

А. И. Русин

УНИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКО- И СВЕРХВЫСОКОБАРИЧЕСКОГО МЕТАМОРФИЗМА ОРОГЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ

Концепция формирования орогенных поясов в связи с циклом Уилсона впервые поставила вопрос о роли метаморфизма высоких давлений в палеогеодинамических реконструкциях. Ранние модели этого метаморфизма У. Дж. Эрнста, Р. Дж. Колмана и др., связывающие РТ-параметры жадеит-глаукофановых фациальных серий с расчетными геотермическими градиентами на конвергентных границах плит, были восприняты тектонистами как ключ для выделения палеозон субдукции в орогенных областях. Исходная нерешенность многих проблем (природа мафит-ультрамафитовых протолитов, механизмы возникновения "сверхдавлений" и быстрой эксгумации с подкорových глубин, несогласованность радиологических датировок и др.) не препятствовала росту популярности субдукционной модели. Ее модификация многократной быстрой обдукцией океанических осадков и ассоциирующих с ними офиолитов на глубоководный желоб и прилегающую плиту, предлагавшаяся в 70-е годы Н. Л. Добрецовым, основывалась на чрезвычайно широком развитии надвиговых структур в францисканской формации Калифорнии и фактически отрицала прямую связь метаморфизма высоких давлений и низких температур с геотермическим градиентом, но не с зонами субдукции.

Геодинамические обстановки проявления глаукофанового метаморфизма в континентальной коре вне связи с офиолитами, формирования эклогит-гнейсовых комплексов и высокобарических лерцолитовых (эклогит-перидотитовых) массивов орогенных областей, не укладывающиеся в рамки субдукционных моделей, длительное время трактовались очень неоднозначно. Представления об особой докембрийской эпохе корового эклогитообразования (с более низкими РТ-параметрами, чем в мантийных эклогитах), оторванной во времени от глаукофанового метаморфизма и обусловившей формирование специфичного фундамента фанерозойских складчатых областей [6], были столь же уязвимы для критики как аргументация преимущественно мантийного генезиса эклогит-перидотитовых массивов и эклогитовых включений в гнейсовых комплексах, транспотированных в кору глубинными надвигами при коллизионных процессах [2, 14], так и обос-

нования корового происхождения эклогитов и пироповых перидотитов гнейсовых комплексов в зонах субдукции [8].

Открытие пироп-коэситовых кварцитов в массиве Дора Майра в Западных Альпах [10] явилось эпохальным событием, показавшим принципиальную возможность возникновения сверхвысоких давлений (более 25 кбар) не только в эклогит-перидотитовых отторженцах верхней мантии, в которых также имелись находки включений коэсита в клинопироксенах [22], но и в сиалическом субстрате. Эти данные, как и накопившиеся к этому времени примеры сохранности в виде включений в гранатах реликтовых высокобарических и гидроксилсодержащих минералов во вмещающих эклогиты комплексах сиалических пород, а также новые радиологические датировки давали основания для вывода, что во многих случаях эклогиты, залегающие в виде будин в гнейсах, и ассоциированные с ними гранатовые перидотиты образовались на одном этапе прогрессивного метаморфизма [5]. Интенсивное исследование высокобарических террейнов Западных и Восточных Альп [11, 18, 21], давшее новые минералогические свидетельства (Fe-Mg-карфолит, коэсит+пироп, кианит+талк и др.) метаморфизма высоких и сверхвысоких давлений метапелитов, выявило, что очень важно, приуроченность этого метаморфизма к формациям палеокраевых частей континентальных плит. Однако геодинамические условия его проявления продолжали трактоваться в рамках субдукционной модели с тем только отличием, что субдукцию испытывают не океаническая кора и осадки глубоководного желоба, а самые внешние участки континентальных окраин. Возможность погружения легких сиалических пород на глубины до 80-100 км постулировалась на основе предполагаемой прямой связи давления лишь с литостатическими нагрузками. Такие заключения вступали в противоречие с более аргументированными палеореконструкциями, дающими примеры "перескакивания" субдукционных зон при закупоривании их более тяжелыми, чем континентальные окраины, островодужными постройками.

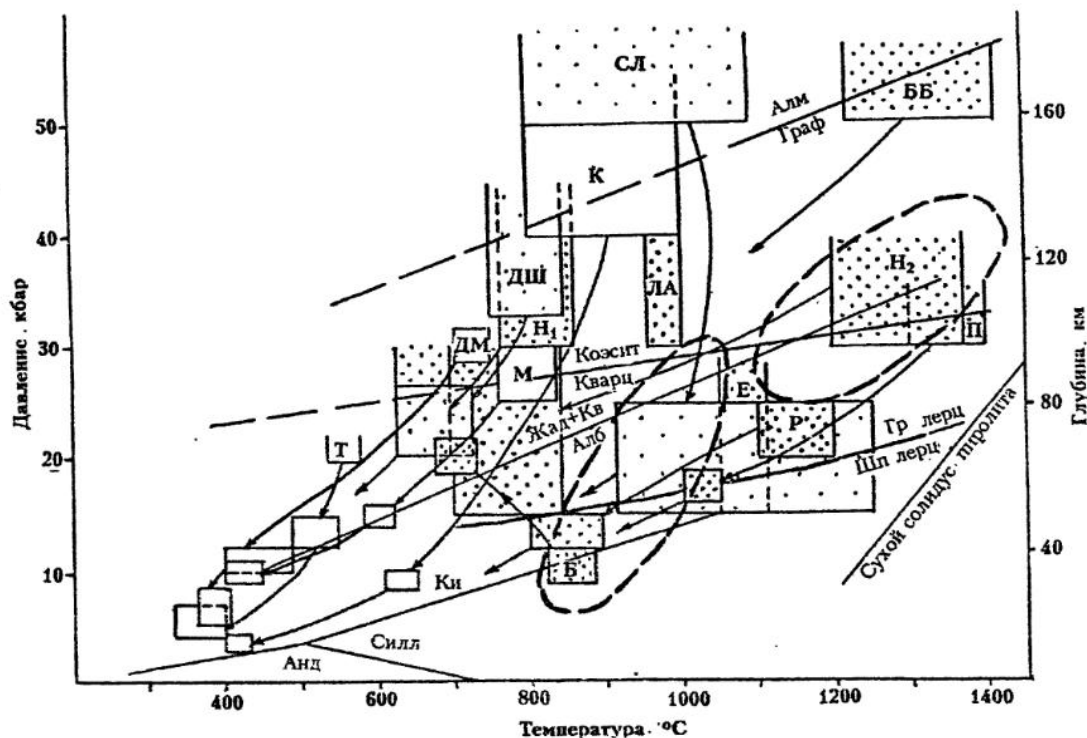
Исследования сверхвысокобарических комплексов метаморфических пород не только с коэситом, но и алмазами [1, 9, 20 и др.] дало основания для еще более высоких оценок давлений (40-50 кбар) в сиалическом субстрате, сопоставимых с оценками давлений для наиболее глубинных мантийных включений в кимберлитах и самого высокобарического из известных ультрамафитового массива Бени Бушера в Мороко [15]. Только литостатические нагрузки могут обеспечить такие давления на глубинах 120-160 км, что и предполагается в популярных моделях "нижнекоровой субдукции", обусловленной коллизией типа континент - континент. Однако максимальное утолщение коры в Гималаях составляет порядка 80 км и, только неведомые силы способны погрузить легкий сиалический материал на большие глубины в мантию. Таким образом, проблема "сверхдавлений", вызывавшая дискуссии при обсуждении природы эклогит-глаукофансланцевых комплексов и "законсервированная" в субдукционной модели, остается актуальной и в генезисе сверхвысокобарических ассоциаций пород.

В современных срезах фанерозойских орогенных областей высоко- и сверхвысокобарический метаморфизм проявляется неравномерно, и геологические закономерности его локализации выявляются лишь в общем плане. Предполагается, что зоны с эклогитами и глаукофановыми сланцами фиксируют важнейшие структурные границы литосферных плит, как например, зона Главного уральского надвига, а глаукофановые сланцы вообще характерны лишь для складчатых поясов уральского или альпийского типа [3]. Действительно, в герцинидах Европы и Аппалачско-Каледонском поясе преимущественно развиты эклогит-гнейсовые комплексы, включающие иногда крупные массивы пироповых перидотитов, однако в орогене Куилинг-Су-Лу в Китае наряду со сверхвысокобарическим высокотемпературным метаморфизмом проявляется и глаукофансланцевый [9]. Эклогит-гнейсовые комплексы в большинстве случаев не связаны с главными сутурами орогенов, не содержат покровов офиолитов [20], а в случаях их пространственного сонахождения [2] характеризуются различными РТ-параметрами метаморфизма. Отсутствие связи с офиолитами и с Главным надвигом отмечается иногда и для глаукофансланцевых комплексов, как например, кваркушского на Урале. Наиболее же универсальная закономерность, подтверждаемая все возрастающим числом публикаций, - это приуроченность проявлений высоко- и сверхвысокобарического метаморфизма к блокам кристаллического фундамента и терригенным формациям палеоконтинентальных окраин.

Формирование континентальных окраин создает основу высоко- и сверхвысокобарических террейнов и является ключевым в вопросе о природе мафит-ультрамафитовых

протолитов. Петро- и геохимические характеристики эклогитов и гранатовых перидотитов в большинстве случаев позволяют связывать их появление в коре с процессами континентального рифтогенеза, что подтверждается и данными радиологических исследований [12, 16, 23]. В палеорифтовых областях, не затронутых метаморфизмом, связанным с коллизионными событиями, сохраняются рой долеритовых даек в терригенно-осадочных толщах, свидетельствующие о внедрении их в условиях литосферного растяжения. В формациях же нижней и средней коры, испытавших пластические деформации, базит-ультрабазитовые тела будинируются, формируя линзовидные включения различных размеров в blastsмилонитовых гнейсах и сланцах. В таких включениях часто сохраняются магматические структуры, а минеральные парагенезисы свидетельствуют о низкобарических условиях кристаллизации. В то же время с процессами континентального рифтогенеза связывается внедрение в кору высоко- и сверхвысокобарических мантийных блоков [14, 17, 19, 23]. Такие мафит-ультрамафитовые блоки, поднимающиеся с различных глубин и часто содержащие минералогические свидетельства декомпрессии, внедряются не только в нижнюю кору (Бени-Бушера, Ронда), но и в рифтогенный чехол (Лерц, Зебергед), оказывая термальное воздействие на вмещающие породы. Механизм перемещения их на высокие гипсометрические уровни при литосферном растяжении недостаточно ясен, но только присутствие мантийных блоков в краевых зонах континентов позволяет с большей надежностью допускать их транспорт глубинными надвигами на современные уровни эрозионных срезов коллизионных орогенов, нежели непосредственное выведение надвигами с мантийных глубин. Характерной особенностью высокобарических базит-гипербазитовых массивов является постоянное присутствие в них признаков высокотемпературных деформаций, указывающих на пластическое течение материала в литосферной мантии, а иногда и в нижней коре. В Западной Норвегии, где, по нашему мнению, обнажается утоненный край континента без перекрывающих рифтогенных осадков, имеются многочисленные примеры как хрупких деформаций габбро-долеритовых тел, залегающих в blastsмилонитовых гнейсах, так и пластически деформированных в условиях фации гранатовых гранулитов лерцолит-габбро-анортозитовых масс (например, в Бергенских Дугах).

Коллизионные процессы, вызывающие укорачивание коры и проявление в отдельных зонах континентальных окраин высоко- и сверхвысокобарического метаморфизма, усложняют исходные взаимоотношения и часто стирают различия между ранними и новообразованными парагенезисами в мафит-ультрамафитовых блоках. Все возрастающее число объектов, в которых во вмещающих сиалических и карбонатных породах в виде включений в цирконах и гранатах обнаруживаются реликтовые парагенезисы, равновесные эклогитам [1, 5, 9, 20], а также новые радиологические датировки эклогитов и пироповых перидотитов [2, 9, 12, 16], показывающие в отдельных случаях возникновение высокобарических парагенезисов в связи с коллизионными событиями, приводят многих исследователей к ошибочным обобщениям о коровой природе всех эклогитов и ассоциирующих с ними ультрамафитов в гнейсовых и сланцевых комплексах. Если же обратиться к конкретным комплексам (см. рисунок), то P-T-t пути их эволюции показывают многоэтапность высоко- и сверхвысокобарического метаморфизма. Декомпрессионная направленность процессов характерна не только для эклогит-перидотитовых массивов, внедренных в низкобарическое окружение, но и для эклогит-гнейсовых и эклогит-сланцевых комплексов. Барические условия метаморфизма мантийных и коровых массивов практически перекрываются, однако температуры в эклогит-перидотитовых блоках, как и глубинных ксенолитах из щелочных базальтов континентальных рифтов, обычно более высоки. Более высокие температуры иногда отмечаются и для ультрамафитовых включений сверхвысокобарических комплексов [9]. Самое же главное, что радиологические датировки высокобарического метаморфизма ранних этапов часто соответствуют не коллизионным событиям, а периоду континентального рифтогенеза. Так, значение около 550 млн лет для коэситовых эклогитов района дер. Шубино в максютовском комплексе Урала сложно увязать с субдукционной моделью [16], так как в это время литосферное растяжение не привело еще к разрыву плит и образованию уральского палеоокеана [13]. Позднедокембрийские датировки эклогит-перидотитовых массивов Западной Норвегии и вмещающих их гнейсов, несомненно, связаны с процессами континентального рифтогенеза, а попытка выделения в них лишь палеозойского этапа высокобарического метаморфизма [12] вряд ли корректна. Наши наблюдения показывают существование нескольких омфацит-гранатовых генераций в этих массивах, и палеозойские датировки



Р-Т-t пути эволюции высоко- и сверхвысокобарических комплексов орогенных областей.

Эклогит-перидотитовые (лериолитовые) массивы: ББ - Бени Бушера в Морокко [15], Н1, Н2 - Западной Норвегии [17,14], Р - Ронда в Испании [20], Е - Центральной и Юго-Западной Европы [2], ЛА - Лепонтинских Альп [11], П - Северо-Пиренейской зоны [23]. Эклогит-гнейсовые комплексы с включениями сверхвысокобарических ультрамафитов: СЛ - Су-Лу [9], ДШ - Даби Шан [20] в Китае. Эклогит-гнейсовые и эклогит-глаукофансланцевые комплексы: К - кокчетавский [1,3], М - максютовский [16], ДМ - Дора Майра [21], Т - Тауэрн [18]. Эклогитизация гранатовых гранулитов: Б - Бергенские Дуги [7]. Пунктиром выделены поля глубинных ксенолитов из щелочных базальтов, по [2]

могут относиться к наиболее поздней из них. В то же время связь высокобарического метаморфизма в Западной Норвегии с коллизионными событиями обоснована достаточно надежно для многих эклогитовых включений в гнейсах и, в частности коронитовых эклогитов, развивающихся по габбро-долеритам, а также классическими описаниями эклогитизации гранатовых гранулитов Бергенских Дуг [7]. Ограниченность объема статьи не позволяет приводить другие примеры дискуссионности интерпретаций радиологических датировок, однако, как и первые находки сверхвысокобарических ассоциаций в сиалических комплексах, сказанное выше позволяет в принципе обосновать необходимость дальнейшего обсуждения проблемы полигенности мафит-ультрамафитовых протолитов высокобарических комплексов.

Предлагаемая модель, объединяющая события континентального рифтогенеза и коллизии и являющаяся дальнейшим развитием концепции формирования складчатых поясов [13], открывает новые подходы в понимании различных аспектов проблемы высоко- и сверхвысокобарического метаморфизма. Кроме заключений о барической полигенности эклогитовых и перидотитовых протолитов метаморфических комплексов, напрашивается вывод об условности традиционного подразделения комплексов на эклогит-гнейсовые и эклогит-глаукофансланцевые. Принадлежность их к формациям кристаллического фундамента и осадочного чехла континентальных окраин позволяет предполагать, что при коллизионных процессах, хотя бы в силу различной водонасыщенности, они должны по-разному реагировать на метаморфизм высоких давлений. Более низкие температуры и давления минеральных равновесий глаукофансланцевых комплексов могут связываться с меньшими глубинами погружения и высокой ролью флюидного свехдавления. Однако, как показывает пример кваркушского комплекса на Урале [4], флюидное свехдавление при глаукофановом метаморфизме может развиваться в надвига-

вых зонах, ни в коей мере не связанных с субдукцией. Обдукция офиолитов при коллизионных процессах может приводить к проявлению в них глаукофанового метаморфизма, как и в сиалических террейнах, поэтому корректность выделения лишь на основе присутствия голубых сланцев палеозон субдукции сомнительна. В настоящее время проблема оценки абсолютных глубин погружения при коллизии континентальных окраин не имеет удовлетворительного решения. Малая вероятность погружения сиалического материала в мантийные глубины с последующим выведением его на уровни современных эрозионных срезов орогенов позволяет допускать возможность повышения давления при метаморфизме за счет тектонических напряжений (стресса) и флюидных сверхдавлений. Иногда предполагается [3], что первый механизм в комбинации с утолщением коры при коллизии реализуется в эклогит-гнейсовых комплексах, а второй - связан с глаукофансланцевым метаморфизмом в зонах субдукции. Более вероятно, что тектоническое и флюидное сверхдавления взаимосвязаны и контролируют проявление высоко- и сверхвысокобарического метаморфизма в коллизионных орогенах. Эклогитизация гранатовых гранулитов Бергенских Дуг в Западной Норвегии в сдвиговых зонах в связи с привнесом водного флюида [7] - наиболее выразительное подтверждение такого предположения.

В заключение следует отметить, что предлагаемая унификация модели высоко- и сверхвысокобарического метаморфизма орогенных областей не дает ответа на вопросы, решение которых вряд ли возможно при современном уровне знаний. Ее цель - привлечь внимание к дометаморфической истории высокобарических террейнов, связанной с процессами континентального рифтогенеза, что позволяет вводить важные ограничения в традиционные модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов М.А. Реликтовые алмазсодержащие ассоциации метаморфических пород Кокчетавского массива: Канд. дис. в виде научного доклада. Новосибирск, 1995. 40 с.
2. Добрецов Н.Л., Ащепков И.В., Карманов Н.С. Особенности минералогии и генезиса пироповых перидотитов и эклогитов в породах кристаллических массивов Центральной и Юго-Западной Европы // Петрология и минералогия базитов Сибири. М.: Наука, 1984. С.50-70.
3. Добрецов Н.Л., Соболев Н.В. Эклогиты и глаукофановые сланцы в складчатых областях // Кристаллическая кора в пространстве и времени. М.: Наука, 1989. С.204-213.
4. Русин А.И., Никифоров О.В. Глаукофансланцевый метаморфизм Северного Урала // Ежегодник-1990 / Ин-т геологии и геохимии УрО РАН. Свердловск, 1991. С.64-66.
5. Соболев Н.В., Шацкий В.С. Проблема генезиса эклогитов метаморфических комплексов // Геология и геофизика. 1986. №9. С.3-11.
6. Удовкина Н.Г. Эклогиты СССР. М.: Наука, 1985. 286 с.
7. Austrheim H. The granulite-eclogite facies transition: A comparison of experimental work and a natural occurrence in the Bergen Arcs, western Norway // Lithos. 1990. N 25. P.163-169.
8. Bryni I., Krogh E., Griffin W.L. Crustal derivation of Norwegian eclogites: a review // Neues Jahrb. Mineral. Abh. 1977. Vol.130, N1-2. P.49-68.
9. Chen X., Wang X., Zhang Q. et al. The High-ultrahigh pressure metamorphic belt in Central and Eastern China: Its formation and P-T evolution and relationship to Tan-Lu fault zone // J.Geomechanics / 1996. Vol.2. P.19-26.
10. Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences // Contrib. Miner. Petrol. 1984. Vol. 86. P.107-118.
11. Ernst W.G. Mineralogic study of eclogitic rocks from Alpe Arami, Lepontine Alps, Southern Switzerland // J.Petrol. 1977. Vol. 18. N3. P. 371-398.
12. Griffin W.L., Bruckner H.K. Rb-Sr and Sm-Nd studies on Norwegian eclogites // Chem. Geol. 1985. Vol.52. N2. P.249-271.
13. Ivanov S.N., Rusin A.I. Model for the evolution of the linear folds in the continents: example of the Urals // Tectonophysics. 1986. N127. P.383-397.
14. Lappin M.A., Smith D.C. Mantle-equilibrated orthopyroxene eclogite pods from the basal gneisses in the selje district, western Norway // J.Petrol. 1978. Vol.19. N 3. P.530-584.
15. Kornprobst J. Le massif ultrabasique des Beni Bouchera (Rif Interne, Maroc) // Contrib. Miner. Petrol. 1969. Vol.23. P.283-322.
16. Lennykh V.I., Valizer P.M., Beane R. et al. Petrotectonic evolution of the Maksyutov complex, Southern Urals, Russia: Implications for ultrahigh-pressure metamorphism // Intern. Geol. Review. 1995. Vol.37. P.584-600.
17. Medaris L.G.Jr. A geothermobarometric investigation of garnet peridotites in the Western gneiss region of Norway // Contrib. Miner. Petrol. 1984. Vol.87. P.72-86.

18. *Miller C.* Alpine high-pressure metamorphism in the Eastern Alps // Schweiz. miner. und petrog. Mitt. 1986. Vol.66, N1-2. P.139-144.
19. *Obata M.* The Ronda peridotite: garnet-, spinel- and plagioclase-lherzolite facies and P-T trajectories of a high-temperature mantle intrusion // J.Petrol. 1980. Vol.21. N3. P.533-572.
20. *Okay A.I., Sengor A.M.C.* Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: the Dabie Shan/Tongbai Shan orogen, China // Tectonics. 1993. Vol.12. N6. P.1320-1334.
21. *Schreyer W.* Metamorphism in crustal rocks at mantle depths: high pressure minerals and mineral assemblages in metapelites // Fortschr. Miner. 1985. Vol.63. N2. P.227-261.
22. *Smith D.C.* Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implication for geodynamics // Nature. 1984. N310. P.641-644.
23. *Vielzeuf D., Kornprobst J.* Crustal splitting and the emplacement of Pyrenean lherzolites and granulites // Earth and Planet. Sci. Lett. 1984. Vol.67. N1. P.87-96.