

**В.В. Федькин**

Институт экспериментальной минералогии  
им. акад. Д.С. Коржинского РАН, г. Черноголовка

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ И ПЕТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОРОВЫХ ЭКЛОГИТОВ

Формирование комплексов коровых эклогитов находится под постоянным взаимодействием когерентных (совмещенных) процессов метаморфизма и метасоматоза. Прогрессивные процессы термобарической направленности приводят к образованию в эклогит-глаукофансланцевых комплексах контрастных серий пород. На ретроградном этапе развития к термобарическим процессам присоединяются явления метасоматоза, вызывая петрохимические изменения пород комплекса. Выделяются две независимые линии аллохимических изменений, связанные с выносом из базитовых пород химических элементов основного ряда – Fe, Mg, Ca, Al, и с замещением эклогитов карбонатсодержащими минеральными ассоциациями.

*Ключевые слова:* высокобарные комплексы, тектонический меланж, когерентные процессы, метасоматоз коровых эклогитов, Максютковский комплекс, Атбашинский комплекс, P-T параметры метаморфизма.

**DOI: 10.17072/chirvinsky.2024.159**

**Введение.** Когерентные - взаимосвязанные, совмещенные, и дополняющие друг друга процессы - широко распространены в эклогит-глаукофансланцевых комплексах - представителях коровых эклогитов. В метаморфической петрологии этот термин связан с вопросами образования контрастных по степени метаморфизма серий пород - высокобарных эклогитовых включений в слабо метаморфизованной толще метаосадочных или гранитоидных пород [16, 19, 20]. Обычно это - небольшие тела, блоки, будины, прослои или линзы HP/UHP пород, внедренные в матрикс в результате тектонического меланжа, которые затем были вовлечены в совместные (когерентные) процессы развития комплекса, но сохранили в составах сосуществующих фаз P-T параметры предыдущих ступеней своей истории. Именно с этих позиций в данной работе рассматриваются взаимосвязанные процессы метаморфической и метасоматической направленности, которые на определенном этапе эволюции комплекса начинают действовать совместно, усиливая и усложняя эффект его развития.

**Задачей исследования** является изучение временной совместимости и относительного влияния совмещенных процессов метаморфической (термобарической) и метасоматической (петрохимической) направленности в комплексах коровых эклогитов разной глубинности.

**Объект изучения.** Взаимосвязанные когерентные процессы метаморфической и метасоматической эволюции рассмотрены на примере двух контрастных наиболее хорошо изученных комплексов коровых эклогитов: Максютовского на Южном Урале и Атбашинского на Южном Тянь-Шане. Более чем 50-летняя история изучения этих комплексов была сосредоточена, в основном, на изучении высокобарных минеральных ассоциаций и процессов метаморфизма, в то время как явлениям метасоматоза уделялось недостаточно внимания [1, 2, 5, 13, 17, 18]. Оба комплекса входят в систему внутриконтинентального герцинского Урало-Монгольского складчатого пояса. Они имеют близкие температурные и возрастные границы своего образования, похожее структурно-литологическое строение, но различаются по уровню глубинности, характеру эволюции метаморфизма и тектонической позиции. Более глубокий Максютовский комплекс, формировался в рифтогенной зоне сочленения Восточно-Европейского континента и Палеоазиатского океана, в области устойчивости алмаза и коэзита при  $T=650-800$  °С,  $P=3,0-3,2$  ГПа. Атбашинский террейн умеренного давления трансформирует тектоническую границу между Средним и Южным Тянь-Шанем, образовался в поле стабильности  $Ab^1-Jd-Qz$  парагенезиса при максимальных параметрах  $P$  до 1,1-1,3 ГПа и  $T$  до 500-600 °С.

**Результаты исследования.** Максютовский ЭГС комплекс изучался многими исследователями. Итоги этих работ обобщены в обзорах [12, 13, 17, 18]. Наши последние исследования [7, 15] и работы уральских геологов [2, 3] подтвердили топовые параметры метаморфизма комплекса: проградный этап -  $800 \rightarrow 900$  °С, ретроградный -  $910 \rightarrow 730$  °С при  $P=3.2-3.4$  ГПа. Такие параметры сохраняются в крупных блоках  $Ti$ -эклогитов среди базитовых и ультрамафитовых ( $Ol-En, Jd-Grt$ ) пород, выдвинутых в виде блоков на поверхность в результате тектонического меланжа. Характерной особенностью метаморфизма Максютовского комплекса является его возвратно-пульсационный характер, когда явления проградного и ретроградного метаморфизма неоднократно повторяются, а  $PT$  тренды, построенные по составам  $Grt-Cpx$  парагенезиса, образуют сопряженные пары, характеризующие режимы отдельных этапов (циклов) развития комплекса. По крайней мере, четыре таких цикла зафиксированы по данным микрозондовых исследований  $Grt-Cpx$  ассоциации пород комплекса [7]. Они образуют общий ретроградный

тренд метаморфической эволюции комплекса с близкими РТ параметрами проградно-ретроградных ветвей внутри цикла, с коротким временным интервалом (~20-25 Ма) между циклами и с их повторением на разных участках и этапах развития комплекса (рис. 1).

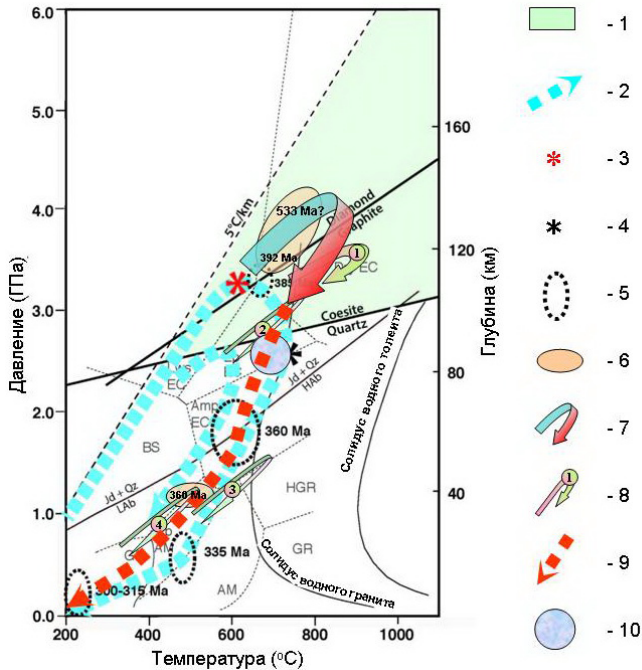


Рис. 1. Физико-химические условия формирования Максютовского комплекса [7]. 1 - область сверхвысокого давления (УНР), 2 - субдукционный Р-Т тренд, 3 - максимальное давление на стадии субдукции, 4 - максимальная температура на стадии эксгумации, 5 - область ретроградного метаморфизма по [12], 6 - РТ параметры образования ультрамафитовых включений в Jd-Grs породах [3], 7 - переходная РТ область от режима субдукции к режиму эксгумации, 8 - четыре эпизода эволюции комплекса на стадии эксгумации. 9 - РТ тренд эксгумации комплекса, 10 - параметры *Perple\_X* моделирования минеральных равновесий

**На ранних стадиях** ретроградного развития комплекса (первый цикл) в будинах и блоках высокобарных пород еще сохраняются остаточные следы проградных процессов, записанные в составах сосуществующих фаз Grt-Crx парагенезиса. Гранат, при этом, проявляет уникальные способности фиксировать и сохранять в своем составе малейшие изменения РТ условий его кристаллизации [8, 9, 14].

Метасоматические изменения на этом этапе затруднены из-за пульсационного характера ретроградного метаморфизма и высокой плавучести погружаемой пластины [11, 15]. Исходный состав высокобарных базитовых пород нижней части комплекса практически не меняется [4, 17, 21]. Первые признаки метасоматоза появляются лишь на 2-м и 3-м этапах в виде морфологических изменений минералов. В зернах граната появляются текстуры атоллового и ажурного граната (рис. 2), что подтверждает присутствие флюида в НР условиях [11]. В эклогитовых ассоциациях образуются низкотемпературные фазы Zo и Gln. Появляются прожилковые скопления и хлоритовые оторочки вокруг граната, зоны мусковитизации.

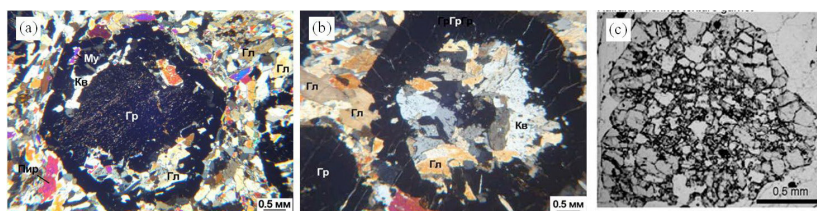


Рис. 2. Атолловые (а, b) и ажурный (с) гранаты Максютковского комплекса: (а) – Grt с проградной зональностью, (b) – Grt с инверсионной зональностью, участок Караяново [7], (с) – ажурный гранат участок Кайракли [11]

**На втором и третьем этапах** гранат приобретает сложную, разнонаправленную, подчас инверсионную зональность [7, 15]. Характерно, что параметры сопряженных проградных и ретроградных трендов совпадают с точностью изменения температуры не только в одном образце, но иногда даже в одном крупном зерне граната [8]. Это говорит о том, что процессы проградного и ретроградного метаморфизма следовали друг за другом практически одновременно с весьма коротким периодом инверсии. Естественно, в такой «неустойчивой» РТ обстановке достижение термодинамического равновесия и формирование стабильной системы метасоматоза не всегда реализуется и остается под большим вопросом.

В верхней, метаофиолитовой части комплекса признаки метасоматические изменения фиксируются по изменению валового состава пород: снижению концентраций Са, Ti, Ва, в меньшей степени концентраций Na и К (рис. 3). Данных не очень много. Наши дополнительные сведения только усиливают не очень ясную картину метасоматических изменений. Снижение активности натрия показывает, что развитие глаукофановых пород комплекса не связано с привносом натрия, а произошло за счет перераспределения Са и Na между другими фазами.

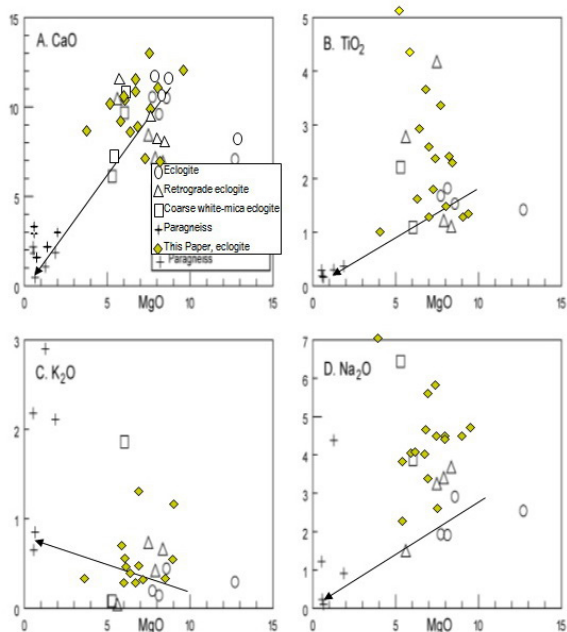


Рис. 3. Вариации ключевых элементов Максютовских эклогитов [12] с добавлением наших данных (закрашенные ромбики) [15]

Дополнительными признаками метасоматических изменений этой части комплекса является также появление среди серпентинит-матричного меланжа и метасоматизированных базальтов родингитов и образование крупных кристаллов лавсонита с мусковитовыми (с участием Grt и CZo) псевдоморфозами по нему. Характерная метасоматическая зональность в породах комплекса не образуется, видимо, из-за скоротечности физико-химических процессов, их интенсивности и частой смены проградно-ретроградного режима.

**Атбашинский комплекс.** Метаморфическая история Атбашинского ЭГС комплекса принципиально отличается от эволюции Максютовских эклогитов. *Во-первых*, они различаются по уровню глубинности, характеру метаморфизма и тектонической позиции [1, 5]. Породы Атбашинского комплекса не имеет четких доказательств условий высокого (НР) давления. Давление образования пород матрицы не превышает 5-7 кбар, для эклогитовых пород - 14-15 кбар в интервале  $T=350-650^{\circ}\text{C}$  [10]. *Во-вторых*, это одноэтапный метаморфизм с единой четко выраженной историей проградного и ретроградного

этапов. В Максютовском комплексе мы наблюдаем лишь его общий ретроградный тренд развития с пульсационной сменой проградно-ретроградного режима. Здесь же мы имеем дело с последовательной историей эволюционного развития метаморфизма, с характерным инверсионным разворотом РТ тренда развития метаморфизма по часовой стрелке. В-третьих, Максютовский комплекс формировался в коллизионной зоне сочленения крупных структурных элементов земной коры, в условиях постоянной тектонической активности и меняющегося режима метаморфизма [1, 5, 10, 13]. Это не совсем одно и то же, что относительно спокойная обстановка в зоне внутри континентального тектонического шва между Срединным и Южным Тянь-Шанем.

Эклогиты среди пород комплекса имеют подчиненное значение.

С одной стороны, они имеют четко обособленные независимые очертания, образуют отдельные блоки и формы в виде будин, прослоев и линз. С другой стороны, они вовлечены в складчатые структуры более позднего происхождения. Степень метаморфизма снижается от центральных частей эклогитовых включений к контактам вмещающего комплекса. Среди разнообразных пород комплекса происходят постоянные реакционные взаимоотношения высокобарных (Grt, Omph, Tit), и вновь образующихся низкотемпературных фаз (Gln, Ms, Chl, Carb, Zo), которые создают мозаичную пестроту ретроградного метаморфизма. Детальное петрографическое изучение сосуществующих минеральных ассоциаций показало, что их разнообразие не является следствием начальной разнородности исходного состава субстрата, как это предполагалось ранее [1], а есть результат последовательных превращений одних пород в другие. Под действием сопряженных (конкурирующих??) процессов метаморфизма и метасоматоза сложная схема минеральных замещений распадается на два направления: с образованием измененных пород базитового ряда и офиолитовых минеральных ассоциаций (рис. 4).

Петрографическая схема минеральных превращений пород комплекса (рис. 4а) однозначно подтверждается петрохимическими изменениями их валового состава (рис. 4б), а выявленные ранее особенности характера метаморфизма [8, 9] показывают тесное взаимодействие совместных термобарических и петрохимических процессов.

В центральных участках крупных эклогитовых тел прогрессивная зональность граната ( $X_{\text{prp}}=0,11-0,53$ ) и омфацитовый состав пироксена ( $X_{\text{jd}}=0,4-0,6$ ) на первом этапе развития комплекса фиксируют проградную направленность метаморфических процессов с параметрами до  $T=650-700$  °С и  $P=14-15$  кбар [8, 9]. На петрохимической диаграмме Si-Mg,Ca-Fe (Рис 4б) эти образцы занимают поля исходных

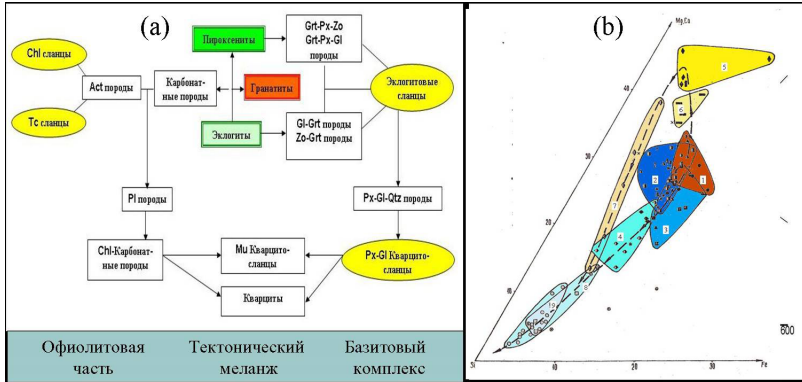


Рис. 4. Когерентные петрографические (а) и петрохимические (b, c) изменения пород комплекса Атбаши по материалам Л.С.Котовой [6] с добавлениями и интерпретацией В.В.Федькина (эта работа, [10])

эклогитов и пироксенитов в узкой зоне 1, а их ближайшие Grt-Cpx-Gln и Grt-Cpx-Zo ассоциации образуют рядом компактную группу в полях 2 и 3. В этих парагенезисах также сохраняются проградные тренды изменения условий метаморфизма, но при более низких температурах и давлениях:  $T=350-550^{\circ}\text{C}$ ,  $P=5-8$  кбар. По мере удаления от центральной части будины в Grt-Cpx ассоциациях намечается снижение параметров минералообразования и разворот направления РТ тренда метаморфизма по часовой стрелке (“clock-wise”), что означает **переход к когерентному (второму) этапу** развития комплекса.

Эта стадия характеризуется заметным снижением давления до 5-6 кбар и существенным разворотом РТ трендов минеральных ассоциаций по часовой стрелке. В базитовых породах происходит вынос Ca, в меньшей степени Fe, Mg, Na. По Grt и Cpx развиваются Gln и/или Zo. Местами среди metabазитовых пород появляется карбонатные фазы в виде пльчатых прожилков, ассоциации с участием Act, Crib, Pl, Chl. Одновременно в Grt-Gln-Chl сланцевой толще на регрессивной стадии происходит смена проградных Р-Т трендов на ретроградные, исчезновение из разреза эклогитов и Grt-Cpx гнейсов, формирование разнонаправленной зональности минералов. В эклогитах и пироксенитах появляются мелкие свежие зерна граната ( $X_{\text{Prp}}=0,05-0,21$ ). В кристаллических сланцах вмещающего комплекса образуется пироксен второй генерации с минимальной долей жадеитового компонента ( $X_{\text{Jd}}=0,03-0,08$ ). Такие составы сосуществующих фаз показывают параметры заключительного (третьего) этапа метаморфизма с параметрами  $T=300-400^{\circ}\text{C}$  и  $P=1,5-2,3$  кбар.



**Под влиянием метасоматических процессов** состав исходных пород на втором этапе развития меняется в двух направлениях. В группе базитовых пород происходит снижение содержания кальция с 30-35% до 20%. В Са-содержащих офиолитоподобных ассоциациях, напротив, идет увеличение содержания Са до 40-50% (рис. 5). За счет выноса Na и Al происходит образование Ab, Chl, Tlc пород; по Zo и Grt развиваются Ep и Chl. В офиолитовой системе появляются поля Tlc сланцев, Chl-Cc и Act пород, поля Crx-Gln-Qz и переходных Chl-Cc-Qz пород. Активная карбонатизация эклогитов и пироксенитов говорит о высокой активности углекислоты и Са на этом этапе. А вот Al остается инертным компонентом и концентрируется в мусковите и гранате.

**Третий заключительный этап** алохимических преобразований пород комплекса происходит под контролем привноса кремния и калия, за счет чего усиливаются процессы окварцевания и мусковитизации. Этот этап протекает при низких параметрах метаморфизма, при  $T=300-400^{\circ}\text{C}$  и  $P=1,5-2,3$  кбар. На рис. 6 показаны три стадии когерентного взаимодействия термобарических (а) и петрохимических (b, c) процессов формирования комплекса Атбаша. В ходе процесса кислотного выщелачивания из эклогитов и пироксенитов продолжается вынос Са, Fe, Mg, а также Na и Al. Образование глаукофановых пород происходит без привноса Na за счет перераспределения Са и Na в карбонатные фазы и в Pl [5, 6]. Затем за счет привноса кремния и калия идет мусковитизация и интенсивное окварцевание пород комплекса вплоть до образования мусковитовых кварцитосланцев и кварцитов.

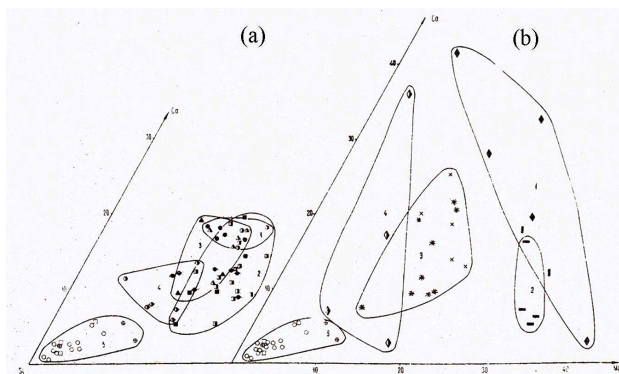


Рис. 5. Диаграмма Si-Ca-Mg. Оконтурированы поля: (а) - низкокальциевых пород: 1 - эклогитов и пироксенитов, 2 - Gln пород, 3 - Zo пород, 4 - Crx-Gln-Qz пород, 5 - кварцитосланцев и кварцитов; (b) - офиолитоподобных ассоциаций: 1 - Chl-Carb и Act пород, 2 - Tc сланцев, 3 - Ab пород, 4 - Chl-Carb-Qz пород, 5 - кварцитосланцев и кварцитов [6]



**Выводы и заключения.** Сочетание когерентных (совмещенных) процессов метаморфического и метасоматического плана в коровых эклогитах реализуется, как правило, на стадии ретроградного этапа развития комплекса. Активная фаза метасоматических процессов в УНР базитовых комплексах проявляется при завершении стадии тектонического меланжа и выражается в морфологических преобразованиях минералов, в образовании серпентинитового меланжа, метасоматизированных базальтов, родингитов, лавсонитовых, Сс-содержащих, Act, Chl, Ab и др. пород. В малоглубинных ЭКГС комплексах метасоматическая активность связана со сменой проградного тренда метаморфизма на ретроградный, с существенным снижением его параметров, что отражается на составах и зональности ключевых сосуществующих фаз.

Метасоматические изменения пород базитовой и офиолитовой

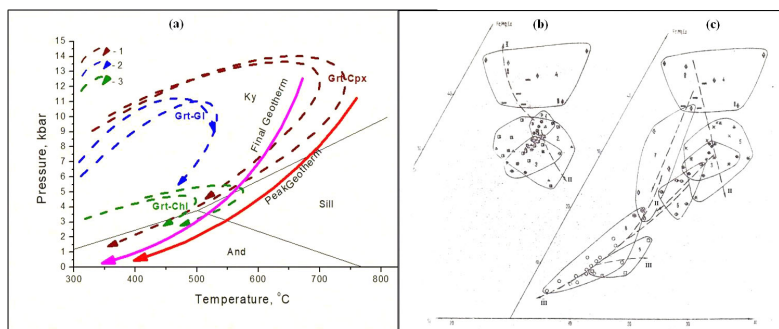


Рис. 6. Сопряженные термобарические (а) и петрохимические (b, c) преобразования пород комплекса Атабаши: (а) - эволюция РТ параметров метаморфизма: 1 – проградный тренд, образование эклогитов и Grt-Cpx гнейсов, 2 – инверсия РТ тренда (Grt-Amp и Grt-Gln породы), 3 – ретроградный метаморфизм (сланцы, кварциты и диафориты) [10]; (b, c) – петрохимические изменения пород комплекса: (b) - I и II этапы метасоматоза; (c) - II и III этапы развития процесса [6]

частей комплексов различаются по набору подвижных элементов: более основных (Mg, Fe, Al) для эклогитовых и сопутствующих пород, более легких (Ca, K, Na, Al, Si) – для офиолитоподобных образований. Финальный этап петрохимической эволюции коровых эклогитов связан с волной кислотного выщелачивания, которая приводит к повсеместной мусковитизации и окварцеванию пород. Видимый процесс интенсивной глаукофанизации пород не связан с существенным привносом натрия, а вызван перераспределением Al, Ca и Na среди других минералов.

*Исследования выполнены в рамках Госзадания FMUF-2022-0004, рег. № 1021051302305-5-1.5.2; 1.5.4 и поддержки Программы Фулбрайт ИМО 2015.*

### Библиографический список:

1. Бакиров А.Б. и др. Условия формирования эколгитовых комплексов Тянь-Шаня // Сов. геология 1985. № 2.
2. Вализер П.М., Краснобаев А.А., Русин А.И. УНРМ эколгит Максютовского комплекса (Южный Урал) // Доклады АН РФ. 2015. Т 461. С. 316-321.
3. Вализер П.М., Краснобаев А.А., Русин А.И. Жадит-гроссуляровый эколгит максютовского комплекса, Южный Урал // Литосфера. 2013. Т. 4. С. 50—61.
4. Волкова Н.И., Френкель А.Э., Буданов В.И., Холодова Л.Д., Лепезин Г.Г. Эколгиты максютовского комплекса (Южный Урал): геохимические особенности и природа протолита // Геохимия. 2001. № 10. С. 1027-1038
5. Добрецов Н.Л., Соболев Н.В., Шацкий В.С., и др. Эколгиты и глаукофановые сланцы в складчатых областях. Новосибирск: Наука, 1989. 234с.
6. Котова Л.С. Петрохимическая эволюция эколгит-глаукофансланцевого комплекса хребта Атбаша (Южный Тянь-Шань). // Геохимия магматических и метаморфических образований Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим. 1989. С. 110-127
7. Федькин В.В. Четыре эпизода термальной эволюции эколгитов Максютовского комплекса (Южный Урал) // Геология и Геофизика, (специальный выпуск) 2020. Т. 61. С. 666-684. DOI:10.15372/GiG2019182
8. Федькин В.В. Коровые базитовые эколгиты в поле зрения Grt-Cpx-Pl-Qz парагенезиса // Материалы научных чтений памяти П.Н. Чирвинского. Вып. 26. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2023. с. 268-278.
9. Федькин В.В., Котова Л.С. Химическая неоднородность граната в эколгит-глаукофансланцевых комплексах // VI Международная научная конференция, посвященная 50-летию Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского Госуниверситета, 2023, с. 544-547
10. Федькин В.В. Минералогическая геотермобарометрия в развивающихся метаморфических системах // Экспериментальная минералогия: некоторые итоги на рубеже столетий. М.: «Наука», 2004. Т. 2. С. 172-187.
11. Beane, R., and Sorensen, S.S. Protolith signatures and element mobility of the Maksyutov subducted slab, Southern Ural Mountains, Russia // Inter. Geol. Review. 2007. V. 49. P. 52-72.
12. Beane, R.J., Leech, M.L. The Maksyutov Complex: The first UHP terrane 40 years later // Geol. Soc. Am. Spec. Paper. 2007. V. 419. P. 153-169.
13. Dobretsov, N.L., Shatsky, V.S., Coleman, R.G., et al., Tectonic setting of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Maksyutov Complex, Ural Mountains, Russia. // Inter. Geol. Review. 1996. V. 38. P. 136-160.
14. Fedkin V.V. Zonal garnets of eclogite-glaucophane schist complexes - recorder of the history of their development. // Research Square Preprint Version 2023 Licensed under a CC BY 4.0 <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2449504/v1> 23p.
15. Fedkin, V.V., Burlick, T.D., Leech, M.L., Shchipansky, A.A., Valizer, P.M., and Ernst, W.G. Petrotectonic origin of mafic eclogites from the Maksyutov subduction complex, south Ural Mountains, Russia // Geological Society of America Special Paper. 2021. V. 552, P. 177-195, [https://doi.org/10.1130/2021.2552\(09\)](https://doi.org/10.1130/2021.2552(09)).
16. Hacker, B.R., Andersen, T.B., Johnston, S. et al., High-temperature deformation during continental-margin subduction & exhumation: the ultrahigh-pressure Western Gneiss Region of Norway // Tectonophysics. 2010. V. 480. P. 149-171.
17. Leech, M. L., and Ernst, W. G. Petrotectonic evolution of the high- to ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, Karayanova area, south Ural Mountains, Russia: structural and oxygen isotopic constraints // Lithos, 2000. V. 52. P. 235-252.
18. Lennykh V.L., Valizer P.M. High pressure metamorphic rocks of the Maksyutov complex (Southern Urals) // 4th International Eclogite Field Symposium: field guide book. Novosibirsk: UIGGM SB RAS. 1999. 64 p.

19. *Lü Z., Bucher K.* The coherent ultrahigh-pressure terrane of the Tianshan meta-ophiolite belt, NW China // *Lithos*. 2018. V. 314-315. P. 260-273.
20. *Meyer, M., Klemd, R., Hegner, E., Konopelko, D.* Subduction and exhumation mechanisms of ultra-high and high-pressure oceanic and continental crust at Makbal (Tianshan, Kazakhstan and Kyrgyzstan) // *J. Metam. Geol.* 2014. V. 32. P. 861-884.
21. *Schulte, B.A., and Blümel, P.* Metamorphic evolution of eclogite and associated garnet-mica schist in the high-pressure metamorphic Maksyutov Complex, Ural, Russia // *Geologische Rundschau*. 1999. V. 87. P. 561–576.
22. *Whitney, D.L., Evans, B.W.* Abbreviations for names of rockforming minerals. // *Am. Mineral.* 2010. V. 95. P. 185–187.

## INTERACTION OF THERMOBARIC AND PETROCHEMICAL PROCESSES DURING THE FORMATION OF CRUSTAL ECLOGITES

**V.V. Fedkin**

*vfedkin@iem.ac.ru*

The formation of crustal eclogite complexes occurs under conditions of constant interaction of successive (joint) processes of metamorphism and metasomatism. Progressive thermobaric processes lead to the formation of contrasting series of rocks in eclogite-glaucophane shale complexes. At the retrograde stage of development, thermobaric processes are joined by the phenomena of metasomatism, causing petrochemical changes in the rocks of the complex. There are two independent lines of allochemical changes associated with the removal of the main chemical elements from the main chemical elements - Fe, Mg, Ca, Al and the replacement of eclogites with carbonate-bearing mineral associations.

*Key words: high-pressure complexes, tectonic melange, coherent processes, metasomatism of crustal eclogites, Maksyutov complex, Atbashi complex, PT parameters of metamorphism.*