

УДК 552.4

АРХЕЙСКО-ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКАЯ ИСТОРИЯ МЕТАМОРФИЗМА ПОРОД УРАЛЬСКОГО СЕГМЕНТА ЗЕМНОЙ КОРЫ

А. М. Пыстин, Ю. И. Пыстина

*Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
Сыктывкарский государственный университет, Сыктывкар*

На Урале архейские и палеопротерозойские образования установлены в составе некоторых полиметаморфических комплексов, которые выступают на дневную поверхность в относительно небольших тектонических блоках (площадью до первых тысяч кв. км). Наиболее достоверной является принадлежность к архейско-палеопротерозойскому разрезу пород, слагающих полиметаморфические комплексы, расположенные в пределах палеоконтинентальной области Урала, к западу от Главного Уральского разлома. Эти комплексы интерпретируются как фрагменты кристаллического основания приуральской части Восточно-Европейского кратона, вовлеченные в структуру уралид. В породах полиметаморфических комплексов палеоконтинентальной (и частично, палеоокеанической) области Урала установлено два этапа метаморфизма гранулитовой фации: ранний – неоархейский и поздний – палеопротерозойский. Высокобарические минеральные парагенезисы являются продуктами наиболее ранних эндогенных процессов преобразования пород в эклогитсодержащих комплексах, где высокобарический метаморфизм, по-видимому, комплементарен палеопротерозойскому гранулитовому метаморфизму.

Ключевые слова: палеоконтинентальная область Урала, полиметаморфический комплекс, гранулит, эклогит.

A. M. Pystin, Yu. I. Pystina. ARCHEAN AND PALEOPROTEROZOIC HISTORY OF ROCK METAMORPHISM IN THE URALS CRUSTAL SEGMENT

In the Urals, Archean and Paleoproterozoic formations were found in several polymetamorphic complexes which crop out as relatively small tectonic blocks (within the first thousands sq. km in area). It is most likely that the rocks forming the polymetamorphic complexes located within the paleocontinental Ural area extending to the west of the Main Uralian Fault belong to the Archean-Paleoproterozoic section. These complexes are interpreted as fragments of the crystalline basement of the Ural part of the East European Craton, which are included in the structure of the Uralides. Two stages of the granulite facies metamorphism – earlier Neoafrican and later Paleoproterozoic – were established in the rocks of the polymetamorphic complexes in the paleocontinental (and partially paleoceanic) Ural region. High-pressure mineral parageneses are the products of the earliest endogenous rock transformational processes in eclogite-bearing complexes, where high-pressure metamorphism is apparently complementary to the Paleoproterozoic granulite metamorphism.

Keywords: the Ural Paleocontinental Zone, polymetamorphic complex, granulite, eclogite.

Введение

В разрезе уральского нижнего докембрия присутствуют архейские (вплоть до 3,5 млрд лет) и палеопротерозойские образования. Они представлены высокотемпературными и сложнодислоцированными комплексами пород (полиметаморфическими комплексами), выступающими на дневную поверхность в относительно небольших тектонических блоках (площадью до первых тысяч кв. км). К настоящему времени на Урале известно около трех десятков полиметаморфических комплексов. По вещественным признакам и особенностям метаморфизма пород мы выделяем гнейсо-гранулитовые, гнейсо-мигматитовые, кристаллосланцевые, гранулит-метабазитовые, эклогито-гнейсовые и эклогито-сланцевые комплексы (рис. 1). Все ли они относятся к архейско-палеопротерозойскому разрезу, остается неясным, поскольку только для некоторой части этих образований достоверно установлен домезопротерозойский возраст проявления наиболее ранних метаморфических событий или столь же древний возраст протолитов метаморфических пород.

Наиболее достоверной представляется принадлежность к архейско-палеопротерозойскому разрезу пород, слагающих полиметаморфические комплексы, расположенные в пределах палеоконтинентальной области Урала. Они компактно расположены в трех «узлах», приуроченных к главным поперечным поднятиям (по отношению к Уралу): Собскому – на Полярном Урале, Кожимскому – на границе Полярного и Приполярного Урала и Уфимскому – на Южном Урале. Эти комплексы можно интерпретировать как эксгумированные фрагменты гетерогенного кристаллического фундамента приуральской окраины Восточно-Европейской платформы. Правомерность такого предположения подтверждается, в частности, геофизическими данными, свидетельствующими о продолжении структур платформенного основания под Уралом, по крайней мере, до Главного Уральского разлома (рис. 2).

Менее определенным является вопрос о масштабах распространения архейско-палеопротерозойских комплексов в палеоокеанической зоне Урала. Некоторые исследователи не исключают широкое распространение таких пород в антиклинорных структурах, где они представлены преимущественно гнейсами и продуктами их гранитизации [Кейльман, 1974; Стратиграфические..., 1994; Шалагинов, 1997 и др.].

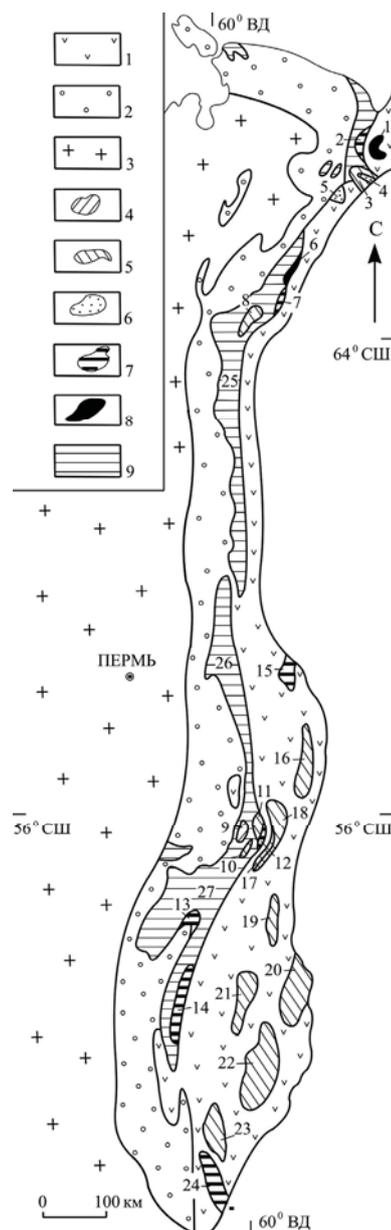


Рис. 1. Схема расположения полиметаморфических комплексов Урала (по: [А. М. Пыстин, 1994] с дополнениями):

1–2 – палеозойские формации: 1 – палеоокеанические; 2 – палеоконтинентальные; 3 – осадочный чехол Европейской платформы; 4–7 – нижнедокембрийские (?) полиметаморфические комплексы: 4 – гнейсо-гранулитовые, 5 – гнейсо-мигматитовые, 6 – кристаллосланцевые, 7 – эклогито-гнейсовые и эклогито-сланцевые; 8 – гранулит-метабазитовые; 9 – верхнепротерозойские образования, преимущественно претерпевшие зеленосланцевый метаморфизм. Метаморфические комплексы: 1 – малькский, 2 – марункеуский, 3 – ханмейхойский, 4 – париквасьшорский, 5 – хараматалоуский, 6 – хордьюский, 7 – неркаюский, 8 – няртинский, 9 – тараташский, 10 – александровский, 11 – уфалейский, 12 – восточно-уфалейский, 13 – белорецкий, 14 – максютовский, 15 – салдинский, 16 – мурзинско-адуйский, 17 – ильменогорский, 18 – сысертский, 19 – кочкарский, 20 – маринский, 21 – адамовский, 22 – текельдытауский, 23 – кайрактинский, 24 – талдыкский. Основные области развития докембрия: 25 – Центрально-Уральская зона, 26 – Кваркушское поднятие, 27 – Башкирское поднятие

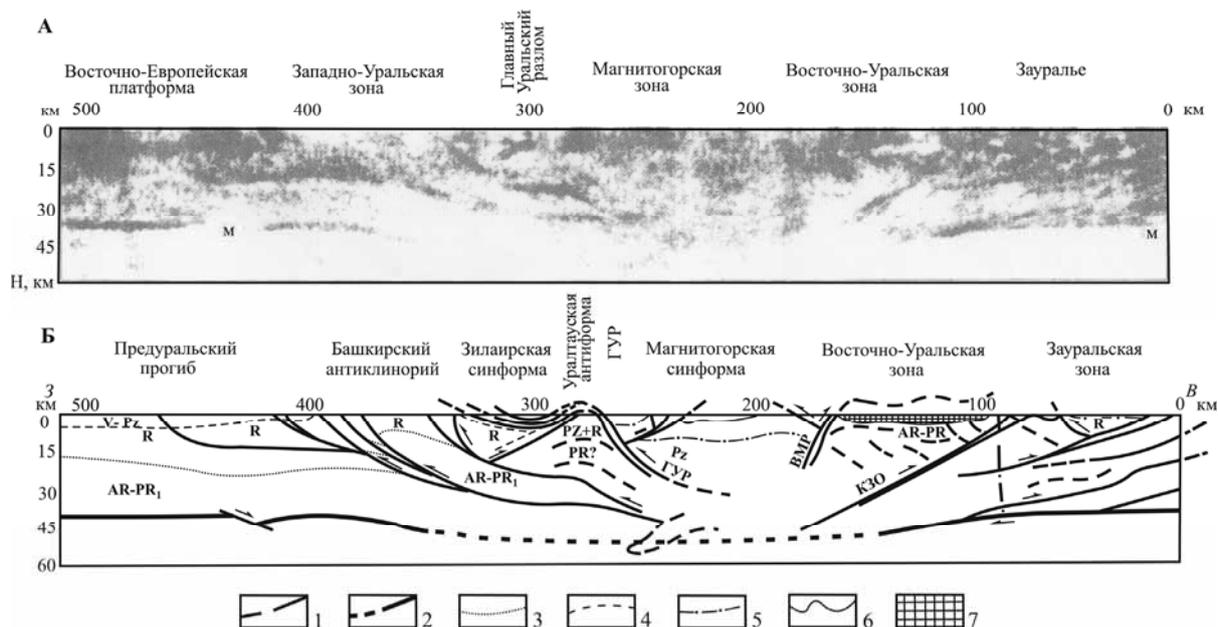


Рис. 2. Сейсмический профиль УРСЕЙС-95. Сейсмическая основа по материалам ПО «Спецгеофизика» [Сулейманов, 2006]. Геологическая интерпретация В. Н. Пучкова [2010]:

1 – разломы и направления движений; 2 – граница МОХО; 3 – кровля архейско-палеопротерозойского фундамента; 4 – верхи рифея; 5 – кровля коровой части офиолитов; 6 – подошва нижнего карбона; 7 – граниты; ГУР – Главный Уральский разлом; КЗО – Карталинская зона отражений

Л. П. Зоненшайн [Zonenshain et al., 1984] рассматривал подобные комплексы как докембрийские образования (гнейсы), интродуцированные палеозойскими гранитами. Вместе с тем, в последние годы получены геохимические и изотопные данные, которые показывают, что литосферный предшественник этой зоны мог быть в значительной степени океаническим, а гнейсы не вмещают палеозойские граниты, а представляют собой краевые части гранитных массивов [Görz et al., 2009; Görz, Hielscher, 2010].

Тем не менее, есть основание утверждать, что, по крайней мере, часть гнейсовых комплексов палеоокеанической зоны Урала, так же как и его палеоконтинентальной области, сложена до-мезопротерозойскими образованиями. Одним из них является селянкинский комплекс Ильменских гор на Южном Урале. Палеопротерозойский возраст метаморфизма пород и их петро- и геохимические особенности дают основание считать селянкинский комплекс фрагментом кристаллического фундамента [Краснобаев и др., 2001, 2011а; Банева, Русин, 2014 и др.], возможно, изначально принадлежавшего восточной окраине Восточно-Европейского кратона.

Фактический материал и его интерпретация

Среди полиметаморфических комплексов Урала в геохронологическом отношении наи-

более изученным является тараташский гнейсо-гранулитовый комплекс.

Тараташский комплекс находится на Южном Урале. Он обнажается в северной части Башкирского мегантиклинория в одноименном тектоническом блоке, имеющем вид выгнутой к востоку линзы, вытянутой в север-северо-восточном направлении. Общая площадь Тараташского блока около 400 км². Комплекс обрамляется вулканогенно-осадочными отложениями айской и саткинской свит нижнего мезопротерозоя.

Тараташский комплекс сложен гиперстеновыми плагиогнейсами, мигматизированными двупироксеновыми кристаллическими сланцами и метакоматиитами. Подчиненное значение имеют биотитовые гнейсы с гранатом, кордиеритом, силлиманитом и графитом, а также железистые и графитовые кварциты. Древние структуры, хорошо сохранившиеся в северной части комплекса, ориентированы в восток-северо-восточном направлении, дискордантны по отношению к субмеридиональному структурному плану уралид (рис. 3). Породы претерпели метаморфизм гранулитовой фации (T = 700–750 °C, P = 8–10 кбар), более поздние процессы диафореза гранулитов проявились в условиях амфиболитовой (T = 630–660 °C, P = 7–8 кбар), эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций [Ленных и др., 1978].

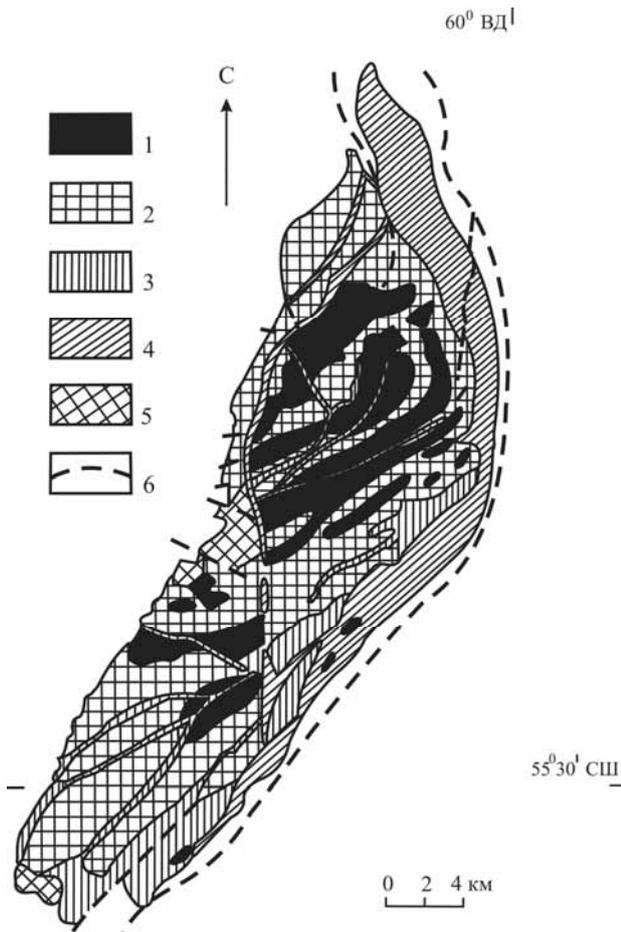


Рис. 3. Метаморфические образования тараташского гнейсо-гранулитового комплекса [по: Ленных и др., 1978; цит. по: Пучков, 2010]:

1 – площади преимущественного развития гранулитовых ассоциаций; 2 – диафориты амфиболитовой фации; 3 – blastsмилониты эпидот-амфиболитовой фации; 4 – зеленосланцевые диафориты; 5 – катаклазиты фации зеленых сланцев; 6 – тектонические контакты

На основании U–Pb (SHRIMP-II)-датирования цирконов, выделенных из гнейсов тараташского комплекса, установлен древнейший на Урале палеоархейский возраст – 3504 ± 210 млн лет, совпадающий в пределах наблюдаемых погрешностей с Sm–Nd модельными датировками (3455 ± 39 и 3490 ± 37 млн лет) валовых составов тех же самых образцов [Ронкин и др., 2007]. Эти цифры могут указывать на минимальный возраст протолитов гнейсов. Сопоставимые U–Pb (SHRIMP-II)-результаты были получены по цирконам из железистых кварцитов – 3445 ± 260 млн лет [Краснобаев и др., 2011б].

Один из наиболее обоснованных возрастных рубежей гранулитового метаморфизма, полученный также по циркону с помощью SHRIMP-II, соответствует значению 2792 ± 86 млн лет [Краснобаев и др., 2011б]. Ранее он характеризовался интервалом 2,7–2,6 млрд лет.

Последующие эндогенные события, которые наиболее отчетливо выражены в хронометрии тараташского комплекса, проявились в возрастном интервале 2,07–1,78 млрд лет назад. По мнению А. А. Краснобаева и его коллег [Краснобаев и др., 2011б], датировки этого уровня фиксируют диафорез амфиболитовой фации и сопутствующих процессов гранитизации. В цитируемой работе приводится U–Pb SHRIMP-II-возраст цирконов из железистых кварцитов – $2037,2 \pm 9,1$ млн лет. С. Синдерном, Ю. Л. Ронкиным и их соавторами получены сопоставимые данные по цирконам из лейкосомы мигматитов – 2044 ± 8 млн лет (U–Pb, SHRIMP-II [Sindern et al., 2005]) и по монацитам из метагранитоидов и метаосадочных пород – 2057 ± 18 и 2073 ± 47 млн лет (U–Pb, LA ICP-MS [Ронкин и др., 2007]).

Не исключено также, что с этим возрастным рубежом (около 2–2,1 млрд лет) связан повторный метаморфизм гранулитовой фации. Реальность проявления двух этапов гранулитового метаморфизма в породах тараташского комплекса подтверждается тем, что по полосчатым метапелитам карьера Радостный (тараташский комплекс) получены модельные датировки 2562–2159 млн лет, указывающие на палеопротерозойский возраст протолита [Ронкин и др., 2012]. Метаморфизм гранулитовой фации в этих породах, очевидно, не мог проявиться раньше 2562 млн лет назад. Логично предположить, что метаморфизм этих пород связан с постархейской историей их преобразования [Пыстин и др., 2012а]. В связи с этим напомним о более раннем варианте интерпретации U–Pb SHRIMP-II-возраста цирконов из железистых кварцитов (2037 млн лет), предложенном А. А. Краснобаевым, как рубеже самого молодого гранулитового метаморфизма пород тараташского комплекса [Пучков, 2010].

Заключительные стадии постгранулитового метаморфизма и гранитизации датируются цифрами около 1,8 млрд лет, полученные разными методами. В качестве верхней возрастной границы проявления метаморфических процессов на палеопротерозойском этапе формирования тараташского комплекса может быть принята U–Pb SHRIMP-II-датировка цирконов из железистых кварцитов – 1777 ± 79 млн лет [Краснобаев и др., 2011б].

Неоднозначна генетическая интерпретация промежуточных значений возраста, полученных в последние годы на основании U–Pb SHRIMP-II и ID-TIMS-данных по цирконам, а также U–Pb LA ICP-MS-данных по монацитам. Одними авторами [Sindern et al., 2005; Ронкин

и др., 2007] они связываются с постгранулитовой магматической активностью (например, датировки 2461 ± 36 и 2344 ± 29 млн лет, U–Pb SHRIMP-II; 2231 ± 23 и 2210 ± 22 млн лет, U–Pb LA ICP-MS), другими [Краснобаев и др., 2011б] – с разномасштабными процессами преобразования гранулитовых цирконов (2611 ± 17 , 2449 ± 82 , 2311 ± 20 млн лет, U–Pb SHRIMP-II).

Возможными возрастными аналогами тарташского гнейсо-гранулитового комплекса являются гранулит-метабазитовые комплексы Полярного Урала: малькский и хордьюский [Пыстин и др., 2012б]. В геохронологическом отношении лучше изучен малькский комплекс, хотя и по нему данных пока крайне мало.

Малькский комплекс – самый крупный выход древнего меланократового фундамента на Урале. Он обнажается на площади 800 кв. км. На западе по надвигу комплекс контактирует с породами Сыумкеуского массива, самого северного в офиолитовом поясе Урала. Взаимоотношения с окружающими его на севере нижнепалеозойскими осадочно-вулканогенными образованиями не вполне отчетливы. На востоке комплекс перекрывается мезозойскими терригенными отложениями. Внутренняя структура комплекса исключительно сложная. Тем не менее, выявляется преобладающее субширотное (север-северо-западное) простираие метаморфической полосчатости высокотемпературных пород (двупироксеновых, гиперстеновых и альмандин-гиперстеновых кристаллосланцев), свойственное и другим метаморфическим комплексам северной части Урала. Субширотный («неуральский») структурный план мафических гранулитов резко отличает их от амфиболитов (приуроченных к западной границе комплекса, а также слагающих отдельные зоны в его внутренних частях), для которых характерны субмеридиональные («уральские») простираия. Наблюдаемая дискордантность структурных планов разнофациальных метаморфитов, несомненно, связана с более древним возрастом проявления метаморфизма гранулитовой фации. Впервые это было отмечено Н. П. Херасковым [Херасков, Перфильев, 1963], который предположил, что первичные субширотные структуры в породах малькского комплекса, резко отличающиеся от субмеридиональных простираий амфиболитов, указывают, возможно, на значительно более древний их возраст.

А. П. Казаком [Петрология..., 1977], впервые подробно охарактеризовавшем малькский комплекс, выделяется четыре этапа метаморфического преобразования пород. Первый соответ-

ствует гранулитовой фации ($T > 800$ °C). Процессы диафореза, с которыми связана структурная перестройка комплекса, проявились в условиях амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций.

Первые K-Ar датировки пород малькского комплекса подтвердили предположение об относительно древнем возрасте гранулитов [Петрология..., 1977]. Возраст трех образцов гиперстеновых кристаллосланцев (габброноритов в цит. источнике) составил 1327–927 млн лет, а гранатового амфиболита – 458 млн лет.

K-Ar возраст амфиболитов хорошо согласуется с данными U-Pb (SHRIMP-II) датирования цирконов из роговообманковых плагиогранитов, залегающих среди гранат-цоизитовых амфиболитов: изотопные отношения в центральных частях пяти зерен циркона образуют кластер с возрастом 451 ± 14 млн лет [Андреичев и др., 2012].

Вопрос о времени проявления метаморфизма гранулитовой фации в породах малькского комплекса пока остается открытым. Верхний возрастной предел можно ограничить максимальным значением K-Ar возраста пород – 1327 млн лет. Существенно более древние значения возраста были получены при U-Pb (SHRIMP-II) датировании цирконов из метабазитов [Душин и др., 2008]. По 18-ти локальным зонам по верхнему пересечению дискордии с конкордией был получен возраст 2736 ± 42 млн лет, который в пределах аналитических погрешностей совпадает с Nd модельной датировкой 2694 млн лет, выполненной по валовому составу образца, из которого были выделены соответствующие цирконы, что по мнению цитируемых авторов подтверждает реальность геологического события на «породном» уровне. Все это позволяет с большой вероятностью предположить, что гранулитовый метаморфизм в породах малькского комплекса проявился в домезопротерозойское время. Более того, не исключается и возможность возрастной корреляции высокотемпературных метаморфических процессов в породах малькского и тарташского комплексов.

Структурно-вещественные свидетельства проявления раннедокембрийских эндогенных процессов установлены во многих гнейсо-мигматитовых комплексах, преобладающих среди других полиметаморфических комплексов Урала (см. рис. 1). В геохронологическом отношении наиболее детально изучен александровский гнейсо-мигматитовый комплекс на Южном Урале.

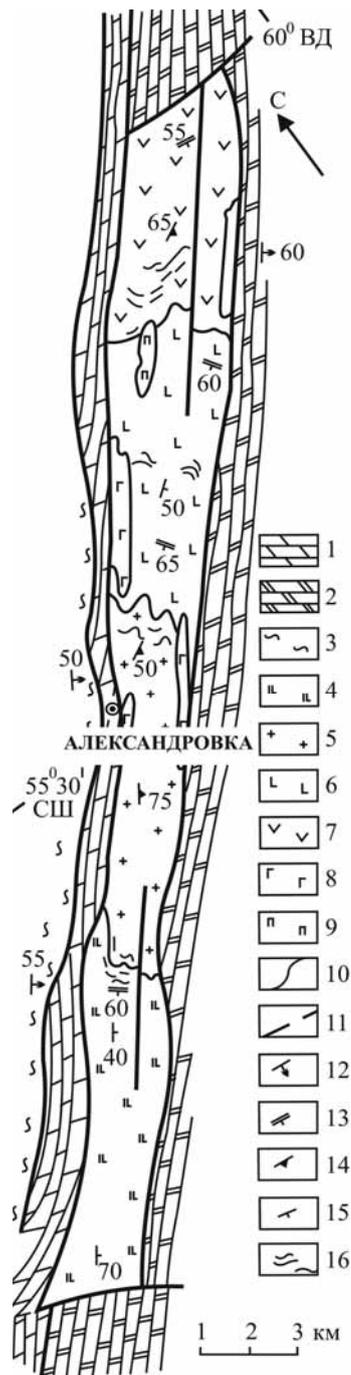


Рис. 4. Геологическая карта александровского гнейсо-мигматитового комплекса [по: Пыстин, 1978]:

1, 2 – саткинская свита (RF₁): 1 – известняки доломитизированные, 2 – мраморы доломитовые; 3 – айская свита (RF₁), филлиты, сланцы кварц-серицитовые, кварц-хлорит-серицитовые, песчаники и гравелиты полимиктовые и аркозовые; 4–9 – александровский комплекс (AR₂(?)–PR₁): 4 – гнейсовидные амфиболиты и амфиболовые плагиогнейсы с прослоями биотитовых сланцев; 5 – гранито-гнейсы; 6 – амфиболиты; 7 – биотитовые плагиогнейсы и плагиомигматиты с гранатом, ставролитом, кианитом, силлиманитом и графитом, жедрититы, кварциты; 8 – апогаббровые амфиболиты; 9 – метаизрандиты; 10 – геологические границы; 11 – тектонические границы; 12–15 – элементы залегания: 12 – слоистости; 13 – поллчатости; 14 – гнейсовидности; 15 – сланцеватости; 16 – реликтовая полосчатость

Александровский комплекс приурочен к региональному Зюраткульскому разлому, отделяющему Башкирское и Уралтауское мегантиклинории. Он представляет собой узкий тектонический клин длиной 25 км и шириной 1–2,5 км (рис. 4). В нижней (северной) части комплекса преобладают гранат-слюдяные плагиогнейсы и кристаллические сланцы с переменным содержанием ставролита, кианита и силлиманита. Вверх по разрезу они сменяются гранат-амфиболовыми и биотит-амфиболовыми плагиогнейсами с редкими прослоями гранат-слюдяных кристаллических сланцев. Верхняя видимая часть разреза сложена гранито-гнейсами и амфиболитами, при этом роль амфиболитов возрастает вверх по разрезу. Породы нижней части разреза интенсивно мигматизированы. При этом в лейкосоме мигматитов полевой шпат представлен исключительно плагиоклазом. В средней – верхней частях комплекса гранитный материал (с кали-натровым полевым шпатом) представлен жилами аплитов и пегматитов, а также небольшими телами гнейсовидных гранитов. Среди интрузивных пород, кроме отмеченных выше гранитоидов, встречаются амфиболитизированные меланократовые габбро, имеющие местное название – израндиты (по р. Изранда), а также метагаббро и метадиабазы.

Как и в других нижнедокембрийских метаморфических комплексах Урала, в александровском комплексе ранние структуры ориентированы дискордантно по отношению к структурам уралид. Замеры элементов реликтовой полосчатости и прослеживание границ между толщами разного литологического состава дают основание для вывода, что ориентировки ранних структур в александровском и тараташском комплексах не совпадают. В александровском комплексе простирание реликтовых структур северо-западное (300–330°), что близко к ориентировке структур в нижнедокембрийских комплексах северной части Урала.

Современный облик александровского комплекса, как и других гнейсо-мигматитовых комплексов Урала, определяется преимущественным распространением пород амфиболитовой фации. Типичные минеральные парагенезисы, которые бы указывали на проявление гранулитовой фации метаморфизма пород, в александровском комплексе пока не выявлены. Тем не менее, есть ряд косвенных признаков, указывающих на апогранулитовую природу метаморфитов. Во-первых, это отчетливая вещественная и возрастная корреляция комплекса с гранулитсодержащими гнейсо-мигматитовыми комплексами, в частности, с селянкинским

Таблица 1. U–Pb SHRIMP-II-изотопные данные для цирконов «гранулитового» типа из плагиогнейсов александровского комплекса (образец А-8)

№	Проба-кратер	²⁰⁶ Pb _c %	U ppm	Th ppm	²⁰⁶ Pb* ppm	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb млн лет	±1σ	(1) ²⁰⁷ Pb* / ²³⁸ U	±1σ %	(1) ²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±1σ %	Rho	D %
1	A8-8,1	0,02	609	136	193	2048	6	6,420	0,52	0,3684	0,41	0,788	1,29
2	A8-2,1	0,06	143	32	46,5	2044	11	6,549	0,96	0,3767	0,70	0,729	-0,82
3	A8-5,1	0,00	485	116	155	2080	6	6,597	0,79	0,3719	0,71	0,899	1,99
4	A8-1,1	0,10	223	77	72,6	2072	9	6,671	0,79	0,3777	0,59	0,747	0,31
5	A8-7,1	0,09	156	41	50,5	2085	13	6,715	0,95	0,3773	0,61	0,642	1,05
6	A8-4,1	0,01	167	66	54,3	2083	10	6,727	0,83	0,3784	0,59	0,711	0,70
7	A8-9,1	0,01	187	70	61,1	2080	10	6,755	0,79	0,3808	0,57	0,722	-0,02
8	A8-6,1	0,23	60	20	20,0	2092	22	6,900	1,50	0,3863	0,90	0,600	-0,66
9	A8-3,1	0,00	255	82	86,0	2095	8	7,020	0,70	0,3923	0,52	0,743	-1,84

Примечание. Образец отобран в 1,5 км к востоку от дер. Юрма. Pb_c и Pb* – нерадиоогенный и радиоогенный свинец, соответственно. (1) – скорректировано по ²⁰⁴Pb. Rho – коэффициент корреляции между отношениями ²⁰⁷Pb/²³⁵U – ²⁰⁶Pb/²³⁸U. D – дискордантность. Аналитик А. Н. Ларионов.

комплексом Южного Урала. Во-вторых, состав некоторых породообразующих минералов, указывающий на их высокотемпературные условия кристаллизации. В частности, в плагиомигматитах встречены гранаты с содержанием пиропового компонента до 30 %, роговые обманки, имеющие состав паргасита и паргасит-гастингсита, биотиты с содержанием TiO₂ до 3,0 вес. %. В-третьих, широкое проявление процессов плагиогранитизации, обычно комплексных с гранулитовым метаморфизмом. Наконец, в-четвертых, это постоянное присутствие в породах небольшого количества хорошо сохранившихся округлых кристаллов цирконов, имеющих блестящие грани с микро-рельефом роста. Подобные образования характерны для метаморфических пород гранулитовой фации [Vavra et al., 1996; Schaltegger et al., 1999; Hoskin, Schaltegger, 2003] и известны как цирконы типа «футбольного мяча». На Урале они впервые были описаны А. А. Краснобаевым [1986] в гранулитах тараташского комплекса и выделены им в «гранулитовый» тип.

Нижний температурный предел гранулитового метаморфизма пород может быть оценен при анализе химического состава породообразующих минералов в участках с сохранившейся ранней (доплагиомигматитовой) метаморфической полосчатостью. Именно здесь гранаты в плагиогнейсах характеризуются наиболее высоким содержанием пиропового компонента, и здесь же отмечается наиболее хорошая сохранность цирконов «гранулитового» типа. Температура, рассчитанная по минералогическим термобарометрам, достигает (а реально, по-видимому, превышает) 720 °С, P = 6,4–8,0 кбар [Пыстин, 1994].

Максимальный установленный возраст пород в александровском комплексе – 2696 ± 13 млн лет. Он получен U-Pb SHRIMP-II-методом по единичному зерну циркона из израндитов [Красно-

баев и др., 2011в]. Авторы указанной публикации оценивают эту датировку как возраст образования протолита.

Pb-Pb и U-Pb SIMS-датировки единичных зерен цирконов «гранулитового» типа из гранат-силлиманит-биотитовых плагиогнейсов александровского комплекса указывают на их кристаллизацию в возрастном интервале 2080–1997 млн лет назад [Пыстина, Пыстин, 2002]. При U-Pb-датировании этих цирконов с помощью SHRIMP-II получены сопоставимые данные: 2134–2021 млн лет (табл. 1). Практически анализы всех кристаллов, за исключением двух, образуют дискордию с верхним пересечением 2081 ± 14 млн лет (рис. 5). По-видимому, эта цифра наиболее точно отражает время проявления метаморфизма гранулитовой фации.

Близкий отмеченному выше возраст цирконов получен для селянчинского гнейсо-мигматитового комплекса, расположенного к востоку от александровского (см. рис. 1). U–Pb SHRIMP-II возраст ранних генераций метаморфогенных цирконов в амфиболитах этого комплекса равен 2099 ± 30 млн лет [Краснобаев и др., 2011а]. Учитывая особенности морфологии датированных цирконов, катодолюминесцентные изображения которых приведены в упомянутой статье, полученную цифру можно интерпретировать как время проявления гранулитового метаморфизма, а вмещающие округлые кристаллы цирконов – амфиболиты рассматривать как апогранулитовые образования. Тем более что в селянчинском комплексе установлены реликтовые парагенезисы гранулитовой фации [Ленных и др., 1986]. Отметим, что и в других гнейсо-мигматитовых комплексах Урала известны цирконы «гранулитового» типа с изотопным возрастом кристаллизации около 2–2,1 млрд лет [Пыстина, Пыстин, 2002].

Нижний возрастной предел метаморфизма амфиболитовой фации в породах александров-

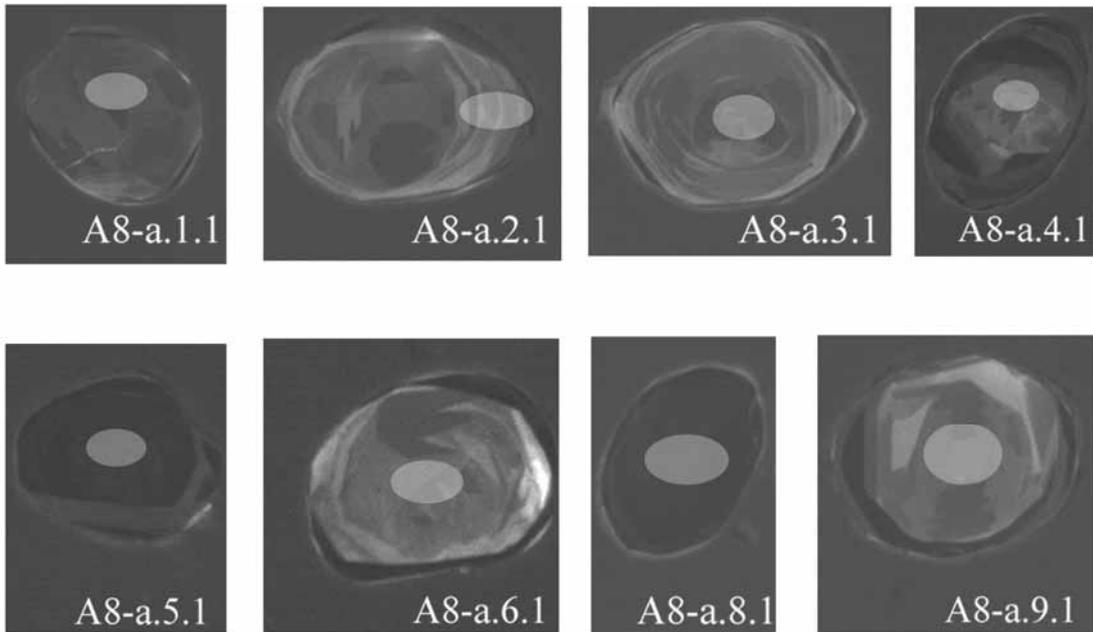
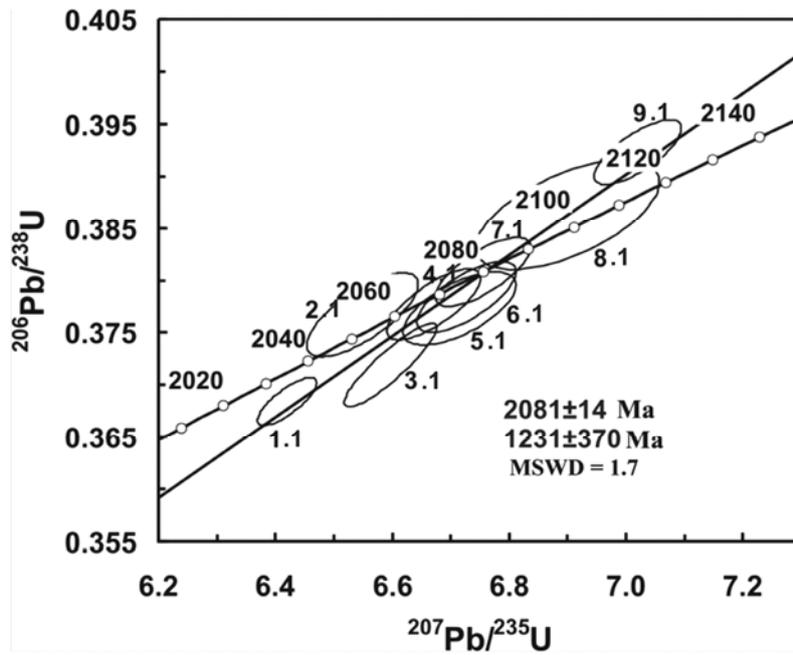


Рис. 5. Диаграмма с конкордией для цирконов «гранулитового» типа из плагиогнейсов александровского комплекса (образец А-8)

ского комплекса определяет U–Pb SHRIMP-II-датировка цирконов из амфиболизированного израндита – 2022 ± 15 млн лет [Краснобаев и др., 2011в]. Более молодые возрасты, с которыми связываются процессы средне-высокотемпературного диафореза и гранитизации, имеют значения около 1850 млн лет (табл. 2). Сопоставимые данные получены по времени проявления метаморфизма амфиболитовой фации и гранитизации пород селянкинского комплекса; Pb–Pb и U–Pb SIMS-определения единичных

зерен цирконов находятся в интервале 1943–1818 млн лет [Пыстина, Пыстин, 2002].

Среди полиметаморфических комплексов палеоконтинентальной области Урала выделяется также группа эклогитсодержащих комплексов (см. рис. 1). Мы их относим к нижнедокембрийским образованиям. Хотя следует признать, что вопрос об их возрасте остается проблематичным. В том числе из-за широко распространенного мнения об исключительной принадлежности высокобарических метамор-

Таблица 2. U–Pb ID-TIMS-данные для цирконов из бластомилонитов александровского комплекса (по: [Sindern et al., 2005])

Обра- зец	Pb ^a ng	U ^b ng	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb ^c	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb ^d	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ^d	±2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ^d	±2σ	Rho	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb млн лет	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U млн лет	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U млн лет	D %
R85-3	1,8	6,62	4147,8 ± 0,4	0,10785	0,0002	3,781	0,020	0,2542	0,0013	0,97	1764	1589	1460	17,2
R85-4	3,82	10,6 ₁	3814,7 ± 0,3	0,11307	0,0002	5,210	0,044	0,3342	0,0028	0,99	1849	1854	1859	–0,5

Примечание.

^{a,б} количество ²⁰⁷Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁴Pb и U,

^c скорректировано на трассер и фракционирование,

^d атомные отношения, скорректированные на холостой опыт, трассер и фракционирование и нерадиоогенный свинец,

^e не использовано в расчетах.

фических комплексов к фанерозойским складчатым поясам. Тем не менее, реальность проявления высокobarического метаморфизма в докембрии, включая ранний докембрий, доказывается находками архейских эклогитов в Карелии [Володичев и др., 2004; Слабунов, 2008 и др.] и на Кольском полуострове [Щипанский, 2008].

Основанием для включения высокobarических метаморфических комплексов палеоконтинентальной области Урала в разрез нижнего докембрия являются в основном косвенные данные: структурные соотношения и метаморфические несогласия с обрамляющими их слабометаморфизованными мезо-неопротерозойскими толщами. Имеются также изотопные датировки соответствующего возрастного уровня, но они пока малочисленны. Наиболее обоснованным является предположение о раннедокембрийском возрасте пород (и процессов их высокobarического метаморфического преобразования) марункеуского и неркаюского комплексов, расположенных в северной части Урала. Для отнесения к нижнедокембрийским образованиям эклогитсодержащих комплексов Южного Урала (максютовского и белорецкого) объективных данных на сегодняшний день нет, хотя такая вероятность, на наш взгляд, остается. Среди эклогитсодержащих комплексов севера Урала наиболее хорошо изученным является марункеуский эклогит-гнейсовый комплекс.

Марункеуский комплекс расположен на крайнем севере Полярного Урала к западу от Сыумкеуского гипербазитового массива, входящего в состав палеозойской офиолитовой ассоциации. Комплекс обрамляется вулканогенно-осадочными мезо-неопротерозойскими отложениями. В строении марункеуского комплекса участвуют эклогиты, симплектит-эклогиты и апоэклогитовые амфиболиты в ассоциации с метакристаллитами, а также плагиогнейсы, плагиомигматиты и K-Na мигматиты.

Геологическое строение марункеуского комплекса в его наиболее изученной южной части в районе так называемой «Слюдяной

горки» приведено на рис. 6. Карта построена на основе крупномасштабной геологической съемки участка, выполненной нами в 2011 г., с использованием материалов Н. Г. Удовкиной [1971] и результатов последней геологической съемки масштаба 1 : 200 000 [Душин и др., 2007]. В результате проведенных исследований было установлено, что возвышенности, сложенные перидотитами (Перидотитовая и Рыжая), представлены многочисленными разрозненными телами. Так, выс. Рыжая объединяет 23 тела перидотитов, центральное из которых занимает площадь 70 000 кв. м. Площадь других более мелких тел от 20 до 4000 кв. м, а общая площадь развития перидотитов в районе выс. Рыжей составляет 200 000 кв. м или 0,2 кв. км. Выс. Перидотитовая сложена 11-ю массивами перидотитов. Перидотитовые массивы в пределах изученного участка слагают ядра синклиналей, запрокинутых на северо-восток и, скорее всего, представляют собой стратифицированные образования.

Эклогиты и апоэклогитовые амфиболиты залегают в виде пластообразных и линзовидных интрузий (рис. 7), ориентированных в северо-западном (поперечном к общеуральскому – северо-восточному) направлении согласно с простираем вмещающих их гнейсов. В районе «Слюдяной горки» эклогиты слагают выс. Коническую и пониженные участки между высотами Коническая, Перидотитовая и Рыжая. В пониженных участках эклогиты характеризуются полосчатой, гнейсовидной, сланцеватой текстурой и наряду с омфацитом и гранатом содержат в своем составе кианит, роговую обманку, цоизит, слюды. На выс. Конической обнажаются преимущественно массивные эклогиты. В них отмечаются реликты офитовой структуры, а также реликты исходных габброидов. Апоэклогитовыми амфиболитами сложены склоны «Слюдяной горки». Они обнажаются в долинах ручьев.

Петрографическое изучение эклогитсодержащих толщ в опорных разрезах позволило установить следующую последовательность

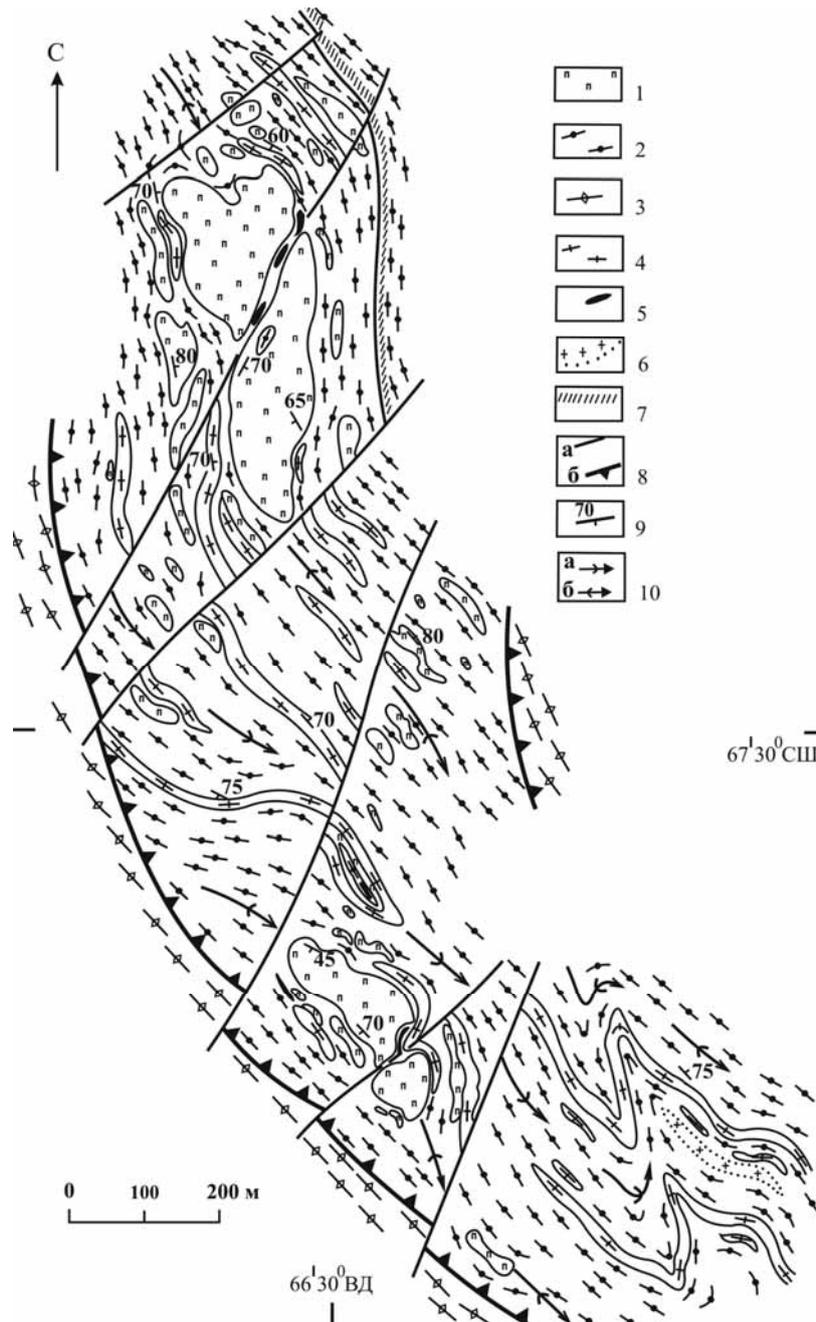


Рис. 6. Геологическое строение района Слюдяной горки. Южная часть марункуевского комплекса:

1 – метультрабазиты, 2 – эглогиты, 3 – амфиболизированные эглогиты, апоэглогитовые амфиболиты, 4 – гранат-слюдяные гнейсы и кристаллические сланцы, 5 – кварцевые и кварц-полевошпатовые жилы, 6 – гранитизированные породы, 7 – интенсивно кианитизированные породы, 8 – разрывные нарушения: а – крутопадающие разломы, б – надвиги, 9 – элементы залегания контактов пород, полосчатости и сланцеватости, 10 – оси: а – антиклиналей, б – синклиналей

кристаллизации метаморфических парагенезисов [Вшивцев, 2008; Литосфера..., 2008]:

- омфациит + гранат (метаморфизм эглогитовой фации);
- омфациит + гранат + плагиоклаз + фенгит (высокобарическая метаморфическая диффе-

ренциация в связи с процессами плагиогранитизации и кислотного выщелачивания);

- роговая обманка + гранат + плагиоклаз (диафторез амфиболитовой фации);
- актинолит + хлорит + альбит (диафторез зеленосланцевой фации).

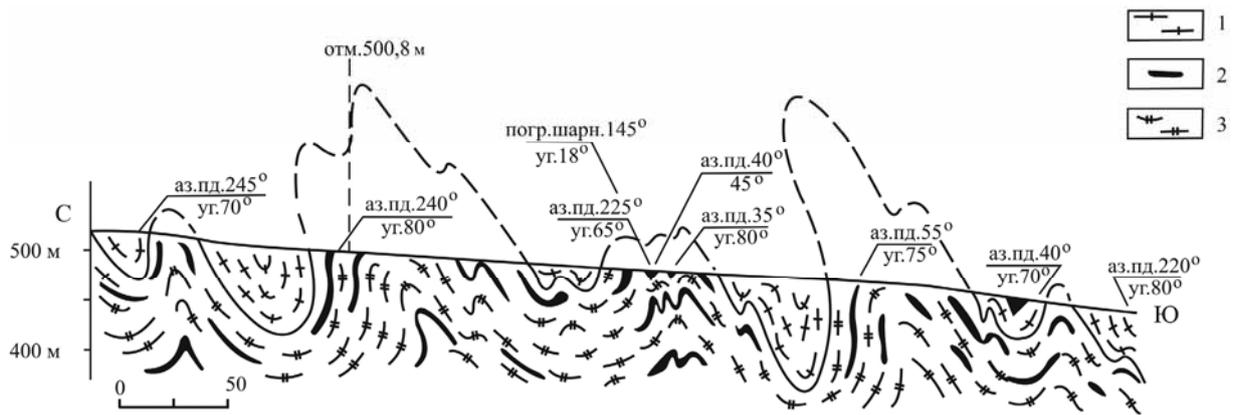


Рис. 7. Геологический разрез марункеуского комплекса по руч. Нярошор:

1 – биотитовые гнейсы, слюдяные и гранат-слюдяные кристаллические сланцы; 2 – эклогиты, амфиболизированные эклогиты, апоэклогитовые амфиболиты; 3 – гнейсы и кристаллические сланцы с будинами в различной степени амфиболизированных эклогитов

Таким образом, эклогиты являются продуктами наиболее ранних эндогенных процессов преобразования пород марункеуского комплекса.

Существующие оценки P-T условий образования эклогитов марункеуского комплекса, полученные разными исследователями, сильно различаются, что, очевидно, связано с неодинаковой степенью постэклогитового преобразования проанализированных образцов пород. По данным Н. Г. Удовкиной [1985] и Дж. Ф. Молины [Molina et al., 2002], кристаллизация эклогитов происходила при $T = 520\text{--}690\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 14\text{--}17$ кбар. По расчетам П. А. Тишина [1999], на инверсионной стадии метаморфического изменения пород температура достигала значений $780\text{--}875\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 18\text{--}21,5$ кбар. Близкие P-T значения пиковых условий эклогитообразования получены К. В. Куликовой и Д. А. Валамовым [2011, 2012]: $T = 790\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 20,5$ кбар.

Максимальные значения возраста пород, определенные путем K-Ar и Pb-Pb датирования минералов из эклогитов, составляют 1,70, 1,56, 1,54 млрд лет [Удовкина, 1985]. В последние годы сопоставимые значения возраста эклогитов ($1,68 \pm 0,07$, $1,61 \pm 0,07$, $1,54 \pm 0,15$, $1,54 \pm 0,14$ млрд лет) были получены на основе Rb-Sr и Sm-Nd изохронных систем по породе в целом и по метаморфогенным минералам, включая амфибол [Андреичев и др., 2007]. Кроме того, для циркона из этих же пород получен конкордантный U-Pb возраст, равный 1,86 млрд лет [Андреичев и др., 2005]. Эти данные дают основание считать, что, во-первых, условия эклогитовой фации имели место на наиболее ранней стадии метаморфической истории марункеуского комплекса и, во-вторых, высокобарический метаморфизм про-

явился в раннедокембрийское время более чем 1,86 млрд лет назад.

Иная интерпретация возраста процессов эклогитообразования дается на основе датирования единичных зерен цирконов из жил эклогитов U-Pb методом (353–362 млн лет [Glodny et al., 2004]), что согласуется с Rb-Sr возрастными определениями этих эклогитов [Glodny et al., 2003]. Ранее близкое значение ($366 \pm 8,6$ млн лет) было получено по Sm – Nd минеральной изохроне [Шацкий и др., 2000].

В последних случаях анализировались породы, имеющие в своем составе белую слюду. Поэтому определения возраста в интервале 352–366 млн лет могут указывать на время одного из этапов метаморфического преобразования эклогитов [Андреичев и др., 2007], связанного, например, с их эксгумацией [Пыстин и др., 2012]. Хотя нельзя полностью исключать и вероятность тектонического совмещения разновозрастных эклогитов [Андреичев и др., 2007] и даже полихронность высокобарического метаморфизма [Удовкина, 1985].

Заключение

В эволюции полиметаморфических комплексов Урала, особенно его палеоконтинентальной области, проявления метаморфизма гранулитовой и эклогитовой фаций относятся к доуральской предыстории и, скорее всего, отражают определенные этапы эволюции кристаллического основания приуральской окраины Восточно-Европейского кратона.

Наиболее ранние (позднеархейские) проявления метаморфизма гранулитовой фации установлены в тараташском гнейсо-гранулитовом и малыкском гранулит-метабазитовом комплексах.

Еще одно высокотемпературное метаморфическое событие, отвечающее условиям гранулитовой фации (палеопротерозойское), фиксируется в породах гнейсо-мигматитовых комплексов, широко представленных как в палеоконтинентальной, так и в палеоокеанической областях Урала. Свидетельством проявления этого метаморфизма являются цирконы «гранулитового» типа. Они в породах разных комплексов имеют близкие значения изотопных U-Pb и Pb-Pb возрастов: 2,1–2 млрд лет.

Ранее метаморфизованные архейские образования в это время, по-видимому, претерпели повторный метаморфизм гранулитовой фации.

Имеющиеся сведения о возрасте высокобарического метаморфизма пород на Урале не однозначны. Верхний возрастной уровень палеопротерозойского этапа эклогитового метаморфизма определяет U-Pb (SHRIMP-II) датировка циркона из амфиболитизированных эклогитов марункеуского комплекса – 1,86 млрд лет. Эта цифра, скорее всего, является заниженной и фиксирует время проявления последующего метаморфизма амфиболитовой фации. Процессы метаморфизма амфиболитовой фации и сопутствующей гранитизации в гнейсо-мигматитовых комплексах проявились в возрастном интервале 1,95–1,75 млрд лет назад.

Таким образом, в породах полиметаморфических комплексов Урала – возможных фрагментов кристаллического основания приуральской окраины Восточно-Европейского кратона – установлено два этапа метаморфизма гранулитовой фации: ранний – неоархейский и поздний – палеопротерозойский. Высокобарические минеральные парагенезисы являются продуктами наиболее ранних эндогенных процессов преобразования пород в эклогитсодержащих комплексах, где высокобарический метаморфизм, скорее всего, комплементарен палеопротерозойскому гранулитовому метаморфизму.

Литература

Андреичев В. Л., Родионов Н. В., Ронкин Ю. Л. U-Pb и Sm-Nd датирование эклогитов Марункеуского блока Полярного Урала: новые данные // Метаморфизм, космические, экспериментальные и общие проблемы петрологии: материалы Междунар. (X Всерос.) петрографического совещ. 2005. Т. 4. С. 17–19.

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

Андреичев В. Л., Куликова К. В., Ларионов А. Н. U-Pb возраст плагиогранитов Малыко (Полярный Урал) // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2012. № 4(12). С. 60–66.

Банева Н. Н., Русин А. И. Структурно-вещественная эволюция и изотопный возраст Ильмено-Вишневогоского комплекса (Южный Урал) // Литосфера. 2014. № 2. С. 131–137.

Володичев О. И., Слабунов А. И., Бибикина Е. В. и др. Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Петрология. 2004. Т. 12, № 6. С. 609–631.

Вшивцев А. Н. Вещественный состав, возраст и геодинамические условия формирования полярно-уральских эклогитов // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: материалы XIV Междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 104–107.

Душин В. А., Сердюкова О. П., Малюгин А. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации М 1 : 200 000. Изд. 2-е. Серия Полярно-Уральская. Листы Q-42-1, II. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 340 с.

Душин В. А., Бурмако П. Л., Ронкин Ю. Л. и др. Состав и новые возрастные датировки метагабброидов малыкского комплекса на Полярном Урале // Структурно-вещественные комплексы и проблемы геодинамики докембрия фанерозойских орогенов: материалы Междунар. науч. конф. (III Чтения памяти С. Н. Иванова). Екатеринбург, 2008. С. 27–29.

Кейльман Г. А. Мигматитовые комплексы подвижных поясов. М.: Наука, 1974. 200 с.

Краснобаев А. А. Циркон как индикатор геологических процессов. М.: Наука, 1986. 152 с.

Краснобаев А. А., Давыдов В. А., Шулькин Е. П., Чердынченко Н. В. Цирконология селянчинского блока Ильменских гор // Доклады РАН. 2001. Т. 379, № 1. С. 807–811.

Краснобаев А. А., Вализер П. М., Русин А. И. и др. Цирконология амфиболитов селянчинской толщи Ильменских гор (Южный Урал) // Доклады РАН. 2011а. Т. 441, № 5. С. 661–665.

Краснобаев А. А., Козлов В. И., Пучков В. Н. и др. Цирконология железистых кварцитов тараташского комплекса на Южном Урале // Доклады РАН. 2011б. Т. 437, № 6. С. 80–807.

Краснобаев А. А., Пучков В. Н., Бушарина С. В. и др. Цирконология израндитов (Южный Урал) // Доклады РАН. 2011в. Т. 439, № 3. С. 394–398.

Куликова К. В., Валамов Д. А. Эклогитизация габброидов хребта Марункеу (Полярный Урал) // Гранулитовые и эклогитовые комплексы в истории Земли: материалы науч. конф. и путеводитель научных экскурсий. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 115–117.

Куликова К. В., Валамов Д. А. Особенности метаморфической эволюции Марункеуского эклогит-гнейсового комплекса (Полярный Урал): материалы Всерос. конф. с междунар. участием. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2012. С. 152–154.

Ленных В. И., Панков Ю. Д., Петров В. И. Петрология и метаморфизм мигматитового комплекса // Петрология и железорудные месторождения тараташского комплекса. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1978. С. 3–45.

Ленных В. И., Вализер П. М., Рассказова А. Д. Некоторые вопросы тектоники докембрия Урала в свете данных по метаморфизму // Геология и палеонтология Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. С. 71–74.

Литосфера Тимано-Североуральского региона: геологическое строение, вещество, геодинамика / А. М. Пыстин, В. Л. Андреичев, А. И. Антошкина и др. Сыктывкар: Геопринт, 2008. 234 с.

Петрология и метаморфизм древних офиолитов. На примере Полярного Урала и Западного Саяна / Н. Л. Добрецов, Ю. В. Молдованцев, А. П. Казак и др. Новосибирск: Наука, 1977. 221 с.

Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.

Пыстин А. М. Александровский гнейсово-амфиболитовый комплекс // Вулканизм, метаморфизм и железистые кварциты обрамления тараташского комплекса. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1978. С. 3–33.

Пыстин А. М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб.: Наука, 1994. 208 с.

Пыстин А. М., Ронкин Ю. Л., Синдерн С., Пыстина Ю. И. Геохронологическая история метаморфизма пород дорифейских образований западного склона Южного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2012а. № 11. С. 2–8.

Пыстин А. М., Пыстина Ю. И., Потапов И. Л., Панфилов А. В. Раннедокембрийская история метаморфизма пород гранулитовых и эклогитовых комплексов палеоконтинентальной зоны Урала. Сыктывкар: Геопринт, 2012б. 46 с.

Пыстина Ю. И., Пыстин А. М. Цирконовая летопись уральского докембрия. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. 167 с.

Ронкин Ю. Л., Синдерн С., Маслов А. В. и др. Древнейшие (3,5 млрд лет) цирконы Урала: U-Pb (SHRIMP-II) и T_{DM} ограничения // Доклады РАН. 2007. Т. 415, № 5. С. 651–657.

Ронкин Ю. Л., Сирерн С., Лепихина О. П. Изотопная геология древнейших образований Южного Урала // Литосфера. 2012. № 5. С. 50–76.

Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 296 с.

Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). Екатеринбург: Уралгеолком, 1994.

Сулейманов А. К. Работы ОГТ по профилю УРСЕЙС // Структура и динамика литосферы Восточной Европы. Вып. 2: Результаты исследований по программе ЕВРОПРОБА. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006. С. 363–373.

Тишин П. А. Петрология эклогитов хребта Марун-Кеу (Полярный Урал): Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Томск, 1999. 24 с.

Удовкина Н. Г. Эклогиты Полярного Урала. М.: Наука, 1971. 191 с.

Удовкина Н. Г. Эклогиты СССР. М.: Наука, 1985. 286 с.

Херасков Н. П., Перфильев А. С. Основные особенности геосинклинальных структур Урала // Проблемы региональной тектоники СССР. М.: Наука, 1963. С. 35–63.

Шалагинов В. В. Раннедокембрийские комплексы Уральского складчатого пояса и их минерагения

// Геология и минерагения подвижных поясов. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. С. 159–173.

Шацкий В. С., Симонов В. А., Ягоуц Э. и др. Новые данные о возрасте эклогитов Полярного Урала // Доклады РАН. 2000. Т. 371, № 4. С. 519–523.

Щипанский А. А. Субдукционные и мантийно-плюмовые процессы в геодинамике формирования архейских зеленокаменных поясов. М.: ЛКИ, 2008. 560 с.

Glodny J., Pease V., Austrheim H. 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. P. 4353–4371.

Glodny J., Austrheim H., Molina J. F. 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 of London Memoir*. 2004. P. 87–105.

Görz I., Buschmann B., Krone U., Hauer R. Henning D. The Permian emplacement of granite-gneiss complexes in the East Uralian Zone and implications on the geodynamics of the Uralides // *Tectonophysics*. 2009. Vol. 467. P. 119–130.

Görz I., Hielscher P. An explicit plate kinematic model for the orogeny in the southern Uralides // *Tectonophysics*. 2010. Vol. 493. P. 1–26.

Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // *Reviews in mineralogy and geochemistry*. 2003. Vol. 53. P. 27–61.

Molina J. F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A. The eclogites of Marun-Keu complex, Polar Urals (Russia): fluid control on reaction kinetics and metasomatism during high P metamorphism // *Lithos*. 2002. Vol. 61. P. 55–078.

Schaltegger U., Fanning C. M., Gunther D., Maurin J. C., Schulmann K., Gebauer D. Growth, annealing and recrystallization of zircon and preservation of monazite in high-grade metamorphism: conventional and in-situ U-Pb isotope, cathodoluminescence and microchemical evidence // *Contrib. Miner. Petrol*. 1999. Vol. 134. P. 186–201.

Sindern S., Hetzel R., Schulte B. A. et al. Proterozoic magmatic and tectonometamorphic evolution of the Taratash complex, Central Urals, Russia // *International Journal of Earth Sciences*. 2005. Vol. 94. P. 319–335.

Vavra G., Gebauer D., Schmid R., Compston W. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): an ion microprobe (SHRIMP) study // *Contrib. Miner. Petrol*. 1996. Vol. 122. P. 337–358.

Zonenshain L. P., Korinevsky V. G., Kazmin V. G., Pechersky D. M., Khain V. V., Mateenkov V. V. Plate tectonic model of the South Urals development // *Tectonophysics*. 1984. Vol. 109. P. 95–135.

Поступила в редакцию 29.01.2015

References

- Andreichev V. L., Rodionov N. V., Ronkin Yu. L. U-Pb i Sm-Nd datirovanie eklogitov Marunkeuskogo bloka Polyarnogo Urala: novye dannye [U-Pb and Sm-Nd dating of eclogites from the Marun-Keu block of the Polar Urals: new data]. *Metamorfizm, kosmicheskie, eksperimental'nye i obshchie problemy petrologii: materialy Mezhdunarodnogo (X Vserossiiskogo) petrograficheskogo soveshchaniya [Metamorphism, cosmic, experimental and general issues of petrology: proceedings of the international (X All-Russian) petrographic conference]*. 2005. Vol. 4. P. 17–19.
- Andreichev V. L., Ronkin Yu. L., Serov P.A. et al. Novye dannye o dokembriiskom vozraste eklogitov Marunkeu (Polyarnyi Ural) [New data on the Precambrian age of Marunkeu eclogites (Polar Urals)]. *Doklady RAN [Proceedings of RAS]*. 2007. Vol. 413, No 4. P. 503–506.
- Andreichev V. L., Kulikova K. V., Larionov A. N. U-Pb vozrast plagiogranitov Malyko (Polyarnyi Ural) [U-Pb age of the Malyko plagiogranites (Polar Urals)]. *Izvestiya Komi NTs UrO RAN [Proceedings of Komi SC UB RAS]*. 2012. No 4 (12). P. 60–66.
- Baneva N. N., Rusin A. I. Strukturno-veshchestvennaya evolyutsiya i izotopnyi vozrast Il'meno-Vishnevogorskogo kompleksa (Yuzhnyi Ural) [Structural-material evolution and isotopic age of the Ilmen-Vishnev complex (Southern Urals)]. *Litosfera [Lithosphere]*. 2014. No 2. P. 131–137.
- Dushin V. A., Serdyukova O. P., Malyugin A. A. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii M 1 : 200 000. Izd. 2-e. Seriya Polyarno-Ural'skaya. Listy Q-42-I, II. Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation M 1 : 200 000. Issue 2. Polar Urals Series. P. Listy Q-42-I, II. Explanatory note]. St. Petersburg: VSEGEI, 2007. 340 p.
- Dushin V. A., Burmako P. L., Ronkin Yu. L. et al. Sostav i novye vozrastnye datirovki metagabbroidov malykskogo kompleksa na Polyarnom Urale [Composition and new age dating of the Malyko metagabbroides, Polar Urals]. *Stukturno-veshchestvennyye kompleksy i problemy geodinamiki dokembriya fanerozoiskikh orogenov: materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (III Chteniya pamyati S. N. Ivanova) [The structural-material complexes and geodynamic problems of the Precambrian of Phanerozoic Orogens: proceedings of the international scientific conference (III anniversary of S. N. Ivanov readings)]*. Ekaterinburg, 2008. P. 27–29.
- Keil'man G. A. Migmatitovye kompleksy podviznykh pojasov [Migmatite complexes of the mobile belts]. Moscow: Nauka, 1974. 200 p.
- Kheraskov N. P., Perfil'ev A. S. Osnovnye osobennosti geosinklinal'nykh struktur Urala [The main features of the geosinclinal structures of the Urals]. *Problemy regional'noi tektoniki SSSR [The problems of regional tectonics of the USSR]*. Moscow: Nauka, 1963. P. 35–63.
- Krasnobaev A. A. Tsirkon kak indikator geologicheskikh protsessov [Zircon as an indicator of geological processes]. Moscow: Nauka, 1986. 152 p.
- Krasnobaev A. A., Davydov V. A., Shchul'kin E. P., Cherednichenko N. V. Tsirkonologiya selyankinskogo bloka Il'menskikh gor [Zirconology of the Selyankinsky block of the Ilmen Mountains]. *Doklady RAN [Proceedings of RAS]*. 2001. Vol. 379, No 1. P. 807–811.
- Krasnobaev A. A., Valize P. M., Rusin A. I. et al. Tsirkonologiya amfibolitov selyankinskoi tolshchi Il'menskikh gor (Yuzhnyi Ural) [Zirconology of amphibolites of the Selyankinskaya series of the Ilmeny Mountains (Southern Urals)]. *Doklady RAN [Proceedings of RAS]*. 2011a. Vol. 441, No 5. P. 661–665.
- Krasnobaev A. A., Kozlov V. I., Puchkov V. N. et al. Tsirkonologiya zhelezistykh kvartsitov taratashskogo kompleksa na Yuzhnom Urale [Zirconology of iron quartzites of the Taratash complex (Southern Urals)]. *Doklady RAN [Proceedings of RAS]*. 2011b. Vol. 437, No 6. P. 80–807.
- Krasnobaev A. A., Puchkov V. N., Busharina S. V. et al. Tsirkonologiya izranditov (Yuzhnyi Ural) [Zirconology of izrandites (Southern Urals)]. *Doklady RAN [Proceedings of RAS]*. 2011v. Vol. 439, No 3. P. 394–398.
- Kulikova K. V., Valamov D. A. Eklogitizatsiya gabbroidov khrebtta Marunkeu (Polyarnyi Ural). Granulitovye i eklogitovye kompleksy v istorii Zemli: materialy nauchnoi konferentsii i putevoditel' nauchnykh ekskursii [Eclogitization gabbro of Marunkeu Ridge (Polar Urals). Granulite and eclogite complexes in the Earth's history. Extended abstracts and field guide]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2011. P. 115–117.
- Kulikova K. V., Valamov D. A. Osobennosti metamorficheskoi evolyutsii Marunkeuskogo eklogit-gneisovogo kompleksa (Polyarnyi Ural): materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Features of metamorphic evolution of the Marunkeu eclogite-gneiss complex (Polar Urals). Proceedings of the All-Russian conference with international participation]. Ekaterinburg: IGIG UrO RAN, 2012. P. 152–154.
- Lennykh V. I., Pankov Yu. D., Petrov V. I. Petrologiya i metamorfizm migmatitovogo kompleksa [Petrology and metamorphism of the migmatite complex]. *Petrologiya i zhelezorudnye mestorozhdeniya taratashskogo kompleksa [Petrology and iron ore deposits of the Taratash complex]*. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1978. P. 3–45.
- Lennykh V. I., Valizer P. M., Rasskazova A. D. Nekotorye voprosy tektoniki dokembriya Urala v svete dannykh po metamorfizmu [Some tectonic issues of the Precambrian Urals in view of the new data on metamorphism]. *Geologiya i paleontologiya Urala [Geology and paleontology of the Urals]*. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1986. P. 71–74.
- Litosfera Timano-Severoural'skogo regiona: geologicheskoe stroenie, veshchestvo, geodinamika [The lithosphere of the Timan-North Urals segment: geological structure, substance, geodynamics]. A. M. Pystin, V. L. Andreichev, A. I. Antoshkina et al. Syktyvkar: Geoprint, 2008. 234 p.

Petrologiya i metamorfizm drevnikh ofiolitov. Na primere Polyarnogo Urala i Zapadnogo Sayana [Petrology and metamorphism of ancient ophiolites (the example of the Polar Urals and West Sayan Mountains)]. N. L. Dobretsov, Yu. V. Moldovantsev, A. P. Kazak et al. Novosibirsk: Nauka, 1977. 221 p.

Puchkov V. N. Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and Cis-Urals (actual problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa: DizainPoligrafServis, 2010. 280 p.

Pystin A. M. Aleksandrovskii gneisovo-amfibolitovyi kompleks [The Alexandrovskiy gneiss-amphibolite complex]. *Vulkanizm, metamorfizm i zhelezistye kvartsity obramleniya taratashskogo kompleksa* [Volcanism, metamorphism and iron quartzites of the Taratash complex]. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1978. P. 3–33.

Pystin A. M. Polimetamorficheskie komplekсы zapadnogo sklona Urala [Polymetamorphic complexes of the Western slope of the Urals]. St. Petersburg: Nauka, 1994. 208 p.

Pystin A. M., Ronkin Yu. L., Sindern S., Pystina Yu. I. Geokhronologicheskaya istoriya metamorfizma porod dorifeiskikh obrazovaniy zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala [Geochronological history of Pre-Riphean rock metamorphism on the Western slope of the Urals]. *Vestnik Instituta geologii Komi NTs UrO RAN* [Herald of Institute of Geology Komi SC UB RAS]. 2012a. No 11. P. 2–8.

Pystin A. M., Pystina Yu. I., Potapov I. L., Panfilov A. V. Rannedokembriiskaya istoriya metamorfizma porod granulitovykh i eklogitovykh kompleksov paleokontinental'noi zony Urala [Early Precambrian history of metamorphic rocks in granulite and eclogite complexes of the paleocontinental zone of the Urals]. Syktyvkar: Geoprint, 2012b. 46 p.

Pystina Yu. I., Pystin A. M. Tsirkonovaya letopis' ural'skogo dokembriya [Zircon chronicle of the Ural Precambrian]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2002. 167 p.

Ronkin Yu. L., Sindern S., Maslov A. V. et al. Drevneishie (3.5 mlrd let) tsirkony Urala: U-Pb (SHRIMP-II) i TDM ogranicheniya [Oldest (3.5 Ga) zircons of the Urals: U-Pb (SHRIMP-II) and TDM constraints]. *Doklady RAN* [Proceedings of RAS]. 2007. Vol. 415, No 5. P. 651–657.

Ronkin Yu. L., Sirern S., Lepikhina O. P. Izotopnaya geologiya drevneishikh obrazovaniy Yuzhnogo Urala [Isotope geology of ancient Southern Urals formations]. *Litosfera* [Lithosphere]. 2012. No 5. P. 50–76.

Slabunov A. I. Geologiya i geodinamika arkhaiskikh podvizhnykh poyasov (na primere Belomorskoi provintsii Fennoskandinavskogo shchita) [Geology and geodynamics of Archean mobile belts (example from the Belomorian province of the Fennoscandian shield)]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2008. 296 p.

Stratigraficheskie skhemy Urala (dokembrii, paleozoi) [Stratigraphic schemes of the Urals (Precambrian, Paleozoic)]. Ekaterinburg: Uralgeolkom, 1994.

Suleimanov A. K. Raboty OGT po profilyu URSEIS [CPD research in the USEIS field]. *Struktura i dinamika litosfery Vostochnoi Evropy. Vyp. 2: Rezul'taty issledovaniy po programme EVROPROBA* [Structure and dynamics of the lithosphere of the Eastern Europe. Vol. 2.: Results of investigation of EUROPROBE program]. Moscow: GEOKART, GEOS, 2006. P. 363–373.

Shalaginov V. V. Rannedokembriiskie komplekсы Ural'skogo skladchatogo poyasa i ikh minerageniya [Early Precambrian complexes of the Ural fold belt and their minerageny]. *Geologiya i minerageniya podvizhnykh poyasov* [Geology and minerageny of mobile belts]. Ekaterinburg: Uralgeolkom, 1997. P. 159–173.

Shatskii V. S., Simonov V. A., Yagoutts E. et al. Novye dannye o vozraste eklogitov Polyarnogo Urala [New data on the age of eclogites of the Polar Urals]. *Doklady RAN* [Proceedings of RAS]. 2000. Vol. 371, No 4. P. 519–523.

Shchipanskii A. A. Subduksionnye i mantiinoplumovye protsessy v geodinamike formirovaniya arkhaiskikh zelenokamennykh poyasov [Subduction-related and mantle plum processes in the geodynamics of formation of Archean greenstone belt]. Moscow: LKI, 2008. 560 p.

Tishin P. A. Petrologiya eklogitov khrebtta Marun-Keu (Polyarnyi Ural): avtoref. dis. ... kand. geol.-miner. Nauk [Petrology of eclogites of the Marun-Keu ridge (Polar Urals): abstract of CSc thesis, geol.-min. sciences]. Tomsk, 1999. 24 p.

Udovkina N. G. Eklogity Polyarnogo Urala [Eclogites of the Polar Urals]. Moscow: Nauka, 1971. 191 p.

Udovkina N. G. Eklogity SSSR [Eclogites of the USSR]. Moscow: Nauka, 1985. 286 p.

Volodichev O. I., Slabunov A. I., Bibikova E. V. et al. Arkhaiskie eklogity Belomorskogo podvizhnogo poyasa (Baltiiskii shchit) [Archean eclogites in the Belomorian mobile belt (Baltic Shield)]. *Petrologiya*. 2004. Vol. 12, No 6. P. 609–631.

Vshivtsev A. N. Veshchestvennyi sostav, vozrast i geodinamicheskie usloviya formirovaniya polyarnoural'skikh eklogitov [Lithology, age and geodynamic conditions of eclogites formation in the Polar Urals]. *Svyaz' poverkhnostnykh struktur zemnoi kory s glubinnymi: materialy XIV mezhdunarodnoi konferentsii* [Relationship between the surface and deep structures of the earth's crust: proceedings of the XIV international conference]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2008. P. 104–107.

*Glodny J., Pease V., Austreim H. 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. P. 4353–4371.*

*Glodny J., Austreim H., Molina J. F. 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 of London Memoir*. 2004. P. 87–105.*

*Görz I., Buschmann B., Krone U., Hauer R. Henning D. The Permian emplacement of granite-gneiss complexes in the East Uralian Zone and implications on the geodynamics of the Uralides. *Tectonophysics*. 2009. Vol. 467. P. 119–130.*

Görz I., Hielscher P. An explicit plate kinematic model for the orogeny in the southern Uralides. *Tectonophysics*. 2010. Vol. 493. P. 1–26.

Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in mineralogy and geochemistry*. 2003. Vol. 53. P. 27–61.

Molina J. F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A. The eclogites of Marun-Keu complex, Polar Urals (Russia): fluid control on reaction kinetics and metasomatism during high P metamorphism. *Lithos*. 2002. Vol. 61. P. 55–078.

Schaltegger U., Fanning C. M., Gunther D., Maurin J. C., Schulmann K., Gebauer D. Growth, annealing and recrystallization of zircon and preservation of monazite in high-grade metamorphism: conventional and in-situ U-Pb isotope, cathodoluminescence and microchemical evidence. *Contrib. Miner. Petrol.* 1999. Vol. 134. P. 186–201.

Sindern S., Hetzel R., Schulte B. A. et al. Proterozoic magmatic and tectonometamorphic evolution of the Taratash complex, Central Urals, Russia. *International Journal of Earth Sciences*. 2005. Vol. 94. P. 319–335.

Vavra G., Gebauer D., Schmid R., Compston W. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): an ion microprobe (SHRIMP) study. *Contrib. Miner. Petrol.* 1996. Vol. 122. P. 337–358.

Zonenshain L. P., Korinevsky V. G., Kazmin V. G., Pechersky D. M., Khain V. V., Mateenkov V. V. Plate tectonic model of the South Urals development. *Tectonophysics*. 1984. Vol. 109. P. 95–135.

Received January 29, 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Пыстин Александр Михайлович

рук. лаборатории, д. г.-м. н., проф.
Институт геологии Коми научного центра Уральского
отделения РАН
ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, Республика Коми,
Россия, 167982
эл. почта: pystin@geo.komisc.ru
тел.: (8212) 447262

Пыстина Юлия Ивановна

ведущий научный сотрудник, д. г.-м. н.
Институт геологии Коми научного центра Уральского
отделения РАН
ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, Республика Коми,
Россия, 167982
эл. почта: pystina@geo.komisc.ru

CONTRIBUTORS:

Pystin, Alexandr

Institute of Geology, Komi Science Centre, Ural Branch
Russian Academy of Sciences
54 Pervomayskaya St., 167982, Syktyvkar, Komi, Russia
e-mail: pystin@geo.komisc.ru
tel.: (8212) 447262

Pystina, Yulia

Institute of Geology, Komi Science Centre, Ural Branch
Russian Academy of Sciences
54 Pervomayskaya St., 167982, Syktyvkar, Komi, Russia
e-mail: pystina@geo.komisc.ru