

**ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ/GEOLOGY,
PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERALOGY**DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.7.2>

EDN: LJWRAL

КРИТЕРИИ И ВОПРОСЫ СУБДУКЦИИ МАКСЮТОВСКОГО КОМПЛЕКСА КОРОВЫХ ЭКЛОГИТОВ

Научная статья

Федькин В.^{1,*}, Щипанский А.²¹ ORCID : 0000-0003-2182-1361;² ORCID : 0000-0003-4426-1176;¹ Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского РАН, Черноголовка, Российская Федерация² Геологический институт РАН, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (vfedkin[at]iem.ac.ru)

Предложена: 18.04.2026; Принята: 13.05.2026; Опубликовано: 13.05.2026

Аннотация

На примере Максютовского эклогит-глаукофансланцевого комплекса (МК) на Южном Урале рассматривается новейшая геодинамическая концепция «Правило инициации субдукции» (ИС). Цель: тестирование и адаптация предложенной модели на конкретном геологическом объекте с перспективой использования ее в качестве глобальной схемы возникновения и развития субдукции эклогитовых комплексов. Максютовский комплекс считается уникальным объектом для апробации таких разработок в качестве общих моделей образования и развития процессов субдукции, поскольку основные признаки и критерии ИС представлены на Южном Урале достаточно полно и четко реализуются. Концепция ИС рассматривается в совокупности с геодинамической классификацией океанических базальтов, на основе новых прецизионных геохимических данных о составе высокобарных пород комплекса по широкому спектру элементов.

Выявлен ряд индивидуальных геохимических, петрологических и геодинамических особенностей МК, которые осложняют восприятие Правил ИС в качестве универсальной модели, поднимая ряд спорных вопросов строения и истории развития террейна. Это вопросы времени зарождения и продолжительности существования МК, субдукционной полярности его развития, особенностей эволюции метаморфизма на этапе погружения и эксгумации, источника и происхождения UHP индекс минералов — алмаза и др. На основе новых геохимических данных и предлагаемой модели ИС, впервые для данного орогена определены некоторые дополнительные параметры и условия зарождения субдукционных процессов, расширяющие его главные характеристики: вклад субдукционной (континентальной) компоненты, параметры магма-генерации (по давлению) при мантийно-коровом взаимодействии, циклический характер метаморфизма, мантийно-плюмовое происхождение алмаза и др. Выявленные особенности и дополнительные параметры развития комплекса не влияют на установленные правила субдукции, но требуют дальнейшего изучения и уточнения, поскольку затрагивают принципиальные моменты его формирования.

Ключевые слова: Максютовский комплекс, эклогит, инициация субдукции, высокобарный/ультра-высокобарный (НР/УНР) метаморфизм, геодинамика, P-T тренды субдукции и эксгумации.

**CRITERIA AND QUESTIONS REGARDING THE SUBDUCTION OF THE MAKSYUTOV COMPLEX OF
CORTICAL ECLOGITES**

Research article

Fedkin V.^{1,*}, Shchipansky A.²¹ ORCID : 0000-0003-2182-1361;² ORCID : 0000-0003-4426-1176;¹ D.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy of Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation² Geological Institute RAS, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (vfedkin[at]iem.ac.ru)

Suggested: 18.04.2026; Accepted: 13.05.2026; Published: 13.05.2026

Abstract

On the example of the Maksyutov eclogite-glaucophane schist complex (MC) in the Southern Urals, the latest geodynamic concept, the ‘Rule of Subduction Initiation’ (SI), is examined. Objective: to test and adapt the suggested model to a specific geological site with a prospect of using it as a global framework for the origin and development of subduction of eclogite complexes. The Maksyutov complex is considered a unique site for testing such models as general frameworks for the formation and development of subduction processes, since the main traits and criteria of the SI are sufficiently well represented in the Southern Urals and are clearly manifested there. The SI concept is viewed in the context of the geodynamic classification of oceanic basalts, based on new high-precision geochemical data on the composition of the complex’s high-barite rocks across a broad range of elements.

A number of individual geochemical, petrological and geodynamic traits of the MC have been identified, which complicate the acceptance of the SI Rules as a universal model, raising a number of contentious issues regarding the structure and

developmental history of the terrane. These include the timing of the MC's formation and duration of existence, the subduction polarity of its development, the characteristics of metamorphic evolution during the stages of subduction and exhumation, and the source and origin of UHP index minerals — such as diamond — and others. Based on new geochemical data and the proposed SI model, certain additional parameters and conditions for the initiation of subduction processes have been determined for the first time for this orogen, expanding its main characteristics: the contribution of the subduction (continental) component, magma-generation parameters (in terms of pressure) during mantle-cortical interaction, the cyclical nature of metamorphism, the mantle-plume origin of diamond, and others. The identified features and additional parameters of the complex's development do not affect the established rules of subduction, but require further study and clarification, as they touch upon fundamental aspects of its formation.

Keywords: Maksyutov complex, eclogite, initiation of subduction, high-pressure/ultra-high-pressure (HP/UHP) metamorphism, geodynamics, P-T trends of subduction and exhumation.

Введение

Многолетняя история изучения Максютковского эклогит-глаукофансланцевого комплекса (МК) на Южном Урале и большой фактический материал, накопившийся за это время [1], [3], [4], [5], [8] и [11], [15], [18], [19], [41], создает широкие возможности для тестирования новых геодинамических идей субдукции в сравнении с устоявшимися традиционными представлениями о строении и развитии комплексов коровых эклогитов [25], [29], [32], [37], [40].

«Правило инициации субдукции» (ИС) [56], [57] рассматривает процесс возникновения субдукции в преддуговых бассейнах совместно с образованием офиолитовых комплексов и формированием в них хеостратиграфической диагностической последовательности состава базальтов офиолитовой части комплекса с определенным изменением содержания в них редких и рассеянных элементов, в том числе высоко-зарядных (HFSE) и литофильных (LILE). Являются ли выявленные закономерности общими для эклогит-глаукофансланцевых комплексов или они носят случайный характер, отражающий лишь специфику конкретного террейна? Ответ на этот вопрос определил главную цель данного исследования.

Апробация концепции «Правило инициации субдукции» проведена с учетом геодинамической классификацией океанических базальтов [42] и новых прецизионных геохимических данных о составе высокобарных пород комплекса по широкому спектру химических элементов, включая редкие, рассеянные, РЗЭ, в том числе высокозарядные (HFSE) и литофильные (LILE) элементы [36]. Геодинамическая/геохимическая классификация океанических базальтов позволяет оценить значение и роль крупных структурных фрагментов земной коры в качестве участников субдукционного процесса, определить их позицию в этом процессе и магмогенерирующую роль как источника исходного материала, их взаимодействие между собой и с мантией Земли. Новые геохимические данные по составу представительных образцов эклогитов и Grt-Cpx ассоциаций дает возможность установить единый независимый контроль над изменением химического состава высокобарных пород в процессе развития комплекса.

В концепции ИС особое внимание уделяется составу исходного базитового расплава образующегося при формировании офиолитового комплекса, и хеостратиграфической последовательности его изменения, как одного из диагностических признаков ИС. В Максютковском комплексе эти вопросы специально не изучались, что создает определенные трудности в оценке этого важного критерия. В рамках данной работы авторы не ставили перед собой задачу дополнительных исследований изучения metabazites офиолитовой части МК. Для апробации модели ИС достаточно было сопоставить имеющиеся геохимические данные по составу высокобарных пород из разных частей МК по широкому спектру химических элементов, чтобы оценить эволюционные тенденции изменения их состава в свете правил ИС. Высококачественные анализы мафитовых пород МК, выполненные в геоаналитической лаборатории университета штата Вашингтон [32], во многом решили эту проблему и дали возможность определить ряд важных геохимических показателей.

Геологическая позиция максютковского комплекса

Максютковский эклогит-глаукофансланцевый комплекс расположен в юго-восточной части западного склона Южного Урала в бассейне р. Сакмара и представляет собой меланжевый пояс метаморфитов, тектонически зажатый между преимущественно эдиакарийской толщей метатеригенных пород суваньянской толщи на западе и меланжем зоны Главного Уральского разлома (ГУР) на востоке (рис. 1). В пределах комплекса традиционно выделяют две *структурно-вещественные* (литолого-тектонические) *единицы* (units) [2], [29], [41], хотя генетические образы этих «свит» представляются излишними.

Нижняя, «субконтинентальная» эклогит-глаукофансланцевая единица включает глаукофановые и полевошпат-слюдистые сланцы, кварциты с линзами, будинами и прослоями эклогитов, гранат-пироксеновых и реже оливин-энстатитовых пород.

Верхняя, «офиолитоподобная» единица, состоит из графитовых кристаллических сланцев и метаграувакков, иногда включает тела и линзы серпентинитов, мраморов и metabazite пород, с лавсонитовыми эклогитами и метальтрамафитами.

Промежуточная, Юмагузинская единица метаосадочных пород неясного происхождения входит в состав нижней серии, слагая ее большую часть. Она включает кварциты и слюдистые сланцы с дистальными турбидитами, редкими включениями гранат-пироксеновых пород и эклогитов.

Возраст протолита — докембрийский, самые древние датировки (по Zr, видимо, из древних источников сноса) охватывают интервал от 1,1–1,4 до 2,35–2,84 млрд лет [1].

Существуют две точки зрения на проблему формирования Максютковского комплекса. По одной из них эклогиты МК образовались при интенсивном UHP метаморфизме 550–600 млн лет тому назад [40]. Заключительный этап HP метаморфизма высокого давления (320–385 млн лет) произошел одновременно с метаморфизмом офиолитовой части



комплекса [6]. Согласно второй точке зрения, эклогиты образовались из океанических базальтов среднего девона (370–380 млн лет назад). Некоторые исследователи видят в этом двухэтапное развитие террейна [1], [20]. Впрочем, в последнее время по этому поводу среди исследователей был заключен своеобразный консенсус о возрасте завершающего HP этапа метаморфизма – ~390 млн лет.

Параметры эклогитового метаморфизма, судя по находкам в породах комплекса микровключений алмаза и коэсита [23], оценивались в области их устойчивости при T до 650–700 °С и P до 2,8–3,2 ГПа [40]. В данной работе мантийно-коровая природа происхождения алмаза показывает, что субдукционный проградный метаморфизм МК заканчивается на глубине ~ 90–120 км в условиях $P < 3,2–3,5$ ГПа и $T < 700–790$ °С на пределе области устойчивости алмаза. Таким образом, Максютковский комплекс, по-видимому, не отвечает критериям для уверенного отнесения его к комплексам сверхвысокого (UHP) давления.

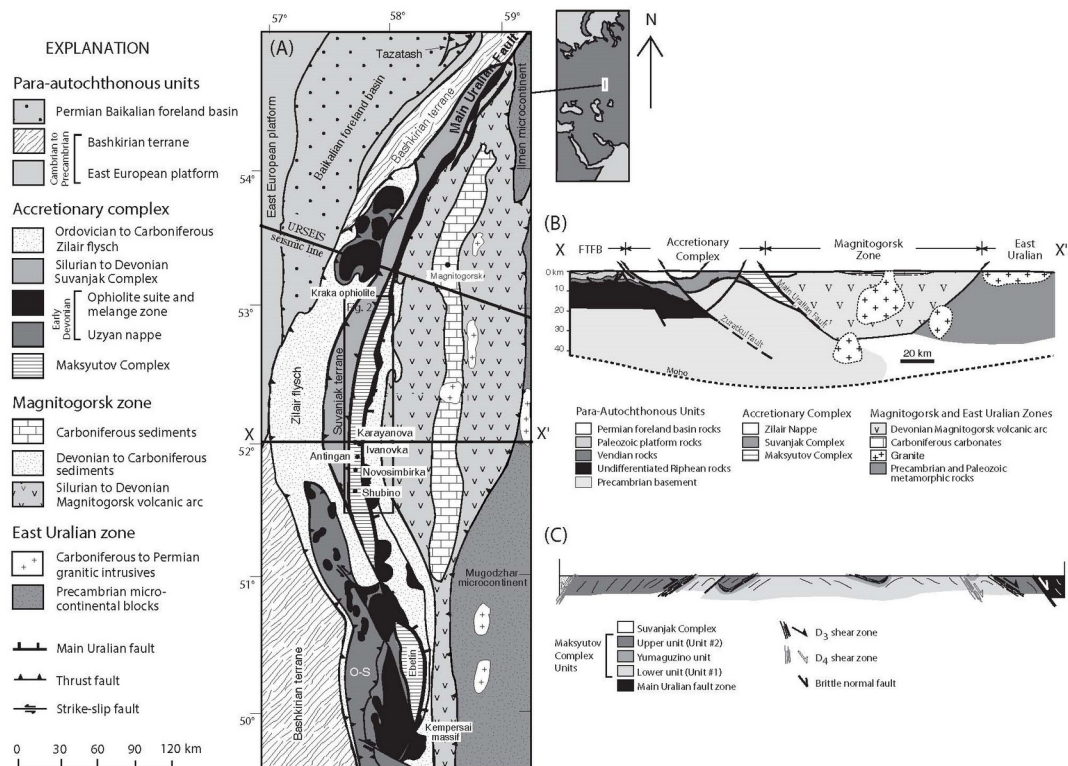


Рисунок 1 - Геотектоническая карта Южного Урала, Россия

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.7.2.1>

Примечание: адаптация [37], разрез URSEIS (Уральский эксперимент по сейсмическому отражению и комплексные исследования), который обеспечивает важный глубинный контроль для Южного Урала

Материалы и методы исследований

В процессе многолетнего изучения высокобарных пород Максютовского комплекса накопился большой фактический материал и выработана определенная методика исследовательского процесса, детально описанная в предыдущих публикациях [18], [32]. Для изучения физико-химических условий метаморфизма и преобразования эклогитовых высокобарных ассоциаций использовался традиционный петрологический подход катионообменной термобарометрии [12]. Химический состав минералов, их неоднородность и зональность изучались методом электронно-зондового рентгеноспектрального анализа (ЭЗРСА) в Институте экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН. Основное внимание было уделено изучению сложной разнонаправленной зональности граната, как наиболее информативного и чувствительного минерала к изменению параметров метаморфизма. Изучались как крупные порфиробластические зерна контактирующих минералов, так и мелкие новообразованные кристаллы в основной массе породы, зерна с прямой и обратной зональностью, а также всевозможные варианты инверсионной зональности. Микрозондовый анализ проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega II XMU (Tescan, Чехия), оснащенного системой для рентгеноспектрального микроанализа INCA Energy 450 с энергодисперсионным (INCAx-sight) рентгеновским спектрометром (Oxford Instruments, Англия). Диапазон определяемых элементов от Be до U. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток поглощенных электронов на Co 0.3 нА, время анализа в точке 70 с. Использовались аналитические линии и стандарты ИЭМ РАН, применяемые при ЭЗРСА минералов.

Для детального исследования были выбраны наиболее изученные и информативные участки в южной части комплекса от д. Шубино на юге до бывшей деревни Караяново на севере (рис. 2). 18 представительных образцов УНР пород из нижней структурно-тектонической единицы Максютовского комплекса были проанализированы методами XRF, ICP-MS в геоаналитической лаборатории университета штата Вашингтон на порообразующие, редкие и редкоземельные элементы. Один образец (обр. 158 и 158R) был проанализирован дважды как две независимые пробы, чем была подтверждена высокая воспроизводимость результатов анализа. Данные XRF и ICP-MS анализов пород, а также нормативные составы минералов приведены в дополнительных материалах [18].

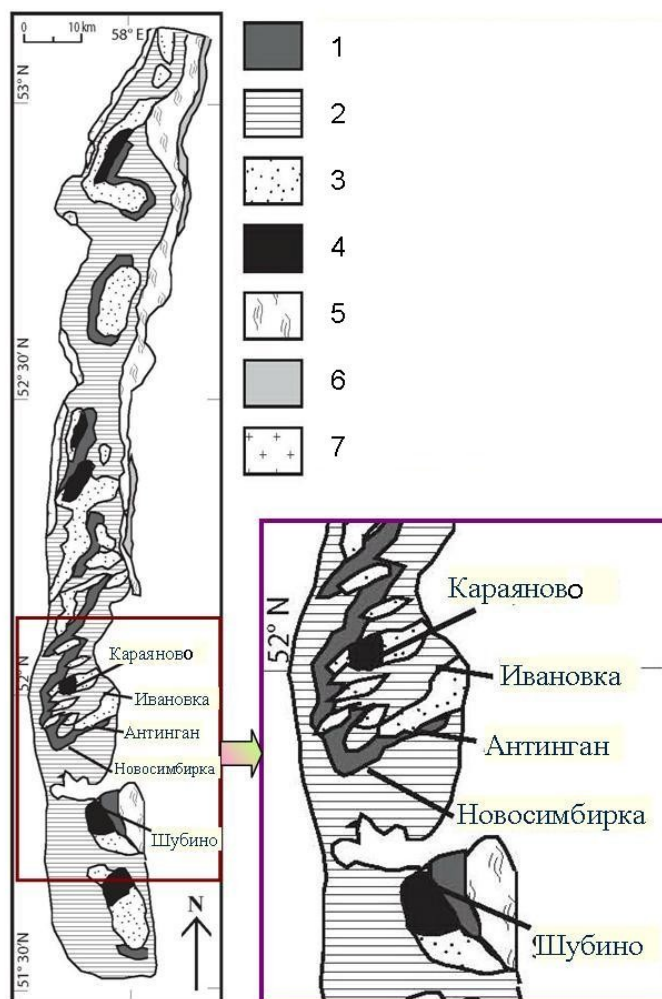


Рисунок 2 - Литолого-тектонические единицы Максютковского комплекса и участки опробования в южной части террейна

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.7.2.2>

Примечание: источник [2], условные обозначения: 1 – верхняя единица (№ 2) с серпентинитовым меланжем и лавсонитсодержащими метародингитами; 2 – сланцы с фенгитовыми кварцитами (юмагузинская толща); 3 – нижняя единица (№ 1) с кварцитами и сланцами; 4 – эклогиты нижней единицы (№ 1); 5 – серпентинитовый меланж с блоками габбро, диабаз и спилитов; 6 – девонские сланцы; 7 – габбро и диабазы

Для оценки P-T условий образования эклогитов и температур Grt-Cpx равновесия были выбраны наиболее популярный гранат-клинопироксеновый геотермометр Пауэлла [47] и усовершенствованный минералогический Grt-Cpx-Pl-Qz геобарометр [10]. Основное внимание было уделено относительным изменениям температуры при кристаллизации зональных зерен граната, соотношению их между собой и отдельными зёрнами в матрице породы. Эти данные позволяют оценить характер эволюционного P-T тренда кристаллизации пород в ходе формирования комплекса.

Гранат практически во всех изученных образцах присутствует в виде крупных порфиробластовых выделений и в форме более мелких, часто идиоморфных кристаллов в основной массе породы. Везде гранат показывает свою химическую и морфологическую неоднородность. Химическая зональность крупных гранатовых зерен в большинстве исследованных образцов имеет разнородную (как прогрессивную, так и регрессивную) направленность, регистрируя противоположные температурные тренды метаморфизма. В некоторых случаях следы этих процессов содержатся в одном образце или, что более интересно, даже в одном зерне граната.

Клинопироксен в виде небольших (0,1–0,4 мм) кристаллов короткопризматического облика присутствует в основной массе породы вместе с глаукофаном, эпидотом, хлоритом, мусковитом и кварцем. Включения пироксена в гранате по составу не отличаются от матричных зерен, которые также используются для определения P-T параметров

Grt-Cpx-Ab-Qz равновесия. Состав клинопироксена в породах МК близок к омфациту и в пределах отдельных образцов меняется в интервале $X_{Jd} \sim 0,2-0,40$, а в пределах одного зерна не превышает 0.30-0.35 мольной доли жадеитового компонента. Массовые наблюдения за составом фаз в Grt-Cpx паре показали, что РТ тренды образования эклогитовых ассоциаций в основном определяет химическая зональность граната при вполне инертном поведении омфацита

Плагиоклаз, необходимый для оценки давления в равновесии с гранатом и клинопироксеном, встречается лишь в относительно низкобарных породах комплекса, подвергшихся ретроградным вторичным изменениям. Включения плагиоклаза в крупных зернах граната существенно облегчают задачу интерпретации условий метаморфизма в процессе формирования породы. Плагиоклаз меняет свой состав от почти чистого альбита до Ab_{5-7} .

Оценка состава на микрозонде занижает содержание натрия в минерале из-за его потери в процессе съемки, и фактически измеренный состав плагиоклаза не превышает трех единиц анортитового компонента. Эта погрешность, естественно, занижает оценку равновесного давления в Grt-Cpx-Pl-Qz ассоциации в пределах 0,1–0,2 ГПа. Но при относительном сравнении величин давления такие отклонения в составе плагиоклаза принципиального значения не имеют.

Результаты исследований

Максютовский комплекс считается уникальным объектом для тестирования и адаптации концепции ИС в качестве общей модели образования и развития субдукции коровых эклогитов. Основные критерии и признаки ИС в МК представлены достаточно полно и в целом выполняются.

1. Время формирования НР-УНР канала субдукции МК, и его метаморфизма совпадает с появлением Магнитогорской внутриокеанической островной дуги в раннем девоне [13], [25], т.о., *выполняется временное сочетание исходных этапов ИС.*

2. Две основные структурно-литологические единицы террейна – нижняя эклогитовая и верхняя офиолитовая, объединены в единый структурно-литологический пакет комплекса [41], что подтверждает *пространственное сочетание эклогитов и офиолитов.*

3. Геохимические данные по основным, редким и рассеянным элементам комплекса, в том числе высоко-зарядным (HFSE) и литофильным (LILE), в общих чертах фиксируют *хемостратиграфическую диагностическую магматическую последовательность* состава metabазальтовых пород офиолитовой части МК, хотя некоторые моменты этого правила в МК требуют уточнения.

4. Единым каналом субдукции высокого давления и эксгумации комплекса является сам МК [13], [29].

Однако, индивидуальные особенности комплекса, его геохимические, петрологические и геодинамические характеристики, осложняют восприятие правил ИС в роли общей схемы возникновения и развития субдукционных процессов. Даже «уникальные условия» Максютковского комплекса оставляют ряд спорных вопросов, связанных, скорее всего, с тектоникой орогена, чем с общими критериями ИС. Наиболее спорные и интересные из них рассмотрены и обсуждаются ниже. Они не затрагивают существа проблемы инициации субдукции, но дополняют полученные закономерности характерными чертами данного комплекса.

4.1. Геохимические данные по главным, рассеянным и РЗ элементам

Новые геохимические данные о составе представительных образцов высокобарных пород МК [32] достаточно традиционны. Они подчеркивают основные признаки ИС, характеризуют условия субдукции, создают некие предпосылки для ее возникновения и развития. *По основным породообразующим элементам отмечается большой разброс составов эклогитов* комплекса. Все образцы попадают в область низко-калиевых базальтов, и лишь некоторые из них соответствуют андезито-базальтам с разбросом содержаний SiO_2 : от 41,8 до 61,12 вес %. Тенденции фракционирования отражают переход составов от базальтов к андезитам. Соотношение щелочей и кремнезема демонстрирует типичные дифференциационные тренды *метаморфизма* протолита высокобарных пород комплекса [35].

В координатах АФМ эклогиты МК образуют *единый тренд эволюции базальтов от толеитовой до известково-щелочной серий*, включая как деплетированные, так и обогащенные составы (рис. 3).

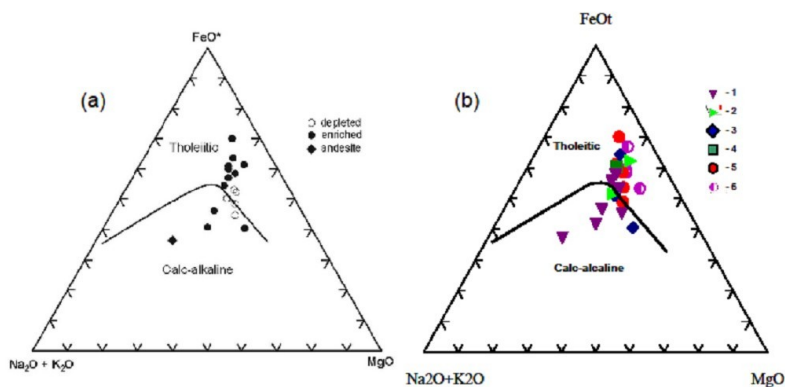


Рисунок 3 - Диапазон составов эклогитов Максютковского комплекса, отображенный на диаграмме АСМ
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.7.2.3>

Примечание: (а) – валовые составы пород; (б) – положение проанализированных образцов из разных местонахождений: 1 – Караяново; 2 – Ивановка; 3 – Новосимбирка; 4 – Антинган; 5 – Шубино [18]; 6 – Шубино [2]

Подобные соотношения базальтов толеитового и известково-щелочного составов могут возникать непосредственно при зарождении субдукции. Так, в Палеогеновых офиолитах Новой Зеландии, состоящих в основном из толеитового базальта, доля известково-щелочных лав составляют ~ 25% [56]. Аналогичные соотношения составов metabазальтов в МК указывает на смену мантийных источников от N-MORB до OIB типа, соответственно. Другой важной причиной такой трансформации мог быть приток флюида и смена кислородного режима в молодых субдукционных структурах в процессе ИС.

Перечисленные особенности состава эколгитов МК и весьма близкие соотношения в изменении состава базальтов современных и зрелых субдукционных систем, подтверждают эволюционный тренд составов исходных мантийных расплавов — один из важных признаков «Правил инициации субдукции».

Состав эколгитов МК по содержанию несовместимых элементов в целом варьирует вблизи среднего состава MORB, незначительно меняясь в ту или другую сторону: в сторону более обедненных пород типа N-MORB или в сторону обогащенных преддуговых базальтов OIB. При этом соотношение деплетированных и обогащенных составов изученных образцов на всех обследованных участках комплекса сохраняется в пропорции 1:2, что говорит о едином характере изменений условий субдукции. Некая щелочная ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) дифференциация проанализированных пород участка Караяново в сторону их повышения (рис. 3b) трактуется как эволюция зрелых дуговых структур к конечной щелочности [56].

Валовые составы UHP пород по редким и рассеянным элементам на дискриминационных диаграммах перекрывают поля базальтов океанических островов (OIT, OIA), поля N-MORB и E-MORB базальтов, островодужных толеитов (IAT) (рис. 4).

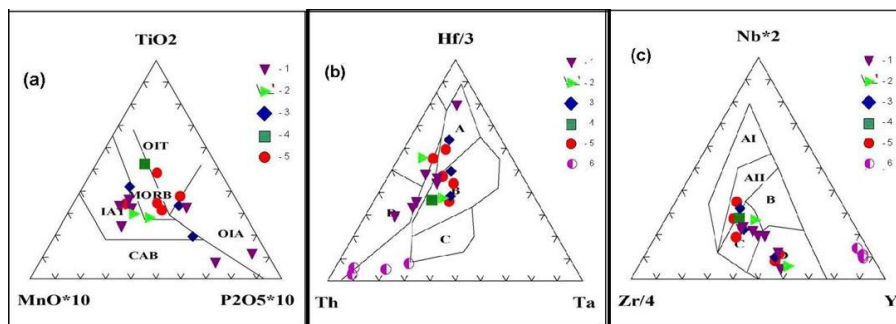


Рисунок 4 - Дискриминационные диаграммы изученных образцов эколгитов Максютковского комплекса в разных координатах

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.7.2.4>

Примечание: поля на диаграммах: (а) Известково-щелочные базальты (CAB), Островодужные толеиты (IAT), Базальты Срединно-океанических хребтов (MORB), Андезиты океанических островов (OIA), Толеиты океанических островов (OIT) по Mullen (1983); (б) N-MORB (A), E-MORB (B), Базальты окраин конвергентных плит (D) по Wood (1980); (с) Внутриплитовые щелочные базальты (AII), Внутриплитовые толеиты (AII-C), N-MORB (D), базальты вулканических дуг (C-D) [43]: 1 – Караяново, 2 – Ивановка, 3 – Новосимбирка, 4 – Антинган, 5 – Шубино [18], 6 – Шубино [2]

Спайдер-диаграммы редкоземельных элементов проанализированных образцов МК, нормированных к разным источникам, показывают отсутствие каких-либо аномалий Eu и Sr, (рис. 5), что говорит о базальтовом (не габбровом) составе исходного протолитового расплава, и подтверждает метаморфическое (не магматическое) происхождение граната при его кристаллизации. В ряду нормализованных диаграмм высокотемпературных пород Максютковского комплекса по РЗЭ отчетливо заметна их эволюционная связь с возможным источником их происхождения от наиболее высоких соотношений по сравнению с хондритовым составом (рис. 5а) до почти сопоставимого состава базальта, нормированного к спектру E-MORB типа (рис. 5с).

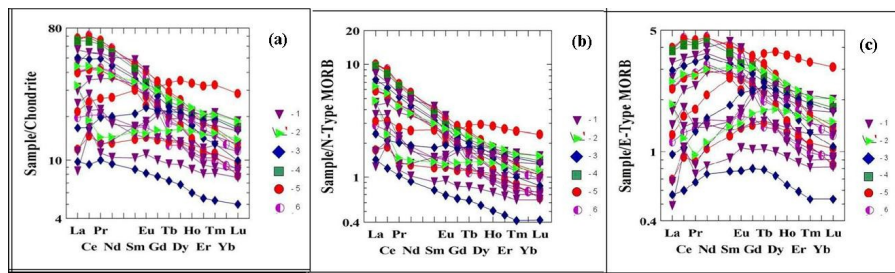


Рисунок 5 - Вариационные диаграммы РЗЭ для изученных образцов эклогитов Максютковского комплекса (Fedkin et al., 2021)

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.7.2.5>

Примечание: источник [32], состав пород нормирован: (а) к хондриту по [45], [54], к составам MORB N-типа (б) и MORB E-типа (с) по [53]: 1 – Караяново, 2 – Ивановка, 3 – Новосимбирка, 4 – Антинган, 5 – Шубино [18], 6 – Шубино [2]

Традиционные геохимические показатели по составу эклогитов МК суммируют следующие особенности состава исходного магматического расплава, протолита мафитовых пород комплекса:

- отсутствие аномалий Eu и Sr, на спайдер-диаграммах РЗЭ (рис. 5) говорит о базальтовом (не габбровом) составе исходного протолитового расплава, и подтверждает метаморфическое (не магматическое) происхождение граната при его кристаллизации;
- состав базальтов образует непрерывный эволюционный тренд от толеитового до известково-щелочного состава (рис. 3а);
- такая последовательность базальтовых серий является признаком эволюции состава в результате смены мантийных источников от N-MORB до OIB, соответственно;
- Nb-обогащенные базальты составляют более половины изученных образцов;
- соотношение обогащенных и деплетированных эклогитов составляет ~ 2:1;

Перечисленные данные определяют основные геохимические признаки хемотратиграфической последовательности состава метабазитов офиолитовой единицы комплекса и в концепции Правил ИС трактуются, как независимые и необходимые. Однако только два показателя из перечисленных могут быть связаны с ИС. Это - широкий разброс состава эклогитов (рис. 3) и многообразие источников их исходного материала (рис. 4). Для Правил ИС критерии мало значимые, но для их выполнения необходимы определенные условия.

1. Для образования высокобарных пород МК требуется, по крайней мере, *трехкомпонентный источник* исходного материала: обогащенной мантии OIB, деплетированной мантии N-MORB и E-MORB и некоего вклада субдукционной компоненты (коровой контаминации).

2. Накопление такого разнообразного материала в одном комплексе требует длительного времени, в связи с чем, встает вопрос о времени начала субдукции и длительности существования Максютковского комплекса с раннего палеозоя по девон включительно.

Вопрос о *времени зарождения и возрасте МК* не новый. Ранее он поднимался по разным причинам: в связи с ранними (палеопротерозойскими) оценками возраста протолита пород МК [6], [29] и возраста высокобарных ультрамафитовых включений [1], с находками конодонтов в отложениях ордовика и модели 2х-этапного развития комплекса [20], а также в связи с надсубдукционными изменениями океанической литосферы в ордовикское время [17] и возрастом Уральского океанического бассейна. В свете концепции ИС, вся эта цепочка причин обостряется и требует уточнения, увлекая за собой проблему образования всего комплекса.

Важнейшей особенностью состава HP пород МК является *обогащенность их ниобием*. Вопрос принципиальный, поскольку так называемые Nb-обогащенные базальты (NEB) являются чувствительным показателем субдукции океанических хребтов. Связь NEB образцов (как правило, деплетированных) с океаническим (N-MORB и E-MORB) субстратом отчетливо видна на диаграммах Пирса [46] (рис. 6, 7). Этот геохимический показатель поднимает ряд геодинамических вопросов (своеобразный симбиоз геохимических и геодинамических факторов) как в связи с процессами субдукции, так и с проблемами исторического развития комплекса.

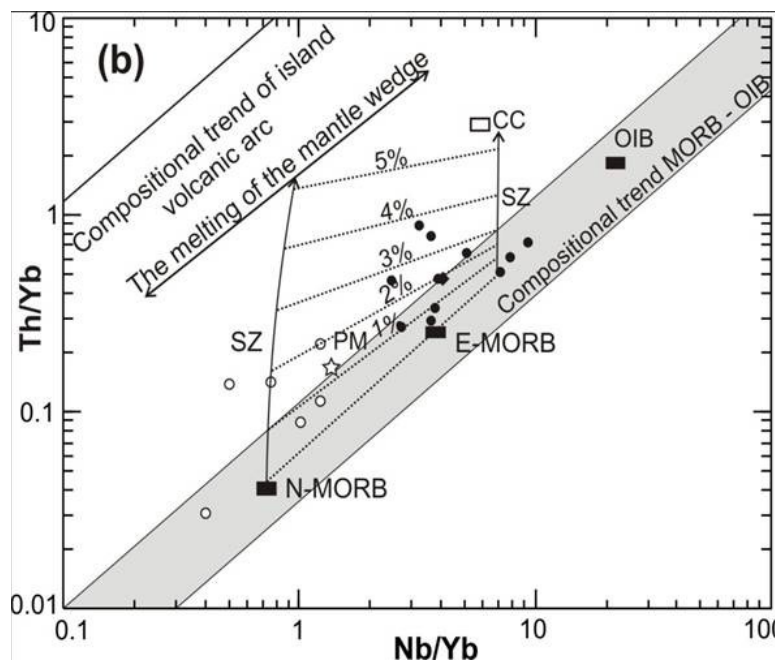


Рисунок 6 - Вклад субдукционной компоненты в высокочарные породы МК
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.7.2.6>

Примечание: составы эфалитов Максютковского комплекса [32] на диаграмме Th/Yb – Nb/Yb [46]

Во-первых, на этой основе возникает идея пересмотра полярности субдукции МК с восточной на западную в районе Губерлинской островной дуги [16], [17], которая принципиально меняет ход развития всего орогена. Главным событием геодинамической эволюции МК становится подвигание палеоазиатской океанической коры под континент, а не субдукция окраины Восточно-Европейского кратона. Впрочем, восточное падение субдукции континента под девонскую Магнитогорскую островную дугу [13] в этих работах не оспаривается.

Во-вторых, естественно, с этим вопросом связана проблема происхождения Уральского океанического бассейна. Был ли он частью Центрально-Азиатского палеоокеана, или образовался в начале Палеозоя? От длительности существования Уральского океана (100 или более 100 млн лет) зависит не только роль и степень участия субдукционной компоненты в породах МК, но и длительность существования всего комплекса.

Вклад субдукционной компоненты в высокочарные породы МК определяется их составом по редким и рассеянным элементам в соответствии с модельными расчетами [46]. Nb-обогащенные базальты являются хорошим индикатором участия субдукционной компоненты в ИС. С учетом имеющихся составов пород комплекса, как деплетированных, так и обогащенных [32], этот вклад оценивается от 1,0 до 4,0% (рис. 6). Не очень высокий процент, но и такое участие коровой компоненты в составе пород МК, судя по параметру Thn/Nb — до 2,38–7,11 в районе д. Шубино — превышает алогичные показатели молодых субдукционных структур почти в три раза — 1,54, в сегменте Нортленда юго-западной части Тихого океана [56].

Остается не ясным, была ли эта компонента в составе пород МК в начале субдукционного процесса или она связана с надсубдукционными изменениями океанической литосферы при формировании раннедевонского P-MORB хребта на Южном Урале в Ордовикское время [17]. Но расчеты однозначно указывают на ее участие в субдукции, подобно тому, как это отмечено в Пермском террейне Юкон-Танана в северной части канадских Кордильер [28]. Присутствие бонинитов в офиолитах на западе Магнитогорской зоны [9] подчеркивает активное участие этого компонента в процессе ИС. Пространственная близость бонинитовых офиолитов, в свою очередь, говорит о возможности мантийно-корового взаимодействия в регионе и об активности мантийно-плюмовой тектоники (рис. 7).

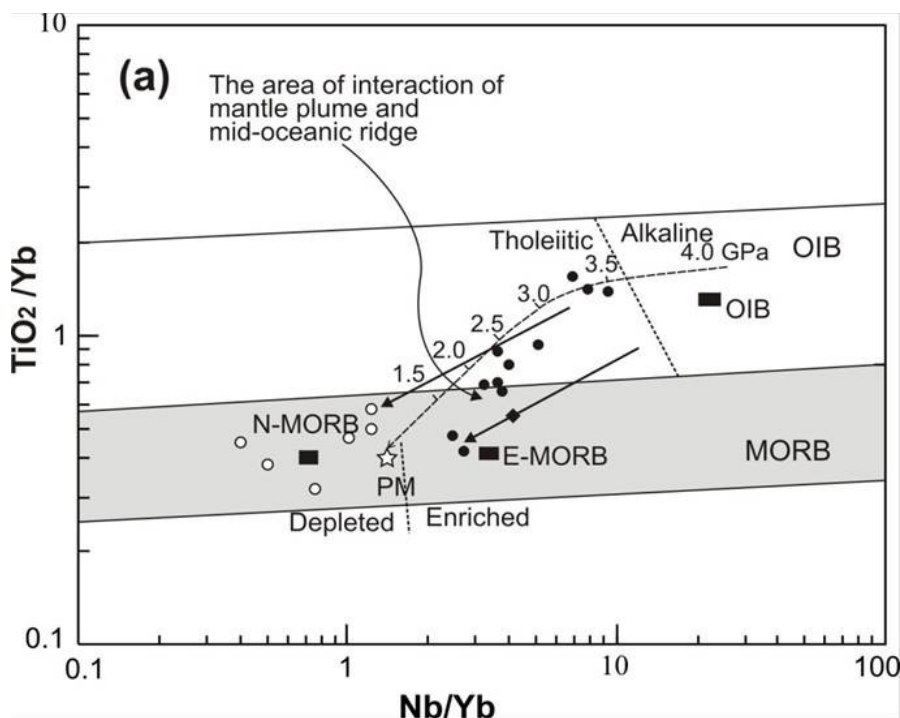


Рисунок 7 - Взаимодействие мантийного плюма OIB типа с деплетированной мантией MORB типа
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.7.2.7>

Примечание: составы эклогитов Максютковского комплекса [32] на диаграмме $Ti/Yb - Nb/Yb$ [46]

Наличие в нижней единице МК древних ($533 \pm 4,6$ млн лет) включений ультрамафитовых (Ol-Ep) и эклогитовых (Jd-Gr) UHP пород структурно и генетически связанных между собой с параметрами образования при $T > 700^\circ\text{C}$ и $P > 3,5-4,4$ ГПа [1], [3], [4], допускает участие в формировании комплекса мантийно-корových источников и компонентов с участием алмаза.

С другой стороны, геохимические данные по составу редких и рассеянных элементов в породах комплекса показывают, что взаимодействие мантийного плюма с деплетированной мантией происходит в интервале давлений от 2,0 до 3,5 ГПа (рис. 7).

При этом, снижение давления до 2,0 ГПа увеличивает степень частичного плавления от 5% в OIB источнике до 20% в области формирования N-MORB и E-MORB составов, где алмаз становится неустойчивым. Таким образом, геохимические данные по составу эклогитовых пород комплекса показывают существенное сокращение области возможного развития субдукции по давлению с участием алмаза в этом процессе.

Алмаз, безусловно, главный возмутитель спокойствия и основной индикатор UHP условий формирования МК. Однако случаи его находок в породах МК достаточно редки и не всегда подтверждены инструментально. Всего 2-3 нано-размерных зерна в двух образцах эклогита в виде включений в гранате были изучены методом рамановской спектроскопии [23]. Наши повторные попытки расширить такой поиск в том же университете, на аналогичной аппаратуре не увенчались успехом. Упоминания о единичных находках алмаза в шлихах не могут быть достоверным доказательством его происхождения в результате проградного метаморфизма. Кубоидные образования графита [36] обычно образуются при низких температурах и не связаны с графитизацией алмаза [34].

Тем не менее, если присутствие алмаза будет надежно доказано, то в этом случае параметры пикового метаморфизма должны достигать $T = 800-910^\circ\text{C}$ и $P \sim 3,5-4,5$ ГПа [1], [3], [5], [32]. При таких параметрах неизбежно должно происходить частичное плавление эклогитов с появлением трондьемитов и тоналитов, поскольку появление гранитов определяется критической точкой (3,4 ГПа и 760°C) [44].

Происхождение алмаза в высокобарных породах МК – метаморфическое, возникшее в процессе субдукции, или мантийно-коровое, захваченное и привнесенное мантийным плюмом, определяет главный вопрос Максютковского комплекса – является ли он комплексом сверхвысокого (UHP) давления или образовался при средних P-T параметрах корových эклогитов. Для решения этого вопроса привлечены традиционные методы метаморфической петрологии – минералогической термобарометрии и фазового соответствия.

Особенности эволюции метаморфизма МК. Оказалось, что главной особенностью метаморфизма МК является ни его экстремально высокие параметры, а циклический возвратно-пульсационный характер [18], когда явления проградного и ретроградного метаморфизма неоднократно повторяются, а P-T тренды, построенные по составам Grt-Crx-Pl-Qz парагенезиса, образуют сопряженные пары, характеризующие режимы отдельных этапов (циклов) развития террейна с проградной и ретроградной ветвями тренда. По крайней мере, четыре таких цикла зафиксированы по данным микросондовых исследований состава сосуществующих фаз МК (табл. 1, рис. 8).

Таблица 1 - Обобщенные P-T тренды проградно-ретроградных стадий (циклов) развития Максютковского эклогит-глаукофансланцевого комплекса

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.7.2.8>

№ цикла	Проградные тренды	Ретроградные тренды	Возраст, млн лет*
1.	T=800→900°C, P=3.5→4.4 ¹⁾ GPa	T=910→730°C, P=3.4→3.1 ¹⁾ GPa	515-533±4,6 ¹⁾
2.	T=500→790°C, P=2.5→3.2 GPa	T=740→610°C, P=2.5→1.4 GPa	360-385 ^{1), 2)} 360-380 ³⁾
3.	T=460→680°C, P=1.1→2.2 GPa	T=690→430°C, P=1.3→1.0 GPa	335 ²⁾
4.	T=310→515°C, P=0.9→1.2 GPa	T=545→310°C, P=1.0→0.6 GPa	310-315 ²⁾

Примечание: по [18]. Возрастные определения приведены по данным: ¹⁾ [3], ²⁾ [21], ³⁾ [29]

В пределах каждого цикла (этапа) P-T параметры сопряженных проградных и ретроградных трендов практически совпадают, а временной интервал инверсии между ними фактически отсутствует. Составы и зональность равновесных минеральных фаз в пределах одного парагенезиса фиксируют малейшие изменения условий локального равновесия [18]. Гранат, в силу своей чувствительности к изменению условий кристаллизации, фиксирует в своем составе параметры нескольких последовательных ступеней развития метаморфизма, демонстрируя их в отдельных образцах, а иногда даже в одном крупном зональном зерне с инверсионной зональностью и со сменой направления P-T тренда его образования [31]. Взаимные проградно-ретроградные переходы в одном образце или в серии образцов из одного обнажения встречаются в МК довольно часто. P-T параметры отдельных этапов повторяются практически на каждом участке комплекса, отмечая иногда одновременно условия метаморфизма нескольких циклов.

Временной разрыв между этапами метаморфизма обычно не превышает 20-25 млн лет. Между первым и вторым циклами он составляет ~ 150 млн лет. Этот перерыв маркирует важнейший рубеж в истории Максютковского комплекса – переход от режима субдукции к условиям эксгумации террейна, которые следуют один за другим в пределах общего восстановленного субдукционного канала МК (рис. 8).

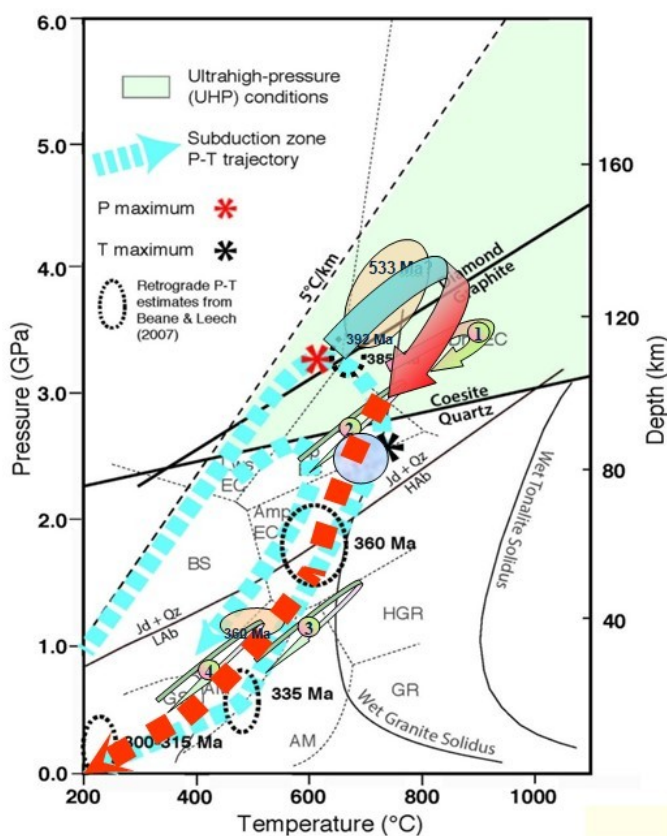


Рисунок 8 - Физико-химические условия формирования Максютковского комплекса

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.7.2.9>

Примечание: петрогенетические поля метабазитов [42]: EC, эцлогиты, DS, голубые сланцы, GR, гранулиты, HGR, высокобарические гранулиты, AM, амфиболиты. Цифры 1-4 в кружках – проградно-ретроградные циклы эволюции метаморфизма

Геохимический спектр эцлогитов по редким и рассеянным элементам на всех участках показывает постоянное соотношение деплетированных и обогащенных составов (в пропорции ~1:2) не зависимо от степени метаморфизма, что говорит о едином процессе формирования всего комплекса по времени и в пространстве.

Практически все породы 1-го цикла обогащены высокозарядными (HFSE) элементами и содержат повышенное содержание ниобия, в то время, как эцлогиты более низкого уровня метаморфизма имеют почти равные соотношения этих компонентов.

Статистическое соотношение проградных и ретроградных изменений в изученных образцах (4:1) показывает, что основным направлением эволюции комплекса был субдукционный процесс погружения с небольшой долей кратковременных возвратно-регрессивных трансформаций по ходу общего развития комплекса. Следы этих РТ колебаний записаны в составе зонального граната в парагенезисе Grt+Crpx+Pl+Qz в виде проградных треков отдельных образцов.

В совокупности проградные РТ тренды начальных этапов развития формируют обобщающий тренд субдукционного проградного погружения комплекса, который заканчивается финальным циклом 1 образования высокобарных пород (табл. 1, рис. 8).

Их древний возраст (519-533 млн лет) и максимальные параметры образования: Т до 790-910°C и Р до 3,3-3,5 ГПа [18], совпадают с условиями происхождения ультрамафит-эцлогитовых включений нижней серии в районе с. Караяново: 533±4,6 млн лет, Т>700°C и Р>3,5-4,4 ГПа [3], [5]. Эти показатели кардинально отличаются от параметров предыдущих этапов 2-4 (табл. 1) и выпадают из общей линейки развития геохимических показателей. Аномальные временные, термодинамические и геохимические параметры цикла дают основание полагать, что этот этап является результатом мантийно-корового взаимодействия мантийного клина (плюма?), захватившего глубинные ультрамафит-эцлогитовые включения слэба на пике субдукции и выдвинутого на поверхность в результате тектонического выброса в переходный период от субдукции к эксгумации.

По времени и Р-Т параметрам этот цикл фиксирует активный период эволюции комплекса – момент завершения процессов погружения и начала эксгумации террейна, определяя общую длительность всего ретроградного этапа – от раннего Палеозоя до Девона включительно. Подъем комплекса происходит, вероятно, по единому восстановленному каналу субдукции, вследствие чего термодинамические параметры погружения и подъема слэба, совмещаются, а их метки в составах сосуществующих фаз практически не различаются. Этому способствует быстротечность возвратно-пульсационного механизма. Период инверсии локального тренда Р-Т условий в пределах одного этапа развития оценивается в нескольких млн лет [37]. Статистическое соотношение проградных и ретроградных Р-Т изменений в

высокобарных породах комплекса (4:1) и их тесные взаимные переходы показывают, что следы возвратных регрессивных изменений в основном, были затерты последующими более активными процессами погружения, на фоне которых тренды и метрики стадии остывания МК и его эксгумации также стали неразличимы.

Причины возникновения и развития циклического возвратно-пульсационного метаморфизма остаются не совсем ясны. Возможны разные причины этого явления: скорость эксгумационного процесса, малая мощность поднимающейся пластины, ее флюидная насыщенность или высокая плавучесть пород [21]. Не ясно также, каким образом создается и работает механизм периодического подъема и погружения пакета УНР пород на каждом этапе его развития. Вполне вероятно, что периодическая дегидратация лавсонита из-за перепада температур в глубинной зоне субдукции приводит к кратковременному всплытию слэба и замещению лавсонита менее насыщенным водой агрегатом клиноцоизита, альбита, граната, хлорита, белых слюд и титанита [26], [27].

Обсуждение результатов

Рассмотренные вопросы относятся исключительно к внутренним особенностям Максютковского комплекса и не затрагивают существа проблемы инициации субдукции. В то же время, для достижения полного соответствия МК критериям ИС необходимо, подтвердить основные признаки хеостратиграфической последовательности формирования офиолитовой части комплекса: исходный базальтовый состав метабазитов, слагающих основную часть единицы, и отсутствие в нем метаморфических и метасоматических изменений [57]. К сожалению, оперативно получить эти данные не удастся, поскольку в верхнем офиолитовом блоке МК исходные базальты не сохранились. Под действием метасоматических процессов они были замещены зеленокаменными породами и сланцами, а в прослоях и блоках вмещающих метасадочных пород описываются тела уже измененных метасоматитов, серпентинитового меланжа, мафитовых и ультрамафитовых включений, лавсонитовых пород и эклогитов [3], [15]. Частично информацию о хеостратиграфической последовательности развития пород офиолитового комплекса можно найти в геохимическом материале общего плана по метабазитовым образованиям нижней единицы комплекса.

Предполагается, что на протяжении длительной истории формирования МК прошел разные стадии своего развития: состояние океанической коры, рифтогенез, коллизионные и субдукционные процессы, трансформацию океанической коры в континентальную, надсубдукционные изменения и т.п. [29], [41], [48]. Предполагаемая смена полярности субдукции МК и пульсационный характер метаморфизма могли в процессе погружения и эксгумации комплекса привести к перемешиванию и выравниванию составов метабазитовых пород континентальной и офиолитовой частей комплекса, фиксируя наиболее устойчивые черты хеостратиграфической последовательности их изменения. В результате слагающие его структурно-вещественные единицы, включения и блоки, сформированные в разной тектонической обстановке, оказавшись в начале орогенеза в раннем девоне, были совмещены и перемешаны в едином субдукционном канале [13], [25].

Возраст начала субдукции МК точно не установлен и его логично было бы считать от первых значений возраста эклогитов – 600-550 млн лет [40] или, точнее, от наиболее вероятного начала формирования МК – **533±4,6 млн лет** [3]. Согласно геодинамическим представлениям инициация субдукции и развитие внутренней океанической Магнитогорской островной дуги, происходили в раннем девоне, около 400 млн лет [52], т.е., процесс эклогитизации базитовых пород нижней части комплекса не был растянут по времени и **не превышал 10 млн лет**, что соизмеримо с длительностью процесса его эксгумации [39], который, как показано выше, протекал в несколько этапов (табл. 1).

Ультрамафитовые (O1-Eп и Eп) включения этого возраста в кварцитосланцах нижней единицы **сформированы в глубинной зоне континентального рифта** и выдвинуты в коровую зону субдукции в результате тектонического меланжа, возраст которого близок к возрасту объединения всех структурных элементов террейна в единый Максютковский комплекс – 372-390 млн лет [14], [33].

Удивительно, что за столь короткое время породы комплекса прошли развитие от базальтов толеитового состава до известково-щелочных (рис. 3), сменив мантийный источник от N-MORB до OIB типа (рис. 4), изменив соотношении обогащенных и деплетированных составов до соотношения 2:1, продемонстрировав в своем составе отсутствие каких-либо аномалий в спектрах редкоземельных элементов (рис. 5). Эти и другие геохимические особенности эклогитов комплекса безусловно следует считать важными показателями хеостратиграфической последовательности эволюции состава исходных пород. Некоторые из них, например, соотношение редких и рассеянных элементов в породах МК позволили *впервые для данного террейна* оценить вклад субдукционной компоненты (от 1,0 до 4%) по мере развития процесса ИС (рис. 6), установить характер взаимодействия мантийного плюма с деплетированной мантией, а также степень частичного плавления в области формирования N-MORB и E-MORB составов (рис. 7) и т.д. Таким образом, основные черты хеостратиграфической последовательности эволюции состава исходных пород комплекса в данной работе учтены и этот важный критерий ИС в определенной степени можно считать выполненным.

Примечательно, что *существенных изменений метасоматического плана* в составах пород нижней единицы комплекса не происходит. На начальном (проградном) этапе своего развития состав высокобарных пород эклогит-сланцевой части практически не меняется [21], [29], [41], [55]. **Метасоматоз мафит-ультрамафитовых пород** затруднен из-за пульсационного характера метаморфизма и высокой плавучести погружаемой пластины [37], [51]. Первые признаки метасоматоза в нижней базитовой пачке появляются лишь на регрессивных стадиях метаморфизма в виде зон мусковитизации, прожилковых скоплений зональных гранатов, хлоритовых оторочек вокруг него. Гранат приобретает сложную, разнонаправленную, подчас инверсионную зональность. В зернах появляется текстуры атолового и ажурного граната, подтверждающие присутствие флюида [21]. Низкотемпературные фазы Zo, Gln, Chl в эклогитовых ассоциациях появляются в результате метасоматических процессов только на третьем этапе при температурах ниже 460-430°C [1].

Верхняя офиолитовая единица Максютковского комплекса имеет свою историю развития, начиная от времени зарождения ее предполагаемого субстрата при 1660 ± 10 млн лет или по более точным данным при 824 млн лет [1], [3] до времени объединения ее с породами эклогит-глаукофансланцевой части:

- 390 млн лет – время, принятое мнением большинства исследователей;
- 372-341 млн лет по данным [3];

– 380-385 млн лет – наши данные (табл. 1, 3й этап), которые фиксируют максимальный возраст проградного НР метаморфизма.

В составе верхней единицы МК преобладают зеленокаменные породы и сланцы, породы древнего меланжа в основании, с антигоритовыми серпентинитами, Са-эклогитами, лавсонитсодержащими породами и метабазитами [2].

Среди метасоматитов и базитовых пород выделяются отдельные включения и блоки более раннего происхождения, чем возраст объединения верхней и нижней единиц в единый комплекс. К таким включениям относятся Grt-Cpx и Law-содержащие породы с весьма редким парагенезисом Fe-Ca-граната [3]. Возраст их образования составляет 470 млн лет, диафореза – 440 млн лет. Породы этой серии также рассматриваются как высокобарные образования глубинной зоны континентального рифта и выделяются в самостоятельную «мафит-ультрамафитовую» единицу. Диапазон P-T параметров образования этих пород весьма широк: от $620-760$ °C и 2,5-4,0 ГПа – для парагенезиса Law+Zo до $T=380-467$ °C и $P=0,7-1,1$ ГПа – для ретроградного замещения лавсонита клиноцоизитом, мусковитом, кальцитом и альбитом. Это говорит о том, что в формировании Максютковского комплекса задолго до его субдукции участвовали различные древние мантийно-коровые образования с параметрами в области устойчивости УНР индекс минералов – алмаза и коэсита.

Точно такой же возрастной интервал (471–444 млн лет) установлен при кристаллизации Law эклогита в Утарбаевской ассоциации диопсид-гроссуляровых метасоматитов и лавсонитовых эклогитов, в составе которых в зернах омфацита обнаружены микровключения коэсита [15]. Стабильность коэсита подтверждается рамановскими спектрами минерала и свидетельствует о достаточно высоких параметрах образования Law парагенезиса: $T=495-622$ °C при $P = 2,2-2,4$ ГПа (Grt-Omp, Grt-Omp-Ph термобарометрия), что также дает основание полагать о возможном участии этих пород в предсубдукционном развитии МК.

Более древний возраст коэситсодержащих пород Утарбаевской ассоциации и «мафит-ультрамафитовой» единицы по сравнению с временем завершения субдукции МК (~ 341-390 млн лет), ставит эти единицы в разряд таких же мантийно-коровых включений нижней структурно-вещетвенной единицы МК [1], [3].

Наиболее контрастное положение между эклогитовой и офиолитовой частями МК занимают экзотические метальтрамафиты (антигоритовые метагарцбургиты и метаортопироксенит), возникшие в результате высокобарного Si-Al метасоматоза при 630 °C и 2,0 ГПа [12]. Поскольку во вмещающих их эклогитах, гранат-слюдяных сланцах и кварцитах метасоматоз не установлен [29], считается, что Si-Al метасоматоз произошел в субдукционном канале до их тектонического совмещения с остальными коровыми породами. Авторы полагают, что эти метальтрамафиты являются фрагментами надсубдукционной мантии, тектонически совмещенной с эклогитами и метаосадочными породами погружающейся плиты. Ранее предположение о надсубдукционных изменениях океанической литосферы МК рассматривалось в связи с формированием раннедевонского P-MORB хребта на Южном Урале в ордовикское время [17]. Таким образом, возрастной интервал 470-440 млн лет является важным рубежом в развитии офиолитовой единицы МК.

История антигоритовых метальтрамафитов напоминает описанные выше Ol-Ep включения в нижней части МК, генетически связанные с Jd-Gros эклогитами [3] с разницей в возрасте их образования и в геодинамической обстановке происхождения. Ol-Ep включения образовались (или были захвачены мантийным плюмом) в глубинной зоне континентального рифта, в то время, как антигоритовые метальтрамафиты являются представителями океанической коры, испытывавшие надсубдукционные изменения (Si-Al метасоматоз, серпентинитовый меланж) до начала субдукции и окончательного формирования офиолитового комплекса в раннем Девоне.

Глубинные включения мафитовых и ультрамафитовых пород, высокобарных метасоматитов, лавсонитовых пород и эклогитов формировали облик Максютковского комплекса задолго до инициации его субдукции. В их числе оказались включения с алмазом и коэситом, а также мафитовые и ультрамафитовые минеральные ассоциации, выдвинутые на поверхность в составе мантийного плюма/клина. P-T условия проградного развития субдукции не достигали области стабильности алмаза и коэсита, вследствие чего статус их происхождения нельзя считать ультра высокобарным (УНР).

Заключение

Проведенные исследования по апробации концепции «Правила Инициации Субдукции» [56], [57] на примере Максютковского комплекса, показали, что главные критерии ИС:

- временное и пространственное сочетание образования эклогитов и офиолитовой части комплекса;
- основные черты хемостратиграфической последовательности; наличие восстановленного UP/УНР канала субдукции, отражены в породах МК достаточно четко, обосновывая и предлагая Правила ИС в качестве универсальной модели образования коровых эклогитов.

В процессе проведенных исследований на основе новых данных о химическом составе высокобарных пород комплекса [32], предлагаемой концепции «Правил Инициации субдукции» и геодинамической классификации океанических базальтов [46] впервые для Максютковского комплекса определены некоторые дополнительные условия и параметры зарождения и развития субдукционного процесса, расширяющие его главные характеристики.

1. Для образования НР/УНР пород МК требуется, по крайней мере, трехкомпонентный источник исходного материала: обогащенной мантии OIB, деплетированной мантии и некоего вклада субдукционной компоненты (коровой контаминации).



2. Установлено, что состав первичного расплава комплекса имеет переменный состав от толеитовой до известково-щелочной серии и далее до андезито-базальта. Состав пород в этом ряду становится все более бедным в отношении когерентных элементов за счет притока флюида и повышения уровня их окисления.

3. Новые геохимические данные о составе НР/УНР пород МК по редким и рассеянным элементам позволили оценить вклад субдукционной компоненты в породах МК от 1 до 4%, что по-новому освещает историю возникновения и развития Уральского океанического бассейна, значение надсубдукционных изменений океанической литосферы на Южном Урале в ордовикское время.

4. Впервые для МК определен интервал давления 3,5–1,5 ГПа мантийно-корового взаимодействия и магма-генерации в мантийном плюме (при $P < 3,5$ ГПа в ОИВ базальтах) и в деплетированной мантии при $P \leq 1,5$ ГПа при образовании E-MORB и N-MORB расплавов.

Циклический возвратно-пульсационный характер метаморфизма МК определяет статус УНР индекс минералов (алмаза и коэсита) в породах МК как захваченный мантийным плюмом при РТ параметрах выше предела их стабильности. Проградно-метаморфическая природа их происхождения не подтверждается, и ультра-высокобарный (УНР) уровень метаморфизма Максютковский комплекса нельзя считать достаточно обоснованным.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы научно-исследовательской работы Института экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского РАН № FMUF-2022-0004 «Экспериментальное и численное моделирование зарождения магм и флюидно-магматического взаимодействия в различных геодинамических обстановках».

Благодарности

Авторы выражают глубокую и искреннюю благодарность профессору Гэри Эрнсту и профессору Мэри Лич за инициирование данного исследования, поддержку и помощь в работе.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

This study is fulfilled under the research program of the D.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy of Russian Academy of Sciences, theme № FMUF-2022-0004 "Experimental and numerical modeling of magma generation and fluid-magma interaction in various geodynamic settings".

Acknowledgement

The authors express their deep and sincere gratitude to Professor W.G. Ernst and Professor M. Leech for initiating this study and for their support and assistance throughout the research process.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Вализер П.М. Ассоциации сверхвысоких давлений в ультрамафитах максютовского комплекса (Южный Урал) / П.М. Вализер, А.А. Краснобаев, А.И. Русин // Доклады РАН. — 2011. — Т. 441. — С. 1645–1648.
2. Вализер П.М. Амфиболы голубых сланцев Урала / П.М. Вализер, В.И. Ленных. — Москва : Наука, 1988.
3. Вализер П.М. Гранат-пироксеновые и лавсонитсодержащие породы Максютовского комплекса (Южный Урал) / П.М. Вализер, А.И. Русин, А.А. Краснобаев, И.И. Лиханов // Геология и геофизика. — 2013b. — Т. 54, № 11. — С. 1754–1772.
4. Вализер П.М. Жадеит-гроссуляровые эклогиты максютовского комплекса (Южный Урал) / П.М. Вализер, А.А. Краснобаев, А.И. Русин // Литосфера. — 2013. — № 4. — С. 50–61.
5. Вализер П.М. Эклогиты УНРМ Максютовского комплекса (Южный Урал) / П.М. Вализер, А.А. Краснобаев, А.И. Русин // Доклады РАН. — 2015. — Т. 461, № 1. — С. 291–296. — DOI: 10.1134/S1028334X1503023X.
6. Добрецов Н.Л. Глаукофансланцевые и эклогит-глаукофансланцевые комплексы СССР / Н.Л. Добрецов. — Новосибирск : Наука, 1974.
7. Иванов С.Н. Континентальный рифтовый метаморфизм / С.Н. Иванов, А.И. Русин // Геотектоника. — 1997. — № 1. — С. 6–19.
8. Ковалев С.Г. Геохимия эклогитов Максютовского комплекса (Южный Урал) и генетическая природа их протолитов / С.Г. Ковалев, Е.А. Тимофеева, Е.О. Пиндюрина // Геохимия. — 2015. — № 4. — С. 299–327. — DOI: 10.7868/S0016752515040044.
9. Кузьмин М.И. Бонинитовые серии Южного Урала: геологическое и петрографическое описание, особенности состава и проблемы происхождения / М.И. Кузьмин, Л.Я. Кабанова // Потенциальная рудоносность, геохимические типы и формации магматических пород. — Новосибирск : Наука, 1991. — С. 156–173.
10. Перчук А.Л. Новый вариант омфациит-альбит-кварцевого геобарометра с учетом структурных состояний омфациита и альбита / А.Л. Перчук // Доклады РАН СССР. — 1992. — Т. 324. — С. 1286–1189.
11. Перчук А.Л. Метаультрамафиты максютовского комплекса, Южный Урал: высокобарный Si-Al метасоматоз и карбонатизация на границе кора-мантия в зоне субдукции / А.Л. Перчук, Н.Г. Зиновьева, А.В. Сапегина и др. // Петрология. — 2024. — Т. 32, № 1. — С. 59–90.



12. Перчук Л.Л. Биотит-гранат-кордиеритовые равновесия и эволюция метаморфизма / Л.Л. Перчук, И.В. Лаврентьева [и др.] — Москва : Наука, 1983.
13. Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные проблемы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении) / В.Н. Пучков. — Уфа : ДизайнПолиграфСервис, 2010. — 280 с.
14. Русин А.И. Высокобарический метаморфизм Урала / А.И. Русин // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование. — Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2007. — С. 421–460.
15. Русин А.И. Лавсонитовые эклогиты и метасоматиты Утарбаевской ассоциации максютовского комплекса / А.И. Русин, А.А. Зворыгина, П.М. Вализер // Литосфера. — 2021. — Т. 21, № 6. — С. 867–883.
16. Рязанцев А.В. Ордовикские вулканогенно-плутонические комплексы Сакмарского аллохтона Южного Урала / А.В. Рязанцев, Т.Ю. Толмачева // Геотектоника. — 2016. — Т. 50, № 6. — С. 23–51.
17. Рязанцев А.В. Ордовикские структурно-формационные комплексы аллохтона Южного Урала / А.В. Рязанцев, С.В. Дубинин, Н.Б. Кузнецов // Геотектоника. — 2008. — № 5. — С. 49–78.
18. Федькин В.В. Четыре эпизода термической эволюции эклогитов Максютовского комплекса (Южный Урал) / В.В. Федькин // Геология и геофизика. — 2020. — Т. 61, № 5–6. — С. 543–558.
19. Чесноков Б.В. Увеличение объёма кварцевых зёрен в эклогитах Южного Урала / Б.В. Чесноков, В.А. Попов // Доклады АН СССР. — 1965. — Т. 162, № 4. — С. 909–910.
20. Шацкий В.С. Sm-Nd датирование высокобарического метаморфизма Максютовского комплекса, Южный Урал / В.С. Шацкий, Э. Ягрутц, О.А. Козьменко // Труды РАН. Секция наук о Земле. — 1997. — Т. 353. — С. 285–288.
21. Beane R. Protolith signatures and element mobility of the Maksyutov subducted slab, Southern Ural Mountains, Russia / R. Beane, S.S. Sorensen // International Geology Review. — 2007. — Vol. 49. — P. 52–72.
22. Beane R.J. The Maksyutov Complex: The first UHP terrane 40 years later / R.J. Beane, M.L. Leech // Geological Society of America Special Paper. — 2007. — No. 419. — P. 153–169. — DOI: 10.1130/2006.2419(08).
23. Bostick B.C. Positive identification of microdiamond from the Maksyutov Complex, south Urals, Russia / B.C. Bostick, R.E. Jones, W.G. Ernst [et al.] // American Mineralogist. — 2003. — Vol. 88. — P. 1709–1717.
24. Brown D. Crustal-scale structure and evolution of an arc-continent collision zone in the southern Urals, Russia / D. Brown, C. Juhlin, J. Alvarez-Marron [et al.] // Tectonics. — 1998. — Vol. 17. — P. 158–171.
25. Brown D. Arc-continent collision in the Southern Urals / D. Brown, P. Spadea, V. Puchkov [et al.] // Earth-Science Reviews. — 2006. — Vol. 79. — P. 261–287.
26. Chen Y. Exhumation of oceanic eclogites: thermodynamic constraints on pressure, temperature, bulk composition and density / Y. Chen, K. Ye, T.F. Wu [et al.] // Journal of Metamorphic Geology. — 2013. — Vol. 31. — P. 549–570.
27. Clarke G.L. The lawsonite paradox: a comparison of field evidence and mineral equilibria modelling / G.L. Clarke, R. Powell, J.A. Fitzherbert // Journal of Metamorphic Geology. — 2006. — Vol. 24. — P. 715–725. — DOI: 10.1111/j.1525-1314.2006.00664.x.
28. Colpron M. Revisiting the "Klondike Orogeny": Permian to Jurassic Development of the Yukon-Tanana Terrane, Northern Canadian Cordillera / M. Colpron, W.C. McClelland, S.J. Piercey [et al.] // Tectonics. — 2025. — Vol. 44, No. 6. — DOI: 10.1029/2024TC008748.
29. Dobretsov N.L. Tectonic setting of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Maksutov Complex, Ural Mountains, Russia / N.L. Dobretsov, V.S. Shatsky, R.G. Coleman [et al.] // International Geology Review. — 1996. — Vol. 38. — P. 136–160.
30. Dobretsov N.L. Blueschists and eclogites: a possible plate tectonic mechanism for their emplacement from the upper mantle / N.L. Dobretsov // Tectonophysics. — 1991. — Vol. 186. — P. 253–268.
31. Fedkin V.V. Zonal garnets of eclogite-glaucophane schist complexes – recorder of the history of their development / V.V. Fedkin // Journal of Marine Science and Research Ocean. — 2024. — Vol. 7, No. 1. — P. 1–12. — DOI: 10.33140/JMSRO.07.01.
32. Fedkin V.V. Petrotectonic origin of mafic eclogites from the Maksyutov subduction complex, south Ural Mountains, Russia / V.V. Fedkin, T.D. Burlick, M.L. Leech [et al.] // Plate Tectonics, Ophiolites, and Societal Significance of Geology. — Geological Society of America Special Paper 552. — 2021. — P. 177–195. — DOI: 10.1130/2021.2552(09).
33. Glodny J. Precise eclogitization ages deduced from Rb/Sr mineral systematics: the Maksyutov complex, Southern Urals, Russia / J. Glodny, B. Bingen, H. Austrheim [et al.] // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 2002. — Vol. 66, No. 7. — P. 1221–1235.
34. Korsakov A.V. Natural graphite cuboids / A.V. Korsakov, O.V. Rezvukhina, D.I. Rezvukhin [et al.] // Minerals. — 2019. — Vol. 9, No. 2. — P. 110–115. — DOI: 10.3390/min9020110.
35. Le Bas M.J. The IUGS systematics of igneous rocks / M.J. Le Bas, A.L. Streckeisen // Journal of the Geological Society of London. — 1991. — Vol. 148. — P. 825–833.
36. Leech M.L. Graphite Pseudomorphs After Diamond? A Carbon Isotope and Spectroscopic Study of Graphite Cuboids from the Maksyutov Complex, South Ural Mountains, Russia / M.L. Leech, W.G. Ernst // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 1998. — Vol. 62. — P. 2143–2154.
37. Leech M.L. Petrotectonic evolution of the high- to ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, Karayanova area, south Ural Mountains, Russia: structural and oxygen isotopic constraints / M.L. Leech, W.G. Ernst // Lithos. — 2000. — Vol. 52. — P. 235–252.
38. Leech M.L. The late exhumation history of the ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, south Ural Mountains, from new apatite fission track data / M.L. Leech, D.F. Stockli // Tectonics. — 2000. — Vol. 19. — P. 153–167. — DOI: 10.1029/1999TC900053.
39. Leech M.L. Thermal modeling of an ultrahigh-pressure complex in the south Urals / M.L. Leech, E. Willingshofer // Earth and Planetary Science Letters. — 2004. — Vol. 226. — P. 85–99.



40. Lennykh V.I. High-pressure metamorphic rocks of the Maksyutov Complex (Southern Urals) / V.I. Lennykh, P.M. Valizer. — Novosibirsk : Russian Academy of Sciences, 1999. — 64 p.
41. Lennykh V.I. Petrotectonic evolution of the Maksyutov Complex, southern Urals, Russia: Implications for ultrahigh-pressure metamorphism / V.I. Lennykh, P.M. Valizer, R. Beane [et al.] // *International Geology Review*. — 1995. — Vol. 37. — P. 584–600. — DOI: 10.1080/00206819509465420.
42. Liou J.G. High pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks / J.G. Liou, R.Y. Zhang, W.G. Ernst [et al.] // *Reviews in Mineralogy*. — 1998. — Vol. 37. — P. 33–96.
43. Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram / M. Meschede // *Chemical Geology*. — 1986. — Vol. 56. — P. 207–218.
44. Mibe K. Slab melting versus slab dehydration in subduction-zone magmatism / K. Mibe, T. Kawamoto, K.N. Matsukage [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2011. — Vol. 108. — P. 8177–8182.
45. Mullen E.D. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminate for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis / E.D. Mullen // *Earth and Planetary Science Letters*. — 1983. — Vol. 62. — P. 53–62.
46. Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust / J.A. Pearce // *Lithos*. — 2008. — Vol. 100. — P. 14–48.
47. Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited / R. Powell // *Journal of Metamorphic Geology*. — 1985. — Vol. 3. — P. 231–243.
48. Puchkov V.N. Paleooceanic structures of the Ural Mountains / V.N. Puchkov // *Geotectonics*. — 1993. — Vol. 27. — P. 184–196.
49. Schmidt M.W. The stability of lawsonite and zoisite at high pressures: experiments in CASH to 92 kbar and implications for the presence of hydrous phases in subducted lithosphere / M.W. Schmidt, S. Poli // *Earth and Planetary Science Letters*. — 1994. — Vol. 124. — P. 105–118.
50. Schulte B. K-rich fluid metasomatism at high-pressure metamorphic conditions: Lawsonite decomposition in rodingitized ultramafite of the Maksyutov Complex, southern Urals (Russia) / B. Schulte, S. Sindern // *Journal of Metamorphic Geology*. — 2002. — Vol. 20. — P. 529–541. — DOI: 10.1046/j.1525-1314.2002.00387.x.
51. Schulte B.A. Metamorphic evolution of eclogite and associated garnet-mica schist in the high-pressure metamorphic Maksyutov Complex, Ural, Russia / B.A. Schulte, P. Blümel // *Geologische Rundschau*. — 1999. — Vol. 87. — P. 561–576. — DOI: 10.1007/s005310050231.
52. Spadea P. Initiation and evolution of intra-oceanic subduction in the Uralides: geochemical and isotopic constrains from Devonian oceanic rocks of the Southern Urals, Russia / P. Spadea, M. D'Antonio // *Island Arcs*. — 2006. — Vol. 15. — P. 7–25.
53. Sun S.S. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes / S.S. Sun, W.F. McDonough // *Magmatism in the Ocean Basins* / ed. by A.D. Saunders, M.J. Norry. — Geological Society, Special Publication. — 1989. — Vol. 42. — P. 313–345.
54. Taylor S.R. The continental crust: its composition and evolution / S.R. Taylor, S.M. McLennan. — Oxford : Blackwell, 1985. — 312 p.
55. Volkova N.L. Geochemical signatures for eclogite protolith from the Maksyutov Complex, South Urals / N.L. Volkova, A.E. Frenkel, V.I. Budanov // *Journal of Asian Earth Sciences*. — 2004. — Vol. 23. — P. 745–759. — DOI: 10.1016/S1367-9120(03)00128-7.
56. Whattam S.A. Subduction initiation ophiolites of the SW Pacific I: first-formed MORB-like lavas / S.A. Whattam // *International Geology Review*. — 2023. — Vol. 66, No. 9. — P. 1681–1717. — DOI: 10.1080/00206814.2023.2248489.
57. Whattam S.A. The 'subduction initiation rule': a key for linking ophiolite, intra-oceanic forearcs, and subduction initiation / S.A. Whattam, R.J. Stern // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. — 2011. — P. 1031–1045.
58. Wood D.A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problem of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province / D.A. Wood // *Earth and Planetary Science Letters*. — 1980. — Vol. 50. — P. 11–30.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Valizer P.M. Assotsiatsii sverkhvysokikh davleniy v ul'tramafitakh maksyutovskogo kompleksa (Yuzhnyy Ural) [Associations of ultrahigh pressures in ultramafites of the Maksyutov complex (Southern Urals)] / P.M. Valizer, A.A. Krasnobaev, A.I. Rusin // *Doklady RAN* [Reports on Earth Sciences]. — 2011. — Vol. 441. — P. 1645–1648. [in Russian]
2. Valizer P.M. Amfiboly golubyykh slantsev Urala [Amphiboles of blue schists of the Urals] / P.M. Valizer, V.I. Lennykh. — Moscow : Nauka, 1988. [in Russian]
3. Valizer P.M. Granat-piroksenovyye i lavsonitsoderzhashchiye porody Maksyutovskogo kompleksa (Yuzhnyy Ural) [Garnet-pyroxene and lawsonite-bearing rocks of the Maksyutov complex (Southern Urals)] / P.M. Valizer, A.I. Rusin, A.A. Krasnobaev, I.I. Likhano v // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. — 2013b. — Vol. 54, No. 11. — P. 1754–1772. [in Russian]
4. Valizer P.M. Zhadeit-grossulyarovyye eklogity maksyutovskogo kompleksa (Yuzhnyy Ural) [Jadeite-grossular eclogites of the Maksyutov complex (Southern Urals)] / P.M. Valizer, A.A. Krasnobaev, A.I. Rusin // *Litosfera* [Lithosphere]. — 2013a. — No. 4. — P. 50–61. [in Russian]
5. Valizer P.M. Eklogity UHPM Maksyutovskogo kompleksa (Yuzhnyy Ural) [UHPM eclogites of the Maksyutov complex (Southern Urals)] / P.M. Valizer, A.A. Krasnobaev, A.I. Rusin // *Doklady RAN* [Reports on Earth Sciences]. — 2015. — Vol. 461, No. 1. — P. 291–296. — DOI: 10.1134/S1028334X1503023X. [in Russian]



6. Dobretsov N.L. Glaukofanslantsevyye i eklogit-glaukofanslantsevyye komplekxy SSSR [Glaucanite schist and eclogite-glaucanite schist complexes of the USSR] / N.L. Dobretsov. — Novosibirsk : Nauka, 1974. [in Russian]
7. Ivanov S.N. Kontinental'nyy riftovyy metamorfizm [Continental rift metamorphism] / S.N. Ivanov, A.I. Rusin // Geotektonika [Geotectonics]. — 1997. — No. 1. — P. 6–19. [in Russian]
8. Kovalev S.G. Geokhimiya eklogitov Maksyutovskogo kompleksa (Yuzhnyy Ural) i geneticheskaya priroda ikh protolitov [Geochemistry of eclogites of the Maksyutov complex (Southern Urals) and the genetic nature of their protoliths] / S.G. Kovalev, E.A. Timofeeva, E.O. Pindyurina // Geokhimiya [Geochemistry International]. — 2015. — No. 4. — P. 299–327. — DOI: 10.7868/S0016752515040044. [in Russian]
9. Kuzmin M.I. Boninitovyye serii Yuzhnogo Urala: geologicheskoye i petrograficheskoye opisaniye, osobennosti sostava i problemy proiskhozhdeniya [Boninite series of the Southern Urals: geological and petrographic description, composition features and problems of origin] / M.I. Kuzmin, L.Ya. Kabanova // Potentsial'naya rudonosnost', geokhimicheskiye tipy i formatsii magmaticheskikh porod [Potential ore content, geochemical types and formations of igneous rocks]. — Novosibirsk : Nauka, 1991. — P. 156–173. [in Russian]
10. Perchuk A.L. Novyy variant omfatsit-al'bit-kvartsevogo geobarometra s uchetom strukturnykh sostoyaniy omfatsita i al'bита [A new version of the omphacite-albite-quartz geobarometer taking into account the structural states of omphacite and albite] / A.L. Perchuk // Doklady RAN SSSR [Reports on Earth Sciences]. — 1992. — Vol. 324. — P. 1286–1189. [in Russian]
11. Perchuk A.L. Metaultramafity maksyutovskogo kompleksa, Yuzhnyy Ural: vysokobarnyy Si-Al metasomatoz i karbonatizatsiya na granitse kora-mantiya v zone subduksii [Meta-ultramafites of the Maksyutov complex, Southern Urals: high-pressure Si-Al metasomatism and carbonatization at the crust-mantle boundary in a subduction zone] / A.L. Perchuk, N.G. Zinovieva, A.V. Sapegina et al. // Petrologiya [Petrology]. — 2024. — Vol. 32, No. 1. — P. 59–90. [in Russian]
12. Perchuk L.L. Biotit-granat-kordieritovyye ravnesiya i evolyutsiya metamorfizma [Biotite-garnet-cordierite equilibria and the evolution of metamorphism] / L.L. Perchuk, I.V. Lavrentieva, L.Ya. Aranovich [et al.] — Moscow : Nauka, 1983. [in Russian]
13. Puchkov V.N. Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nyye problemy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and Cis-Urals (current problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)] / V.N. Puchkov. — Ufa : DizaynPoligrafServis, 2010. — 280 p. [in Russian]
14. Rusin A.I. Vysokobaricheskiy metamorfizm Urala [High-pressure metamorphism of the Urals] / A.I. Rusin // Geodinamika, magmatizm, metamorfizm i rudoobrazovaniye [Geodynamics, magmatism, metamorphism and ore formation]. — Yekaterinburg : IGG UrB RAS, 2007. — P. 421–460. [in Russian]
15. Rusin A.I. Lavsonitovyye eklogity i metasomaty Utarbayevskoy assotsiatsii maksyutovskogo kompleksa [Lawsonite eclogites and metasomites of the Utarbayevskaya association of the Maksyutov complex] / A.I. Rusin, A.A. Zvorygina, P.M. Valizer // Litosfera [Lithosphere]. — 2021. — Vol. 21, No. 6. — P. 867–883. [in Russian]
16. Ryazantsev A.V. Ordovikskiy vulkanogenno-plutonicheskiye komplekxy Sakmarskogo allokhona Yuzhnogo Urala [Ordovician volcanogenic-plutonic complexes of the Sakmara allochthon of the Southern Urals] / A.V. Ryazantsev, T.Yu. Tolmacheva // Geotektonika [Geotectonics]. — 2016. — Vol. 50, No. 6. — P. 23–51. [in Russian]
17. Ryazantsev A.V. Ordovikskiy strukturno-formatsionnyye komplekxy allokhona Yuzhnogo Urala [Ordovician structural-formational complexes of the allochthon of the Southern Urals] / A.V. Ryazantsev, S.V. Dubinin, N.B. Kuznetsov // Geotektonika [Geotectonics]. — 2008. — No. 5. — P. 49–78. [in Russian]
18. Fedkin V.V. Chetyre epizoda termicheskoy evolyutsii eklogitov Maksyutovskogo kompleksa (Yuzhnyy Ural) [Four episodes of thermal evolution of eclogites of the Maksyutov complex (Southern Urals)] / V.V. Fedkin // Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]. — 2020. — Vol. 61, No. 5–6. — P. 543–558. [in Russian]
19. Chesnokov B.V. Uvelicheniye ob'yoma kvartsevyykh zeren v eklogitakh Yuzhnogo Urala [Increase in volume of quartz grains in eclogites of the Southern Urals] / B.V. Chesnokov, V.A. Popov // Doklady AN SSSR [Reports of the Academy of Sciences of the USSR]. — 1965. — Vol. 162, No. 4. — P. 909–910. [in Russian]
20. Shatsky V.S. Sm-Nd datirovaniye vysokobaricheskogo metamorfizma Maksyutovskogo kompleksa, Yuzhnyy Ural [Sm-Nd dating of high-pressure metamorphism of the Maksyutov complex, Southern Urals] / V.S. Shatsky, E. Jagoutz, O.A. Kozmenko // Trudy RAN. Sektsiya nauk o Zemle [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Section of Earth Sciences]. — 1997. — Vol. 353. — P. 285–288. [in Russian]
21. Beane R. Protolith signatures and element mobility of the Maksyutov subducted slab, Southern Ural Mountains, Russia / R. Beane, S.S. Sorensen // International Geology Review. — 2007. — Vol. 49. — P. 52–72.
22. Beane R.J. The Maksyutov Complex: The first UHP terrane 40 years later / R.J. Beane, M.L. Leech // Geological Society of America Special Paper. — 2007. — No. 419. — P. 153–169. — DOI: 10.1130/2006.2419(08).
23. Bostick B.C. Positive identification of microdiamond from the Maksyutov Complex, south Urals, Russia / B.C. Bostick, R.E. Jones, W.G. Ernst [et al.] // American Mineralogist. — 2003. — Vol. 88. — P. 1709–1717.
24. Brown D. Crustal-scale structure and evolution of an arc-continent collision zone in the southern Urals, Russia / D. Brown, C. Juhlin, J. Alvarez-Marron [et al.] // Tectonics. — 1998. — Vol. 17. — P. 158–171.
25. Brown D. Arc-continent collision in the Southern Urals / D. Brown, P. Spadea, V. Puchkov [et al.] // Earth-Science Reviews. — 2006. — Vol. 79. — P. 261–287.
26. Chen Y. Exhumation of oceanic eclogites: thermodynamic constraints on pressure, temperature, bulk composition and density / Y. Chen, K. Ye, T.F. Wu [et al.] // Journal of Metamorphic Geology. — 2013. — Vol. 31. — P. 549–570.
27. Clarke G.L. The lawsonite paradox: a comparison of field evidence and mineral equilibria modelling / G.L. Clarke, R. Powell, J.A. Fitzherbert // Journal of Metamorphic Geology. — 2006. — Vol. 24. — P. 715–725. — DOI: 10.1111/j.1525-1314.2006.00664.x.



28. Colpron M. Revisiting the "Klondike Orogeny": Permian to Jurassic Development of the Yukon-Tanana Terrane, Northern Canadian Cordillera / M. Colpron, W.C. McClelland, S.J. Piercey [et al.] // *Tectonics*. — 2025. — Vol. 44, No. 6. — DOI: 10.1029/2024TC008748.
29. Dobretsov N.L. Tectonic setting of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Maksutov Complex, Ural Mountains, Russia / N.L. Dobretsov, V.S. Shatsky, R.G. Coleman [et al.] // *International Geology Review*. — 1996. — Vol. 38. — P. 136–160.
30. Dobretsov N.L. Blueschists and eclogites: a possible plate tectonic mechanism for their emplacement from the upper mantle / N.L. Dobretsov // *Tectonophysics*. — 1991. — Vol. 186. — P. 253–268.
31. Fedkin V.V. Zonal garnets of eclogite-glaucophane schist complexes – recorder of the history of their development / V.V. Fedkin // *Journal of Marine Science and Research Ocean*. — 2024. — Vol. 7, No. 1. — P. 1–12. — DOI: 10.33140/JMSRO.07.01.
32. Fedkin V.V. Petrotectonic origin of mafic eclogites from the Maksyutov subduction complex, south Ural Mountains, Russia / V.V. Fedkin, T.D. Burlick, M.L. Leech [et al.] // *Plate Tectonics, Ophiolites, and Societal Significance of Geology*. — Geological Society of America Special Paper 552. — 2021. — P. 177–195. — DOI: 10.1130/2021.2552(09).
33. Glodny J. Precise eclogitization ages deduced from Rb/Sr mineral systematics: the Maksyutov complex, Southern Urals, Russia / J. Glodny, B. Bingen, H. Austrheim [et al.] // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 2002. — Vol. 66, No. 7. — P. 1221–1235.
34. Korsakov A.V. Natural graphite cuboids / A.V. Korsakov, O.V. Rezvukhina, D.I. Rezvukhin [et al.] // *Minerals*. — 2019. — Vol. 9, No. 2. — P. 110–115. — DOI: 10.3390/min9020110.
35. Le Bas M.J. The IUGS systematics of igneous rocks / M.J. Le Bas, A.L. Streckeisen // *Journal of the Geological Society of London*. — 1991. — Vol. 148. — P. 825–833.
36. Leech M.L. Graphite Pseudomorphs After Diamond? A Carbon Isotope and Spectroscopic Study of Graphite Cuboids from the Maksyutov Complex, South Ural Mountains, Russia / M.L. Leech, W.G. Ernst // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 1998. — Vol. 62. — P. 2143–2154.
37. Leech M.L. Petrotectonic evolution of the high- to ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, Karayanova area, south Ural Mountains, Russia: structural and oxygen isotopic constraints / M.L. Leech, W.G. Ernst // *Lithos*. — 2000. — Vol. 52. — P. 235–252.
38. Leech M.L. The late exhumation history of the ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, south Ural Mountains, from new apatite fission track data / M.L. Leech, D.F. Stockli // *Tectonics*. — 2000. — Vol. 19. — P. 153–167. — DOI: 10.1029/1999TC900053.
39. Leech M.L. Thermal modeling of an ultrahigh-pressure complex in the south Urals / M.L. Leech, E. Willingshofer // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2004. — Vol. 226. — P. 85–99.
40. Lennykh V.I. High-pressure metamorphic rocks of the Maksyutov Complex (Southern Urals) / V.I. Lennykh, P.M. Valizer. — Novosibirsk : Russian Academy of Sciences, 1999. — 64 p.
41. Lennykh V.I. Petrotectonic evolution of the Maksyutov Complex, southern Urals, Russia: Implications for ultrahigh-pressure metamorphism / V.I. Lennykh, P.M. Valizer, R. Beane [et al.] // *International Geology Review*. — 1995. — Vol. 37. — P. 584–600. — DOI: 10.1080/00206819509465420.
42. Liou J.G. High pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks / J.G. Liou, R.Y. Zhang, W.G. Ernst [et al.] // *Reviews in Mineralogy*. — 1998. — Vol. 37. — P. 33–96.
43. Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram / M. Meschede // *Chemical Geology*. — 1986. — Vol. 56. — P. 207–218.
44. Mibe K. Slab melting versus slab dehydration in subduction-zone magmatism / K. Mibe, T. Kawamoto, K.N. Matsukage [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2011. — Vol. 108. — P. 8177–8182.
45. Mullen E.D. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminate for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis / E.D. Mullen // *Earth and Planetary Science Letters*. — 1983. — Vol. 62. — P. 53–62.
46. Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust / J.A. Pearce // *Lithos*. — 2008. — Vol. 100. — P. 14–48.
47. Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited / R. Powell // *Journal of Metamorphic Geology*. — 1985. — Vol. 3. — P. 231–243.
48. Puchkov V.N. Paleo-oceanic structures of the Ural Mountains / V.N. Puchkov // *Geotectonics*. — 1993. — Vol. 27. — P. 184–196.
49. Schmidt M.W. The stability of lawsonite and zoisite at high pressures: experiments in CASH to 92 kbar and implications for the presence of hydrous phases in subducted lithosphere / M.W. Schmidt, S. Poli // *Earth and Planetary Science Letters*. — 1994. — Vol. 124. — P. 105–118.
50. Schulte B. K-rich fluid metasomatism at high-pressure metamorphic conditions: Lawsonite decomposition in rodingitized ultramafite of the Maksyutov Complex, southern Urals (Russia) / B. Schulte, S. Sindern // *Journal of Metamorphic Geology*. — 2002. — Vol. 20. — P. 529–541. — DOI: 10.1046/j.1525-1314.2002.00387.x.
51. Schulte B.A. Metamorphic evolution of eclogite and associated garnet-mica schist in the high-pressure metamorphic Maksyutov Complex, Ural, Russia / B.A. Schulte, P. Blümel // *Geologische Rundschau*. — 1999. — Vol. 87. — P. 561–576. — DOI: 10.1007/s005310050231.
52. Spadea P. Initiation and evolution of intra-oceanic subduction in the Uralides: geochemical and isotopic constrains from Devonian oceanic rocks of the Southern Urals, Russia / P. Spadea, M. D'Antonio // *Island Arcs*. — 2006. — Vol. 15. — P. 7–25.



53. Sun S.S. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes / S.S. Sun, W.F. McDonough // *Magmatism in the Ocean Basins* / ed. by A.D. Saunders, M.J. Norry. — Geological Society, Special Publication. — 1989. — Vol. 42. — P. 313–345.
54. Taylor S.R. The continental crust: its composition and evolution / S.R. Taylor, S.M. McLennan. — Oxford : Blackwell, 1985. — 312 p.
55. Volkova N.L. Geochemical signatures for eclogite protolith from the Maksyutov Complex, South Urals / N.L. Volkova, A.E. Frenkel, V.I. Budanov // *Journal of Asian Earth Sciences*. — 2004. — Vol. 23. — P. 745–759. — DOI: 10.1016/S1367-9120(03)00128-7.
56. Whattam S.A. Subduction initiation ophiolites of the SW Pacific I: first-formed MORB-like lavas / S.A. Whattam // *International Geology Review*. — 2023. — Vol. 66, No. 9. — P. 1681–1717. — DOI: 10.1080/00206814.2023.2248489.
57. Whattam S.A. The 'subduction initiation rule': a key for linking ophiolite, intra-oceanic forearcs, and subduction initiation / S.A. Whattam, R.J. Stern // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. — 2011. — P. 1031–1045.
58. Wood D.A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problem of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province / D.A. Wood // *Earth and Planetary Science Letters*. — 1980. — Vol. 50. — P. 11–30.