ky-Ph-Qtz, а в процессе перемещения эклогитизированных осадков на верхние уровни в условиях гранулитового метаморфизма повышенных давлений, Ph испытал инконгруентное плавление с формированием сложных полиминеральных псевдоморфоз. На границе с Grt-Ky-Ph-Qtz породами, симплектитовые эклогиты трансформируются в Grt-Cpx-Pl гранулит. Пик высокотемпературного метаморфизма в течении эксгумации оценивается как 850–900°C. Тем не менее нельзя исключить, что Grt-Ky-Ph-Qtz породы могут представлять собой кислый расплав, сформированной при дегидратационном плавлении гидротермально измененной океанической коры в зоне субдукции.

Трансформация симплектитового эклогита в гранулит



BSE изображения симплектитового эклогита (слева), с реликтами омфацита в клинопироксен-плагиоклазовых симплектитах и эклогит, полностью перекристаллизованный в условиях гранулитовой фации метаморфизма (справа)

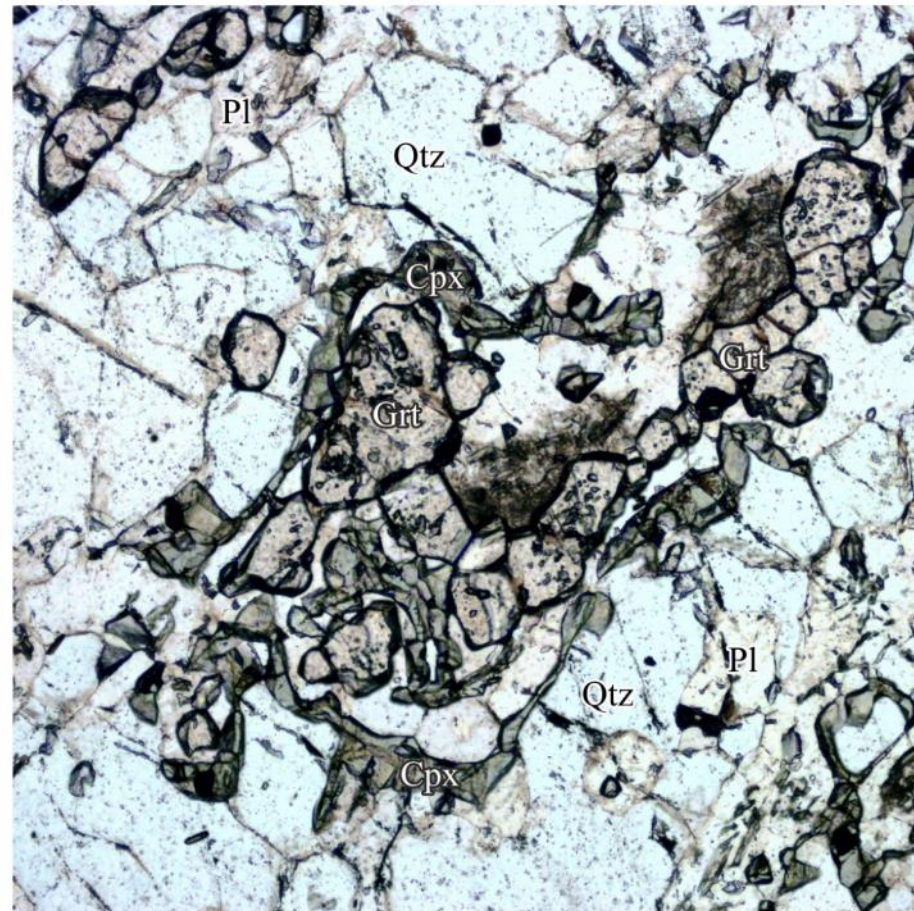
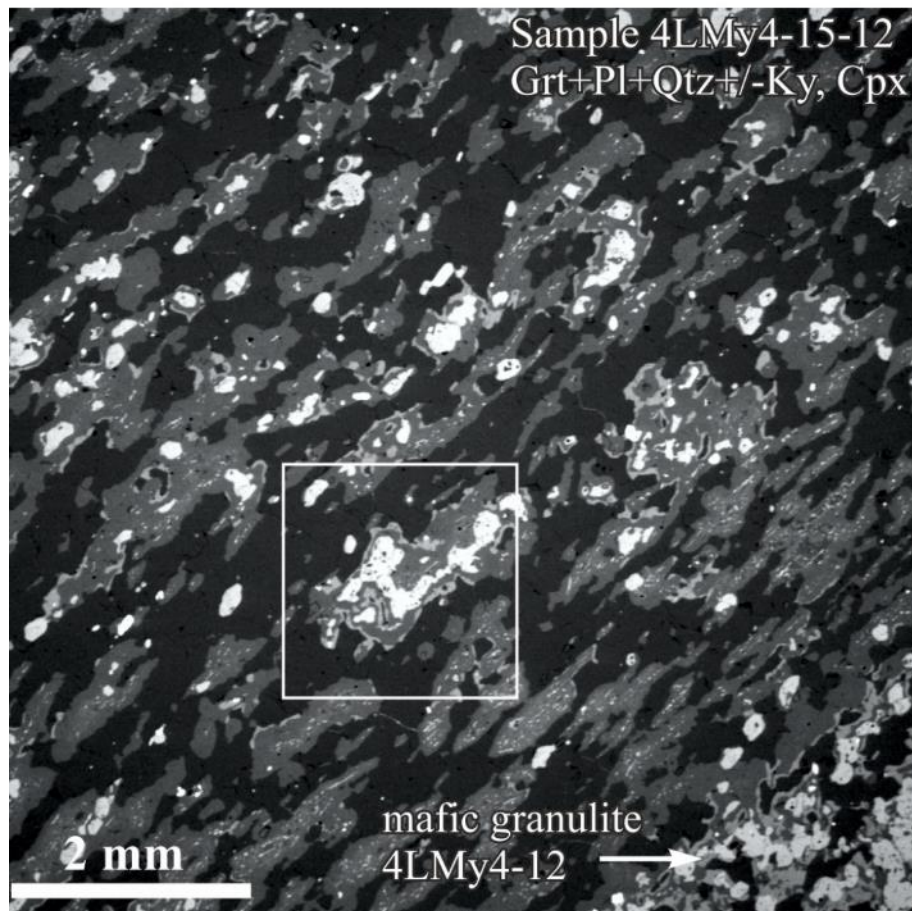
РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНОВ ИЗ МАФИЧЕСКОГО ГРАНУЛИТА, ПРОБА 4LMu4-12



Grt-Cpx-Pl порода, проба 4LMu4-12, гранулит основного состава содержит циркон, зерна которого в поперечных сечениях имеют сложные расщепленные формы (см BSE изображения) с неровными скругленными гранями. Зерна характеризуются низкими содержаниями U (23-76 ppm) и Pb (14-39 ppm) и содержат включения клинопироксена, граната, плагиоклаза и кварца, минералов гранулитовой стадии трансформации породы. ID TIMS датирование циркона в КНЦ РАН, г. Апатиты дало значение возраста 2406 ± 26 млрд лет ($N=3$, СКВО 0.98)

КИСЛЫЙ ГРАНУЛИТ:

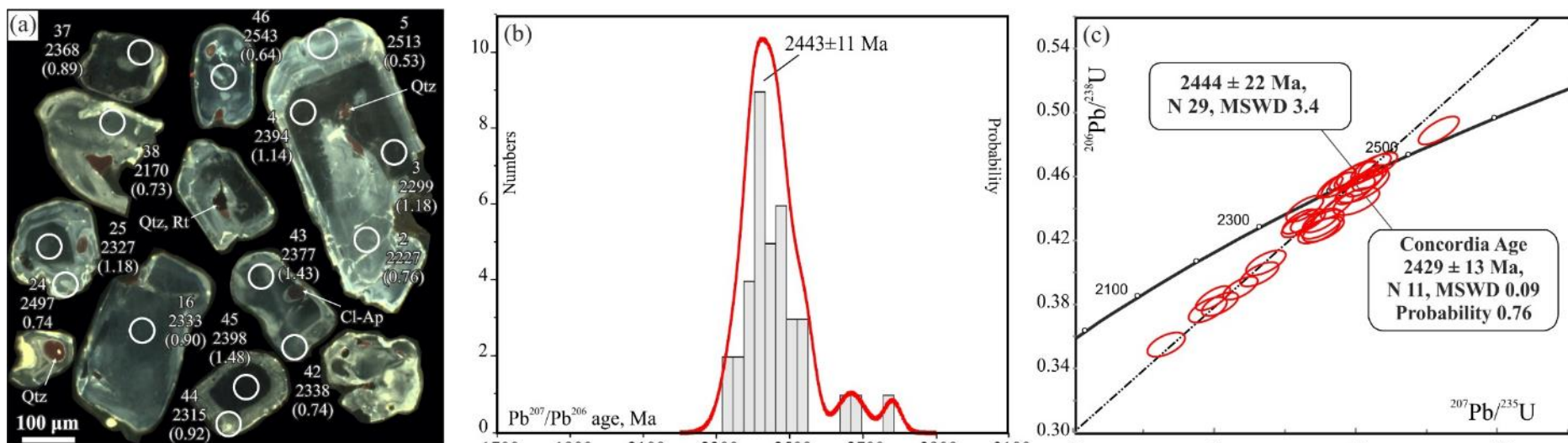
Сpx и Grt-содержащая Ky-Fsp-Qtz порода, проба 4LMу4-12-5; тело жильной формы внутри датированного мафического гранулиты, проба 4LMу4-12



BSE изображение (слева) и микрофотография (справа), проба 4LMу4-12-5.

РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb ДАТИРОВАНИЯ

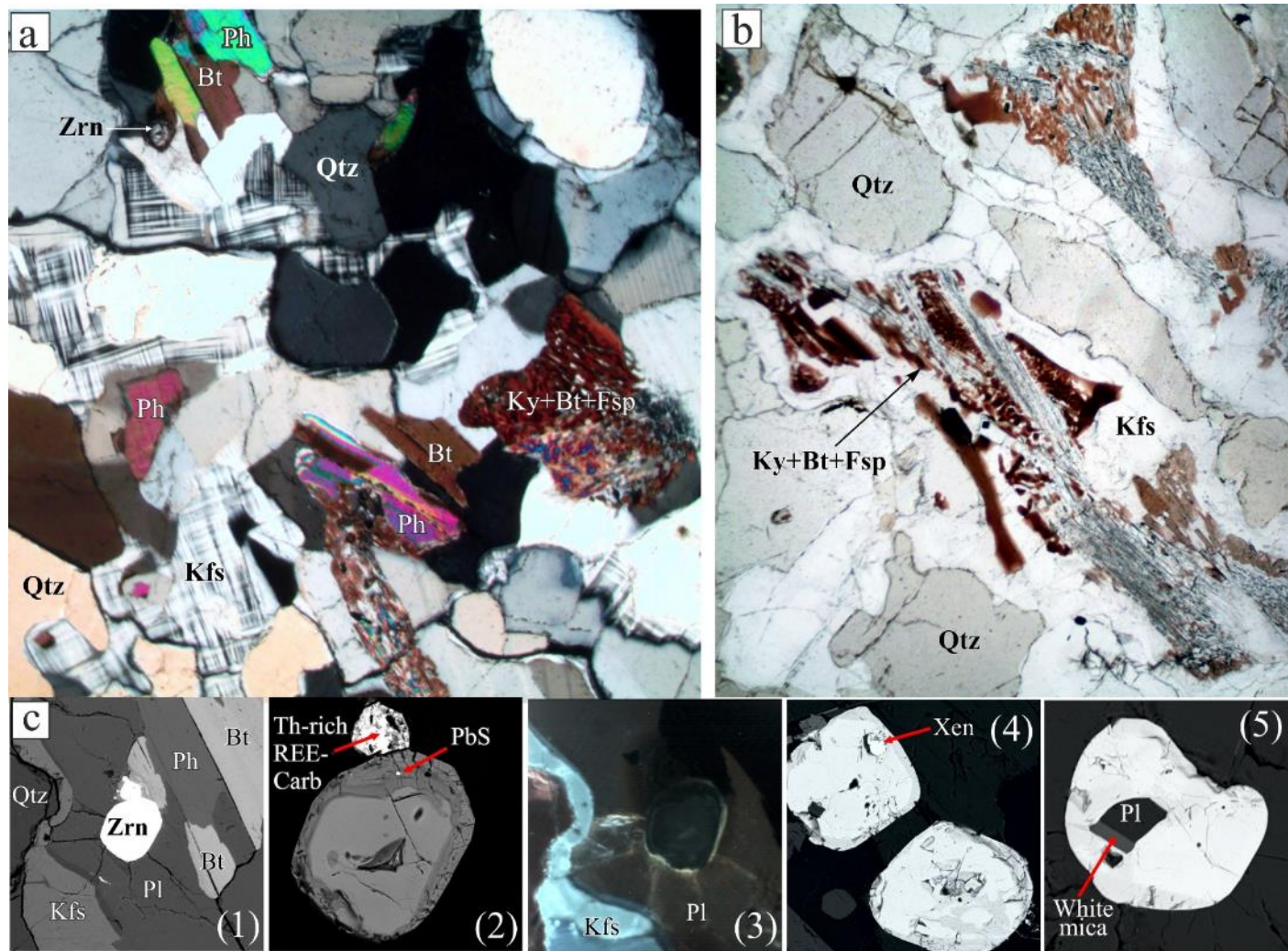
Grt- и Cpx-содержащей Ky-Fsp-Qtz породы, проба 4LMу4-12-5



(a) Католюминесцентные изображения некоторых датированных зерен циркона. Белые кружки обозначают места LA-ICPMS анализов, цифры в столбцах соответственно номер анализа – $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст в млн лет – Th/U отношение; (b) Гистограмма $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастов циркона; (c) U-Pb диаграмма с конкордией для изученных цирконов.

Цирконы из тонкого жильного тела Grt-Ky-Ph-Qtz пород (мощностью до 2-3 см), проба 4LMу4-12-5, локализованного внутри мафического гранулит (проба 4LMу4-12) были датированы методом LA-SF-ICPMS в ЦКП БНЦ СО РАН, г. Улан-Уде. Зерна циркона в некоторых случаях имеют ядра и каймы, но в целом однородны и характеризуется бесструктурным строением в католюминесценции. Циркон содержит включения клинопироксена, граната, плагиоклаза и кварца. В ядрах Th/U отношения (0.5-1.6) и концентрации Th (34-2138 ppm) и U (44-1756 ppm) в ядрах цирконов в целом существенно выше, чем Th/U отношения (0.5-0.9) и концентрации Th (20-50 ppm) и U (31-61 ppm) в каймах, однако значение возраста в ядрах и каймах в пределах погрешности совпадает 2444 ± 22 млрд лет (N=29, СКВО 3)

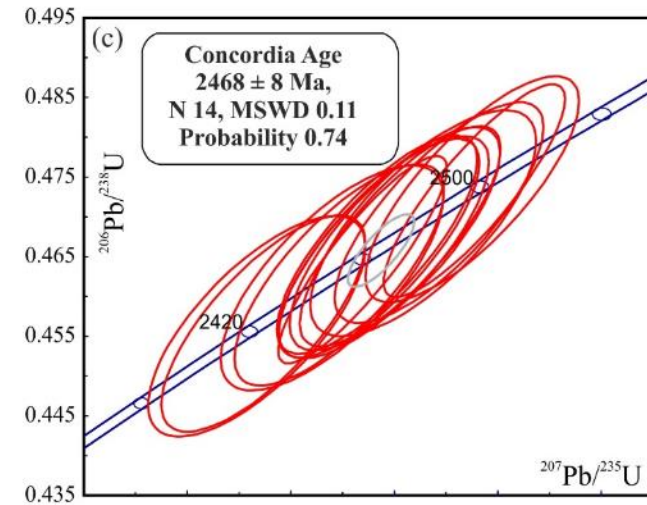
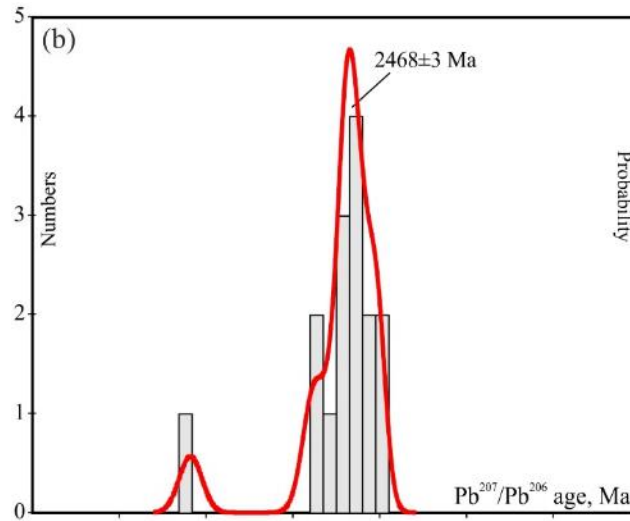
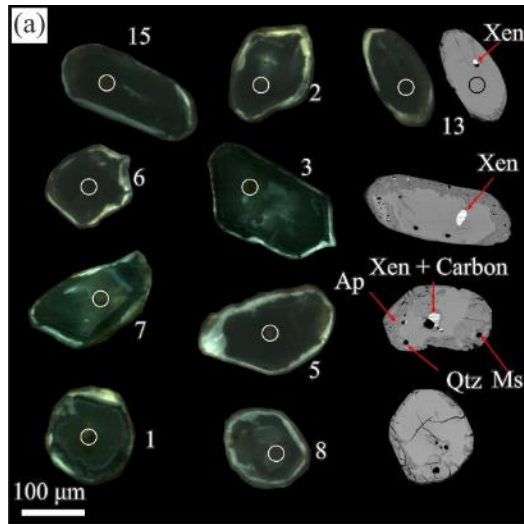
КИАНИТ-ГРАНАТ-ФЕНГИТ-КВАРЦЕВАЯ ПОРОДА, проба 4LMу2-9



Изображения Ку-Grt-Ph-Qtz породы из карьера Куру-Ваара, проба 4LMу2-9. (a-b) Разрушение Ph с формированием с формированием полиминеральных псевдоморфоз, состоящих из Bt, Pl, Kfs и Ky в Qtz: Микрофотографии в скрещенных николях (a), в проходящем свете (b). (c) BSE изображения (1, 2, 4, 5) и катодолуминесцентное изображение (3) зерен цирконов внутри полиминеральных псевдоморфоз: (1-3) Высокорadioактивное ядро циркона разрушается в процессе метасоматоза с выделением галенита; обогащенного торием и редкоземельными элементами карбоната, и формируаем новой истощенной по содержанию радиоактивных элементов каймы, наследующей форму первоначального зерна циркона; (4-5) цирконы с включениями ксенотима и белой слюды.

РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНОВ

Grt-Ky-Ph-Qtz породы, проба 4LMу4-12-5

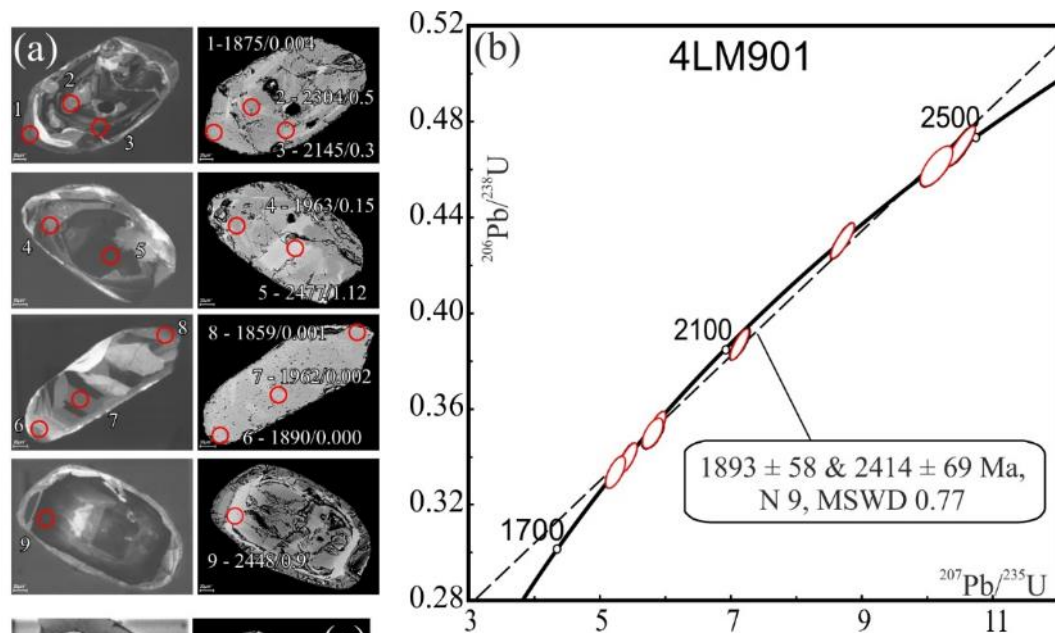


(a) CL и BSE изображения датированных зерен циркона. Белые кружки обозначают места LA-ICPMS анализов; (b) Гистограмма $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастов циркона; (c) U-Pb диаграмма с конкордией для изученных цирконов.

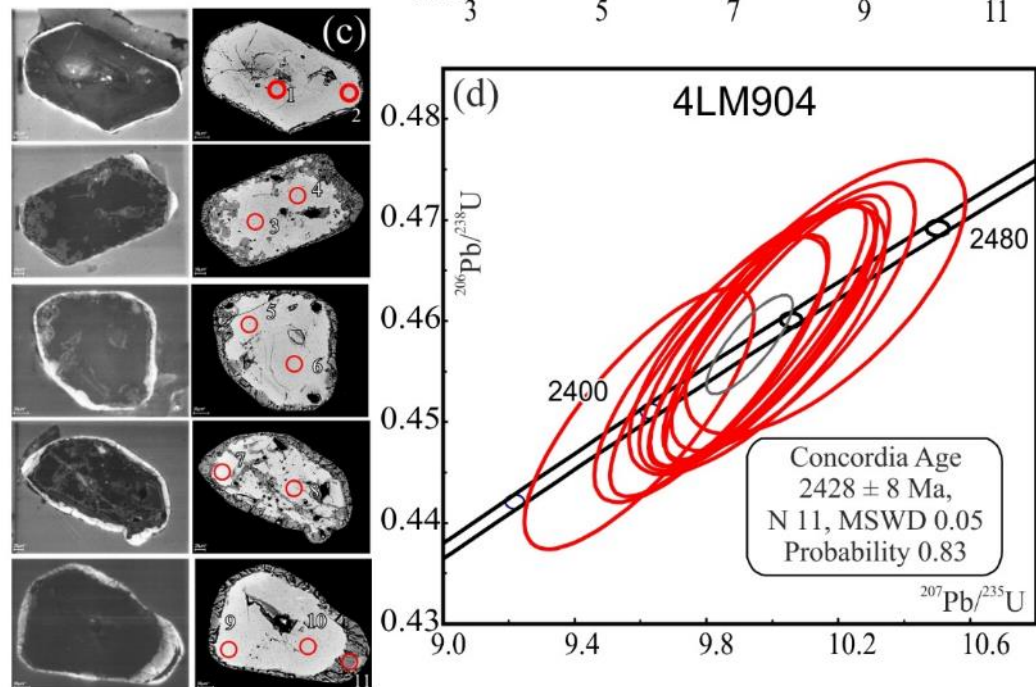
Цирконы из крупного тела Grt-Ky-Ph-Qtz пород (проба 4LMу2-9) были датированы методом LA-ICPMS в Лаборатория химико-аналитических исследований ГИН РАН, г. Москва. Зерна цирконов идиоморфные, мутные, серо-желтые со сглаженными ребрами, в CL - метамиктные с явно выраженными процессами перекристаллизации, связанными с ростом светлых в CL кайм (см CL и BSE изображения). Зерна структурно приурочены к полиминеральным псевдоморфозам и имеют высокие Th/U отношения (0.9-1.7), внутри циркона диагностируются включения ксенотима, алланита, плагиоклаза и белой слюды, предшествующей плавлению и формированию псевдоморфоз. Конкордантный возраст цирконов 2468 ± 8 млрд лет (N=14, СКВО 0.11)

РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНОВ

Grт-Ky-Ph-Qtz порода, пробы 4LM901 и 4LM904



(a-b) проба 4LM901: (a) CL и BSE изображения датированных цирконов; (b) диаграмма с конкордией U-Pb возраста цирконов, полученных LA-ICPMS методом. Через слэш – соответственно номер анализа / $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст / Th/U отношение. (c-d) проба 4LM904: (d) CL и BSE изображения датированных цирконов; (e) диаграмма с конкордией U-Pb возраста цирконов, полученных LA-ICPMS методом.



Цирконы из крупного тела Grт-Ky-Ph-Qtz пород (проба 4LMу901 и 4LMу904) были датированы методом LA-ICPMS в Лаборатория химико-аналитических исследований ГИН РАН, г. Москва.

ВЫВОДЫ

- Сложная форма зерен циркона в мафическом гранулите предполагает, что рост циркона происходил в ограниченных условиях роста внутри твердой породы ~ 2.4 млрд лет назад.
- Цирконы внутри Grt-Ky-Ph-Qtz породы с возрастом ~ 2.4 млрд лет структурно приурочены к полиминеральным псевдоморфозам, сформированных при плавлении метаосадочных пород. Эти цирконы характеризуются высокими Th/U отношениями и высокими концентрациями Th, U и Pb, что позволяет предположить формирование циркона из расплава в течении частичного плавления породы.
- Согласованный палеопротерозойский возраст ~ 2.4 млрд лет отвечает времени высокобарного гранулитового метаморфизма при температурах как минимум 850-900°C.
- Цирконы с возрастом ~ 2.4 млрд лет сформировались за счет U-, Pb- и Th-содержащих метаморфических минералов (ксенотим, монацит, циркон), сформированных при метаморфизме осадочных пород
- Рост истощенных по Th, U и Pb с низкими Th/U отношениями связано с преобразованием магматического циркона с возрастом ~ 2.4 млрд лет.