

## ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.16:551.72 (234.851)

**Возраст протолитов и геохронология метаморфизма  
Неркаюского эклогит-сланцевого комплекса  
Приполярного Урала****А.М. Пыстин, Е.В. Кушманова, Ю.И. Пыстина, А.В. Панфилов,  
И.Л. Потапов**

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54

E-mail: [pystin@geo.komisc.ru](mailto:pystin@geo.komisc.ru)*(Статья поступила в редакцию 11 декабря 2018 г.)*

Приведены первые результаты U-Pb датирования цирконов из метаморфических пород неркаюского эклогит-сланцевого комплекса. Минимальный возраст детритовых цирконов позволяет предположить, что исходные осадочные образования – протолиты гранат-слюдяных кристаллических сланцев – сформировались в палеопротерозое. Время проявления раннего этапа метаморфизма пород датируется рубежом около 2.0 млрд лет назад. Эти данные подтверждает давно разрабатываемое авторами представление о неркаюском эклогит-сланцевом комплексе, как о тектонически перемещенном фрагменте нижнедокембрийского кристаллического основания, вовлеченного в структуру уралид.

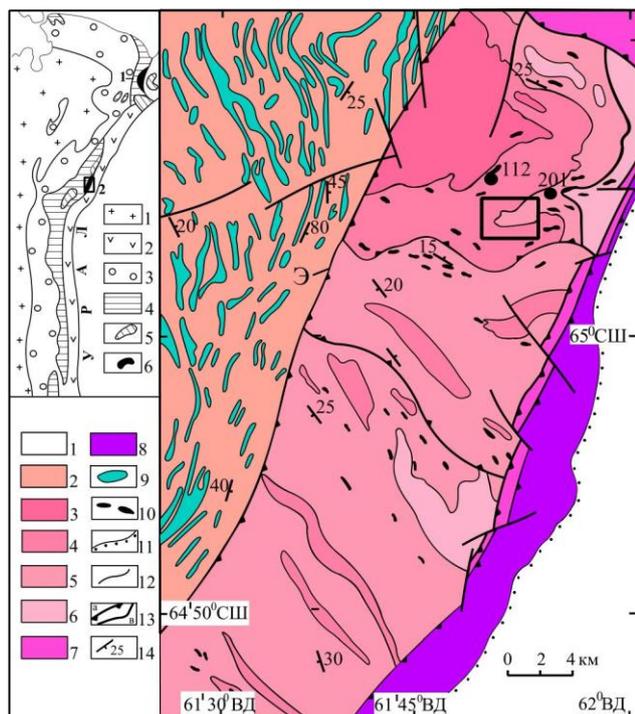
Ключевые слова: *Приполярный Урал, нижний докембрий, протолит, эклогит, геохронология.*

DOI: 10.17072/psu.geol.18.2.96

**Введение**

Высокобарические эклогитсодержащие комплексы привлекают внимание геологов прежде всего тем, что являются общепризнанными индикаторами субдукционно-коллизийных процессов. На Урале такие комплексы в основном приурочены к зоне Главного Уральского разлома (ГУР), их формирование большинство исследователей связывает с историей развития уралид. Однако в отличие от низкотемпературных высокобарических метаморфитов (с глаукофаном и лавсонитом), почти непрерывной полосой трассирующих зону ГУР, распространение высокотемпературных эклогитсодержащих породных ассоциаций ограничивается только несколькими областями, где они пространственно связаны с древнейшими (нижнедокембрийскими) полиметаморфическими комплексами. Данное обстоятельство в свое время послужило основанием для отнесения некоторых эклогитсодержащих комплексов Урала к нижнедокембрийскому разрезу (Стратиграфические..., 1993). На севере Урала – это марункеуский эклогит-

гнейсовый и неркаюский эклогит-сланцевый комплексы (рис. 1). Геохронологическим обоснованием раннедокембрийского возраста марункеуского комплекса послужили результаты K-Ar и Pb-Pb датирования минералов из эклогитов – 1.70, 1.56, 1.54 млрд лет (Удовкина, 1985). Позднее близкие 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 породообразующим метаморфогенным минералам (Андреичев и др., 2007). Кроме того, для циркона из этих же пород был получен конкордантный U-Pb возраст, равный 1.86 млрд лет (Андреичев и др., 2005). В то же время на основе датирования единичных зерен цирконов из жил эклогитов U-Pb методом Дж. Глодни с соавторами (Glodny et al., 2004) ограничили время проявления высокобарического метаморфизма интервалом 353–362 млн лет, что согласуется с Rb-Sr возрастными значениями этих же пород (Glodny et al., 2003). Сопоставимые определения возраста эклогитов были получены по Sm – Nd



**Рис. 1.** Геологическая карта неркаюского эклогит-сланцевого комплекса (Пыстин, 1994): 1 – четвертичные отложения; 2 – керегшорский комплекс (RF<sub>2-3</sub>): парасланцы зеленые ортосланцы, прослои метапесчаников и метагравелитов; 3-7 – неркаюский комплекс (PR<sub>1</sub>): 3 – лейкократовые кристаллические сланцы, 4 – мезократовые кристаллические сланцы, 5 – мезократовые и лейкократовые кристаллические сланцы с прослоями амфиболитов, 6 – амфиболиты, эклогиты, гранат-глаукофановые сланцы, кристаллические сланцы, 7 – амфиболиты, гранат-глаукофановые сланцы, кварциты; 8 – габбро, пироксениты, перидотиты (O<sub>3</sub>-S<sub>1</sub>); 9 – метагаббро, метагаббро-долериты (RF<sub>3</sub>-V); 10 – эклогиты и апоэклогитовые амфиболиты (PR<sub>1</sub>); границы: 11 – распространения мезокайнозойских отложений, 12 – стратифицируемых и интрузивных образований; 13 – разрывные нарушения (а – взбросы и надвиги, в – крутопадающие разломы); 14 – элементы залегания кристаллизационной сланцеватости; Э – Эрепшорский разлом глубокого заложения. Прямоугольником выделены границы геологической карты, приведенной на рис. 2. Черные кружочки с номерами – места отбора проб и их номера.

На врезке. Схема размещения нижнедокембрийских метаморфических комплексов на севере Урала: 1 – осадочный чехол Европейской платформы; 2-3 – палеозойские формации Урала: 2 – палеоокеанические; 3 – палеоконтинентальные; 4 – верхнедокембрийские образования, преимущественно претерпевшие зеленосланцевый мета-

морфизм; 5-6 – нижнедокембрийские образования (5 – гнейсо-мигматитовые и гранулит-метабазитовые, 6 – эклогит-гнейсовые и эклогит-сланцевые). Цифровые обозначения: 1 – марункеуский эклогит-гнейсовый комплекс, 2 – неркаюский эклогит-сланцевый комплекс. Прямоугольником выделены границы геологической карты неркаюского комплекса

минеральной изохроне –  $366 \pm 8,6$  млн лет (Шацкий и др., 2000) и по цирконам U-Pb методом на SHRIMP-II –  $392 \pm 72$  млн лет (Коновалов и др., 2014).

Противоречивость изотопных данных можно объяснить тем, что «молодые» датировки получены по породам, имеющим в своем составе белую слюду. Поэтому они могут указывать на время одного из этапов метаморфического преобразования эклогитов (Андреичев и др., 2007), связанного, например, с их эксгумацией (Пыстин и др., 2012; Пыстин, Пыстина, 2015). Хотя нельзя полностью исключать и вероятность тектонического совмещения разновозрастных эклогитов.

Неркаюский комплекс в отличие от марункеуского в геохронологическом отношении изучен очень слабо. Известна единственная датировка циркона, полученная Pb-Pb термоизохронным методом, – 1.6 млрд лет (Вализер, Ленных, 1988). Имеются также Ar-Ar датировки белых слюд ( $351.3 \pm 3.6$  и  $352 \pm 3.6$  млн лет) из эклогитов (Иванов, 2001). Автор вышеуказанной публикации считает, что эти возрастные значения определяют время проявления субдукционного эклогит- глаукофансланцевого метаморфизма.

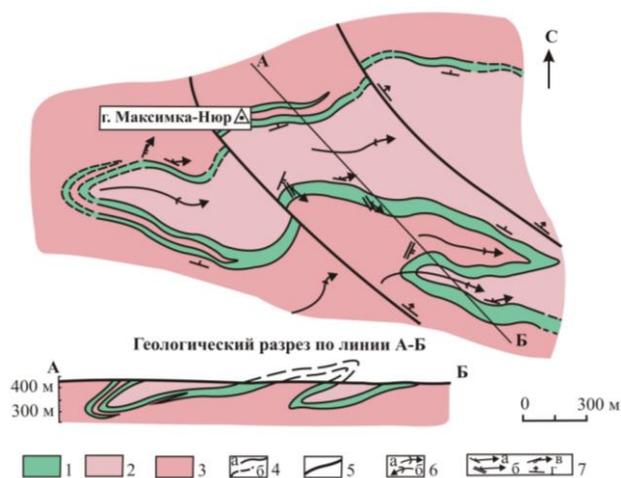
В настоящей статье приводятся первые U-Pb датировки цирконов, которые дают возможность судить о возрасте протолитов кристаллических сланцев, вмещающих тела эклогитов, а также о времени проявления метаморфических преобразований пород, в том числе в высокобарических условиях.

### Геологическое строение

Неркаюский эклогит-сланцевый комплекс выделен при геологической съемке масштаба 1:50000 (Пыстин и др., 1983). Он расположен на восточном склоне Приполярного Урала в

бассейне р. Хулга, слагает одноименный тектонический блок размером 80x15 км и граничит на востоке и юго-востоке по ГУР с габбро и гипербазитами Олыся-Мусюрского массива, а на западе по Эрепшорскому разлому глубокого заложения – со слабометаморфизованными средневерхнерифейскими вулканогенно-осадочными отложениями (рис. 1).

Комплекс сложен полиметаморфическими образованиями. Породы многократно дислоцированы и преобразованы последовательно проявившимися метаморфическими процессами. Фрагменты наиболее ранних структурных элементов представлены линейными складками преимущественно субширотного и северо-западного простирания. «Неуральский» структурный план неркаюского комплекса отчетливо проявляется в физических полях (Пономарева и др., 2017). Фрагмент геологической карты неркаюского комплекса приведен на рис. 2.



**Рис. 2.** Геологическое строение района выс. Максимка-Нюр, неркаюский эклогит-сланцевый комплекс: 1 – амфиболизированные эклогиты, апоэклогитовые амфиболиты; 2 – амфиболсодержащие слюдистые кристаллические сланцы; 3 – гранат-слюдистые кристаллические сланцы и плагиогнейсы; 4 – границы геологических тел: а – установленные, б – предполагаемые; 5 – взбросы; 6 – оси складок ранней генерации: а – антиклиналей, б – синклиналей; 7 – элементы залегания плоскостных и линейных структур (а – контактов пород и шарниров складок ранней генерации; б – полосчатости и минеральной линейности; в – сланцеватости и минеральной линейности; г – плоскостей сместителей взбросов

В обобщенном виде геологический разрез неркаюского комплекса по данным геологосъемочных работ (Пыстин, 1994) выглядит следующим образом. В его нижней части залегает толща гранат-глаукофановых сланцев и гранат-барруазитовых амфиболитов с прослоями гранат-слюдяных кристаллических сланцев и гранатсодержащих кварцитов. Встречаются также межпластовые тела эклогитов и апоэклогитовых амфиболитов. Выше залегают переслаивающиеся между собой мезократовые и лейкократовые гранат-слюдяные кристаллические сланцы с прослоями амфиболитов и эклогитов. В целом разрез метаморфической толщи нарастается с северо-востока на юго-запад. Мощность ее не менее 4000 м.

Детали геологического строения неркаюского комплекса и его структурные особенности видны на геологической схеме района выс. Максимка-Нюр, находящегося на правом берегу р. Неркаю. Здесь на плоскогорье компактно располагаются обнажения эклогитов и апоэклогитовых амфиболитов. При проведении геологической съемки этого района (Пыстин и др., 2014) установлено, что обнажающиеся на поверхности тела эклогитов и апоэклогитовых пород являются фрагментами одного «пласта» мощностью до 50 м, который уверенно прослеживается на расстоянии 4,5 км. «Пласт» подстилается гранат-биотит-мусковит-кварц-плагиоклазовыми кристаллическими сланцами и перекрывается амфиболсодержащими слюдистыми кристаллическими сланцами. Учитывая приведенные выше данные, можно предположить, что протолитами эклогитов в пределах изученного участка были вулканиты основного состава. На это указывают морфология «пласта», сложенного эклогитами и апоэклогитовыми амфиболитами, его большая протяженность при незначительной мощности, положение в разрезе между породами, различающимися по минеральному составу.

В наших предыдущих исследованиях пород неркаюского комплекса (Пыстин и др., 1983; Пыстин, 1991) были установлены проявления трех этапов метаморфизма. Парагенезисы первого этапа имеют реликтовый характер. Они фрагментарно сохранились только в тех частях комплекса, где высоко-

температурные метаморфиты слабо изменены поздними низкотемпературными преобразованиями: в удалении от ограничивающих комплекс разломов и других разрывных нарушений с приуроченными к ним зонами зеленосланцевых диафторитов. P-T параметры раннего этапа метаморфизма были оценены как соответствующие фации дистеновых гнейсов и амфиболитов ( $T > 650^{\circ}\text{C}$ ,  $P > 9$  кбар). При этом условия для образования эклогитов, по-видимому, возникали только в локальных зонах повышенных давлений. Формирование таких зон могло быть связано с ранними (раннедокембрийскими?) стадиями эксгумации. На это указывает факт не повсеместного распространения эклогитов в неркаюском комплексе: этими породами насыщены только две локализованные зоны – по правобережью р. Неркаю и в междуречье Бол. Нядокота и Бол. Хасая. В других местах находки эклогитов единичны. Со вторым этапом метаморфизма связана амфиболитизация эклогитов. На регрессивной стадии условия метаморфизма отвечали глаукофан-альмандиновой фации. Термодинамические условия этого этапа метаморфизма:  $T = 600\text{--}760^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 10\text{--}13$  кбар. Третий этап метаморфического преобразования пород соответствовал глаукофановой фации, переходной по температуре к глаукофанальмандиновой фации, а по давлению – к фации зеленых сланцев ( $T = 450\text{--}500^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 9\text{--}12$  кбар).

Оценка возможных геодинамических обстановок образования протолитов метаморфических пород неркаюского комплекса была дана в нашей недавней публикации (Пыстин и др., 2014), где было показано, что на дискриминационных диаграммах точки составов эклогитов и амфиболитов ложатся в пограничные области полей континентальных базальтов и базальтов океанических островов. При сравнении распределения R3Э в metabazитах (эклогитах и амфиболитах) неркаюского комплекса с типовыми составами вулканитов основного ряда обнаружилось их сходство с платобазальтами и умеренно-обогащенными толеитами окраинных (задуговых) морей. Анализ спектров распределения редких и R3Э элементов показал близость составов исследуемых кристаллических сланцев с составами граувакк океанических островных дуг. В целом результа-

ты анализа петрогеохимических данных приводят к заключению, что протолиты метаморфических пород неркаюского комплекса наряду с признаками океанического (морского) происхождения имеют континентальные метки. Это можно проинтерпретировать следующим образом: вулканогенно-осадочные образования – протолиты метаморфических пород – сформировались на окраине континента в обстановке рифтогенеза и последующего развития задугового моря (Пыстин и др., 2014).

### Объекты и методы исследования

Для установления возраста протолитов и времени проявления метаморфических преобразований пород проводились изотопные исследования цирконов U-Pb LA-SF-ICP-MS методом. Этот метод реализован на базе одноколлекторного магнитно-секторного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Element XR и установки для лазерной абляции UP-213 в ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Обработка данных масс-спектрометрического анализа проводилась с помощью программы Glitter, разработанной Австралийским научным центром GEMOC при Университете Маккуори (г. Сидней). Для построения U-Pb диаграмм с конкордией использовался макрос Isoplot 3. Процедура анализа и расчета возраста приведена в статье В.Б. Хубанова и др. (2016).

Необходимое для получения корректного результата количество цирконов (более 50 зерен) удалось выделить из двух проб, представленных амфиболсодержащими гранат-слюдистыми кристаллическими сланцами. Проба № 201 отобрана из глыбы, залегающей вблизи коренного выхода на левом берегу р. Неркаю, в 5850 м ниже устья ее левого притока – р. Осею (СШ  $65.0704^{\circ}$ , ВД  $61.8921^{\circ}$ ). Проба № 112 отобрана из элювиального развала на правом берегу р. Осею в 1100 м выше устья (СШ  $65.0848^{\circ}$ , ВД  $61.8132^{\circ}$ ).

Минералы отбирались вручную под биноклярным микроскопом из раздробленных до крупности  $< 0.5$  мм проб после их обогащения на магнитном сепараторе и разделения на фракции в тяжелой жидкости (три-

бромметане). Общий набор морфотипов цирконов в пробах оказался идентичным. Среди цирконов были установлены аллотигенные и аутигенные разновидности. Аллотигенные (детритовые) цирконы представлены хорошо окатанными округлыми и слабо удлиненными прозрачными и полупрозрачными зернами светло-розовой и розовой окраски. Размер зерен 80–150 мкм. Шероховатая поверхность зерен и наличие на них царапин не оставляют сомнений в том, что они претерпели транспортировку, т.е. являются терригенными образованиями. Общее количество таких цирконов в монофракциях 3–5%. Среди аутигенных цирконов выделяются два морфотипа. Один из них составляют светло-розовые и бесцветные округлые цирконы с четко выраженной кристаллографической формой, обусловленной развитием граней (311), (111), (110), (100). Кристаллы отличаются слабо выраженной зональностью и отсутствием ядер. Их размер варьируется от 100 до 250 мкм. Такие цирконы характерны для ультравысокотемпературных и высокотемпературных метаморфических пород. А.А. Краснобаевым (1986) они выделяются как «гранулитовый» тип, а в зарубежной литературе известны как цирконы типа «футбольного мяча» (Schaltegger et al., 1999). Содержание цирконов этого морфотипа в монофракциях 20–30%. Другой морфотип циркона представлен светло-розовыми полупрозрачными и прозрачными призматическими кристаллами, облик которых обусловлен развитием призмы (110) и дипирамиды (111). Размер зерен 100–300 мкм, коэффициент удлинения – 2–3. Поверхность граней блестящая. Внутреннее строение отличается многозональностью. Расположение зон относительно друг друга может быть симметричным и несимметричным. Иногда отмечаются ядра, образованные округлыми цирконами. Такие цирконы типичны для пород амфиболитовой фации, особенно для их мигматизированных разновидностей. Их формирование связывается с присутствием силикатного расплава, поэтому фактически являются магматическими цирконами. На Урале они известны как цирконы «мигматитового» типа (Краснобаев, 1986). Количество таких цирконов в монофракциях 65–75%. В породах многих полиметаморфических ком-

плексов Урала этот морфотип, как и в неркаюском комплексе, обычно является преобладающим среди метаморфогенных цирконов (Пыстина, Пыстин, 2002; 2018).

Перед изотопными исследованиями цирконы были имплантированы в эпоксидную смолу и в дальнейшем шлифовались и полировались.

### Результаты и обсуждение

В пробе № 201 было отобрано 105 зерен цирконов. Из них 50 наиболее чистых, однородных, нетрещиноватых зерен были проанализированы. По критерию конкордантности возрастов по разным изотопным системам ( $D < 10\%$ ) отобрано для дальнейшего анализа 38. Результаты анализа приведены в табл. 1 и на графике распределения возрастов (рис. 3, а). Наиболее высокие  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возрастные значения были получены для терригенных цирконов (2716–2608 и 2131–2012 млн лет). Для цирконов, в которых отсутствуют признаки транспортировки (шероховатость поверхности плоскостей кристаллов, наличие на них царапин и др.) и которые на этом основании могут быть отнесены к метаморфогенным минералам, наиболее высокие датировки находятся в интервале 2004–1969 млн лет. Они получены для цирконов «гранулитового» морфотипа. В то же время для этого морфотипа установлены и более молодые возрасты: 1757, 1714 и 1480 млн лет. Основной объем возрастных значений получен по цирконам «мигматитового» морфотипа. Они группируются в следующие интервалы: 1852–1845, 1644–950 и 791–622 млн лет.

Таким образом, датировки цирконов более 2.01 млрд лет указывают на возраст протолитов метаморфических пород неркаюского комплекса. Морфологические особенности наиболее древних метаморфогенных цирконов подтверждают структурные и петрографические данные о высоких P-T параметрах раннего этапа метаморфизма пород. Последующие более молодые возрастные значения отражают многоэтапный характер полиметаморфических преобразований в породах неркаюского комплекса.

В пробе № 112 было отобрано 73 зерна

**Таблица 1.** Результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования цирконов из гранат-слюдяных кристаллических сланцев (проба 201)

Номер зерна	Изотопные отношения ± % (1σ)		Rho	Возраст ± 1σ, млн лет		D, %	Th/U
	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		
1	0,4799±1,7	12,3540±2,1	0,79	2527±35	2716±34	7,47	1,34
2	0,4638±0,9	11,1873±1,1	0,86	2457±19	2608±20	6,16	0,31
3	0,3606±0,9	6,5757±1,1	0,84	1985±15	2131±21	7,33	0,44
4	0,3655±1,4	6,6402±2,0	0,70	2008±24	2124±36	5,77	1,34
5	0,3505±0,9	5,9734±1,1	0,83	1937±15	2012±22	3,86	0,14
6	0,3481±1,1	5,9050±1,4	0,75	1925±18	2004±27	4,06	0,64
7	0,3604±1,0	5,9959±1,2	0,79	1984±16	1969±24	-0,76	0,51
8	0,3206±1,0	4,7424±1,3	0,75	1793±15	1757±26	-2,02	0,76
9	0,2988±1,0	4,3176±1,4	0,73	1685±15	1714±28	1,71	1,91
10	0,2614±0,8	3,3608±1,0	0,86	1497±11	1496±22	-0,08	0,38
11	0,3324±0,9	5,1834±1,1	0,80	1850±15	1852±24	0,11	0,90
12	0,2979±0,9	4,6265±1,1	0,80	1681±13	1845±23	9,79	0,53
13	0,2651±1,0	3,6888±1,3	0,73	1516±13	1644±27	8,49	0,27
14	0,2830±1,0	3,9101±1,4	0,71	1606±15	1631±29	1,54	0,84
15	0,2824±0,9	3,8906±1,3	0,75	1604±13	1625±26	1,36	0,48
16	0,2777±0,9	3,6463±1,2	0,76	1580±13	1536±26	-2,79	0,18
17	0,2655±0,9	3,4856±1,2	0,76	1518±12	1535±26	1,15	0,69
18	0,2563±0,9	3,3599±1,3	0,74	1471±12	1532±27	4,17	0,72
19	0,2605±0,9	3,3976±1,3	0,74	1492±13	1523±27	2,06	1,87
20	0,2519±0,9	3,2330±1,1	0,79	1448±11	1493±24	3,06	0,03
21	0,2606±1,0	3,3376±1,4	0,71	1493±13	1488±29	-0,31	0,65
22	0,2567±0,9	3,2778±1,2	0,75	1473±12	1483±26	0,65	0,62
23	0,2399±1,1	3,0622±1,7	0,64	1386±14	1482±36	6,88	0,53
24	0,2593±0,9	3,3063±1,3	0,78	1486±12	1480±25	-0,38	0,52
25	0,2446±1,0	3,1171±1,6	0,67	1411±13	1479±32	4,81	1,38
26	0,2487±1,2	3,1574±2,0	0,61	1432±16	1472±41	2,80	1,49
27	0,2485±1,0	3,1521±1,5	0,69	1431±13	1470±31	2,74	0,91
28	0,2485±1,1	3,0480±1,7	0,64	1431±14	1407±35	-1,68	0,81
29	0,2492±1,3	3,0259±2,2	0,59	1434±17	1387±44	-3,28	1,00
30	0,2045±1,0	2,2819±1,4	0,69	1199±11	1223±30	1,99	0,46
31	0,1858±0,9	2,0145±1,1	0,80	1099±9	1166±25	6,11	0,83
32	0,1758±0,9	1,7602±1,1	0,79	1044±8	1007±26	-3,54	0,34
33	0,1719±1,1	1,7121±2,0	0,57	1023±11	995±43	-2,68	1,46
34	0,1665±0,9	1,6219±1,3	0,70	993±8	950±30	-1,42	0,33
35	0,0958±1,2	0,8636±2,3	0,51	590±7	791±51	7,23	1,04
36	0,1003±1,1	0,8545±2,3	0,50	616±7	670±51	1,77	0,72
37	0,1071±1,0	0,9040±1,8	0,56	656±6	651±42	-0,29	0,59
38	0,1181±0,9	0,9836±1,2	0,73	719±6	622±29	-3,32	0,70

Примечание: мофотипы цирконов: детритовые (1–5), «гранулитовые» (6–10), «мигматитовые» (11–38)

циркона. Цирконы к изотопным исследованиям готовились уже после получения результатов по пробе № 201, поэтому основное внимание уделялось отбору детритовых и «гранулитовых» цирконов с целью более детальной характеристики ранних этапов становления неркаюского комплекса. Были про-

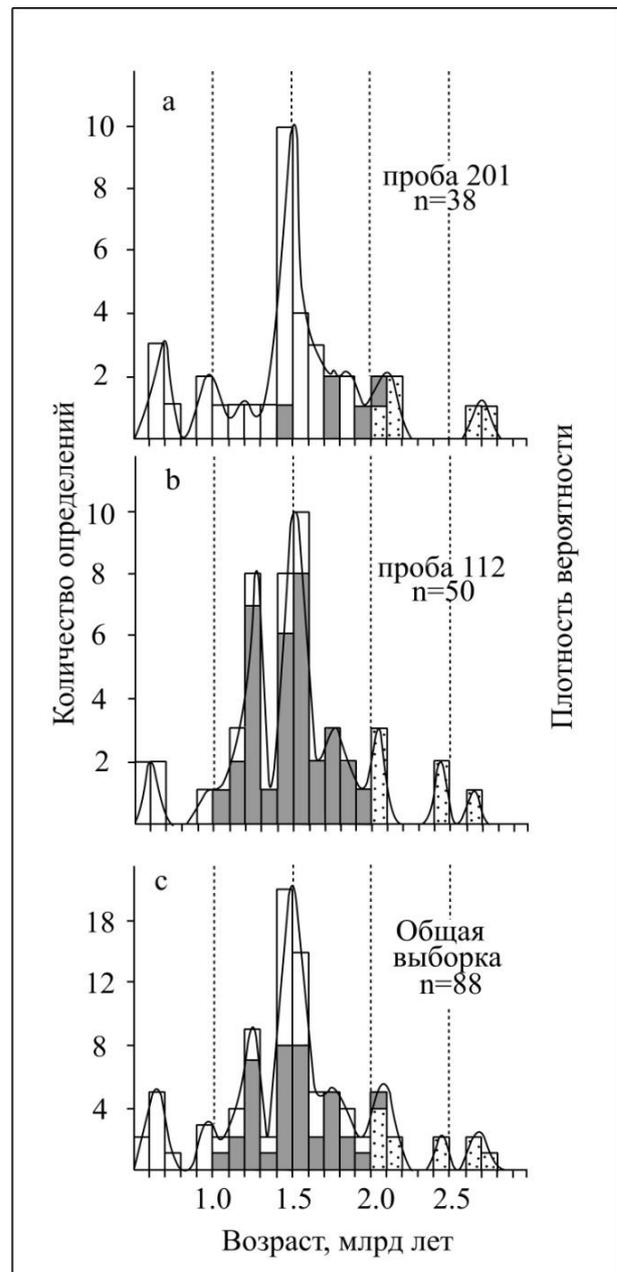
анализированы 50 зерен. Результаты анализа приведены в табл. 2 и на графике распределения возрастов (рис. 3,б). Полученные значения возрастов показали высокую степень конкордантности (D<10%), поэтому все они были использованы для дальнейшего анализа. Как и в предыдущей пробе, наиболее вы-

сокие  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возрасты были получены для детритовых цирконов (2640 – 2408 и 2056–2009 млн лет). Интервал датировок цирконов «гранулитового» типа в отличие от пробы № 201 оказался очень большим: 2008–1049 млн лет. В то же время значения  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возрастов цирконов «мигматитового» типа в сравнении с пробой № 201 показали меньший возрастной интервал: 1518–534.

Как и в пробе № 201, в данном случае минимальный возраст протолитов оказался равным около 2.01 млрд лет. Максимальная датировка, указывающая на время проявления ранних метаморфических событий, равна  $2008 \pm 42$  млн лет, т.е. в пределах погрешности сопоставима с изотопным возрастом наиболее древнего зерна циркона «гранулитового» типа в предыдущей пробе ( $2004 \pm 27$  млн лет). Распределение более молодых возрастов в интервале 2.0–0.5 млрд лет имеет полимодальный характер.

Сравнение графиков распределения возрастов цирконов из проб № 201 и 212 (рис. 3 а, б) и из общей выборки (рис. 3, с) дает основание для выделения нескольких эпизодов кристаллизации цирконов или, вероятно, процессов, приводящих к нарушению в цирконах U-Pb изотопной системы: около 2.1, 1.75, 1.5, 1.25, 1.0 и 0.65 млрд лет. Все модальные значения датировок цирконов за исключением 1.5 млрд лет соответствуют основным возрастным рубежам в протерозойской истории развития докембрийских метаморфических комплексов Урала (Пыстина, Пыстин, 2002). Однозначного решения для интерпретации раннерифейских датировок цирконов пока мы предложить не можем. Возможно, это омоложенные возрастные значения, маркирующие время активизации метаморфических процессов, связанных с проявлением ранних этапов позднекембрийского континентального рифтогенеза около 1.6 млрд лет назад. На Южном Урале с этими событиями соотносится щелочно-базальтовый вулканизм «навышского» уровня (Нижний..., 1989; Краснобаев и др., 1992 и др.). Правда, в последние годы на основании результатов локального U-Pb датирования цирконов возраст навышских вулканитов пересматривается в сторону удреждения,

вплоть до 1.75 млрд лет (Краснобаев и др., 2013; Краснобаев и др., 2018).



**Рис. 3.** Гистограммы и графики плотности вероятности  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возрастов цирконов из метатерригенных кристаллических сланцев неркаюского комплекса. На гистограмме выделены датировки морфотипов цирконов: точками – детритовых, серым тоном – «гранулитовых», не выделены – «мигматитовых»

## Выводы

Впервые выполненное U-Pb датирование цирконов из метаморфических пород неркаюского эклогит-сланцевого комплекса подтверждает давно разрабатываемое нами

**Таблица 2.** Результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования цирконов из гранат-слюдяных кристаллических сланцев (проба 112)

Номер зерна	Изотопные отношения ± % (1σ)		Rho	Возраст ± 1σ, млн лет		D, %	Th/U
	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		
	1	0,5027±0.8		12,3820±2.3	0,35		
2	0,4480±0.7	9,9558±2.2	0,33	2386±15	2468±38	1,86	0,23
3	0,4770±0.8	10,2315±2.3	0,33	2514±16	2408±39	-2,32	0,84
4	0,3699±0.7	6,4756±2.3	0,33	2029±13	2056±40	0,69	0,63
5	0,3815±0.7	6,5052±2.3	0,32	2084±13	2009±40	-1,77	0,57
6	0,3204±0.8	5,4603±2.3	0,33	1792±12	2008±42	5,72	0,72
7	0,3337±0.7	5,4252±2.3	0,33	1856±12	1925±41	1,75	0,86
8	0,3425±0.8	5,2700±2.3	0,33	1899±13	1825±42	-1,82	0,74
9	0,3130±0.7	4,7898±2.3	0,32	1755±11	1815±42	1,58	0,50
10	0,3001±0.9	4,3826±2.5	0,34	1692±13	1730±47	1,02	0,79
11	0,3211±0.7	4,7030±2.3	0,32	1795±12	1736±42	-1,51	0,44
12	0,3132±0.8	4,5897±2.4	0,33	1757±12	1736±44	-0,52	0,49
13	0,2387±0.9	3,2805±2.6	0,33	1380±11	1617±49	6,98	0,90
14	0,2850±0.8	3,9369±2.4	0,33	1616±11	1627±45	0,30	0,58
15	0,2682±0.9	3,4635±2.6	0,33	1532±12	1501±49	-0,84	1,26
16	0,2638±0.8	3,4094±2.4	0,32	1509±10	1503±45	-0,16	0,78
17	0,2714±0.9	3,5408±2.6	0,33	1548±12	1520±50	-0,75	0,95
18	0,2538±0.9	3,3261±2.7	0,33	1458±12	1529±51	2,01	1,04
19	0,2719±0.8	3,5678±2.3	0,32	1550±10	1531±44	-0,50	0,62
20	0,2634±0.8	3,4668±2.5	0,33	1507±11	1537±47	0,84	0,85
21	0,2413±0.8	3,1779±2.5	0,33	1394±10	1538±48	4,18	0,52
22	0,2718±0.8	3,5825±2.5	0,33	1550±11	1539±47	-0,28	0,71
23	0,2413±0.8	2,9796±2.5	0,33	1393±10	1416±48	0,66	0,51
24	0,2329±0.8	2,8948±2.5	0,32	1350±10	1428±48	2,27	0,94
25	0,2685±0.8	3,3526±2.6	0,33	1533±12	1437±49	-2,60	1,03
26	0,2400±0.8	3,0050±2.4	0,32	1387±10	1442±46	1,61	0,95
27	0,2643±0.8	3,3556±2.5	0,33	1512±11	1469±47	-1,18	0,88
28	0,2688±0.9	3,4427±2.8	0,34	1534±13	1486±53	-1,32	1,45
29	0,2195±0.8	2,5555±2.4	0,32	1279±9	1302±47	0,69	0,37
30	0,1856±0.8	2,0573±2.4	0,32	1098±8	1206±48	3,37	0,23
31	0,2100±0.8	2,3558±2.6	0,32	1229±9	1230±51	0,03	0,49
32	0,2172±0.7	2,4263±2.3	0,32	1267±9	1221±46	-1,33	0,30
33	0,2099±0.8	2,3586±2.5	0,32	1228±9	1233±48	0,17	0,35
34	0,2142±0.8	2,4391±2.5	0,32	1251±9	1259±49	0,24	0,62
35	0,2339±0.7	2,6931±2.3	0,32	1355±9	1281±45	-2,09	0,38
36	0,2058±0.8	2,3888±2.5	0,32	1206±9	1296±49	2,72	0,32
37	0,2166±0.7	2,3049±2.3	0,32	1264±8	1125±46	-3,97	0,33
38	0,1954±0.7	2,1263±2.3	0,32	1150±8	1170±47	0,62	0,41
39	0,1602±0.9	1,6409±2.7	0,31	958±8	1049±55	2,94	0,39
40	0,2651±0.8	3,4543±2.5	0,33	1516±11	1518±48	0,07	1,05
41	0,2843±0.8	3,7174±2.4	0,32	1613±11	1524±45	-2,36	0,49
42	0,2714±0.8	3,4931±2.4	0,32	1548±11	1494±45	-1,45	1,29
43	0,2600±0.8	3,3343±2.4	0,33	1490±11	1488±46	-0,06	0,91
44	0,2048±0.8	2,3253±2.4	0,32	1201±9	1254±48	1,58	0,27
45	0,2078±0.9	2,2565±2.8	0,32	1217±10	1166±56	-1,50	0,70
46	0,1704±0.7	1,6986±2.3	0,31	1015±7	994±48	-0,64	0,31
47	0,1261±0.8	1,0810±2.5	0,31	765±5	680±53	-2,77	0,43
48	0,0941±0.8	0,7807±2.5	0,30	580±4	609±55	1,05	0,44
49	0,0817±0.8	0,6665±2.7	0,30	506±4	574±59	2,49	0,60
50	0,0927±0.7	0,7427±2.4	0,30	571±4	534±54	-1,26	0,54

Примечание: мофотипы цирконов: детритовые (1–5), «гранулитовые» (6–39), «мигматитовые» (40–50).

представление о неркаюском эклогит-сланцевом комплексе, как о тектонически перемещенном фрагменте нижнедокембрийского кристаллического основания, вовлеченного в структуру уралид (Пыстин, 1994; Пыстин и др., 2012, 2014 др.).

Основные результаты исследований сводятся к следующему.

1. Верхний возрастной уровень терригенных образований – протолитов гранат-слюдяных кристаллических сланцев – превышает 2.0 млрд лет. Это подтверждается как возрастом наиболее «молодых» зерен детритовых цирконов (2012–2009 млн лет), так и наиболее древними датировками метаморфогенных цирконов (2008–2004 млн лет). Наличие нескольких возрастных популяций детритовых цирконов (2716–2608, 2468–2408, 2131–2009 млн лет) может быть связано с разными источниками сноса терригенного материала. Однако не исключается также возможность нарушения U-Pb изотопной системы детритовых цирконов при метаморфизме, максимальные P-T параметры которого достигались на наиболее ранних этапах метаморфической эволюции неркаюского комплекса, т.е. около 2.0 млрд лет назад. С этим обстоятельством может быть связано появление популяции детритовых цирконов с возрастными 2131–2009 млн лет. Если это так, то источниками сноса были породы неoarхейского и раннепалеопротерозойского возраста.

2. Время проявления раннего этапа метаморфизма первично-терригенных отложений неркаюского комплекса около 2.0 млрд лет назад. Учитывая, что пластовые тела эклогитов участвуют в строении наиболее ранних складок, а парагенезис гранат+омфацит в metabазитах относится к образованиям наиболее ранних метаморфических событий (Пыстин и др., 1983; Пыстин, 1994; Пыстин и др., 2014), этот возрастной репер можно связать с проявлением эклогитового метаморфизма.

Обращает на себя внимание то, что в цирконовой хронометрии неркаюского комплекса не выделяются палеозойские метаморфические события, которые в отличие от метаморфических процессов в марункеуском комплексе были, вероятно, низкотемпературными.

3. Геохронологические метки, полученные для неркаюского комплекса, удовлетворительно согласуются с основными возрастными рубежами в протерозойской истории развития докембрийских метаморфических комплексов Урала, а также с главными эпизодами проявления эндогенной активности в нижнедокембрийских комплексах прилегающей с запада платформенной области. Так, наиболее ранние проявления метаморфизма (около 2.0 млрд лет) по времени коррелируются с образованием Волго-Уралии из двух мегаблоков: Волго-Уралии и Сарматии, а скрытый максимум около 1.75 млрд лет (рис. 3,с), наиболее отчетливо проявившийся в датировках цирконов «гранулитового» типа (рис. 4,б), может быть связан с активизацией метаморфических процессов при объединении Волго-Сарматии с Фенноскандией (Vogdanova et al., 2005).

4. Полимодальное распределение допалеопротерозойских возрастных значений с максимумами около 1.5, 1.25, 1.0 и 0.65 млрд лет (рис. 3,с) связано с неоднократным развитием метаморфических процессов в породах неркаюского комплекса. Несмотря на то, что в интервале 1.6–1.0 млрд лет имеются датировки, полученные по цирконам «гранулитового» типа, вряд ли из этого следует, что метаморфизм неоднократно проявлялся в ультравысокотемпературных или высокобарических условиях. Более реалистичным представляется предположение, что нарушение U-Pb изотопной системы в ранее образованных цирконах могло происходить при умеренных температурах и давлениях.

5. Датировки белых слюд из эклогитов, полученные Ar-Ar методом,  $351,3 \pm 3,6$  и  $352 \pm 3,6$  млн лет (Иванов, 2001), близкие U-Pb возрастам цирконов из жил эклогитов марункеуского комплекса, скорее всего, указывают на время палеозойского этапа эксгумации эклогитсодержащих толщ. ГУР в этой трактовке является зоной выведения глубинных метаморфических комплексов, в том числе нижнедокембрийских, на приповерхностные уровни. Этим объясняется приуроченность к ГУР марункеуского и неркаюского комплексов.

*Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 18-5-5-19.*

## Библиографический список

- 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: матер. Международного (X Всероссийского) петрографического совещания*. Т. 4. Апатиты: Изд-во Кол. НЦ РАН, 2005. С. 17–19.
- Андреичев В. Л., Ронкин Ю. Л., Серов П. А. и др. Новые данные о докембрийском возрасте эклогитов Марункеу (Полярный Урал) // *ДАН*. 2007. Т. 413, № 4. С. 503–506. DOI: 10.1134/S1028334X07030051
- Вализер П. М., Ленных В. И. Амфиболы голубых сланцев Урала. М.: Наука, 1988. 203 с.
- Иванов К. С. Оценка палеоскоростей субдукции и коллизии при формировании Урала // *ДАН*. 2001. Т. 377, №2. С. 231–234.
- Коновалов А. Л., Казак А. П., Черкашин А. В. К вопросу о возрасте метаморфических пород Харбейского антиклинория (Полярный Урал) // *Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: матер. XII Геологического съезда Республики Коми*. Т. II / ИГ Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 2014. С. 110–112.
- Краснобаев А. А. Циркон как индикатор геологических процессов. М.: Наука, 1986. 152 с.
- Краснобаев А. А., Бибилова Е. В., Ронкин Ю. Л., Козаков В. И. Геохронология вулканитов айской свиты и изотопный возраст нижней границы рифея // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1992. № 6. С. 127–139.
- Краснобаев А. А., Пучков В. Н., Сергеева Н. Д. Полихронная цирконология навьшских вулканитов айской свиты (Южный Урал) // *ДАН*. 2018. Т. 478, № 1. С. 74–80. DOI: 10.7868/S086565-21304021X
- Нижний рифей Южного Урала / В.И. Козлов, А.А. Краснобаев, Н.Н. Ларионов и др. М.: Наука, 1989. 208 с.
- Пономарева Т.А., Пыстин А.М., Кушманова Е.В. Глубинная характеристика неркаюского эклогит-сланцевого комплекса Приполярного Урала // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2017. № 11. С. 9–14. DOI: 10.19110/2221-1381-2017-11-9-14
- Пыстин А. М., Казак А. П., Чернышев Ю. А. Эклогиты неркаюского комплекса на Приполярном Урале // *Записки ВМО*. 1983. Ч. 112, вып. 3. С. 346–353.
- Пыстин А. М. Карта метаморфизма Приполярного и южной части Полярного Урала // *Научные доклады (Серия препринтов) Коми НЦ УрО АН СССР*. Сыктывкар, 1991. 20 с.
- Пыстин А. М. Полиметаморфические комплексы Западного Урала. СПб.: Наука, 1994. 208 с.
- 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, 2012. 46 с.
- Пыстин А. М., Кушманова Е. В., Потапов И. Л., Панфилов А. В. Неркаюский метаморфический комплекс Приполярного Урала // *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*. 2014. № 10. С. 22–27.
- Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Архейско-палеопротерозойская история метаморфизма пород Уральского сегмента земной коры // *Тр. Карельского научного центра РАН. Сер. Геология докембрия*. 2015. № 7. С. 3–18. DOI: 10.17076/geo163
- Пыстина Ю. И., Пыстин А. М. Цирконовая летопись уральского докембрия/ УрО РАН. Екатеринбург, 2002. 167 с.
- Пыстина Ю. И., Пыстин А. М. Морфологические особенности цирконов из метаморфических пород и гранитоидов Тимано-Уральского региона // *Вестник ВГУ. Сер. Геология*. 2018. № 3. С. 74–82.
- Стратиграфические* схемы Урала (докембрий, палеозой). Объяснительная записка. Екатеринбург: Уралгеолком, 1994. 152 с.
- Удовкина Н. Г. Эклогиты СССР. М.: Наука, 1985. 286 с.
- Хубанов В. Б., Буянтуев М. Д., Цыганков А. А. U-Pb изотопное датирование цирконов из PZ<sub>3</sub>-MZ магматических комплексов Забайкалья методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором: процедура определения и сопоставление с SHRIMP данными // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57, № 1. С. 241–258. DOI: 10.15372/GiG20160113
- Шацкий В. С., Симонов В. А., Ягоутц Э. и др. Новые данные о возрасте эклогитов Полярного Урала // *ДАН*. 2000. Т. 371, № 4. С. 519–523.
- Bogdanova S.V., Gorbatschev R., Garetsky R.G. The East European Craton // *Encyclopedia of Geology*. 2005. Vol. 2. P. 34–49. DOI: 10.1016/j.precamres.2007.04.024
- Glodny J., Austrheim H., Molina J.F. et al. // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2003. Vol. 67. P. 4353–4371. DOI: 10.1016/S0016-7037(03)00370-3
- 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 NE European continental margin // *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica*. Geological Society, London, Memoirs,

2004. Vol. 30. P. 87–105. DOI: 10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.09

Schaltegger U, Fanning C.M., Gunther D. et al. Growth, annealing and recrystallisation of zircon and preservation of monazite in high-grade metamor-

phism: conventional and in-situ U-Pb isotope, cathodoluminescence and microchemical evidence. Contrib Mineral Petrol. 1999. Vol. 134. P. 186–201. DOI: 10.1007/s004100050478

## Age of Protoliths and Geochronology of Metamorphism of the Nerkayuskiy Eclogite-Schist Complex of the Subpolar Urals

A.M. Pystin, E.V. Kushmanova, Yu.I. Pystina, A.V. Panfilov, I.L. Potapov

Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 54 Pervomayskaya Str., Syktyvkar 167982, Russia

E-mail: [pystin@geo.komisc.ru](mailto:pystin@geo.komisc.ru)

The first results of the U-Pb dating of zircons from the metamorphic rocks of the Nerkayuskiy eclogite-schist complex are discussed. The minimum age of detrital zircons suggests that the initial sedimentary formations, the protoliths of garnet-mica crystalline schists, were formed in the Paleoproterozoic. The time of manifestation of the early stage of rock metamorphism dates back to about 2.0 billion years ago. The idea, which has long been supported by the authors, considers the Nerkayuskiy eclogite-schist complex as a tectonically displaced fragment of the Lower Precambrian crystalline basement included in the structure of the Uralides.

Key words: *Subpolar Ural; Lower Precambrian; protolith; eclogite; geochronology.*

### References

Andreichev V.L., Rodionov N.V., Ronkin Yu.L. 2005. U-Pb and Sm-Nd datirovanie eklogitov Marunkeuskogo bloka Polyarnogo Urala: novye dannye [U-Pb and Sm-Nd dating of eclogites of the Marunkeuskiy block of the Polar Urals: new data]. In: Metamorphism, cosmic, experimental and general problems of petrology. Materials of the International (X All-Russian) petrographic meeting. Vol. 4. Apatity. Kolskiy SC RAS, pp. 17–19. (in Russian)

Andreichev V.L., Ronkin Yu.L., Serov P.A. et al. 2007. Novye dannye o dokembriyskom vozraste eklogitov Marunkeu (Polyarnyy Ural) [New data on the Precambrian age of the eclogites of Marunkeu (the Polar Urals)]. Doklady RAN. Earth Sciences. 413(4):503–506. (in Russian)

doi: 10.1134/S1028334X07030051

Valizer P.M., Lennykh V.I. 1988. Amfiboly golubyykh slantsev Urala [Amphiboles of the blue schists of the Urals]. Moskva, Nauka, p. 203. (in Russian)

Ivanov K.S. 2001. Otsenka paleoskorostey subduktzii i kollizii pri formirovaniy Urala [Evaluation of paleospeed of the subduction and collision during the formation of the Urals]. Doklady RAN. Earth Sciences. 377(2):231–234. (in Russian)

Kononov A.L., Kazak A.P., Cherkashin A.V. 2014. K voprosu o vozraste metamorficheskikh porod Kharbeyskogo antiklinoriya (Polyarnyy Ural) [On the problem of the age of metamorphic rocks of the Kharbeyskiy anticlinorium (Polar Urals)]. In: Geology and mineral resources of the European North-East of Russia. Proceedings of the XII Geo-

logical Congress of the Republic of Komi. T. II. Syktyvkar: IG Komi SC, UB RAS, pp. 110–112. (in Russian)

Krasnobaev A.A. 1986. Tsirkon kak indikator geologicheskikh protsessov [Zircon as an indicator of geological processes]. Moskva, Nauka, p. 152. (in Russian)

Krasnobayev A.A., Bibikova Ye.V., Ronkin Yu.L., Kozakov V.I. 1992. Geokhronologiya vulkanitov ayskoy svity i izotopnyy vozrast nizhney granitsy rifeya [Geochronology of volcanic rocks of the Ayskaya Suite and the isotopic age of the Riphean lower boundary]. Izv. AN USSR. Ser. geol. 6:127–139. (in Russian)

Krasnobayev A.A., Puchkov V.N., Sergeeva N.D. 2018. Polikhronnaya tsirkonologiya navyshskikh vulkanitov ayskoy svity (Yuzhnyy Ural) [Polychronous zirconology of the Navysh volcanites of the Ayskaya Suite (Southern Urals)]. Doklady RAN. Earth Sciences. 478(1):74–80. (in Russian) doi: 10.7868/S08656521304021X

Nizhniy rifey Yuzhnogo Urala [Lower Riphean of the Southern Urals]. V.I. Kozlov, A.A. Krasnobayev, N.N. Larionov et al. (Eds.). Moskva, Nauka, 1989, p. 208. (in Russian)

Ponomareva T.A., Pystin A.M., Kushmanova Ye.V. 2017. Glubinnaya kharakteristika nerkayuskogo eklogit-slantsevogo kompleksa Pripolyarnogo Urala [Deep characteristic of the Nerkayuskiy eclogite-schist complex of the Subpolar Urals]. Vestnik IG Komi SCUB RAS. 11:9–14. (in Russian) doi: 10.19110/2221-1381-2017-11-9-14

- Pystin A.M., Kazak A.P., Chernyshev Yu.A.* 1983. Eklogity nerkauskogo kompleksa na Pripolyarnom Urale [Eclogites of the Nerkauskii Complex in the SubPolar Urals]. *Zapiski RMO*, 112(3):346–353. (in Russian)
- Pystin A.M.* 1991. Karta metamorfizma Pripolyarnogo i yuzhnoy chasti Polyarnogo Urala [Map of metamorphism of the Subpolar and southern part of the Polar Urals]. Scientific reports. Syktyvkar, Komi SC UB RAS, Syktyvkar, p. 20. (in Russian)
- Pystin A.M.* 1994. Polimetamorficheskiye komplekсы zapadnogo sklona Urala [Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals]. St. Petersburg, Nauka, p. 208. (in Russian)
- Pystin A.M., Pystina Yu.I., Potapov I.L., Panfilov A.V.* 2012. Rannedokembriyskaya istoriya metamorfizma porod granulitovykh i eklogitovykh kompleksov paleokontinentalnoy zony Urala [Early Precambrian history of metamorphism of granulite and eclogite complexes of the paleocontinental zone of the Urals]. Syktyvkar, Geoprint, p. 46. (in Russian)
- Pystin A.M., Kushmanova E.V., Potapov I.L., Panfilov A.V.* 2014. Nerkauskii metamorficheskiy kompleks Pripolyarnogo Urala [Nerkauskii metamorphic complex of the SubPolar Urals]. *Vestnik IG Komi SCUB RAS*. 10:22–27. (in Russian)
- Pystin A.M., Pystina Yu.I.* 2015. Arkheiskopaleoproterozoiskaya istoriya metamorfizma porod Uralskogo segmenta zemnoy kory [Archean-Paleoproterozoic history of metamorphism in the Ural segment of the Earth's crust]. Proceedings of the Karelian Science Center of the RAS. Series Geology of the Precambrian, 7:3–18. (in Russian) doi: 10.17076/geo163
- Pystina Yu.I., Pystin A.M.* 2002. Tsirkonovaya leptopis uralskogo dokembriya [Zircon chronicle of the Urals Precambrian]. Ekaterinburg, UB RAS, p. 167. (in Russian)
- Pystina Yu.I., Pystin A.M.* 2018. Morfoloicheskiye osobennosti tsirkonov iz metamorficheskikh porod i granitoidov Timano-Uralskogo regiona [Morphological features of zircons from metamorphic rocks and granitoids of the Timan-Ural region]. *Vestnik VSU. Series: Geology*. 3:74–82. (in Russian)
- Stratigraficheskiye skhemy Urala (dokembriy, paleozoy)* (Stratigraphic diagrams of the Urals [Precambrian, Paleozoic]). Ekaterinburg, Uralgeolkom, 1993. (in Russian)
- Udovkina N.G.* 1985. Eklogity SSSR (Eclogites of the USSR). Moskva, Nauka, p. 286. (in Russian)
- Khubanov V.B., Buyantuyev M.D., Tsygankov A.A.* 2016. U-PB izotopnoye datirovaniye tsirkonov iz PZ3-MZ magmaticheskikh kompleksov Zabaykalya metodom magnitno-sekturnoy mass-spektrometrii s lazernym probotoorom: protsedura opredeleniya i sopostavleniya s SHRIMP dannymi [U-PB isotope dating of zircons from PZ3-MZ magmatic complexes of the Transbaykal region using the method of magnetic-sector mass spectrometry with a slice sampling: the procedure of determination and comparison with SHRIMP data]. *Geology and geophysics*. 57(1):241–258. (in Russian) doi: 10.15372/GiG20160113
- Shatskiy V.S., Simonov V.A., Yagoutts E. et al.* 2000. Novyye dannyye o vozraste eklogitov Polyarnogo Urala [New data on the age of eclogites of the Polar Urals]. *Doklady RAN. Earth Sciences*. 371(4): 519–523. (in Russian)
- Bogdanova S.V., Gorbatshev R., Garetsky R.G.* 2005. The East European Craton. In: *Encyclopedia of Geology*, V. 2, pp. 34–49. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.024
- Glodny J., Austrheim H., Molina J.F. et al.* 2003. Rb/Sr record of fluid-rock interaction in eclogites: The Marun-Keu complex, Polar Urals, Russia. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 67(22):4353–4371. doi: 10.1016/S0016-7037(03)00370-3
- Glodny J., Pease V., Montero P. et al.* 2004. Protolith ages of eclogites, Marun-Keu Complex, Polar Urals, Russia: Implications for the pre- and early Uralian evolution of the NE European continental margin. In: *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica*. Geological Society, London, Memoirs, 30:87–105. doi: 10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.09
- Schaltegger U., Fanning C.M., Gunther D. et al.* 1999. Growth, annealing and recrystallisation of zircon and preservation of monazite in high-grade metamorphism: conventional and in-situ U-Pb isotope, cathodoluminescence and microchemical evidence. *Contrib Mineral Petrol*. 134: 186–201. doi: 10.1007/S004100050478