ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геология*

Реконструкция геодинамической истории комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал: мультидисциплинарный подход

А.В.Березин[1], **Л.И.Салимгараева**[1,2]✉, **В.Н.Пучков**[2]
[1] *Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

Как цитировать эту статью: Березин А.В., Салимгараева Л.И., Пучков В.Н. Реконструкция геодинамической истории комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал: мультидисциплинарный подход // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 91-100. EDN AEBPRK

Аннотация
Представлено детальное изучение истории развития комплекса Марун-Кеу на Полярном Урале. С помощью оригинальных и литературных данных определены диапазоны значений температур и давлений магматической и метаморфической стадий эволюции пород, геотермический градиент и мощность континентальной коры. В термобарометрических расчетах для магматической стадии используют методы машинного обучения (алгоритм «случайного леса»), основанные на экспериментальных данных, и требуют минимальных петрохимических сведений о составе пород. Оценки *PT* параметров метаморфической стадии проводились программным комплексом THERIAK-DOMINO. Породы, вмещающие эклогиты, могут быть результатом частичного плавления континентальной коры под воздействием разогретых основных-ультраосновных расплавов. Установлено, что давление на пике эклогитового метаморфизма, вероятно, не превышало 21 кбар, а значения температуры – 730-750 °С. Регрессивный метаморфизм в эклогитах Марун-Кеу был ограничен температурой не выше 640 °С и давлением не ниже 5 кбар. Геотермический градиент при становлении протолитов эклогитов составлял 13 °С/км, что хорошо согласуется с современными данными для континентальной коры. Угол погружения субдуцировавшей плиты был оценен в 6-8°, а расчетная скорость субдукции составляла 2,2-2,9 см/год, что не противоречит гипотезе континентальной субдукции.

Ключевые слова
метаморфизм; петрогенезис; геодинамика; эклогит; коровая эволюция; субдукция

Финансирование
Исследования выполнены в рамках проекта Российского научного фонда № 22-17-00177.

Поступила: 28.08.2024 ***Принята: 28.01.2025*** ***Онлайн: 27.06.2025*** ***Опубликована: 29.12.2025***

Введение

Уральский ороген представляет классический пример складчатого пояса, прошедшего полный цикл геодинамической эволюции [1]. В пределах Уральского орогена находится значительное количество месторождений различных полезных ископаемых [2-4]. Комплекс Марун-Кеу на Полярном Урале – один из эталонных мест проявления эклогитов – главнейших маркеров геодинамических обстановок. По причине удаленности и сложного геологического строения этот комплекс до сих пор изучен слабо; его возраст [5-7], характер протолитов эклогитов [8, 9], условия образования пород [10-12] и положение в истории развития региона [13-15] являются предметами дискуссий. Большинство проведенных исследований комплекса Марун-Кеу сосредоточено на участке Слюдяная горка. На сравнительно малой площади (~5 км^2) обнажаются эклогиты, развитые по различным типам пород – от ультрабазитов до долеритовых порфиритов.

Наиболее значимый вклад в изучение геологического строения комплекса внесен Н.Г. Удовкиной, опубликовавшей в 1971 г. монографию «Эклогиты Полярного Урала» по результатам детальных геолого-петрографических работ 1956 и 1962 годов [8]. Проявления эклогитов представлены

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

блоками и линзовидными телами, размещенными в гнейсах, иногда с участками амфиболитов. В эклогитах имеет место развитие гранатитов и кианитсодержащих парагенезисов.

Эклогитизация контролируется зонами деформаций [14], которые являются проводниками флюидов. Она проявлена в зонах сдвига мощностью от 1 см до 10 м, тогда как в стороне от зон деформаций сохраняются магматические текстуры и минералы исходных интрузивных пород. В этих зонах деформаций часто образуется сеть прожилков, сложенных как эклогитами, так и мономинеральными зональными агрегатами, представленными омфацитом, гранатом и амфиболом. Метаморфизм эклогитовой фации привел к образованию сложных взаимоотношений эклогитов и амфиболитов, что может стать причиной ошибочных *PT* реконструкций.

Выделяются несколько направлений исследований эклогитов Марун-Кеу: исследование состава минеральных фаз, определение *PT* условий формирования минеральных парагенезисов и оценка времени формирования с последующей геодинамической интерпретацией. В большинстве работ исследуется небольшая группа образцов – не более десятка, а чаще – от одного до трех [10-12]. Такая особенность часто приводит к многообразию гипотез, так как разные авторы исследуют пробы из буквально одного обнажения. В связи с тем, что критерии отбора образцов зависят от специфики исследования (например геохронология и масс-балансовые расчеты для метасоматитов), они могут давать разные результаты. Об этом свидетельствует значительный разброс *PT* параметров для комплекса Марун-Кеу (рис.1) и соответственно наличие разных геодинамических моделей.

Процесс метаморфизма приурочен к зонам трещиноватости и деформаций и особенно затрагивает мелкие ксенолиты эклогитов. Однако зафиксированы тела массивных эклогитов без видимых признаков привноса вещества. Отметим, что ни в одной из известных авторам работ не приводятся оценки относительного количества метаморфически измененных пород по всему комплексу Марун-Кеу. Таким образом, предполагая, что незначительная часть пород была изменена (сильноизмененные породы по данным литературного источника в нашу выборку не включались), с обработкой большого количества данных по их составам возможно выделить особенности, характерные для всего комплекса в целом. За более чем шестидесятилетний период исследования комплекса Марун-Кеу опубликовано значительное количество геохимической информации по породам, которая часто использовалась описательно, без интерпретации.

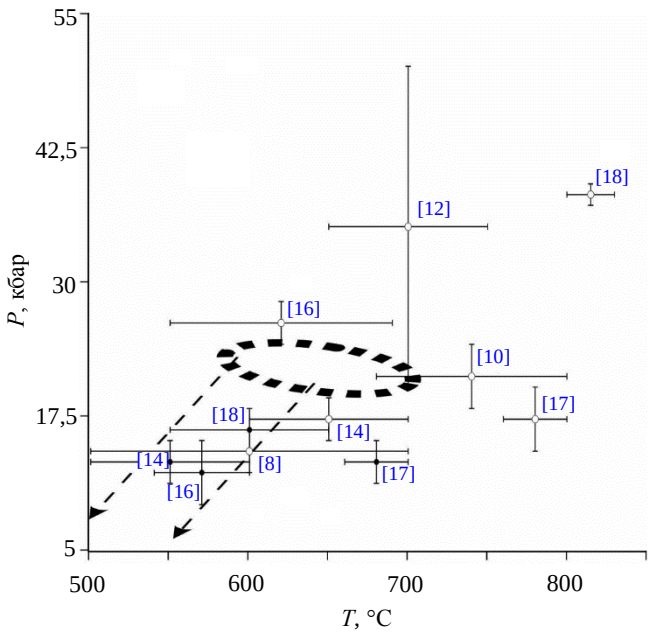


Рис.1. Сводная диаграмма *PT* параметров для пород комплекса Марун-Кеу, построенная по опубликованным данным. Белые маркеры – параметры «пиковой» стадии, черные – регрессивной стадии метаморфизма. Горизонтальные и вертикальные «усы» соответствуют расчетным погрешностям в *PT* параметрах. Область предполагаемых пиковых параметров метаморфизма указана эллипсом с пунктирной границей. Линии со стрелками ограничивают *PT* область для регрессивной стадии метаморфизма

Цель настоящей работы – выявить основные тенденции в эволюции комплекса Марун-Кеу на основе большого количества данных по составу пород, который соответственно и определяет минеральные парагенезисы в них. Для этого решался вопрос, не противоречат ли результаты ранних оценок параметров эволюции, полученные по небольшому количеству представительных образцов, обобщенной модели, предложенной авторами и использующей ретроспективные данные по составам пород (в том числе при отсутствии данных по составу минералов). Оценивался характер эволюции протолитов эклогитов Марун-Кеу от магматической стадии к пиковым *PT* условиям. Впервые устанавливался генезис гнейсов, содержащих блоки эклогитов и ультрабазитов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Образцы и методы исследований

Помимо оригинальных анализов, из литературных источников извлечены данные о химическом составе пород. Включая данные авторов (15 образцов), выборка составила 66 образцов эклогитов и 19 – гнейсов и гранитов, ассоциирующих с эклогитами. Все составы пород для проведения моделирования нормированы к 100 %, исключая данные по MnO и P_2O_5.

Первая задача заключалась в определении температур и давлений, соответствующих магматическому этапу становления пород. Для решения подобного рода задач обычно используется набор классических методов термобарометрии [19-21], однако в данном случае эти методы для массива данных часто невозможно корректно применить по причине полного или частичного отсутствия в литературе информации о составе минералов. В современной литературе описаны альтернативные методы термобарометрии, основанные на методах машинного обучения. С помощью более чем 2900 экспериментальных данных из 135 экспериментов в работе [22] показана возможность расчета температуры с ошибкой до 50 °С, давления – до 2 кбар, используя только химический состав пород по главным элементам. Принцип расчета следующий – петрогенные оксиды для каждой экспериментальной точки, за исключением P_2O_5 и MnO, были нормализованы до 100 %, также отмечены все стабильные минеральные фазы из 10 групп минералов (Ol, Opx, Cpx, Plag, Amph, Bt, Ksp, Qtz, Ox, Gt – по [22]). Далее к массиву экспериментальных данных был применен метод «случайного леса» – один из алгоритмов машинного обучения, который строит несколько деревьев решений и в качестве ответа выдает среднее значение параметра (например, *T* или *P*).

Проведенный нами расчет температур и давлений кристаллизации по 66 ультрабазитам и базитам (в том числе эклогитам) показал, что эти параметры варьируются от 1340-1100 °С и 10-4 кбар соответственно. Средние ошибки расчета не превышают 75 °С для температуры и 2,5 кбар – по давлению. Сравнение с оценками, приведенными в работе [10], показало их высокую сходимость по давлению (6-8 кбар [10] и 6-9 кбар у авторов) и удовлетворительную – по температуре (1253±15 °С [10] и 1192±37 °С у авторов). Для определения плотностей силикатных расплавов с учетом петрогенных оксидов (10-компонентная система), давления и температуры нами был использован метод, реализованный в статье [23] на языке программирования Python, ошибка расчета не превышала 0,02 г/см^3. Для установления возможной природы метаморфизованных кислых-средних пород, вмещающих эклогиты и ультрабазиты, в программном комплексе Rhyolite-MELTS [24] проведено моделирование возможности их образования при частичном плавлении докембрийской континентальный коры [25] под воздействием основных-ультраосновных расплавов.

С целью определения генерального тренда метаморфической эволюции пород авторами настоящей работы проведено физико-химическое моделирование в программном комплексе THERIAK-DOMINO [26]. Использованы составы пород по главным элементам и литературные данные о наличии в них таких минеральных фаз, как пироксены, оливин, шпинель (для субсолидусной магматической ассоциации) и граната, омфацита, амфибола, хлорита (для метаморфической ассоциации). Для расчетов применялась адаптированная база данных ds55 [27] (два варианта для основных и кислых пород), поскольку зачастую данные о породе и составе минералов недоступны. Расчеты проводились при условном присутствии минеральных фаз при фиксированных *PT* параметрах. Для моделирования ассоциации Ol – Opx – Cpx использовались база стандартных термодинамических свойств минералов и свойства смешения их твердых растворов JUN92.bs [28]. С целью оценки величин температур и давлений при переходе от магматической стадии к пиковой метаморфической – эклогитовой – отдельно рассчитывалась устойчивость ассоциации Ol – Opx – Cpx, часто наблюдаемая в эклогитах как реликтовая. Моделирование проводилось при избытке H_2O (оценивалось по сопоставимости модельных и петрографических данных), Fe^{3+} оценено приблизительно, исходя из количества эпидота, биотита или амфибола в породах. Аббревиатуры минералов даны по статье [29], если не указано иное.

Обсуждение результатов

Проведенные расчеты позволили установить, что кристаллизация ультрабазитов и базитов (в том числе протолитов эклогитов) проходила в диапазоне температур 1340-1100 °С и давлений от 11 до 4 кбар. Это соответствует наблюдаемым в породах минеральным парагенезисам (Ol, Opx,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Cpx, Plag). Такие данные позволяют непосредственно оценить плотность основных-ультраосновных расплавов, которые внедрялись в вещество коры. Поскольку система кора – интрузия должна находиться в гидростатическом равновесии, то плотности расплавов будут близки плотности коры, представляя, по сути, ее разрез (рис.2, *а*). Значения максимальной плотности 3,06 г/см^3 пород соответствуют наибольшим давлениям и температурам, убывая в дальнейшем до 2,60 г/см^3.

Оценка максимальной мощности коры при внедрении расплавов проводилась дифференцированно, в соответствии с изменением плотности и давления (рис.2, *а*), принимая все давление литостатическим. Полученные оценки составляют диапазон 38-40 км и хорошо согласуются с современными данными для континентальной коры [30]. Основываясь на рис.2, можно предположить, что по крайней мере часть наиболее высокотемпературных ультраосновных пород может определяться первичным мантийным происхождением вблизи границы кора – мантия, либо, как и локальная область высокоплотных ультрабазитов (~1170 °С), быть кумулатной природы. Можно достаточно уверенно предположить, что ультраосновные и основные породы комплекса Марун-Кеу обладают природой частичных выплавок из верхней мантии, тогда как часть пород, вмещающих блоки эклогитов и ультрабазитов, могла быть образована путем плавления вещества континентальной коры. Предложена авторская методика оценки температурного градиента, основанная на непосредственной генетической связи кислых пород как продуктов частичного плавления континентальной коры при термальном воздействии основных-ультраосновных расплавов. Предполагается, что породы континентальной коры уже нагреты до какой-то температуры, в соответствии с градиентом. В первом приближении можно считать, что плавление вмещающих пород континентальной коры начинается одномоментно с внедрением в нее основных расплавов. Кристаллизация минералов из «приконтактовой», относительно магматической камеры, выплавки (кислой-средней по составу) начинается только после того, как система магматическая камера – кора достигнет температурного равновесия. Таким образом, непосредственная разница рассчитанных температур кристаллизации для основных и кислых-средних составов будет пропорциональна температуре непосредственного нагрева пород континентальной коры, определяемой температурным градиентом. Для нивелирования ошибок в индивидуальных определениях расчет проведен путем разбивки всего диапазона давлений на интервалы с шагом 1 кбар и вычисления средней разницы температур в их пределах (принцип такого расчета проиллюстрирован на рис.2, *б*). Как показывает рис.2, *в*, расчетные точки градиента образуют линейный тренд, угловой коэффициент

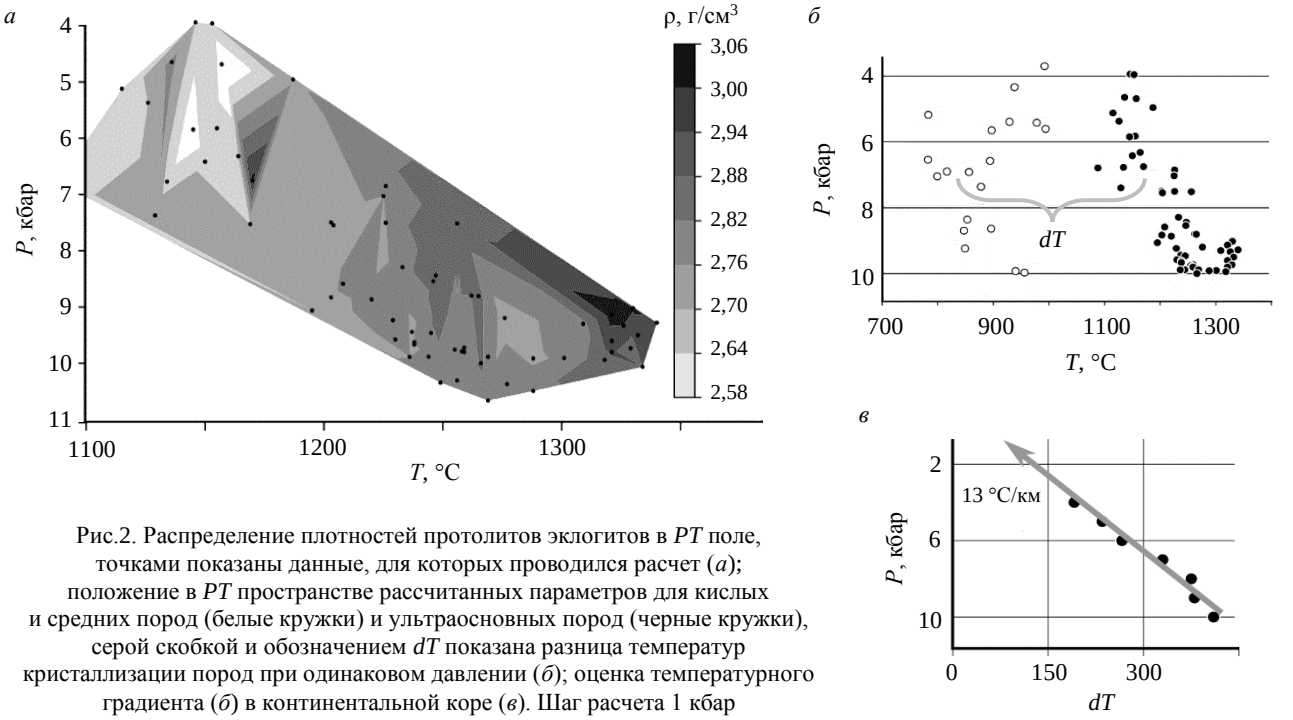


Рис.2. Распределение плотностей протолитов эклогитов в *PT* поле, точками показаны данные, для которых проводился расчет (*а*); положение в *PT* пространстве рассчитанных параметров для кислых и средних пород (белые кружки) и ультраосновных пород (черные кружки), серой скобкой и обозначением *dT* показана разница температур кристаллизации пород при одинаковом давлении (*б*); оценка температурного градиента (*б*) в континентальной коре (*в*). Шаг расчета 1 кбар

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

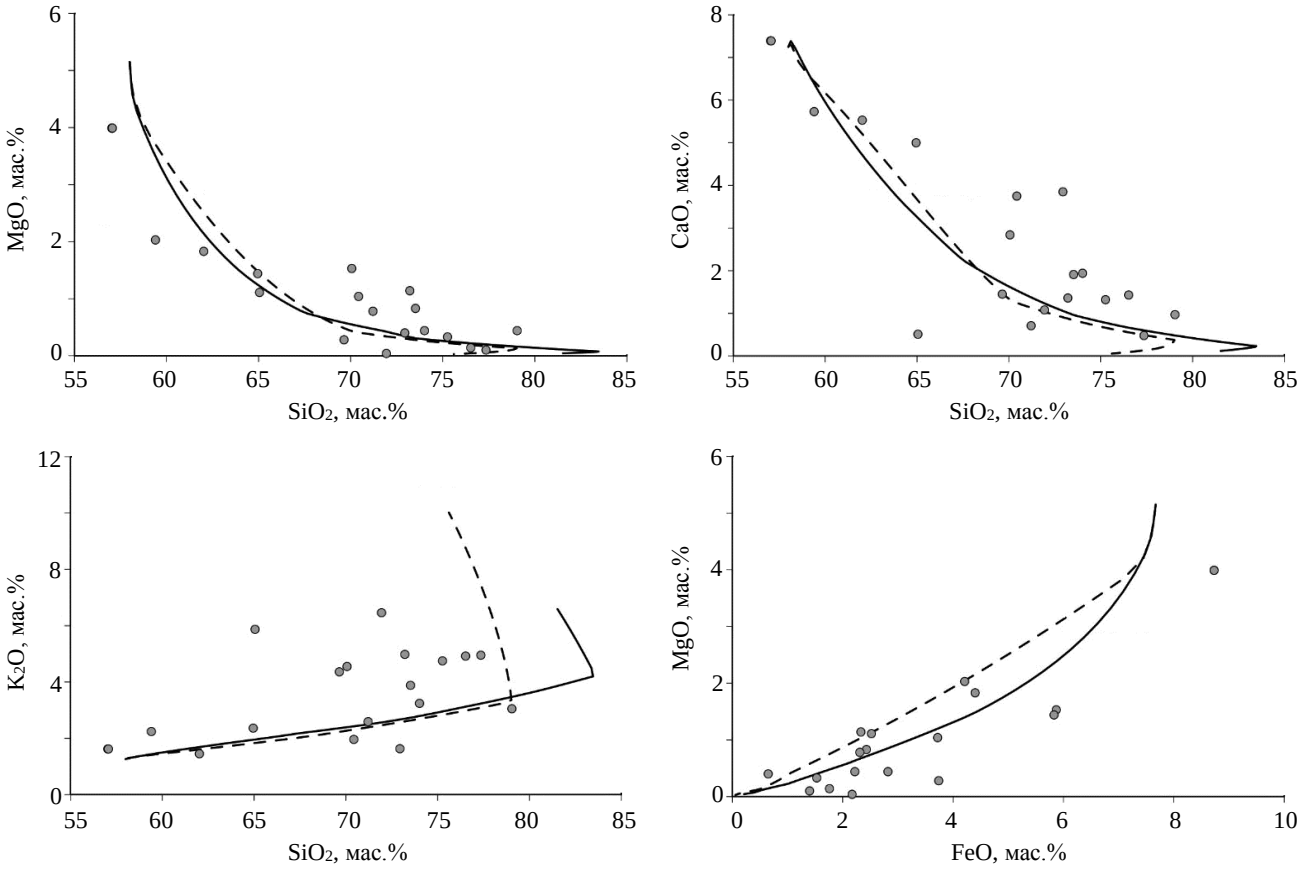


Рис.3. Вариационные диаграммы для пород матрикса эклогитов Марун-Кеу с модельными траекториями частичного плавления вещества континентальной коры при давлениях 5 (пунктирная линия) и 10 (сплошная линия) кбар

которого соответствует температурному градиенту около 13 °С/км. Эти результаты следует считать предварительными ввиду ограниченного количества данных для расчетов.

Как показано на рис.3, положение фигуративных точек составов пород, вмещающих тела основных (в том числе эклогитов) и ультраосновных пород, удовлетворительно описывается моделью равновесного плавления материала континентальной коры по статье [25], принимая ее состав на глубинах, соответствующих давлениям 4-10 кбар, постоянным. Разные степени частичного плавления пород коры, необходимые для генерации таких составов, могли определяться разным режимом термального воздействия на нее, зависящим, например, от объема магматических камер, теплофизических свойств и состава расплава. Следует отметить, что максимальные температуры, необходимые для генерации таких расплавов, находятся в хорошей согласованности с расчетными температурами, описанными выше, для протолитов эклогитов, не превышая их. Отклонения точек составов пород от модельных траекторий, особенно щелочей, может быть связано с их значительной подвижностью при процессе частичного плавления.

Оценки пикового давления и температуры, соответствующих эклогитовому этапу метаморфизма комплекса Марун-Кеу, весьма различны. Некоторые из авторов предполагают параметры, соответствующие ультравысокобарическим условиям – вплоть до 50 кбар [12]. Наиболее корректные, на наш взгляд, оценки пиковых параметров, основанные на методах мультиминеральной термобарометрии, приведены в статье [10], где авторы оценивают пиковые условия эклогитового метаморфизма – 22 кбар и 680 °С. Близкие им величины – 20,5 кбар и 790 °С приведены в работе [17] и интерпретируются как часть сложного тренда эволюции пород – от эклогитовой фации через гранулитовую к амфиболитовой фации.

Как показал расчет (рис.4), точки составов пород образуют вытянутую область, имеющую отрицательный угловой коэффициент, соответствующий градиенту порядка 13 °С/км. Поле

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 91-100
© А.В.Березин, Л.И.Салимгараева, В.Н.Пучков, 2025

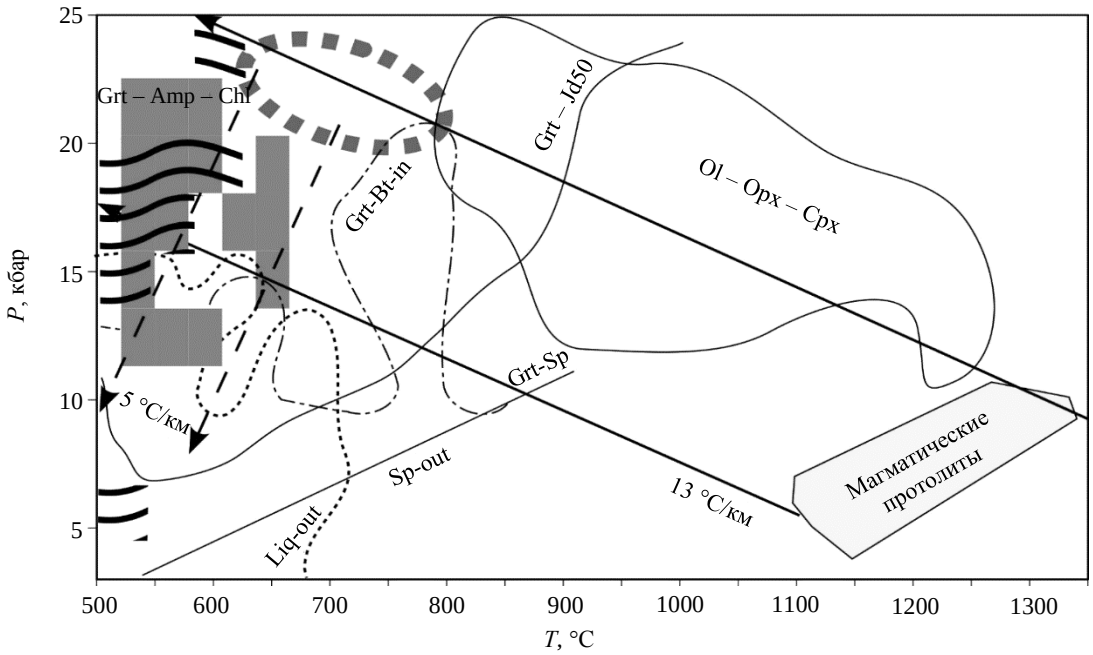


Рис.4. Сводная диаграмма полей устойчивости минеральных ассоциаций в породах Марун-Кеу, построенная по результатам моделирования

Ассоциации: Ol – Opx – Cpx – оливин-ортопироксен-клинопироксеновая (постмагматическая, предпиковая), Grt – Amp – Chl – гранат-амфибол-хлоритовая (темно-серое поле), Grt – Jd50 – гранат-омфацитовая; Grt-Bt-in – граница поля устойчивости ассоциации граната-биотита (штрихпунктирная линия); Sp-out – граница устойчивости включений шпинели (сплошная линия); Liq-out – приближенная граница начала плавления для пород матрикса, включающего блоки эклогитов (штриховая линия); парагенезисы с тальком (черные волнистые линии); область предполагаемых пиковых параметров метаморфизма (эллипс с серой пунктирной границей); расчетные градиенты: прогрессивная стадия (сплошные линии со стрелками), регрессивная (пунктирные линии со стрелками). Светло-серое поле для магматической стадии эволюции пород дано согласно рис.2, *а*

ассоциации Ol – Cpx – Opx не пересекается с областью магматических протолитов ввиду того, что в базе стандартных термодинамических свойств минералов и свойств смешения их твердых растворов JUN92.bs [28] отсутствуют данные для расплавов. При условиях пересечения трендом данного градиента области пиковых параметров эклогитового метаморфизма и неустановлении коэсита в эклогитах комплекса Марун-Кеу можно предположить вероятность нахождения пиковой температуры в интервале 600-800 °С, что не противоречит приведенным выше литературным данным, а давления – не выше 25 кбар. При дальнейшей интерпретации рис.4 следует учесть, что ультрабазиты при метаморфизме могли достигать области стабильности амфибола и хлорита с образованием соответствующих парагенезисов. Отметим, что линейные ограничения (линии градиентов) на рисунке не предполагают линейного характера эволюции от магматических к метаморфическим породам, а лишь ограничивают возможную область вариантов.

Предполагая совместное перемещение эклогитов и вмещающих их пород, можно уточнить направление преобразований, используя данные полей устойчивости граната, биотита и эпидота, а также условий начала процессов плавления пород матрикса эклогитов. Моделирование показало, что ассоциация гранат и биотит, широко проявленная в гнейсах, не стабильна выше 21 кбар. Поле устойчивости ассоциации гранат – биотит – эпидот еще у́же и ограничено диапазоном давления 7-13 кбар и температуры не выше 730 °С. При этих параметрах степень частичного плавления субстрата кислого состава с образованием мигматитов весьма незначительна, что полностью согласуется с полевыми наблюдениями авторов и известными литературными данными [8].

Для регрессивной, постэклогитовой стадии метаморфизма авторские, а также литературные [18] данные однозначно фиксируют присутствие включений амфибола и хлорита в гранате, причем их составы аналогичны этим же минералам в матриксе породы. Это позволяет достаточно жестко ограничить предельные температуры равновесия величиной 670 °С, а также оценить параметры давления – не ниже 11 кбар. В некоторых зернах граната установлено наличие талька, вероятно заместившего оливин. По результатам моделирования было установлено, что тальк становится

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

стабильным ниже 20 кбар и при температуре около 640 °С, и его поле стабильности частично перекрывается описанной выше ассоциацией гранат – амфибол – хлорит, образуя достаточно компактную область, вплоть до параметров менее 11 кбар и 500 °С соответственно. Используя оценку пиковых параметров и данные по регрессивной ветви метаморфизма, возможно оценить геотермический градиент, который составляет 5±2 °С/км.

Авторы предполагают в качестве наиболее вероятной модели образования комплекса Марун-Кеу процессы, связанные с субдукцией и последующей эксгумацией в ходе коллизии. Поэтому для корректной оценки скорости погружения было необходимо оценить угол наклона субдуцирующей плиты. Согласно расчетам по эмпирическим уравнениям [31], значение угла наклона находится в диапазоне 6-8°, что представляется вполне правдоподобным [32].

Принимая максимальное давление магматического этапа в 11 кбар, а пиковые условия эклогитового метаморфизма в 21 кбар, и полагая давление литостатическим, что правомерно вплоть до глубин 60-80 км [33], получаем оценки вертикальных скоростей погружения порядка 0,23-0,37 см/год. Аппроксимируя субдуцирующую плиту в первом приближении жесткой плоскостью, для приведенных выше углов наклона плиты получаем оценку скорости субдукции в диапазоне 2,9-2,2 см/год, принимая возраст для магматических протолитов 470-500 млн лет, а возраст эклогитового метаморфизма – 360-370 млн лет [17, 34, 35]. На сегодняшний момент авторам неизвестны прецизионные определения времени образования регрессивных парагенезисов, поэтому корректно оценить скорость эксгумации пород на данный момент не представляется возможным.

Дискуссия и выводы

Проведенные расчеты позволили установить, что диапазон температур 1340-1100 °С и давлений от 11 до 4 кбар для магматической стадии формирования протолитов эклогитов хорошо согласуется с современными представлениями о разрезе континентальной коры. Учитывая плотность пород, очевидно, что наиболее ультраосновные разности были размещены в нижней коре. Расчетный геотермический градиент в 13 °С/км не противоречит этому предположению и косвенно указывает на максимально возможный возраст материала коры – 2,5 млрд лет [36]. Градиент 5 °С/км, отвечающий регрессивной стадии, практически однозначно определяет максимальную оценку возраста регрессивного метаморфизма – около 600 млн лет. Следуя известным данным [17, 34, 35], авторы придерживаются именно такого порядка величин – 470-500 млн лет для магматического протолита эклогитов и гранитов и 360-370 млн лет для возраста эклогитового метаморфизма.

Механизм, который мог привести к наблюдаемым совместно в настоящее время эклогитам и вмещающим породам матрикса, нам представляется следующим. Поскольку расплавы основных и ультраосновных пород внедрялись в вещество коры, то при этом происходило его частичное плавление. Об этом может свидетельствовать близкий возраст ядер циркона в эклогитах и кислых породах, составляющий примерно 500 млн лет [36]. Однако ввиду малого размера внутрикоровых магматических резервуаров основных-ультраосновных пород относительный объем таких выплавок был весьма незначительным. Следует отметить, что на стадиях эволюции, следующих с временным разрывом за магматическим этапом (эклогитовый метаморфизм и последующая эксгумация пород на верхние уровни), первичные контакты были утрачены – сорваны или тектонизированы. Кроме этого, вероятно, что в комплексе Марун-Кеу могут присутствовать и реликтовые блоки, соответствующие древней континентальной коре. Анортозиты, часто описываемые в качестве компонентов нижней континентальной коры [25], в том числе эклогитизированные, также отмечены на участке Слюдяная горка. Возможна и альтернативная интерпретация присутствия анортозитов как пород-кумулатов.

Альтернативному варианту, который предполагает, что все породы матрикса эклогитов являются просто тектонически совмещенным коровым веществом, противоречит то, что породы матрикса варьируются по составу от средних до практически ультракислых. Изотопно-геохимические данные по циркону из пород матрикса также указывают на то, что породы матрикса могли испытать эклогитовый метаморфизм совместно с основными и ультраосновными породами данного района [35].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Пиковые условия эклогитового метаморфизма, вероятно, не превышали 21 кбар по давлению и 730-750 °С по температуре. Эти значения хорошо соотносятся с оценками, данными ранее [10]. Кроме того, отмечается, что в эклогитовых ассоциациях Слюдяной горки не установлен омфацит с мольной долей жадеитового минала $X_{Jd} > 0,5$, который предполагал бы бóльшие пиковые давления. Наличие включений рутила как в гранате, так и в натровом пироксене по результатам моделирования ограничивает снизу давление эклогитового метаморфизма величиной около 18 кбар. Однако такие включения установлены не повсеместно. Следует отметить, что на этапе перемещения из коровых условий в условия эклогитовой фации породы проходили различный барический путь, соответствующий разной глубине, вплоть до давлений 15-16 кбар.

Приведенные параметры имеют значительные отличия от оценок по термометрам и барометрам для пары гранат и ортопироксен (830 °С и 39 кбар по [18]). Это обусловлено тем, что для качественных определений критично содержание алюминия в пироксене и хрома в гранате, которые крайне малы и с учетом метода определения состава минералов могут приводить к существенному завышению значений давления и температуры. В работе [16] авторы оценили давление в 27 кбар и, указывая на включения поликристаллического кварца в гранате, интерпретируют его как псевдоморфозы по коэситу. Однако в подавляющем большинстве зерен граната наблюдается обычный кварц, что позволяет предположить пиковое давление, не достигающее поля устойчивости коэсита.

Гипотеза, предполагающая давление до 50 кбар [12], основана на интерпретации присутствия сегрегаций карбонатов, не рассматривая их как результат проникновения карбонатных флюидов на регрессивной стадии метаморфизма. Наличие таких сегрегаций в одном обнажении указывает скорее на их ограниченное распространение в породах. Также остается неясной стабильность апатита, обогащенного REE, при столь высоких давлениях.

Регрессивная минеральная ассоциация в эклогитах, как правило представленная хлоритом, амфиболом и тальком, определяет постпиковую ветвь эволюции. Диапазон давления здесь составляет 5-11 кбар при температуре ниже 640 °С. Расчетный геотермический градиент для этой ветви эволюции пород составил около 5 °С/км. Это значение крайне мало и может представлять собой результат интегрального действия процессов эксгумации пород и их остывания. Для точной оценки скорости эксгумации и *PT* параметров при этом требуются дополнительные исследования.

Природа образования гнейсов, в том числе вмещающих эклогиты, может быть интерпретирована как результат частичного плавления вещества древней коры. Однако нельзя исключать и присутствия кислых пород, протолитами которых могли быть метаосадки. Этот вопрос требует дальнейших геохимических и изотопно-геохимических доказательств.

Угол погружения плиты во время формирования комплекса Марун-Кеу был оценен в 6-8°, а предполагаемая скорость субдукции могла составлять 2,2-2,9 см/год. Такая оценка хорошо согласуется с единственным известным авторам значением – 2,8 см/год, полученным ранее на основе геологических данных [37]. Учитывая субизотермический характер постпиковой истории развития пород, можно предположить возможный механизм в рамках гипотезы континентальной субдукции. Термомеханическое моделирование, проведенное ранее [38], показало, что континентальная субдукция медленнее, по сравнению с океанической (1-3 см/год), а ее низкая скорость определяет относительно малую степень деформации пород. При таких процессах возможно погружение континентальной окраины на относительно небольшие глубины и лишь часть погруженных пород может достигать высокобарных *PT* условий, что и приводит к большому разбросу оценок давлений и температур на относительно локальных участках.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов К.С., Пучков В.Н.* Структурно-формационные зоны Уральского складчатого пояса: обзор данных и развитие новых идей // Геотектоника. 2022. № 6. С. 78-113. DOI: 10.31857/S0016853X22060030

2. *Кисин А.Ю., Притчин М.Е., Озорнин Д.А.* Геолого-структурная позиция Светлинского месторождения золота (Южный Урал) // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 369-376. DOI: 10.31897/PMI.2022.46

3. *Недосекова И.Л.* Карбонатитовые комплексы Южного Урала: геохимические особенности, рудная минерализация и связь с геодинамическими обстановками // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 349-368. DOI: 10.31897/PMI.2022.28

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

4. *Попов М.П.* Особенности редкометалльного оруденения и генетическая связь минеральных ассоциаций в восточном обрамлении Мурзинско-Адуйского антиклинория (Уральская изумрудоносная полоса) // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 337-348. DOI: 10.31897/PMI.2022.19

5. *Шацкий В.С., Симонов В.А., Ягоутц Э. и др.* Новые данные о возрасте эклогитов Полярного Урала // Доклады Академии наук. 2000. Т. 371. № 4. С. 519-523.

6. *Андреичев В.Л., Ронкин Ю.Л., Серов П.А. и др.* Новые данные о докембрийском возрасте эклогитов Марункеу (Полярный Урал) // Доклады Академии наук. 2007. Т. 413. № 4. С. 503-506.

7. *Glodny J., Austrheim H., Molina J.F. et al.* Rb/Sr record of fluid-rock interaction in eclogites: The Marun-Keu complex, Polar Urals, Russia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2003. Vol. 67. Iss. 22. P. 4353-4371. DOI: 10.1016/S0016-7037(03)00370-3

8. *Удовкина Н.Г.* Эклогиты Полярного Урала (на примере южной части хр. Марун-Кеу). М.: Наука, 1971. 191 с.

9. *Удовкина Н.Г.* Эклогиты СССР. М.: Наука, 1985. 288 с.

10. *Лю И., Перчук А.Л., Арискин А.А.* Высокобарный метаморфизм в перидотитовом кумулате комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал // Петрология. 2019. Т. 27. № 2. С. 138-160. DOI: 10.31857/S0869-5903272138-160

11. *Liu Y.Y., Perchuk A.L., Philippot P.* Eclogites from the Marun-Keu Complex, Polar Urals, Russia: a record of hot subduction and sub-isothermal exhumation // Geological Society, London, Special Publications. 2019. Vol. 474. P. 255-274. DOI: 10.1144/SP474.6

12. *Шмелев В.Р., Мэн Ф.-С.* Свидетельства ультравысокобарической эволюции гранатовых перидотитов Полярного Урала // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 513. № 1. С. 90-95. DOI: 10.31857/S2686739723601187

13. *Glodny J., Pease V., Montero P. et al.* Protolith ages of eclogites, Marun-Keu Complex, Polar Urals, Russia: implications for the pre- and early Uralian evolution of the northeastern European continental margin // Geological Society, London, Memoirs. 2004. Vol. 30. P. 87-105. DOI: 10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.09

14. *Molina J.F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A.* The eclogites of the Marun-Keu complex, Polar Urals (Russia): fluid control on reaction kinetics and metasomatism during high *P* metamorphism // Lithos. 2002. Vol. 61. Iss. 1-2. P. 55-78. DOI: 10.1016/S0024-4937(02)00070-1

15. *Molina J.F., Poli S., Austrheim H. et al.* Eclogite-facies vein systems in the Marun-Keu complex (Polar Urals, Russia): textural, chemical and thermal constraints for patterns of fluid flow in the lower crust // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2004. Vol. 147. P. 484-504. DOI: 10.1007/s00410-004-0569-z

16. *Гульбин Ю.Л., Михальский Е.В.* Моделирование минеральных парагенезисов и термобарометрия метавулканических пород серии Рукер, Южные горы Принс-Чарльз, Восточная Антарктида // Записки Российского минералогического общества. 2019. Т. 148. № 5. С. 24-44. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1485.01

17. *Abdrakhmanov I.A., Gulbin Y.L., Skublov S.G., Galankina O.L.* Mineralogical Constraints on the Pressure–Temperature Evolution of Granulites in the Bunger Hills, East Antarctica // Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 5. № 488. DOI: 10.3390/min14050488

18. *Никитина Л.П., Марин Ю.Б., Корешкова М.Ю. и др.* Ксенолиты высокоглиноземистых пироксенитов в базальтах вулкана Сигурд, о. Шпицберген (*арх. Свальбард*) как индикаторы геодинамики литосферы региона в палеозое // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 10. С. 1319-1340. DOI: 10.15372/GiG2022106

19. *Weber G., Blundy J.* A Machine Learning-Based Thermobarometer for Magmatic Liquids // Journal of Petrology. 2024. Vol. 65. Iss. 4. № egae020. DOI: 10.1093/petrology/egae020

20. *Iacovino K., Till C.B.* DensityX: A program for calculating the densities of magmatic liquids up to 1,627 °C and 30 kbar // Volcanica. 2019. Vol. 2. № 1. P. 1-10. DOI: 10.30909/vol.02.01.0110

21. *Gualda G.A.R., Ghiorso M.S., Lemons R.V., Carley T.L.* Rhyolite-MELTS: a Modified Calibration of MELTS Optimized for Silica-rich, Fluid-bearing Magmatic Systems // Journal of Petrology. 2012. Vol. 53. Iss. 5. P. 875-890. DOI: 10.1093/petrology/egr080

22. *Rudnick R.L., Fountain D.M.* Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective // Reviews of Geophysics. 1995. Vol. 33. Iss. 3. P. 267-309. DOI: 10.1029/95RG01302

23. *de Capitani C., Petrakakis K.* The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software // American Mineralogist. 2010. Vol. 95. Iss. 7. P. 1006-1016. DOI: 10.2138/am.2010.3354

24. *Holland T.J.B., Powell R.* An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest // Journal of Metamorphic Geology. 1988. Vol. 16. Iss. 3. P. 309-343. DOI: 10.1111/j.1525-1314.1998.00140.x

25. *Berman R.G.* Internally-Consistent Thermodynamic Data for Minerals in the System Na_2O-K_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2-H_2O-CO_2 // Journal of Petrology. 1988. Vol. 29. Iss. 2. P. 445-522. DOI: 10.1093/petrology/29.2.445

26. *Warr L.N.* IMA–CNMNC approved mineral symbols // Mineralogical Magazine. 2021. Vol. 85. Iss. 3. P. 291-320. DOI: 10.1180/mgm.2021.43

27. *Hacker B.R., Kelemen P.B., Behn M.D.* Continental Lower Crust // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2015. Vol. 43. P. 167-205. DOI: 10.1146/annurev-earth-050212-124117

28. *Куликова К.В., Варламов Д.А.* Эклогит-гнейсовый комплекс хребта Марункеу (Полярный Урал) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания, 15-18 октября 2014, Иркутск, Россия. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2014. Вып. 12. С. 177-179.

29. *Селятицкий А.Ю., Куликова К.В.* Эволюция химического состава граната при метаморфизме перидотитов UHP-комплекса Марун-Кеу (Полярный Урал) // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2017. № 8. С. 36-43. DOI: 10.19110/2221-1381-2017-8-36-43

30. *Jiashun Hu, Gurnis M.* Subduction Duration and Slab Dip // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2020. Vol. 21. Iss. 4. № e2019GC008862. DOI: 10.1029/2019GC008862

31. *Гаврилов С.В., Харитонов А.Л.* Геодинамическая модель глубинного строения палеосубдукционной зоны на восточной окраине Русской палеоплиты и распределение месторождений нефти и газа // Вестник Пермского университета. Геология. 2020. Т. 19. № 1. С. 1-12. DOI: 10.17072/psu.geol.19.1.1

32. *Yamato P., Agard P., Burov E. et al.* Burial and exhumation in a subduction wedge: Mutual constraints from thermomechanical modeling and natural P-T-t data (Schistes Lustrés, western Alps) // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2007. Vol. 112. Iss. B7. № B07410. DOI: 10.1029/2006JB004441

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

33. *Удоратина О.В., Куликова К.В., Шуйский А.С. и др.* Гранитоидный магматизм севера Урала: U-Pb возраст, эволюция, источники // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 2. С. 287-309 (in English). DOI: 10.5800/GT-2021-12-2-0525

34. *Salimgaraeva L., Berezin A., Sergeev S. et al.* Zircons from Eclogite-Associated Rocks of the Marun-Keu Complex, the Polar Urals: Trace Elements and U–Pb Dating // Geosciences. 2024. Vol. 14. Iss. 8. № 206. DOI: 10.3390/geosciences14080206

35. *Nicoli G., Moyen J.-F., Stevens G.* Diversity of burial rates in convergent settings decreased as Earth aged // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. № 26359. DOI: 10.1038/srep26359

36. *López-Carmona A., Tishin P.A., Chernyshov A.I. et al.* UHP metamorphism in the Polar Urals: evidences from the Marun-Keu Complex (Russia) // Петрология магматических и метаморфических формаций: Материалы Всероссийской петрографической конференции с международным участием. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2016. Вып. 8. С. 15-19 (in English).

37. *Иванов К.С.* Оценка палеоскоростей субдукции и коллизии при формировании Урала // Доклады Академии наук. 2001. Т. 377. № 2. С. 231-234.

38. *Завьялов С.П., Захаров В.С.* Континентальная субдукция в палеопротерозое: условия и особенности протекания по результатам суперкомпьютерного моделирования // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2016. Т. 91. Вып. 4-5. С. 103-116.

***Авторы*: Алексей Васильевич Березин,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник* (*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-5324-5840*, **Ляйсан Ильшатовна Салимгараева,** *канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник* (*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия*), *научный сотрудник* (*Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *fluoritecaf2@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3285-847X*, **Виктор Николаевич Пучков**, *д-р геол.-минерал. наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник* (*Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия*) *https://orcid.org/0000-0003-2972-5497*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0