

ЭКЛОГИТЫ МАКСЮТОВСКОГО КОМПЛЕКСА: ГЕОХИМИЯ И ГЕНЕЗИС

© С.Г. Ковалев,

доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник,
Институт геологии
Уфимского научного центра РАН,
ул. Карла Маркса, 16/2,
450077, г. Уфа, Российская Федерация,
эл. почта: kovalev@ufaras.ru

© Е.О. Пиндюрина,

инженер-исследователь,
Институт геологии
Уфимского научного центра РАН,
ул. Карла Маркса, 16/2,
450077, г. Уфа, Российская Федерация

© Е.А. Тимофеева,

научный сотрудник,
Институт геологии
Уфимского научного центра РАН,
ул. Карла Маркса, 16/2,
450077, г. Уфа, Российская Федерация

В статье представлена детальная геологическая и петрогеохимическая характеристика эклогитов максютовского метаморфического комплекса (ММК). Установлено, что протолитами для различных разновидностей эклогитов (высокотитанистые, средне- и низкотитанистые эклогиты, графитовые эклогиты, эклогиты расслоенного тела) являлись магматические породы основного состава различной формационной природы.

На основе сравнительного анализа петрогеохимических характеристик эклогитов ММК с ранне-палеозойскими структурно-вещественными комплексами Южного Урала показано, что по ряду параметров эклогиты близки к базальтоидам, сформировавшимся в различных геодинамических обстановках, существовавших в регионе в кембрий(?)–ордовик–силурийское(?) время.

Расчеты термодинамических параметров для минеральных парагенезисов эклогитов показали, что при близости температур образования низкотитанистых эклогитов ($t = 680\text{--}700^\circ\text{C}$, $P = 24$ кбар), графитовых эклогитов ($t = 660\text{--}710^\circ\text{C}$, $P = 17\text{--}18,8$ кбар) и эклогитов расслоенного тела ($t = 610\text{--}730^\circ\text{C}$, $P = 16\text{--}18$ кбар; $t = 410\text{--}430^\circ\text{C}$, $P = 12,5\text{--}13$ кбар) для них характерен значительный разброс по давлению. Делается вывод о том, что вариации давления обусловлены тектоническим совмещением тел при эксгумации эклогитов, образовавшихся на различных по глубинности уровнях субдуцирующей плиты.

Ключевые слова: эклогит, максютовский метаморфический комплекс, редкоземельные элементы, протолит, термодинамические параметры

© S.G. Kovalev¹, E.O. Pindyrina², E.A. Timofeeva³

ECLOGITES OF MAKSYUTOV COMPLEX: GEOCHEMISTRY AND GENESIS

^{1,2,3} Institute of Geology
Ufa Scientific Centre,
Russian Academy of Sciences,
16/2, ulitsa K. Marksa,
450054, Ufa, Russian Federation,
e-mail: kovalev@ufaras.ru

The paper contains detailed geochemical characteristics of the Maksyutov eclogite metamorphic complex (MMC). It is found that basic igneous rocks of different origins served as protoliths of different eclogite types (high-Ti, medium-Ti and low-Ti eclogites, graphite eclogites, eclogites in stratified bodies).

A comparative analysis of petrogeochemical characteristics of MMC eclogites and Early Paleozoic structural-material complexes of the South Urals shows that by a number of parameters eclogites are closely allied to basaltoids formed in different geodynamic settings that existed in the region during the Cambrian (?), Ordovician and Silurian (?) periods.

Calculations of thermodynamic parameters for eclogite parageneses show that though formation temperatures of low-Ti eclogites ($t = 680\text{--}700^\circ\text{C}$, $P = 24$ kbar), graphite eclogites ($t = 660\text{--}710^\circ\text{C}$, $P = 17\text{--}18,8$ kbar) and eclogites in stratified bodies ($t = 610\text{--}730^\circ\text{C}$, $P = 16\text{--}18$ kbar; $t = 410\text{--}430^\circ\text{C}$, $P = 12,5\text{--}13$ kbar) almost coincide, they are characterized by considerable pressure variations. It is concluded that pressure variations occur due to tectonic alignment of the bodies on exhuming eclogites formed at different depth levels of the subducting plate.

Key words: eclogite, Maksyutov Metamorphic Complex, rare earth elements, protolith, thermodynamic parameters

Южный Урал является уникальной геологической структурой, в которой присутствуют три разновозрастных эклогитовых комплекса: белорецкий, куртинский и максютовский, представляющих собой информативные объекты для геолого-петрологических исследований процессов высокобарического метаморфизма. Характерной их чертой является высокая доля (до 75–90%) в составе продуктов метаморфизма сиалических пород, представленных кварцитами, слюдяными сланцами и мраморами. Геология и петрология ММК, эклогит-глаукофансланцевого метаморфического комплекса изучены хорошо, но в то же время генетическая природа протолитов эклогитов остается проблемным вопросом. В настоящее время их формирование объясняется изофациальным метаморфизмом магматических пород и вмещающих их осадочных или вулканогенно-осадочных толщ, тектоническим внедрением мантийных эклогитов или непосредственной кристаллизацией эклогитов из магматических расплавов в условиях высоких давлений.

Геологическое положение эклогитов. Несмотря на хорошую геологическую изученность, на закономерности пространственного и стратиграфического размещения эклогитов максютовского комплекса, существует несколько точек зрения. В работах В.М. Чайки с соавторами [1] и В.И. Ленных [2] обосновывается отсутствие стратиграфического контроля в размещении эклогитов. По материалам Г.И. Кириченко [3], Д.Г. Ожиганова [4] и А.В. Клочихина [5] эклогиты приурочены преимущественно к низам разреза ММК. А.А. Алексеевым установлено, что почти во всех эклогитовых полях эклогиты обычно приурочены к одному стратиграфическому уровню — кайраклинской свите. В редких случаях они наблюдаются среди образований юмагузинской свиты и еще реже в низах карамалинской свиты [6]. Здесь необходимо отметить, что, согласно детальным геологическим работам на площади распространения пород

ММК, проведенным в последнее время, его стратиграфия претерпела значительные изменения. В частности, четырехчленное деление комплекса на галеевскую, кайраклинскую, юмагузинскую и карамалинскую свиты заменено на двучленное. Первая единица — нижняя, объединяет метаосадки, включая метакварциты, метаграувакки и метапелиты, среди которых встречаются менее деформированные блоки основного и ультраосновного состава. В целом эта единица отвечает галеевской, кайраклинской и юмагузинской свитам стандартной стратиграфической схемы. Вторая единица — верхняя, отделенная от первой тектоническими контактами, представлена графитовыми кварцитами, метавулканитами с линзами мраморов, метагаббро и линзами серпентинитового меланжа с метародингитами, соответствует карамалинской свите [7].

Эклогиты встречаются в нижней серии в форме пластовых тел мощностью от 10–15 до 60–70 м и протяженностью иногда до нескольких сот метров, но чаще присутствуют в виде будин мощностью до 5–10 м и более мелких тел линзовидной формы размером по длинной оси до 1–2 м, часто пластически деформированных. Обычно будины располагаются изолированно одна от другой, реже — кулисообразно и четкообразно. Выделяются эклогитовые поля — участки концентрации нескольких десятков эклогитовых тел, занимающих в среднем около 5–10% общей площади таких полей [8]. Большинство отдельных тел эклогитов и эклогитовых полей образуют сравнительно узкие (до 1 км, редко шире), субмеридионально вытянутые, иногда прерывистые и изогнутые в северо-восточном или юго-западном направлениях, круто падающие зоны, длина которых достигает 8 км (рис. 1).

По данным С.Г. Самыгина с соавторами [9], внутреннее строение таких зон автономно по отношению к окружающим толщам и отличается исключительно сильной

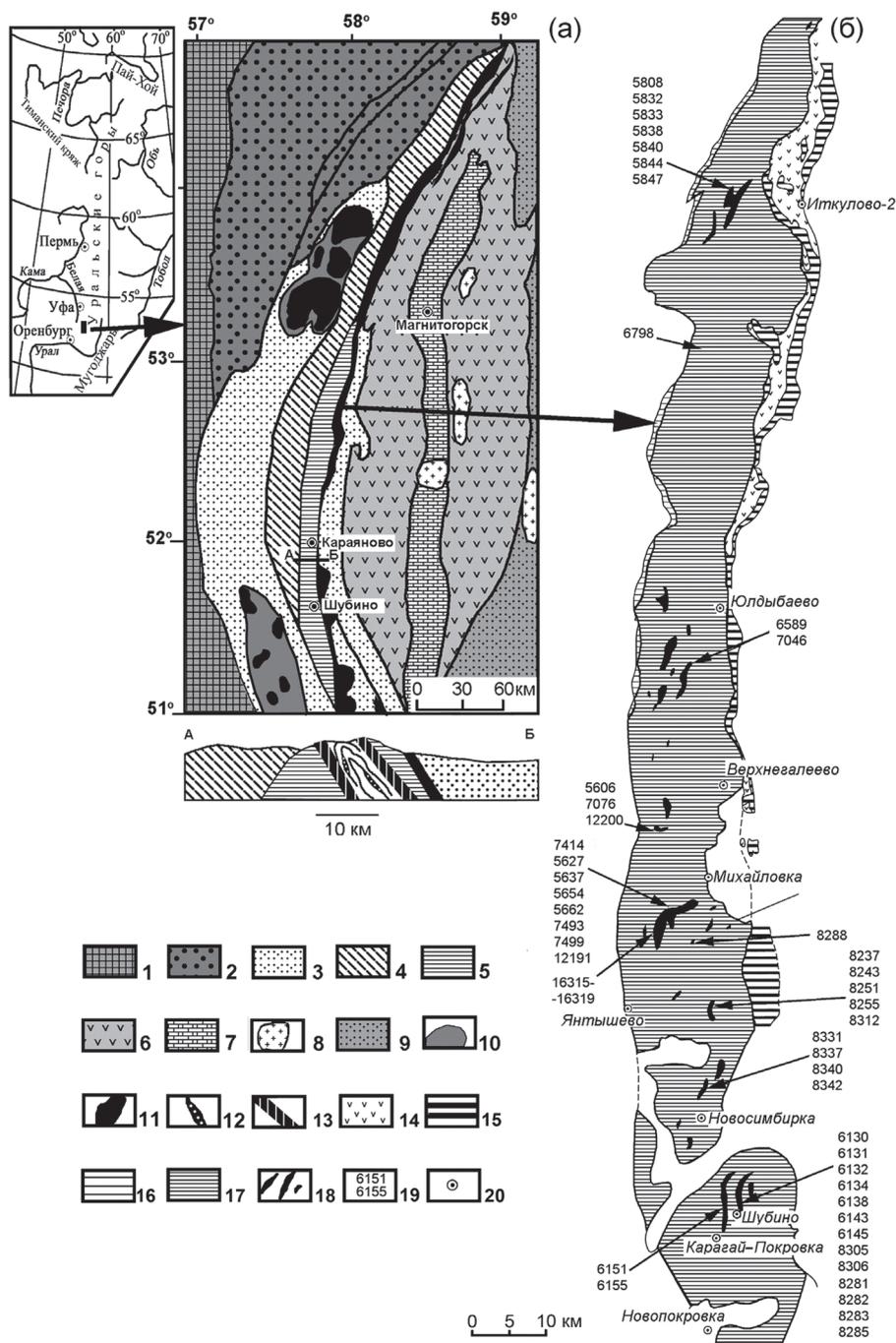


Рис. 1. Геологическая схема Ю. Урала (а) и максютовского комплекса (б) с полями эклогитов по [9–10] с дополнениями и изменениями авторов:

а: 1 – нерасчлененные отложения восточной части Восточно-Европейской платформы; 2 – нерасчлененные рифейские отложения Башкирского мегантиклинория; 3 – нерасчлененные отложения Зилаирского синклинория; 4 – нерасчлененные отложения суванякского комплекса; 5 – нерасчлененные отложения ММК; 6 – нерасчлененные вулканогенно-осадочные отложения Магнитогорского синклинория; 7 – нерасчлененные карбонатные отложения Магнитогорского синклинория; 8 – гранитные массивы; 9 – нерасчлененные отложения Мугоджарского и Ильменского блоков; 10 – нерасчлененные отложения Межкракинской и Сакмарской зон; 11 – гипербазиты; 12 – эклогиты; 13 – отложения юмагузинской толщи; б: 14 – 15 породы зоны ГУР (14 – основные вулканыты, кремнистые сланцы, 15 – серпентиниты, блоки габбро, серпентинитовый меланж); 16 – высокотитанистые метагабброиды юлукского комплекса; 17 – максютовский метаморфический комплекс нерасчлененный; 18 – эклогиты; 19 – номера образцов; 20 – населенные пункты

дислоцированностью, дисгармонией и интенсивным развитием глаукофановых сланцев. Типичны небольшие, разно ориентированные, тесно сжатые складки с круто погружающимися, часто с субвертикальными шарнирами и такими же осевыми плоскостями.

Петрогеохимическая характеристика эклогитов. Эклогиты представляют собой наиболее глубоко метаморфизованные разности ортопород максютовского комплекса с типоморфной минеральной ассоциацией: гранат пиральспитового ряда, пироксен (омфацит), рутил. Неизменные породы отличаются простым и постоянным минеральным составом, среди которых выделяются разновидности. В данной работе эклогиты максютовского комплекса подразделены на низкотитанистые (TiO_2 — до 2%), среднетитанистые (TiO_2 — 2,1–3%) и высокотитанистые разновидности с содержанием TiO_2 свыше 3,1%. Кроме того, в качестве самостоятельных петротипов пород выделяются практически неизученные графитовые эклогиты и эклогиты расслоенного тела.

Несмотря на значительное количество опубликованных материалов по эклогитам ММК, данные об их геохимии очень скудны [11–13].

На диаграммах нормализованных содержаний REE и мультикомпонентных диаграммах (рис. 2) тренды эклогитов с различным количеством TiO_2 в значительной степени различаются между собой. Высокотитанистые разновидности обогащены группой легких и средних редкоземельных элементов, а их усредненный тренд близок к тренду рифтогенных пород.

При этом наблюдается четко проявленная прямая зависимость между титанистостью пород и количеством легких и средних редкоземельных элементов, заключающаяся в том, что для высокотитанистых пород характерны их повышенные количества, и в целом тренды для них характеризуются большей степенью дифференциации REE (La/Yb —

0,90–9,28 — высокотитанистые эклогиты; La/Yb — 0,68–7,49 — средне- и низкотитанистые эклогиты). По распределению редких, рассеянных и некогерентных элементов эклогиты также различаются между собой. Общие тенденции в распределении характерны для крупноионных элементов (Cs, Rb, Ba, K) и Zr. В то же время по содержаниям высокозарядных элементов Th, U, а также P, Sr, Nd и Pb низкотитанистые эклогиты отличаются от средне- и высокотитанистых.

Для графитовых эклогитов характерно максимальное содержание LREE, установленное в породах комплекса, четко проявленная дифференциация редкоземельных элементов (La/Yb — 1,18–7,49) и европиевый минимум (см. рис. 2). Они обогащены U, Th и Pb при пониженных содержаниях Ti, крупноионных элементов (Rb, Zr) и переменных количествах Sr и P. Метаморфизованные породы расслоенного тела отличаются от описанных выше эклогитов. Конфигурация графика нормализованных REE в них близка к хондритовой при некоторой обедненности группой LREE (La/Yb — 0,71–1,09) и слабо выраженном европиевом минимуме (см. рис. 2). При этом наблюдается комплиментарность трендов эклогитов и тальк-энстатит-амфиболовых сланцев, свидетельствующая о формировании тела в процессе внутрикамерной дифференциации.

В целом анализ распределения редкоземельных элементов показывает, что, несмотря на значительные вариации содержаний, которые, вероятнее всего, обусловлены их перераспределением при метаморфизме, подразделение эклогитов максютовского метаморфического комплекса на высоко-, среднетитанистые эклогиты, низкотитанистые эклогиты, графитовые эклогиты и эклогиты расслоенного тела правомерно.

Геохимический материал свидетельствует, что в результате сложной истории формирования комплекса пространственно сближенными оказались эклогиты, образо-

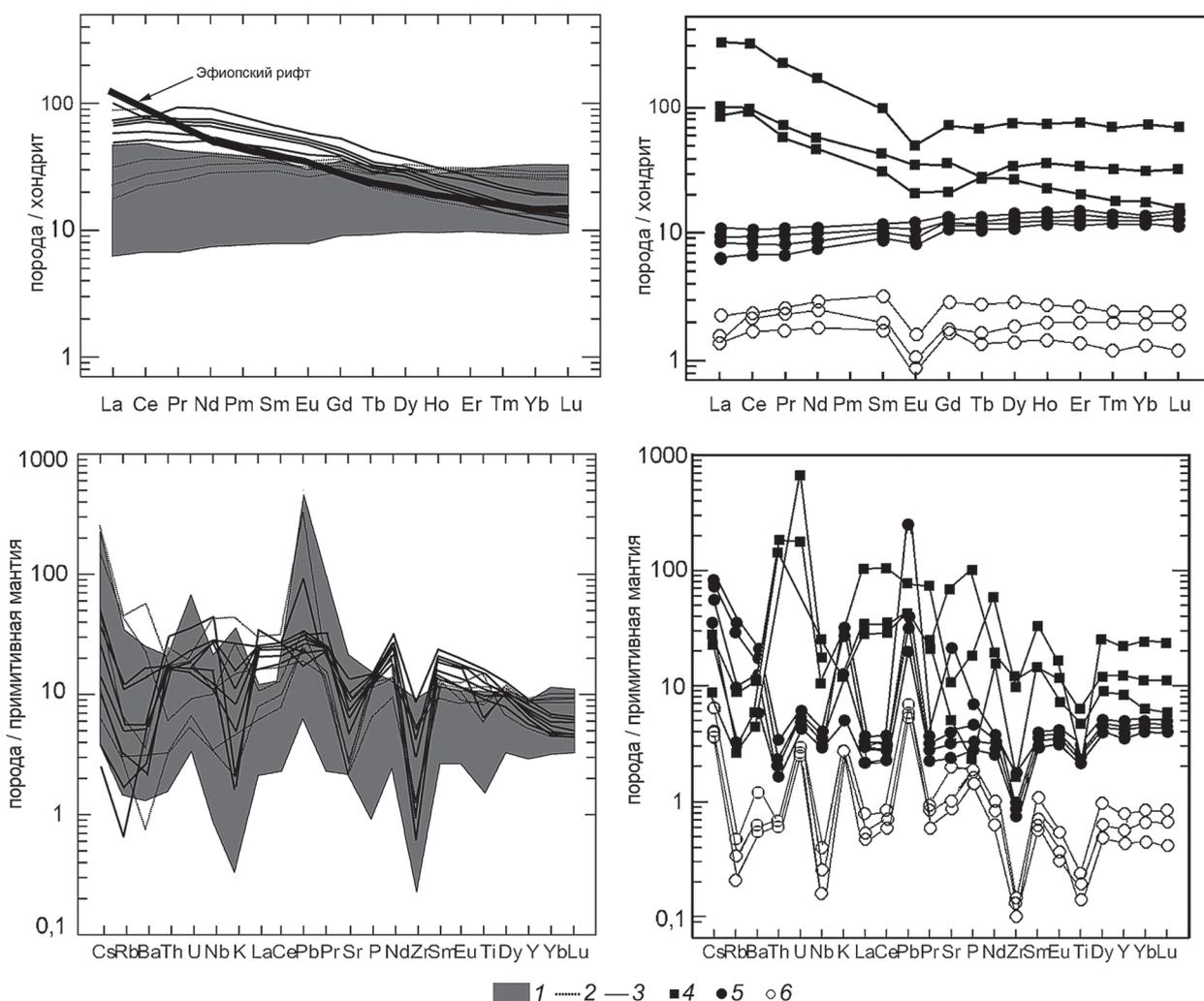


Рис. 2. Нормализованные содержания РЗЭ и мультикомпонентные диаграммы для эколгитов ММК: 1 — эколгиты с содержанием TiO_2 — до 2%; 2 — эколгиты с содержанием TiO_2 — 2,1–3%; 3 — эколгиты с содержанием TiO_2 — от 3,1%; 4 — графитовые эколгиты; 5 — эколгиты расслоенного тела; 6 — тальк-энстатит-амфиболовые сланцы расслоенного тела. Хондрит и примитивная мантия по [14]. Субщелочные оливиновые базальты, вулканический центр Бойна, Эфиопия по [15]

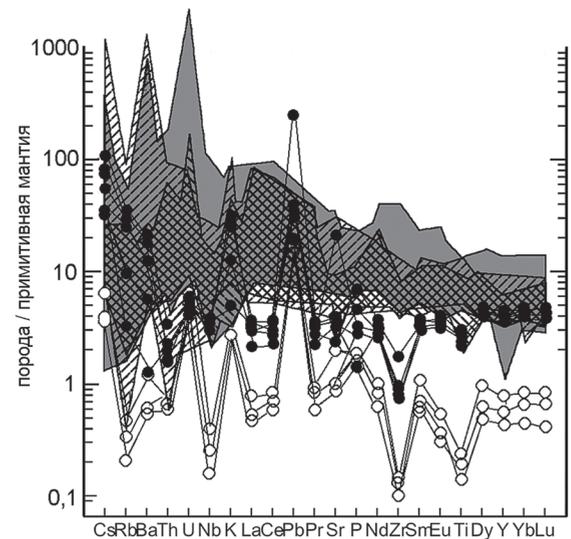
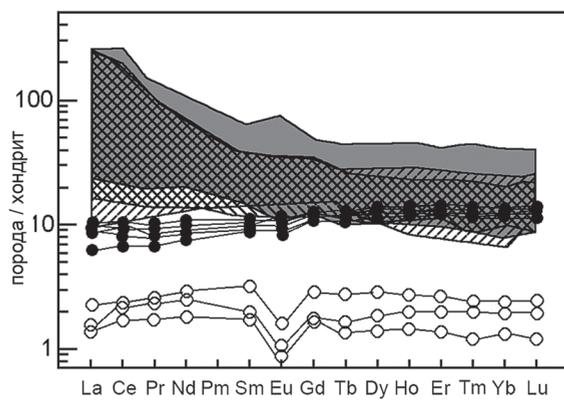
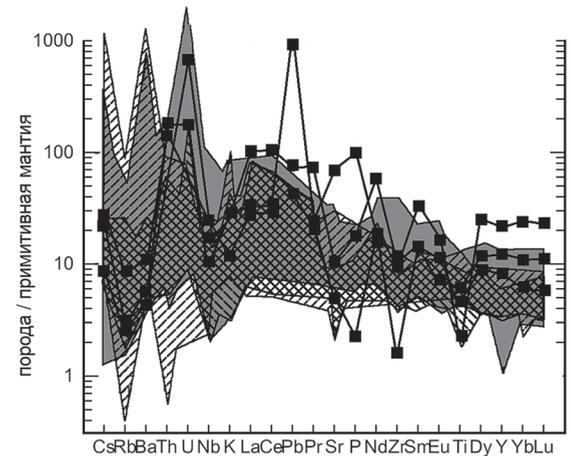
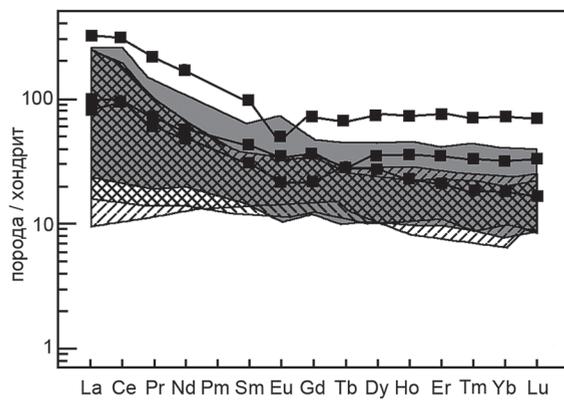
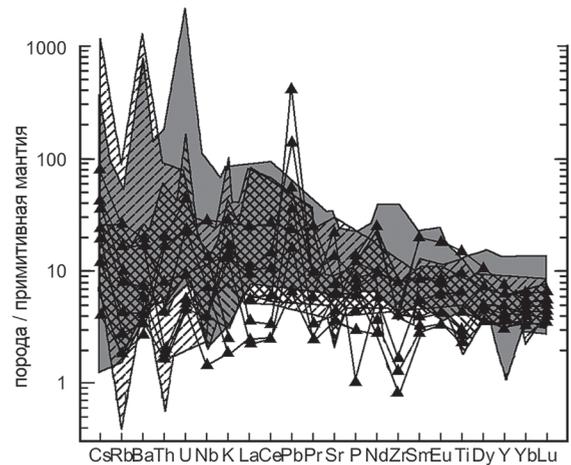
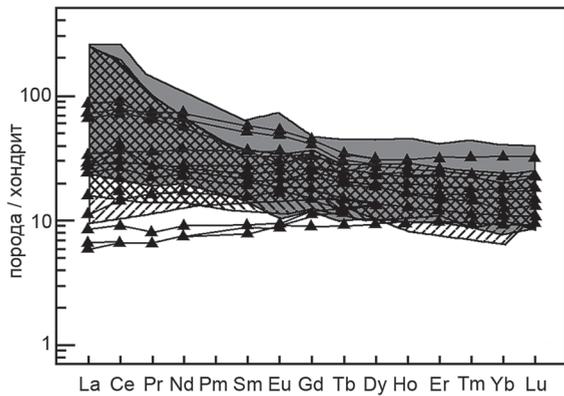
вавшиеся по породам различной формационной природы: «рифтогенным» базальтоидам, базальтам островных дуг и срединноокеанических хребтов. «Экзотические» разновидности (графитовые эколгиты и эколгиты расслоенного тела) представляют собой самостоятельные петротипы пород, формационная принадлежность которых обсуждается ниже.

В качестве возможных протолитов эколгитов максютовского комплекса рассматриваются вулканы раннепалеозойского возраста Эбетинской и Троицкой зон Южного Урала, породы поляковской свиты, а также вулка-

ниты океанической и островодужной стадий развития Сакмарской зоны, заимствованные из работ [16–17].

Обобщенные результаты анализа нормализованных содержаний REE, редких, рассеянных и некогерентных элементов в различных разновидностях эколгитов и раннепалеозойских вулканиках Эбетинской, Троицкой и Сакмарской зон и магматических породах поляковской свиты (рис. 3) свидетельствуют о том, что:

1) подавляющая часть трендов распределения нормализованных содержаний REE и трендов на спайдер-диаграммах в низко-



▲ 1 ■ 2 ○ 3 ● 4 ■ 5 ▨ 6 ▩ 7

Рис. 3. Графики нормализованных содержаний редкоземельных элементов и спайдер-диаграммы для эклогитов ММК и раннепалеозойских магматических пород Ю. Урала: 1 — низко-, средне- и высокотитанистые эклогиты; 2 — графитовые эклогиты; 3 — тальк-энстатит-амфиболовые породы расслоенного тела; 4 — эклогиты расслоенного тела; 5 — поле вулканитов Эбетинской и Троицкой зон; 6 — поле вулканитов поляковской свиты; 7 — поле магматических пород Сакмарской зоны. 5–7 — по [16–17]. Хондрит и примитивная мантия по [14]

средне- и высокотитанистых экологитах предполагается в полях венд-раннепалеозойских пород, за исключением единичных анализов обедненных легкой группой РЗЭ (La/Yb — 0,68–1,1), Nb, P и Zr, которые, вероятно всего, относятся к деплетированным породам океанической коры;

2) средние нормализованные содержания REE в графитовых экологитах превышают аналогичные количества редкоземельных элементов в раннепалеозойских магматических породах. При этом для них характерен европейский минимум и дифференциация в распределении РЗЭ (La/Yb — 1,18–7,49). Кроме того, они отличаются повышенными количествами U, Th и Pb по отношению к раннепалеозойским магматическим породам при значительных вариациях P и Zr;

3) нормализованные содержания REE в основном (экологиты) и ультраосновном (тальк-энстатит-амфиболовые сланцы) горизонтах дифференцированного тела в значительной степени отличаются от графиков раннепалеозойских магматических пород Южного Урала как конфигурацией трендов, так и количеством REE. При общей комплиментарности спайдер-диаграмм для них характерна обедненность Rb, Ba, Nb, Sr, P, Nd, Zr и Ti, что может служить показателем определенной «истощенности» расплава, сформировавшего дифференцированное тело, являвшееся фрагментом океанической коры — «корневой» частью вулканитов палеоокеанического сегмента.

Термодинамические параметры образования экологитов. По данным минералого-термобарометрических исследований, проведенных ранее [18], нижняя единица максютовского комплекса, с хорошо сохранившимися экологит-глаукофансланцевыми минеральными ассоциациями, испытала пиковый метаморфизм при 17 кбар и температуре ~ 570°C. Вместе с тем ряд исследователей допускает, что первоначальный пиковый метаморфизм мог осуществляться в пределах поля

стабильности алмаза [10; 19].

Детальные исследования гранатов из экологитов, выполненные П.М. Вализером [20], позволили установить, что обратная и сложная зональность в гранатах, присутствующая в глаукофанизированных экологитах («экологит-бластомилонитах»), расположенных в тектонических зонах сдвиговой природы, обусловлена несколькими этапами деформаций на заключительных стадиях преобразования пород комплекса. Автором выделяется «ранняя» ассоциация — $T = 652\text{--}761^\circ\text{C}$, $P = 13,7\text{--}20,8$ кбар; «поздняя» ассоциация — $T = 608,2\text{--}630,7^\circ\text{C}$, $P = 11,0\text{--}13,9$ кбар и альмандин-фенгит-кварцевый парагенезис, образовавшийся при $T = 436,0\text{--}506,0^\circ\text{C}$ и давлении $\geq 11,0$ кбар.

Нами была выполнена оценка P-T параметров условий образования экологитов методом мультиравновесной термобарометрии TWEEQU в программе TWQ [21] с базой данных Бермана-92 [22] и использованием дополнительных программ TWQ_Comb и TWQ_View, разработанных Д.В. Доливо-Добровольским. В тех случаях, когда равновесие между минералами ассоциации гранат-клинопироксен-амфибол-плаггиоклаз-кварц не установлено, оценка P-T параметров производилась в программном комплексе TWQ с использованием классических термометров и барометров (термометры: гранат — амфиболовый, гранат-клинопироксеновый; барометры: гранат — амфибол — плаггиоклаз — кварцевый, клинопироксен — плаггиоклаз — кварцевый). Полученные результаты изображены на рис. 4, из которого видно, что низкотитанистые экологиты сформировались при $T = 680\text{--}700^\circ\text{C}$ и $P = 24$ кбар, а графитовые при $T = 660\text{--}710^\circ\text{C}$ и $P = 17\text{--}18,8$ кбар. Расчеты для граната и включенного в него клинопироксена из экологитов расслоенного тела дали интервал значений: $T = 610\text{--}730^\circ\text{C}$, $P = 16\text{--}18$ кбар для центральной части кристалла и $T = 410\text{--}430^\circ\text{C}$, $P = 12,5\text{--}13$ кбар для краевой.

Таким образом, при близости температур

образования минеральных парагенезисов низкотитанистых, графитовых эклогитов и эклогитов расслоенного тела наблюдается значительный разброс по давлению. По нашему мнению, вариации давления обусловлены тем, что в процессе эксгумации комплекса тектонически совмещенными в пространстве оказались эклогиты, сформировавшиеся на различных по глубинности уровнях субдуцирующей плиты.

Геотектонические условия образования эклогитов. Формирование высокобарического максютовского эклогит-глаукофансланцевого комплекса в зоне взаимодействия двух тектонических плит в настоящее время ни у кого не вызывает сомнений. Предложено несколько вариантов одной модели. В.Н. Пучков допускает, что максютовский комплекс имеет аккреционную природу и возник в результате шарьирования палеозойского офиолитового комплекса на сиалический комплекс неясного (возможно докембрийского) возраста, сопровождавшегося глаукофансланцевым метаморфизмом во фронтальной части островной дуги в Магнитогорской зоне. Коллизия этой дуги с микроконтинентом могла обеспечить как образование шарьяжа, так и выведение на поверхность всего комплекса с больших глубин за счет плавучести сиалического блока [23]. В модели Р. Хетцеля максютовский эклогит-глаукофансланцевый комплекс формируется в среднем девоне в результате субдукции протерозойских отложений и палеозойских осадков на океанической коре под Магнитогорскую островную дугу [24]. Согласно модели Д. Брауна с соавторами, окраина Восточно-Европейского кратона состояла из трех слоев континентальной коры: архейские кристаллические гнейсы, протерозойские отложения и маломощный поверхностный слой рыхлых палеозойских отложений [18]. Последние в результате низко-среднетемпературного зеленосланцевого метаморфизма, сформировали суванякский комплекс. Породы фундамента (архейские

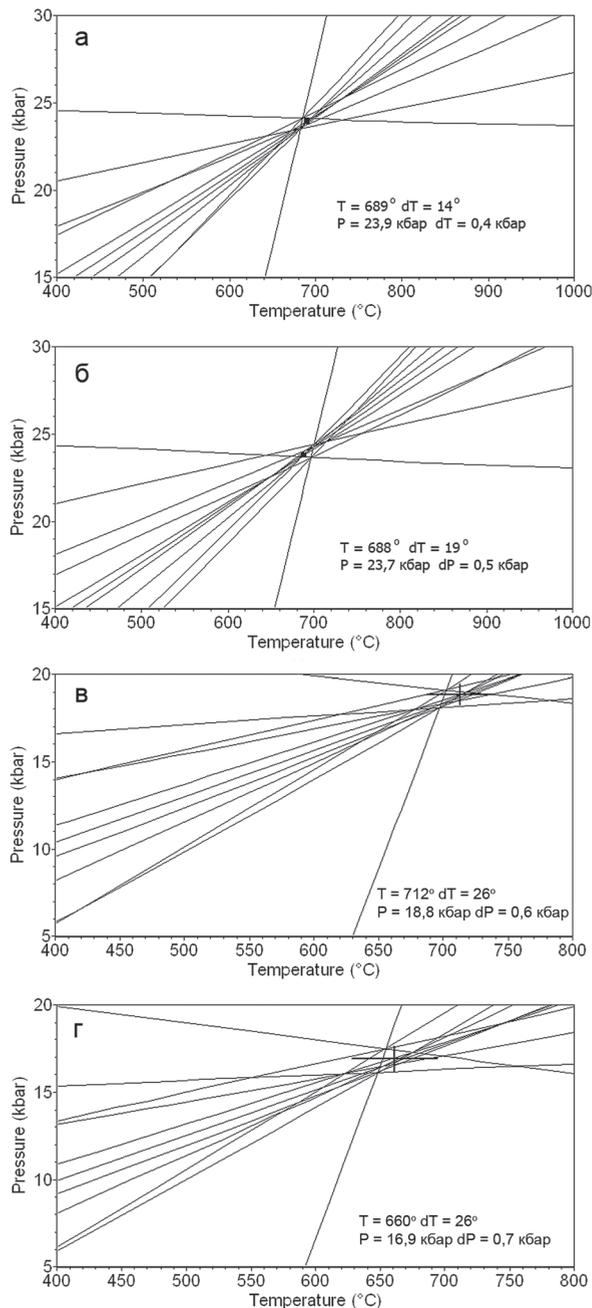


Рис. 4. Мультикомпонентные P–T диаграммы в системе CFMATSH для минеральных парагенезисов (Grt-Pl-Amp-Rt-Ttn-Q) эклогитов ММК. Количество независимых реакций 3. dT и dP — величина схожимости «пучка»: а, б — низкотитанистый эклогит; в, г — графитовый эклогит

кристаллические гнейсы и протерозойские отложения) были субдуцированы на большую глубину и претерпели высокотемпературный и высокобарический метаморфизм.

По нашим представлениям, изображенным на серии диаграмм (рис. 5), процесс

преобразования субстрата, сформировавшего ММК в качестве самостоятельной структурно-вещественной единицы в обобщенном виде можно представить следующим образом:

— в результате субдукции океанической плиты на восток под формирующуюся Магнитогорскую островную дугу на значительной глубине оказались раннепалеозойские породы, слагавшие океаническую кору (см. рис. 5, *a*), представлявшую собой довольно «пестрое» образование, состоящее из структурно-вещественных комплексов кембрий(?)—ордовик—силурийского(?) возраста. Если за условный репер взять графитовые сланцы, относительно широко распространенные в ММК и первоначально представлявшие собой углеродсодержащие породы, то аналоги известны в терригенных типах разрезов раннего ордовика, выделенных в восточной части Эбетинской антиформы, которые состоят из аркозовых песчаников, алевролитов с незначительным объемом кремней и базальтов [25]. Для магматических пород кембрийско—ордовикского возраста характерен широкий разброс геохимических характеристик и как следствие этого многообразие реконструируемых геотектонических обстановок: кембрийские вулканы Сакмарской зоны — рифтовые, океанических островов и островодужные обстановки; ордовикские вулканы поляковской свиты — обогащенные базальты СОХ, островодужные и внутриплитные обстановки [25]. Поэтому вслед за Л.А. Карстен с соавторами [26] мы считаем, что нижняя структурная единица максютовского комплекса «континентального» типа представляет собой верхнюю часть раннепалеозойской океанической коры, в которой тектонически совмещены структурно-вещественные комплексы ранних стадий развития палеоуральского океана. Время «основного» процесса эклогитизации определено достаточно уверенно — 378 ± 6 млн лет [27–30], хотя существуют и более древние датировки — 388 ± 4 млн лет [31].

— в процессе эксгумации пород максютовского комплекса (370 млн лет по [28; 29] произошло не только совмещение верхней серии с нижней, но и широкое развитие деформаций пликативного типа со сдвигами, что привело к совмещению в пространстве эклогитовых тел, сформировавшихся по породам различной формационной принадлежности (см. рис. 5, *b*). Принципиальным следует считать то, что эксгумироваться могли только блоки с преобладающим количеством осадочных пород, которые меняют свои плотностные характеристики при высокотемпературном метаморфизме незначительно. Большая часть океанической коры с преобладанием базальтов различного типа была субдуцирована в мантию, возможно с отрывом нижней части слэба, связанного с нарастанием растягивающих напряжений и дальнейшей эклогитизацией базальтов с увеличением их плотности.

— на конечных этапах процесса эксгумации формируются зоны меланжа, а при сдвиговых деформациях с большими дифференциальными скоростями — «зоны бластомилонитизации» по [20] (см. рис. 5, *в*). Вероятнее всего на этой стадии формируются собственно глаукофановые сланцы и наложенные глаукофановой минерализации на эклогитовые комплексы. Оценка роли натрового метасоматоза, источника флюидов и давления H_2O , в этом процессе детально рассмотрена в ранее опубликованных работах [32]. При этом относительно малый временной интервал между окончанием процесса эклогитизации пород и их выводом на поверхность (фамен — по находкам граната и глаукофана в песчаниках зилаирской серии [33–34]), вероятнее всего, обусловлен тем, что «механический» пересчет давления на глубину погружения пород комплекса в данной ситуации не применим. Более реально предположение о том, что эклогиты сформировались в результате комбинированного давления (литостатическое давление + стресс ± флюидное давление [35]),

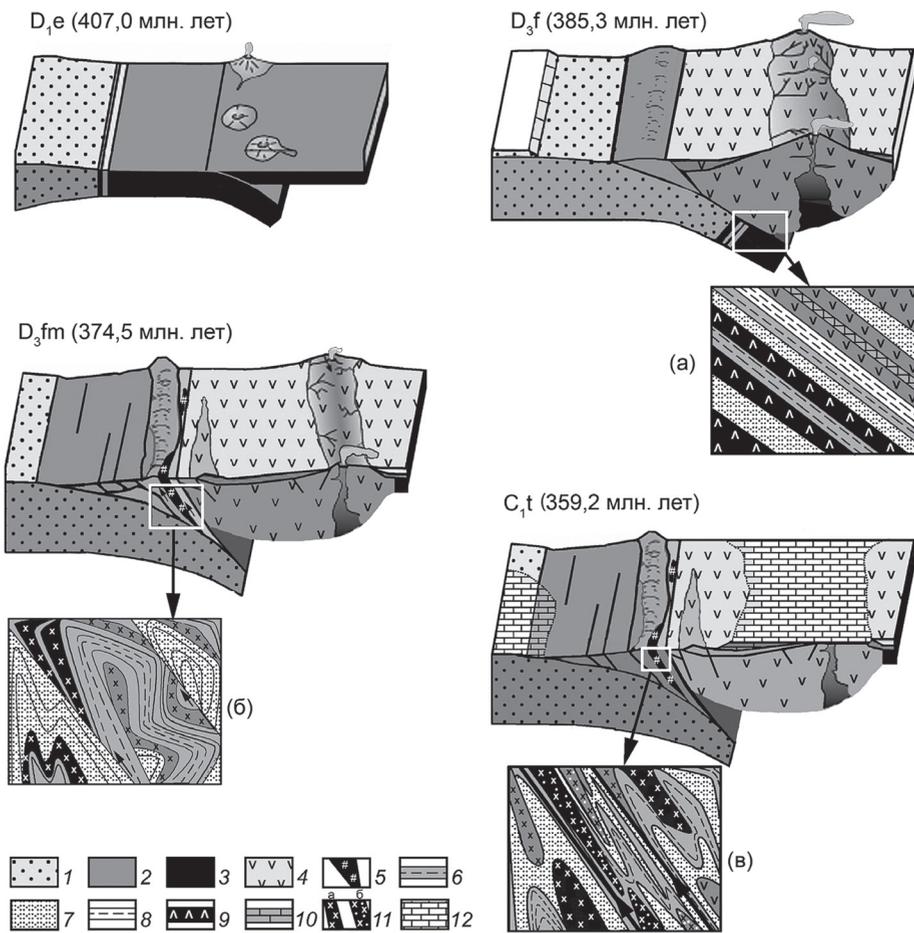


Рис. 5. Геодинамическая реконструкция развития Южного Урала в девонско-раннекаменноугольное время по [18] с дополнениями и изменениями и упрощенные схемы эволюции протолита: 1 — континентальная кора; 2 — осадочные отложения преддугового и задугового бассейнов; 3 — океаническая кора; 4 — островодужные отложения; 5 — максютовский комплекс; 6 — углеродсодержащие сланцы; 7 — песчаники; 8 — глинистые сланцы; 9 — магматические породы ранних стадий развития палеоуральского океана; 10 — карбонатные породы; 11 — эклогиты (а) и глаукофанизированные эклогиты (б); 12 — нерасчлененные раннекаменноугольные отложения

что в значительной степени уменьшает время эксгумации.

Заканчивается «активная» история формирования максютовского комплекса как структурно-вещественной единицы около 300 ± 25 млн лет, когда породы прошли через геотерму 110°C [36].

Выводы. 1. Среди эклогитов ММК установлены разновидности [высокотитанистые, средне- и низкотитанистые эклогиты, графитовые эклогиты, расслоенное эклогит-(тальк-энстатит-амфиболовое) сланцевое тело], геохимическое изучение которых свидетельствует о принадлежности их протоли-

тов к магматическим породам основного состава (базальтоидам) различной формационной природы.

2. Сравнительный анализ геохимических характеристик эклогитов ММК с раннепалеозойскими структурно-вещественными комплексами Ю. Урала показал, что по ряду параметров эклогиты близки к базальтоидам, сформировавшимся в различных геодинамических обстановках, существовавших в регионе в кембрий(?)—ордовик-силурийское(?) время. В результате субдукции океанической коры и последующей эксгумации, пространственно сближенными оказались тела, прото-

литы которых сформировались на начальной стадии и островодужном этапе развития палеоуральского океана.

3. При близости температур образования минеральных парагенезисов низкотитанистых ($t = 680\text{--}700^\circ\text{C}$, $P = 24$ кбар), графитовых эклогитов ($t = 660\text{--}710^\circ\text{C}$, $P = 17\text{--}18,8$ кбар) и эклогитов расслоенного тела ($t = 610\text{--}730^\circ\text{C}$,

$P = 16\text{--}18$ кбар; $t = 410\text{--}430^\circ\text{C}$, $P = 12,5\text{--}13$ кбар) установлен значительный разброс по давлению, вариации которого обусловлены тем, что в процессе эксгумации комплекса тектонически совмещенными в пространстве оказались эклогиты, сформировавшиеся на различных по глубинности уровнях субдуцирующей плиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чайка В.М., Казак А.П., Мирошников А.Е. Зоны повышенной деформации в структуре Южного Урала // Сов. геология. 1962. № 10. С. 13–26.
2. Ленных В.И. Региональный метаморфизм докембрийских толщ западного склона Южного Урала и хребта Урал-Тау. Путеводитель Уралтауской экскурсии. Свердловск: УФАН СССР, 1968. 68 с.
3. Воинова Е.В., Кириченко Г.И., Константинова Л.И. Геологическое строение Орско-Халиловского района. М.: Госгеолиздат, 1941. 131 с.
4. Ожиганов Д.Г. Метаморфические толщи хр. Урал-Тау // Геология СССР. М.: Недра, 1964. Т. 13, ч. 1. С. 78–98.
5. Ключихин А.В. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Лист М-40-IV. М.: Госгеолтехиздат, 1959.
6. Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Галиева А.Р., Тимофеева Е.А. Метаморфическая геология западного склона Южного Урала. Уфа: Гилем, 2006. 212 с.
7. Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
8. Ленных В.И. Эклогит-глаукофансланцевый пояс Южного Урала. М.: Наука, 1977. 160 с.
9. Самыгин С.Г., Милев В.С., Голионко Б.Г. Зона Уралтау: геодинамическая природа и структурная эволюция // Труды ГИНа. Вып. 561: Очерки по региональной геотектонике. М.: Наука, 2005. Т. 1. С. 9–35.
10. Bostick B.C., Jones R.E., Ernst W.G., Chen C., Leech M.L., Beane R.J. Low-temperature microdiamond aggregates in the Maksyutov Metamorphic Complex, South Ural Mountains, Russia // Amer. Mineralogist. 2003, vol. 88, pp. 1709–1717.
11. Ковалев С.Г., Тимофеева Е.А., Пиндюрина Е.О., Ковалев С.С. Геохимия и условия образования эклогитов максютовского комплекса // Геологический сборник № 9. Информ. материалы. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2011. С. 236–245.
12. Волкова Н.И., Френкель А.Э., Буданов В.И., Холодова Л.Д., Лепезин Г.Г. Эклогиты максютовского комплекса (Южный Урал): геохимические особенности и природа протолита // Геохимия. 2001. № 10. С. 1027–1038.
13. Салихов Д.Н. Составы базальтов кембрия, ордовика и раннего силура на Южном Урале // Геологический сборник № 4. Информ. материалы. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2004. С. 106–121.
14. Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for the mantle composition and processes // Magmatism in the oceanic basins. London: Geol. Soc. Spec. Publ., 1989, pp. 313–345.
15. Barberi F., Ferrara G., Santacroce R. A transitional basalt-pantellerite sequence of fractional crystallisation, the Boina centre (Afar rift, Ethiopia) // J. Petrol. 1975, no. 1, pp. 65–78.
16. Косарев А.М., Шафигуллина Г.Т. Геохимические особенности базальтов стадии континентального рифтогенеза Южного Урала // Геологический сборник № 9. Информ. материалы. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2011. С. 153–163.
17. Салихов Д.Н., Алексеев А.А. Эклогиты в метаморфических комплексах Южного Урала: сравнительный геолого-петрологический и петрогеохимический анализ // Геологический сборник № 8. Информ. материалы. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2009. С. 94–107.
18. Brown D., Spadea P., Puchkov V., Alvarez-Marron J., Herrington R., Willner A.P., Hetzel R., Gorozhanina Y., Juhlin C. Arc-continent collision in the Southern Urals // Earth-Science Reviews. 2006, vol. 79, pp. 261–287.
19. Leech M.L. and Ernst W.G. Graphite pseudomorphs after diamond? A carbon isotope and spectroscopic study of graphite cuboids from the Maksyutov Complex, south Ural Mountains, Russia // Geochimica et

- Cosmochimica Acta. 1998, vol. 62, no. 12, pp. 2143–2154.
20. Вализер П.М. Гранат эколлитов высокобарических комплексов Урала // Литосфера, 2011. № 5. С. 53–69.
21. Berman R. Thermobarometry using multi-equilibrium calculations: a new technique with petrologic applications // Canadian Mineralogist. 1991, vol. 29, pp. 833–855.
22. Berman R. Internally-consistent thermodynamic data for stoichiometric minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ // Journal of Petrology. 1988, vol. 29, pp. 445–522.
23. Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 2000. 146 с.
24. Hetzel R. Geology and geodynamic evolution of the high-P/low-T Maksyutov Complex, Southern Urals, Russia // Geol. Rundschau. 1999, vol. 87, pp. 577–588.
25. Рязанцев А.В. Ордовикские структурно-вещественные комплексы западной части Магнитогорской мегазоны и краевых аллохтонов Южного Урала: строение и обстановки формирования: автореф. ...канд. геол. наук. М., 2012. 29 с.
26. Карстен Л.А., Иванов К.С., Пучков В.Н. Новые данные о геологическом строении и метаморфизме эколлит-глагофансланцевого комплекса (Южный Урал) // Ежегодник-1992. Свердловск: УрО РАН, 1993. С. 20–25.
27. Lennykh V.I., Valiser P.M., Beane R., Leech M., Ernst W.G. Proterectonic evolution of the Maksyutov complex, southern Ural Mountains, Russia: implications for ultrahigh-pressure metamorphism // International Geology Review, 1995, vol. 37, pp. 584–600.
28. Beane R.J., Connelly J.H. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, U–Pb and Sm–Nd constraints on the timing of metamorphic events in

- the Maksyutov Complex, Southern Ural Mountains // Journal of the Geological Society. 2000, vol. 157, pp. 811–822.
29. Hetzel R., Romer R.L. A moderate exhumation rate for the highpressure Maksyutov Complex, Southern Urals, Russia // Geological Journal. 2000, vol. 35, pp. 327–344.
30. Glodny J., Bingen B., Austrheim H., Molina J.F., Rusin A. Precise eclogitization ages deduced from Rb/Sr mineral systematics: the Maksyutov Complex, Southern Urals, Russia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002, vol. 66, pp. 1221–1235.
31. Leech M.L., Willingshofer E. Thermal modeling of the UHP Maksyutov Complex in the south Urals // Earth and Planetary Science Letters. 2004, vol. 226, pp. 85–99.
32. Вализер П.М., Ленных В.И. Амфиболы голубых сланцев Урала. М.: Наука, 1988. 203 с.
33. Аржавитина М.Ю. Расчленение зилаирской свиты Магнитогорского мегасинклинария по минеральным компонентам // Докл. АН СССР. 1976. Т. 229. № 3. С. 679–682.
- Алексеев А.А. О некоторых проблемных вопросах геологии позднего докембрия западного склона Урала в связи с изучением магматизма и метаморфизма // Геология докембрия Южного Урала и востока Русской плиты. Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1990. С. 5–19.
34. Puchkov V.N. The collisional origin of the eclogite-glaucophane-schist belt of the Urals // Ofioliti. 1989, no 14 (3), pp. 213–220.
35. Leech M.L., Stockli D.F. The late exhumation history of the ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, south Ural Mountains, from new apatite fission-track data // Tectonics. 2000, vol. 19, pp. 153–167.

REFERENCES

1. Chayka V.M., Kazak A.P., Miroshnikov A.E. *Zony povyshennoy deformatsii v strukture Yuzhnogo Urala* [High-strain zones in the structure of the South Urals]. *Sovetskaya geologiya – Soviet Geology*, 1962, no. 10, pp. 13–26 (In Russian).
2. Lennykh V.I. *Regionalnyy metamorfizm dokembriiskikh tolshch zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala i khrebtta Ural-Tau* [Regional metamorphism of the Precambrian strata on the western slope of the South Urals and the Ural-Tau Ridge]. *Putevoditel Uraltauskoy ekskursii* [Ural-Tau Excursion Guidebook]. Sverdlovsk, UFAN SSSR, 1968. 68 p. (In Russian).
3. Voinova E.V., Kirichenko G.I., Konstantinova L.I.

- Geologicheskoe stroenie Orsko-Khalilovskogo rayona* [Geological structure of the Orsk-Khalilov district]. Moscow, Gosgeolizdat, 1941. 131 p. (In Russian).
4. Ozhiganov D.G. *Metamorficheskie tolshchi khrebtta Ural-Tau* [Metamorphic rocks of the Ural-Tau Ridge]. *Geologiya SSSR* [Geology of the USSR]. Moscow, Nedra, 1964, vol. 13, part 1, pp. 78–98 (In Russian).
5. Klochikhin A.V. *Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200000. List M-40-IV*. [Geological map of the USSR, scale 1:200,000. Sheet M-40-IV]. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 1959 (In Russian).
6. Alekseev A.A., Alekseeva G.V., Galieva A.R., Timofeeva E.A. *Metamorficheskaya geologiya zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala* [Metamorphic geology of the western slope of the Southern Urals]. Ufa, Gilem, 2006.

212 p. (In Russian).

7. Puchkov V.N. *Geologiya Urala i Priuralya (aktualnye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* [Geology of the Urals (topical issues on stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa, DizainPoligrafServis, 2010. 280 p. (In Russian).

8. Lennykh V.I. *Eklogit-glaukofanslantsevyy poyas Yuzhnogo Urala* [Eclogite-glaucophane-schist belt of the Southern Urals]. Moscow, Nauka, 1977. 160 p. (In Russian).

9. Samygin S.G., Milev V.S., Golionko B.G. *Zona Uraltau: geodinamicheskaya priroda i strukturnaya evolyutsiya* [Uraltau zone: Geodynamic nature and structural evolution]. *Trudy GIN* [Transactions of the Geological Institute]. Issue 561. *Ocherki po regionalnoy geotektonike* [Essays on regional geotectonics]. Moscow, Nauka, 2005, vol. 1, pp. 9–35 (In Russian).

10. Bostick B.C., Jones R.E., Ernst W.G., Chen C., Leech M.L., Beane R.J. Low-temperature microdiamond aggregates in the Maksyutov Metamorphic Complex, South Ural Mountains, Russia. *Amer. Mineralogist*, 2003, vol. 88, pp. 1709–1717.

11. Kovalev S.G., Timofeeva E.A., Pindyurina E.O., Kovalev S.S. *Geokhimiya i usloviya obrazovaniya eklogitov maksyutovskogo kompleksa* [Geochemistry and origin of eclogites from the Maksyutov Complex]. *Geologicheskiy sbornik. no. 9* [Collected Articles on Geology. no. 9]. Information Materials. Ufa, DizainPoligrafServis, 2011, pp. 236–245 (In Russian).

12. Volkova N.I., Frenkel A.E., Budanov V.I., Kholodova L.D., Lepezin G.G. *Eklogity maksyutovskogo kompleksa (Yuzhnyy Ural): geokhimicheskie osobennosti i priroda protolita* [Maksyutov complex eclogites (Southern Urals): Geochemical characteristics and the nature of the protolith]. *Geokhimiya — Geochemistry*, no. 10, 2001, pp. 1027–1038 (In Russian).

13. Salikhov D. N. *Sostavy bazaltov kembriya, ordovika i rannego silura na Yuzhnom Urale* [Composition of Cambrian, Ordovician and Early Silurian basalts in the Southern Urals]. *Geologicheskiy sbornik. no. 4* [Collected Articles on Geology. no. 4]. Information Materials. Ufa, DizainPoligrafServis, 2004, pp. 106–121 (In Russian).

14. Sun S.-S., McDonought W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for the mantle composition and processes. In: *Magmatism in the oceanic basins*. London, Geol. Soc. Spec. Publ., 1989, pp. 313–345.

15. Barberi F., Ferrara G., Santacroce R. A transitional basalt-pantellerite sequence of fractional crystallisation, the Boina centre (Afar rift, Ethiopia). *Journal of Petrology*, 1975, no. 1, pp. 65–78.

16. Kosarev A.M., Shafigullina G.T. *Geokhimicheskie osobennosti bazaltov stadii kontinentalnogo riftogeneza Yuzhnogo Urala* [Geochemical characteristics of basalts of the continental rifting stage in the Southern Urals]. *Geologicheskiy sbornik No. 9* [Collected Articles on Geology No. 9]. Information Materials. Ufa, DizainPoligrafServis, 2011, pp. 153–163 (In Russian).

17. Salikhov D.N., Alekseev A.A. *Eklogity v metamorficheskikh kompleksakh Yuzhnogo Urala: sravnitelnyy geologo-petrologicheskiy i petrogeokhimicheskiy analiz* [Eclogites in the metamorphic complexes of the Southern Urals: Geological and petrologic comparative and geochemical analysis]. *Geologicheskiy sbornik. no. 8* [Collected Articles on Geology. no. 8]. Information Materials. Ufa, DizainPoligrafServis, 2009, pp. 94–107 (In Russian).

18. Brown D., Spadea P., Puchkov V., Alvarez-Marron J., Herrington R., Willner A.P., Hetzel R., Gorozhanina E., Juhlin C. Arc-continent collision in the Southern Urals. *Earth-Science Reviews*, 2006, vol. 79, pp. 261–287.

19. Leech M.L., Ernst W.G. Graphite pseudomorphs after diamond? A carbon isotope and spectroscopic study of graphite cuboids from the Maksyutov Complex, South Ural Mountains, Russia, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, vol. 62, no. 12, pp. 2143–2154.

20. Valizer P.M. *Granat eklogitov vysokobaricheskikh kompleksov Urala* [Eclogite garnet of high-pressure complexes in the Urals]. *Litosfera — Lithosphere*, 2011, no. 5, pp. 53–69 (In Russian).

21. Berman R. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: A new technique with petrologic applications. *Canadian Mineralogist*, 1991, vol. 29, pp. 833–855.

22. Berman R. Internally-consistent thermodynamic data for stoichiometric minerals in the system Na₂O-K₂O-CaO-MgO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-H₂O-CO₂. *Journal of Petrology*, 1988, vol. 29, pp. 445–522.

23. Puchkov V.N. *Paleogeodinamika Yuzhnogo i Srednego Urala* [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals]. Ufa, Dauriya, 2000. 146 p. (In Russian).

24. Hetzel R. Geology and geodynamic evolution of the high-P/low-T Maksyutov Complex, Southern Urals,

Russia. Geol. Rundschau, 1999, vol. 87, pp. 577–588.

25. Ryazantsev A.V. *Ordovikskie strukturno-veshchestvennye komplekсы zapadnoy chasti Magnitogorskoй megazonы i kraevykh allokhthonov Yuzhnogo Urala: stroenie i obstanovki formirovaniya* [Ordovician structural-material complexes of the western part of the Magnitogorsk Megazone and marginal allochthons in the Southern Urals: Structure and formational conditions]. Ph.D. thesis abstract. Moscow, 2012. 29 p. (In Russian).

26. Karsten L.A., Ivanov K.S., Puchkov V.N. *Novye dannye o geologicheskom stroenii i metamorfizme eklogit-glaukofanslantsevogo kompleksa (Yuzhnyy Ural)* [New data on the geological structure and metamorphism of eclogite-glaucophane-schist complex (Southern Urals)]. *Ezhгодnik-1992* [Annual-1992]. Sverdlovsk, Ural Branch, RAS, 1993, pp. 20–25 (In Russian).

27. Lennykh V.I., Valiser P.M., Beane R., Leech M., Ernst W.G. Petrotectonic evolution of the Maksyutov Complex, Southern Ural Mountains, Russia: Implications for ultrahigh-pressure metamorphism. *International Geology Review*, 1995, vol. 37, pp. 584–600.

28. Beane R.J., Connelly J.H. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, U–Pb and Sm–Nd constraints on the timing of metamorphic events in the Maksyutov Complex, Southern Ural Mountains. *Journal of the Geological Society*, 2000, vol. 157, pp. 811–822.

29. Hetzel R., Romer R.L. A moderate exhumation rate for the high-pressure Maksyutov Complex, Southern Urals, Russia. *Geological Journal*, 2000, vol. 35, pp. 327–344.

30. Glodny J., Bingen B., Austrheim H., Molina J.F., Rusin A. Precise eclogitization ages deduced from Rb/Sr mineral systematics: The Maksyutov Complex,

Southern Urals, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, vol. 66, pp. 1221–1235.

31. Leech M.L., Willingshofer E. Thermal modelling of the UHP Maksyutov Complex in the South Urals. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, vol. 226, pp. 85–99.

32. Valizer P.M., Lennykh V.I. *Amfiboly golubyykh slantsev Urala* [Blue shale amphiboles of the Urals]. Moscow, Nauka, 1988. 203 p. (In Russian).

33. Arzhavitina M.Yu. *Raschlenenie zilairskoy svity Magnitogorskogo megasinklinoriya po mineralnym komponentam* [Differentiation of the Zilair Formation of the Magnitogorsk Megasyklinorium by mineral components]. *Doklady AN SSSR – Transactions of the USSR Academy of Sciences*, 1976, vol. 229, no. 3, pp. 679–682 (In Russian).

34. Alekseev A.A. *O nekotorykh problemnykh voprosakh geologii pozdnego dokembriya zapadnogo sklonа Urala v svyazi s izucheniem magmatizma i metamorfizma* [On some problematic issues on Late Precambrian geology of the western slope of the Urals in connection with the study of magmatism and metamorphism]. *Geologiya dokembriya Yuzhnogo Urala i vostoka Russkoy plity* [Precambrian geology of the South Urals and eastern Russian Plate]. Ufa, Bashkir Scientific Centre, Ural Division, USSR Academy of Sciences, 1990, pp. 5–19 (In Russian).

35. Puchkov V.N. The collisional origin of the eclogite-glaucophane-schist belt of the Urals. *Ophiolites*. 1989, vol. 14 (3), pp. 213–220.

36. Leech M.L., Stockli D.F. The late exhumation history of the ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, South Ural Mountains, from new apatite fission-track data. *Tectonics*, 2000, vol. 19, pp. 153–167.

