Тһ-U-РҌ-ДАТИРОВАНИЕ МОНАЦИТА ИЗ КИАНИТОВЫХ ГНЕЙСОВ СЫСЕРТСКОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

В. С. Пономарев, В. В. Хиллер, Ю. В. Ерохин

Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 21 августа 2017 г.

Аннотация: получены новые данные о возрасте метаморфизма пород шумихинской серии Сысертского метаморфического комплекса (Средний Урал). В кианитовых гнейсах установлен акцессорный монацит и выполнено микрозондовое исследование его химического состава. Методом химического Th-U-Pb датирования определен возраст кристаллизации монацита от 282 до 304 млн лет, средневзвешенное значение 293 ± 7 млн лет и изохрона 292 ± 11 млн лет (СКВО = 0,98). Таким образом, формирование кианитовых гнейсов происходило в раннепермское время. Ключевые слова: химическое датирование, монацит, кианитовые гнейсы, Сысертский метаморфический комплекс, Средний Урал.

Th-U-Pb DATING OF MONAZITE IN KYANITE GNEISSES OF THE SYSERT METAMORPHIC COMPLEX (MIDDLE URAL)

Abstract: data on the age of metamorphism of the shumikhinskaya series rocks of the Sysert Metamorphic Complex (Middle Urals) are obtained. Accessory monazite is found in the kyanite gneisses and its microprobe study of the chemical composition is performed. The age is determined by the chemical Th-U-Pb dating method. The values of monazite age are from 282 to 304 Ma, a weighted average of 293 ± 7 Ma and isochrone of 292 ± 11 Ma (MSWD = 0,98). Hence the formation of kyanite gneisses occurred in the early Permian.

Key words: chemical dating, monazite, kyanite gneiss, Sysert metamorphic complex, Middle Urals.

Введение

Сысертский комплекс является одним из крупнейших метаморфических комплексов Урала, с породами которого связаны многочисленные месторождения как рудных, так и нерудных полезных ископаемых. Многими исследователями прослеживается сложная и многостадийная эволюция метаморфических пород Сысертского комплекса. Проблема возраста субстрата и метаморфизма комплекса остается предметом многолетней дискуссии. В настоящей работе впервые приведены данные о возрасте акцессорных монацитов из кианитовых гнейсов Сысертского метаморфического комплекса, полученные методом химического Th-U-Pb датирования.

Объект исследования

Сысертский метаморфический комплекс расположен на границе Среднего и Южного Урала и является составной частью более крупного Сысертско-Ильменогорского метаморфического комплекса [1]. Сысертский комплекс сложен гнейсово-мигматитовым ядром (шумихинская серия) и его сланцевым обрамлением. К последнему приурочено большое количество тел метаультрабазитов и амфиболитов (черновская серия). Метаморфические породы Сысертского комплекса представлены плагиогнейсами, двуслюдяными гнейсами, амфиболовыми и биотит-гранат-слюдяно-кварцевыми сланцами, амфиболитами, антофиллитовыми породами, хлоритолитами и т.д. В северной части гнейсово-мигматитового ядра в плагиогнейсах нами обнаружено большое количество проявлений серого и голубоватого кианита образуюшего крупные метакристаллы до 8 см в длину. Распределение кианита в гнейсах неравномерное, минерал в основном приурочен к лейкократовой части породы (лейкосоме). При изучении минералогии плагиогнейса нами в меланосоме обнаружен обильный акцессорный монацит, который был использован для химического микрозондового датирования. Представительная проба кианитового гнейса отобрана на западном склоне горы Гладкая в 3,8 км к западу от озера Багаряк, приблизительно в 4,5 км от западной границы села Космакова (рис. 1) Сысертского района Свердловской области (координаты отбора пробы с GPS-приемника – 56°21'29,1" с.ш.; 60°45'84,7" в.д.).

Изученные гнейсы имеют полосчатый облик, характеризующийся наличием темных и светлых слоев, часто смятых в складки. Согласно со слоистостью



пород встречаются мелкие пегматитовые жилы. Лейкосома имеет нематогранобластовую структуру, её мощность не превышает 4 см, и в основном состоит из зерен альбита (Ав₉₀₋₉₉) вытянутой, полигональной формы размером до 7 мм и изометричных индивидов кварца размером до 5 мм. В лейкосоме наблюдаются кристаллы кианита до 2,5 см по удлинению. Гранат (Alm₇₆₋₇₇) в породе встречается в виде единичных ксеноморфных зерен, содержащих многочисленные мелкие включения апатита. Лейсты слюды (магнезиальный аннит) в лейкосоме редки и тяготеют к границе с меланосомой. Рутил и ксенотим образуют редкую вкрапленность в породе с размером зерен до 50 мкм. На границе меланосомы и лейкосомы наблюдаются скопления призматических зерен турмалина (железистый дравит) размером до 1 см.

Меланосома имеет полосчатую текстуру, лепидогранобластовую структуру и сложена изометричными зернами кварца, альбитом (Ab₉₀₋₉₅) и черной слюдой (магнезиальный аннит), которая придает темный цвет породе. Размер зерен главных минералов не превышает 2 мм. В виде единичных зерен присутствует калиевый полевой шпат, изометричные красно-коричневые зерна граната (Alm₇₈₋₇₂), а также редкая вкрапленность монацита и циркона. В меланосоме встречаются зерна кианита, окрашенные в голубовато-серый цвет, размером до нескольких миллиметров в длину.

Метод исследования

Химический состав и датирование монацита выполнено на рентгеноспектральном электронно-зондо-



Рис. 1. Схематическая геологическая карта Сысертского метаморфического комплекса [2] (составлена Г. А. Кейльманом и Г. А. Глушковой): 1 – карбонатно-сланцевая толща, серицит-кварцевые сланцы с прослоями углистых кварцитов, эпидот-актинолитовых сланцев и мраморов, слюдисто-кварцевые сланцы с гранатом, кианитом и ставролитом, сысертская свита; 2 – амфиболиты, амфиболовые и биотит-амфиболовые гнейсы с прослоями графитовых кварцитов, черновская серия; 3 - гнейсы биотитовые, реже амфиболовые и двуслюдяные, гранито-гнейсы и мигматиты, шумихинская серия; 4 – граниты; 5 – плагиограниты, плагиогранодиориты, кварцевые диориты, гранодиориты; 6 - амфиболиты апогаббровые и габбро; 7 - серпентиниты, тальк-карбонатные породы; 8 – антофиллитовые породы; 9 - разрывные нарушения; 10 - точка отбора пробы (Киан 2); 11 - населенные пункты.

вом микроанализаторе САМЕСА SX 100 (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург). Измерение интенсивности характеристического рентгеновского излучения проводили при ускоряющем напряжении 15 кВ, сила тока 270 нА, диаметр пучка электронов 2-5 мкм. Регистрация интенсивности проводилась по Ка, La, Ma и Mβ,линиям на пяти наклонных волновых спектрометрах (угол отбора рентгеновского излучения 40°). При выполнении количественного анализа время измерения интенсивности на пике в два раза превышало время измерения фона и составило для Th, U и Pb по 200 с, для Y и Si по 20 с, для остальных элементов 10 с [2-5]. Стандартные образцы: ThO₂, UO₂, Pb₂P₂O₇, диопсид, синтетические фосфаты РЗЭ [6]. Пределы обнаружения Th, U и Pb в монаците - 217, 126, 91 г/т, соответственно. Среднее значение содержания по 18 точкам анализа минерала: $ThO_2 = 2,49$ мас. %, $UO_2 =$ 5,05 мас. %, PbO = 0,23 мас. %. Обоснование метода химического датирования с помощью рентгеноспектрального микрозондового анализа приведено в работах [7–9 и мн. др.]. Основное условие данного метода, что в процессе эволюции минерал не терял радиогенный свинец, который образовался только за счет распада тория и урана. Возраста монацита рассчитаны как из единичного определения содержания Th, U, Pb в точке по методу Ж.-М. Монтеля [7], так и по построению графика PbO-ThO2* (при содержании Th>>U, или PbO-UO₂^{*} при содержании Th<<U) по методу СНІМЕ [8, 10], где по углу наклона прямой (изохроны) определяется возраст и его погрешность. Здесь ThO₂* = (ThO₂+UO₂^{экв}), где UO₂^{экв} – содержание

урана, пересчитанное в эквивалентное содержание тория, способное произвести то же количество Pb за время жизни системы при равенстве U-Pb и Th-Pbзначений возраста.

Результаты химического датирования

Монацит наблюдается в виде включений в биотите и плагиоклазе, размером от 40 до 100 мкм (рис. 2). Форма зерен вытянутая, веретенообразная, неправильная с прямолинейными и извилистыми ограничениями. Часто между биотитом и монацитом наблюдается индукционная поверхность, что свидетельствует о совместном росте минералов. Монацит не содержит включений, зональности также не обнаружено.

Нами выполнено 18 микрозондовых анализов монацита и рассчитан их возраст. Полученные химические составы монацита приведены в таблице 1. По соотношению редких земель минерал относится к монациту-(Се). Он характеризуется высокими содержаниями примесей (в мас. %): неодима (Nd₂O₃ до 14,43), лантана (La₂O₃ до 12,10), тория (ThO₂ до 3,43), урана (UO₂ до 5,59), празеодима (Pr₂O₃ до 3,17), самария (Sm₂O₃ до 3,31), гадолиния (Gd₂O₃ до 2,61), иттрия (Y₂O₃ до 3,09) и кальция (CaO до 2,06). Сумма анализов близка к 100 мас. %, что говорит об отсутствии вторичных изменений в минерале. При химическом датировании монацита его возраст характеризуется интервалом значений от 282 до 304 млн лет, средневзвешенное значение 293 ± 7 млн лет (СКВО = 0,67) (рис. За). При построении зависимости (изохроны) PbO-ThO₂^{*} [10] рассчитанный возраст составляет 292 ± 11 млн лет (СКВО = 0,98) (рис. 3б), что соответствует раннепермскому времени.



Рис. 2. Включение монацита в агрегате лейстов биотита. Кианитовый гнейс (обр. Киан 2). ВSE-изображение, САМЕ-СА SX 100. *Мпz* – монацит. *Bi* – биотит, *Qz* – кварц.

Обсуждение результатов

В литературе представлено большое количество данных о возрасте пород Сысертского метаморфического комплекса полученных различными геохронологическими методами. В работе [1] показано, что «гнейсовое ядро» Сысертского комплекса сложенное гнейсами шумихинской серии имеет два возраста: 550–230 млн лет (по данным K-Ar метода) и 1200–1400 млн лет (определения α-свинцовым и Rb-Sr методами). При этом возраст амфиболитов черновской серии из краевой части Сысертского комплекса указан как 480-320 млн лет (K-Ar метод) и \geq 600 млн лет (αсвинцовый метод). В дальнейшем в более поздних исследованиях [11–13 и др.] в Сысертском метамор-

Таблица 1

N⁰	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ThO ₂	3,10	3,18	1,54	3,22	3,30	3,43	2,23	2,47	1,72
UO ₂	5,14	4,99	4,13	5,23	4,90	5,35	5,59	5,24	4,75
SiO ₂	0,04	0,12	0,22	0,08	0,33	0,01	0,05	0,07	0,02
P_2O_5	30,50	29,71	30,86	30,54	30,46	30,26	30,11	30,97	30,17
Ce_2O_3	24,17	24,10	24,87	24,82	24,94	24,24	24,35	24,87	24,64
La ₂ O ₃	11,78	11,27	11,11	11,73	11,87	11,64	11,45	10,71	11,57
Nd ₂ O ₃	12,97	12,69	13,35	12,28	11,96	12,93	12,53	12,30	13,02
Pr ₂ O ₃	2,82	2,88	2,79	2,91	2,65	2,86	2,92	2,80	3,05
Sm ₂ O ₃	2,29	2,35	3,07	2,35	2,24	2,39	2,57	2,55	2,85
Gd ₂ O ₃	1,85	1,82	2,46	2,02	1,86	2,12	2,25	2,24	2,41
Dy ₂ O ₃	0,52	0,46	0,71	0,53	0,50	0,51	0,61	0,59	0,82
Y ₂ O ₃	2,31	2,48	2,66	1,86	1,54	1,60	2,47	2,24	2,49
PbO	0,24	0,23	0,18	0,25	0,24	0,25	0,25	0,24	0,21
CaO	1,87	1,94	1,19	1,71	2,06	2,01	1,75	1,71	1,34
Сумма	99,60	98,21	99,12	99,54	98,86	99,61	99,13	98,98	99,05
Возраст	286	284	290	290	292	288	293	296	294

Химический состав (мас.%) монацитов и значения возраста (млн лет) в точках анализа

							I /	1	1
N⁰	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ThO ₂	3,41	2,07	1,63	1,71	1,64	1,20	2,98	2,91	3,00
UO ₂	4,80	5,48	5,22	5,04	5,22	3,61	5,33	5,39	5,41
SiO ₂	0,23	0,08	0,03	0,03	0,05	0,02	0,08	0,12	0,01
P_2O_5	30,55	30,13	30,29	30,64	30,19	31,19	30,23	30,26	30,51
Ce_2O_3	24,83	24,81	24,19	24,04	24,21	24,62	24,80	23,76	22,84
La_2O_3	12,10	11,33	10,95	10,85	11,09	11,36	10,71	11,83	10,92
Nd ₂ O ₃	12,00	12,43	13,14	12,96	12,89	14,43	12,10	12,11	12,52
Pr ₂ O ₃	2,90	2,99	2,89	2,84	2,94	3,17	2,95	2,76	2,79
Sm ₂ O ₃	2,25	2,61	2,69	2,79	2,80	3,31	2,48	2,48	2,59
Gd_2O_3	2,00	2,50	2,61	2,59	2,60	2,54	2,51	2,35	2,59
Dy ₂ O ₃	0,49	0,82	0,80	0,85	0,80	0,59	0,90	0,94	0,95
Y_2O_3	1,56	2,42	2,81	3,09	2,84	2,45	2,65	2,50	2,83
PbO	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23	0,16	0,26	0,25	0,26
CaO	2,00	1,53	1,49	1,45	1,47	0,81	1,82	1,82	1,83
Сумма	99,34	99,45	98,98	99,11	98,95	99,46	99,82	99,49	99,05
Возраст	282	299	300	300	296	289	304	295	301

Продолжение таблицы 1



Рис.3. Вариации значений возраста монацита, рассчитанные по единичным точкам: a - c величиной их средневзвешенного возраста; $\delta -$ по совокупности точек диаграммы ThO₂*-PbO.

фическом комплексе не было подтверждено докембрийских возрастов. В работе [11] приводятся Rb-Sr датировки 435±44 млн лет для плагиогнейсов и 260±6 млн лет для гранитизированных гнейсов шумихинской свиты, что связывалось с двумя этапами гранитизации региона. В другой работе [13] отмечаются две «реперные» датировки: 355-350 млн лет (Sm-Nd метод), которая, по мнению автора, отвечает возрасту зонального метаморфизма и 260-240 млн лет – время закрытия изотопных систем, фиксирующее последнее термальное событие, связанное с формированием Мурзинско-Ильменогорской сдвиговой зоны. В публикации [14] приводится возраст гнейсов шумихинской свиты, который варьирует в широких пределах от 482 до 210 млн лет (Pb-Pb метод по цирконам). Датировки 437±32 и 482±41 млн лет интерпретируются авторами как возраст протолита, а более «молодые» возрасты, образующие изохрону 352±40 млн лет (амфиболит, Sm-Nd метод [12]), объясняются временем орогенного метаморфизма. Также приведены изохроны для плагиогранитов шумихинской серии: 435±33 млн лет и 254±4 млн лет для гранито-гнейсов, полученные Rb-Sr методом. В этой же работе [14] приведены пермьтриасовые возраста для пород шумихинской серии, полученные K-Ar методом, интерпретируемые как продолжительность времени остывания системы при метаморфизме. В недавней публикации [15], приведен верхнекаменноугольный возраст метагипербазитов (300±3 млн лет по Th-U-Pb датированию уранинита) черновской серии, к которым приурочено Карасьевогорское золото-медно-кобальтовое месторождение. Полученный возраст исследователи связывают с рудообразующими флюидами плагиогранитизации, с участием которых прошло преобразование гипербазитов.

Полученные нами раннепермские датировки акцессорного монацита из кианитовых гнейсов шумихинской серии могут интерпретироваться как возраст последнего метаморфического преобразования пород Сысертского комплекса. Как видно из литературных данных, наши датировки охватывают только узкий интервал среди ранее полученных изотопных данных для гнейсов шумихинской серии, которые, по всей видимости, фиксировали либо возраст субстрата (древние датировки цирконов, а также Sm-Nd и Rb-Sr возраста), либо поздние наложенные тектонические события (молодые K-Ar и Rb-Sr возраста). При этом полученный нами возраст акцессорных монацитов очень близок с датировками уранинита из оруденелых метагипербазитов Сысертского комплекса. Вероятно, метаморфическое преобразование плагиогнейсов шумихинской серии и обрамляющих их гипербазитов происходило на границе перми и карбона под влиянием единого мощного термального события. Его природа является предметом дискуссий. Так, предполагается, что метаморфические породы образовались в результате термального события связанного с надсубдукционным тоналит-гранодиоритовым магматизмом [13], или Сысертский комплекс формировался как надсубдукционная аккреционная призма с интенсивно деформированными гнейсами, метавулканическими породами, гранитными интрузиями и метаморфизованной зоной меланжа [14].

Выводы

По результатам Th-U-Pb химического датирования акцессорных монацитов из кианитовых гнейсов шумихинской свиты Сысертского метаморфического комплекса установлен раннепермский (средневзвешенное значение 293 ± 7 млн лет и изохрона 292 ± 11 млн лет (СКВО = 0,98)) возраст их кристаллизации. Можно утверждать, что полученная оценка возраста отражает последнее метаморфическое событие преобразования плагиогнейсов из ядра Сысертского комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кейльман, Г. А. Мигматитовые комплексы подвижных поясов / Г.А. Кейльман. – М.: Изд-во «Недра». – 1974. – 200 с. 2. Месторождения антофиллит-асбеста СССР. Под редакцией И. Ф. Романовича. М.: Изд-во «Недра». – 1976. – 247 с.

Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург

Пономарев Владимир Сергеевич, старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук E-mail: p123v@yandex.ru; Тел.: +7 922-602-86-66

Хиллер Вера Витальевна, старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук. E-mail: hilvervit@mail.ru; Ten.: +7-908-917-42-31

Ерохин Юрий Викторович, ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук E-mail: erokhin-yu@yandex.ru; Ten.: +7-950-194-27-52 Королюк, В. Н. Метрологические характеристики определения свинца в фосфатах редких земель методом электронно-зондового микроанализа / В. Н. Королюк // Журнал аналитической химии, 2014. – Т. 66. – № 11. – С. 1166–1172.
Королюк, В. Н. Регистрация Ма-линии свинца в фосфатах редких земель на микроанализаторе JEOL JXA-8100 / В. Н. Королюк, Е. Н. Нигматулина // Журнал аналитической химии, 2013. – Т. 68. – № 9. – С. 865–872.

5. Монациты поздних гранитных пегматитов Ильменских гор: химическое датирование возраста зонально-секториальных кристаллов / В. И. Попова [и др.] // Новые данные о минералах, 2010. – № 45. – С. 72–78.

6. Синтетические кристаллы TRPO₄ – образцы сравнения при количественном рентгеноспектральном микроанализе редкоземельных минералов / Ю. Г. Лаврентьев [и др.] // Журнал аналитической химии, 2011. – Т. 66. – № 9. – С. 947–953.

7. Electron microprobe dating of monazite / J.- M. Montel [et. al.] // Chem. Geol., 1996. – V. 131. – P. 37–53.

8. *Suzuki, K.* CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: Protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discordant age data / K. Suzuki, T. Kato // Gondwana Research. – 2008. – V. 14. – P. 569–586. 13.

9. Age determination of thorianite in phlogopite-bearing spinel-garnet peridotite in the Gfohl Unit, Moldanubian Zone of the Bohemian Massif / K. Naemura [et. al.] // Jour. Mineral. Petrol. Sciences. – 2008. – V. 103. – P. 285–290.

10. *Suzuki, K.* Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrain, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime / K. Suzuki, M. Adachi // Geochem. Jour., 1991. – V. 25. – P. 357–376.

11. О возрасте гранитизации и природе субстрата гнейсов Сысертско-Ильменогорского комплекса / А. А. Краснобаев [и др.] // Ежегодник–1977. – Свердловск: Изд-во ИГГ УНЦ СССР. – 1978. – С. 3-6.

12. Ронкин, Ю. Л. Sm-Nd изотопная система Сысертского гнейсово-мигматитового комплекса / Ю. Л. Ронкин, А. Г. Носков, Д.З. Журавлев // Ежегодник–1992. – Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН. – 1993. – С. 135-139.

13. Русин, А. И. Метаморфические комплексы Урала и проблема эволюция метаморфизма в полном цикле развития литосферы подвижных поясов Диссертация доктора геол.мин. наук / А. И. Русин. – Екатеринбург. – 2004. – 507 с.

14. The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals, Russia: a reappraisal / H. P. Echtler [et. al.] // Tectonophysics, 1997. – V. 276. – P. 229–251.

15. *Мурзин, В. В.* Возрастное положение золото-сульфидного оруденения в метагипербазитах Сысертского метаморфического комплекса на Среднем Урале / В. В. Мурзин, В. В. Хиллер, Д. А. Варламов // Литосфера, 2015. – № 4. – С. 87-92.

Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg

Ponomarev V. S., Senior Research worker, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences E-mail: p123v@yandex.ru; Tel.: +7 922-602-86-66

Khiller V.V., Senior Research worker, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences E-mail: hilvervit@mail.ru; Tel.: +7-908-917-42-31

Erokhin Yu.V., Leading Research worker, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences E-mail: erokhin-yu@yandex.ru; Tel.: +7-950-194-27-52