ГЛАВА 7. МИКРОЗОНДОВОЕ ХИМИЧЕСКОЕ ДАТИРОВАНИЕ U-Th-СОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛОВ

CHAPTER 7. ELECTRON MICROPROBE AGE DATING OF U-Th-BEARING MINERALS

Метод химического датирования широко использован для анализа различных мировых геологических объектов в работах зарубежных авторов, представляющих, в основном, четыре исследовательские группы: из Франции под руководством Montel J.-М. и Cocherie A., Японии под руководством Suzuki К., Германии под руководством Rhede D. и США под руководством Williams M., Jercinovic М. Аналогичные исследования по уральским и сибирским объектам в настоящее время находятся лишь на начальной стадии (Вотяков и др., 2010а, б; 2011а, б; Хиллер, 2010). При этом важная проблема геохронологических исследований на Урале – неоднозначность и ненадежность датирования пород по данным изучения какой-либо одной изотопной системы; еще более сложны для интерпретации случаи значимых расхождений данных для разных изотопных систем или одной системы в разных минералах. Отдельным дискуссионным вопросом остается интерпретация данных изучения U-Pb системы в полихронных цирконах. Все это свидетельствует об актуальности интенсификации геохронологических исследований пород Уральского складчатого пояса в области датирования не только новых объектов, но и повышения достоверности датировок и определенности интерпретации полученных возрастных данных. Особенное значение в этой связи приобретают локальные методы анализа U-Pb-системы в единичных зернах минералов. Представляется, что дополнительным аргументом, который позволит повысить корректность определений возраста в последнем случае, может служить химическое экспресс-датирование U-Th-содержащих минералов. Актуальность

подобных предварительных датировок велика и для геохронологически неизученных, немых объектов.

Представляется, что повышение надежности и точности химических датировок минералов с высоким содержанием материнских радиоактивных элементов может быть реализовано при использовании «биминерального» (или «мультиминерального») изохронного подхода – расчета возраста по совокупности аналитических данных для системы из двух, трех и более минералов (типа монацит-уранинит, уранинит-коффинит и др.). При этом вследствие значительной дисперсии содержания U, Th и Pb в мультиминеральной системе определение ее возраста изохронными методами осуществляется со значительно более низкой погрешностью, чем по отдельности для каждого минерала. Заметим, что использование данного подхода основано на целой серии достаточно строгих допущений, в первую очередь, о монохронности минералов, близости температуры закрытия их U-Th-Pb-системы и др.

Цель настоящего раздела работы – химическое микрозондовое датирование U-Th-содержащих минералов из ряда геологических объектов Урала и Сибири, в том числе и по данным для двух минералов («биминеральные» датировки) по сосуществующим монацитам, уранинитам, торитам, торианитам и коффинитам с использованием усовершенствованной аналитической микрозондовой методики.

Первоначально в разделе кратко рассмотрены основные работы по химическому микрозондовому датированию минералов из различных мировых геологических объектов, выполненные в «новейший» период развития этой методики, начиная с 1991 г. по настоящее время.

7.1. Химическое датирование минералов из различных мировых геологических объектов*

В работе (Suzuki, Adachi, 1991) приведены данные по возрасту акцессорного монацита, циркона и ксенотима из террейна Южной Китаками (Северная Япония); минералы представляли ксенолиты парагнейсов по осадочным породам, залегающих в ранне-карбоновом гранитном массиве Хиками; установлен возраст в 430±10 млн. лет; по всем минералам получены сходящиеся результаты. В работе (Enami et al., 1993) выполнено химическое датирование монацита, торита и циркона из гнейсов и фенгитовых сланцев региона Су-Лу (Восточный Китай); для монацита установлены широкие вариации возраста от 1.5 до 2.2 млрд. лет; для циркона получен возраст в 860 млн. лет; для частично-метамиктного торита – от 100 до 400 млн. лет, причем последние данные авторами отбракованы. В работе (Suzuki et al., 1994) представлены результаты микрозондовых исследований обломочных монацитов из кислых гнейсов метаморфического пояса Рюока (Юго-западная Япония); проанализированы процессы диффузия Рb в минерале; показано, что для корректной интерпретации возраста в зерне монацита необходима информация о температуре закрытия минерала по Pb; последняя изменяется в зависимости от многих факторов, в частности, продолжительности нагревания, скорости охлаждения и размера зерна. Обнаружены единичные древние реликтовые монациты с возрастом до 1.7 млрд. лет и большое количество зерен с молодыми датировками 98±3.3 и 98±3.2 млн. лет, соответствующими процессу метаморфизма. В работе (Cocherie et al., 1998) проведено химическое датирование полигенных монацитов из архейских гнейсов, испытавших протерозойский орогенез в Западно-Африканском кратоне (Либерия); для ряда зерен минерала выполнено детальное элементное картирование, свидетельствующее об их полигенности; отмечено, что ядра монацитов имеют архейские возраста в 2830±7 млн. лет, а внешние каймы, испытавшие процессы мигматитизации, имеют протерозойские датировки в 2055 и 2033 млн. лет. В статье (Braun et al., 1998) проведено химическое датирование монацита из высокоградных гнейсов и пегматитов южной части Индии; выделено несколько популяций проб с возрастом 1900, 580 и 470 млн. лет. В публикации (Finger et al., 1998) проведено исследование монацита из гранитных гнейсов амфиболитовой фации Восточных Альп; получен возраст в интервале 347-314 млн. лет; изучен ториевый апатит, для которого получен возраст в 56-17 млн. лет. В публикации (Williams et al., 1999) проведено картирование и датирование монацитов из различных метаморфических пород архейского, протерозойского и палеозойского возрастов ряда районов США, Канады и Норвегии; для проб из Норвегии описаны включения монацитов в гранатах из метаморфитов высокого давления; их возраст – 405 млн. лет, в некоторых ядрах – до 1 млрд. лет. Для монацитов из тектонической зоны Сноубепд в Западной Канаде получены датировками в 700 млн. лет; для монацитов Нью-Мексико установлен возраст в 1.4 и в более древних породах – 1.7 млрд. лет.

В статье (Crowley, Ghent, 1999) представлена U-Th-Pb-систематика монацитов из разных метаморфических пород и пегматитов Канадских Кордильер; для центральных зон монацитов из пегматитов получены древние возраста в области 1.8 млрд. лет, а для краевых зон получены значения в области 85 млн. лет; для монацитов из пелитовых сланцев также отмечена полихронность – от 2060 в центре до 48 млн. лет на краях. В публикации (Paquette et al., 1999) выполнено датирование монацита из метагранитов массива Дора-Майра (Западные Альпы); получена датировка в 259±33 млн. лет; по данным изотопного датирования циркона и монацита получен более широкий интервал возрастов кристаллизации и преобразования пород – от 300 до 60 млн. лет. В статье (Zhu, O'Nions, 1999) приведены данные о химизме монацита из метаморфических, метасоматических и других типов пород Шотландии, Гренландии и Китая; предложено использовать монацит из древних пород для их датирования. В работе (Forster et al., 2000) представлены данные по составу и химическому датированию хаттонита и торита из морских россыпей Южного острова Новой

^{*)} Настоящий раздел работы выполнен совместно с Ерохиным Ю.В.

Зеландии; отмечено, что торит размывался из коренных пород и переотлагался в россыпи. где в современных условиях частично преобразован в хаттонит; возраст реликтовых зерен торита варьирует от 155 до 70 млн. лет, а замещающего хаттонита - от 13.2 до 2.3 млн. лет. В статье (Geisler, Schleicher, 2000) рассмотрены методические вопросы химического датирования акцессорных цирконов из разных гранитных массивов Норвегии, Швеции, Финляндии и Восточной пустыни Египта; проанализирован возрастной интервал от 1.8 млрд. лет до 500 млн. лет; в качестве сравнения приводятся ранее опубликованные данные изотопных исследований, которые согласуются с результатами химического датирования. В работе (Vlach, Gualda, 2000) проведено датирование монацита из некоторых гранитных и метаморфических пород юго-восточной Бразилии; для минерала из двух разных гранитных массивов и их контактовых ореолов получены близкие возраста – 625– 600 млн. лет; другие метаморфические породы и граниты изученного района по данным монацита древнее – 690 млн. лет. В статье (Scherrer et al., 2000) рассмотрены проблемы датирования монацита в породах различного генезиса; приведен пример картирования молодого монацита с возрастом 26±2.5 млн. лет. В публикации (Terry et al., 2000) приведена монацитовая геохронология (изотопная и химическая) метаморфических комплексов Западного гнейсового региона (Норвегия); отмечено, что метаморфиты отличаются высокобарическим генезисом и содержат микроалмазы (для них изучены акцессорные монациты); получен возраст монацита в 408-398 млн. лет, что сопоставимо с изотопными результатами, хотя для последних выделен реликтовый монацит с возрастом 1100-950 млн. лет. В публикации (Foster et al., 2000) изучены включения монацита в гранате из метаморфических пород Гималайского орогена; проведено изотопное и химическое датирование минерала; получено две группы возрастов – 44– 36 и 30-26 млн. лет.

В работе (Lee, 2001) выполнено химическое датирование акцессорных циркона и монацита из гранитов массива Бунчеон (Южная Корея); для обоих минералов получены значения возраста в интервале 1.87–1.92 млрд. лет. В работе (Okudaira et al., 2001) приведены данные по метаморфическому поясу Рюока (юго-западная часть Японии), включающему в себя массивы гранитоидов и обрамляющих пород; представлено значительное число Rb-Sr и U-Pb-изотопных данных по породам и минералам, в том числе и циркону; проанализированы результаты химического датирования монацита; для проб из гранитов и метаморфитов получен возраст в 95-100 млн. лет, что сопоставимо с изотопными данными. В публикации (Grew et al., 2001) представлены данные по химическому датированию ксенотима, монацита и циркона в бериллиевых пегматитах из высокотемпературного метаморфического комплекса Напьер (Восточная Антарктида); для всех минералов получены датировки в интервале от 2.5 до 0.55 млрд. лет; для ядер неметамиктного ксенотима – 2168±36 млн. лет, для кайм – от 1 до 0.6 млрд. лет; молодые значения возраста минералов интерпретированы как связанные с более поздними наложенными термальными процессами при орогенном поднятии. В публикации (Williams, Jercinovic, 2002) приведена возрастная эволюция монацитов при метаморфизме осадочных и вулканических пород в протерозойском орогеническом поясе на юго-западе США; рассмотрены метаморфические породы Аризоны, севера Нью-Мексико и юга Колорадо; при картировании монацитов установлено, что они характеризуются сложной зональностью в распределении элементов; зоны имеют разную датировку; по монацитам из разных мест орогенического пояса получены датировки с широким разбросом возрастов – от 1.4 до 2.45 млрд. лет; для центральной зоны зерна монацита из пород Великого Каньона получен возраст 1688, для краевых зон – 1659 млн. лет, что согласуется с изотопными возрастами. В работе (Asami et al., 2002) выполнено химическое датирование монацита, ксенотима, поликраза и циркона из гранулитов и пегматитов, локализованных в комплексе Напьер в восточной Антарктиде; для акцессорных минералов из гранулитов получены значения возраста в интервале 2410-2440 млн. лет; для отдельных ядер циркона получен возраст 3.6 млрд. лет; в пегматитах зафиксированы сильно омоложенные датировки в пределах 1000-1100 млн. лет. В публикации (Finger et al., 2002) проведено изучение монацитов из метаморфических пород кембрийской, карбоновой, пермской и альпийской эпох из восточной Греты (Греция); в метаморфитах проанализированы реликтовые монациты, обогащенные Ү; для них получены значения возраста в 530-515 (кембрий). 360-310 (карбон) и 270--240 млн. лет (пермь); для «молодых» монацитов с низким содержанием У получен возраст в 116-55 млн. лет. В работе (Dobmeier, Simmat, 2002) изучены монациты анортозитового комплекса и его метаморфического обрамления из восточного пояса Гхат (Индия); по данным химического датирования минерала анортозиты формировались в период 762-743 млн. лет с поздними наложенными деформациями в интервале 690-662 млн. лет; для монацитов из окружающих метаморфитов получены два значения возраста – древний реликтовый (964–921) и молодой (520-505 млн. лет); предположено, что позднетермальная проработка связана с Пан-Африканским орогенезом. В работе (French et al., 2002) проанализированы перспективы использования бадделеита как минерала-геохронометра в методике химического датирования; изучен акцессорный бадделеит из различных интрузий габбро (Канада, Австралия) и карбонатитов (Южная Африка); для проб из карбонатитов получен возраст в 2026 млн. лет, из габброидов Канады – от 1.3 до 0.9 млрд. лет; из дайки габброидов Австралии – 2.5 млрд. лет; все значения возраста сопоставлены с изотопными; установлено, что большая часть результатов согласуются удовлетворительно. Отмечено, что центральная проблема при химическом датировании бадделеита заключается в том, что минерал содержит очень низкое количество примесей, и даже в древних пробах количество радиогенного Рь находится практически на пределе чувствительности микрозондового анализа. В публикации (Кетре, 2003) изучен акцессорный уранинит из постколлизионной гранитной интрузии Кирчберг (Германия); возраст минерала варьирует в интервале от 327 до 333 млн. лет, при среднем значении 330±5 млн. лет; отмечено, что уранинит имеет каймы вторичных изменений с возрастом в 342-296 млн. лет, что, по-видимому, свидетельствует о нарушении замкнутости его U-Pb-системы. В работе (Santosh et al., 2003) рассмотрены гранулитовые комплексы южной Индии; выполнены датировки для циркона, монацита, уранинита и хаттонита; для цирконов в различных метаморфических блоках получены датировки в интервале 2.4-2.6 млрд. лет, в редких случаях – 1.7–0.6 млрд. лет; последние датировки подтверждены данными по монациту, хаттониту и ураниниту, возраст которых варьирует от 0.6 до 0.45 млрд. лет. В публикации (Biermeier et al., 2003) рассмотрена эволюция пород из тектонической зоны Редбанк в центральной Австралии; проведено химическое датирование монацита и ксенотима из метаморфических пород; для ксенотима получен возраст в 1100-1270 млн. лет, для ядер зерен монацита -1790–1630, для краевых зон – датировки, подобные ксенотиму. Все химические датировки подтверждены изотопными данными. В работе (Boggs et al., 2003) проведено исследование молодых (с возрастом менее 100 млн. лет) монацитов из метаморфических пород Канадских Кордильер; получены значения возраста от 59 до 26 млн. лет, которые согласуются с изотопными данными. Заметим, что цитированная работа опровергает известный вывод (Williams et al., 1999) о том, что радиогенный Рb в монаците не успевает накапиться в количестве, достаточном для микрозондового метода, в течение 100 млн. лет. В работе (Kruza, 2003) проведено изучение акцессорного монацита из докембрийских гранулитов Карелии и Украины, а также раннепалеозойских анатектитов юго-запада Польши. В статье (Kelsey et al., 2003) выполнено химическое датирование монацита из глиноземисто-магнезиальных метапелитов (парагнейсов) Раньер Групп (восточная Антарктида); монацит обнаружен в ассоциации с кордиеритом, сапфирином и биотитом; его возраст составляет 511±4 млн. лет (среднее значение по большой выборке данных); он соотнесен с изотопными результатами по циркону. В работе (Tickyj et al., 2004) проведено химическое датирование и возрастное картирование монацита из гранитоидов и гранулитов южной части Бразильского щита; исследованы пробы из разных метаморфических комплексов и крупных кислых интрузий; наиболее древние значения возраста в 1.9-2.3 млрд. лет получены для монацитов гранулитовых комплексов, в остальных метаморфических породах и гранитоидах датировки варьируют в интервале от 510 до 640 млн. лет; значения возраста согласуются с U-Pb-изотопными датировками по циркону (метод SHRIMP). В работе (Kruza et al., 2004) изучен монацит из шести комплексов докембрийских гранитоидов Украинского щита; проведено его химическое датирование; получен возраст в 2048±21 млн. лет, который согласуется с изотопными данными по циркону в 2020-2080 млн. лет. В работе (Barnes et al., 2004) приведены данные о монаците из хлоритовых сланцев разрывных нарушений в офиолитовых зонах восточных Альп; выполнено химическое датирование; получены значения возраста в интервале 29-20 млн. лет, что согласуется с основным термическим пиком Альпийского орогенеза (около 30 млн. лет); датировка монацита проведена при крайне низких значениях радиогенного Pb. В статье (Mikulski et al., 2004) приведены данные по химическому датированию ксенотима и монацита из аляскитов Западных Судет (Польша); для обоих минералов получены значения возраста в 390±25 и 271±20 млн. лет; первая датировка связана со становлением гранитного массива, а вторая - с его постмагматической гидротермальной проработкой; при этом более древние датировки получены по ксенотиму. В работе (Gibson et al., 2004) изучен акцессорный монацит из метаморфических пород Канадских Кордильер; проведено химическое картирование зерен минерала; продемонстрирована корреляция его химического и изотопного возраста с содержанием в минерале Y; показано, что это необходимо учитывать при датировании. В работе (Goncalves et al., 2004) представлены данные по химическому датированию монацита из магнезиальных гранулитов мафического комплекса Андриамена (северныйцентральный Мадагаскар); получено два значения возраста – около 2 500 и 790–730 млн. лет; архейские датировки связаны со становлением кислых и основных интрузий региона, а более молодые - с формированием магнезиальных гранулитов (процессом метаморфизма). В работе (Janak et al., 2004) проведено химическое датирование монацита из метапелитов западной и высокогорной части Татр (Словакия); выделено два значения возраста - 415-395 (возраст мигматитизации) и 380-335 млн. лет (возраст регионального метаморфизма); полученные датировки согласуются с изотопными результатами по циркону. В статье (Clark et al., 2005) приведены результаты изучения метаосадочных мезопротерозойских пород в тектонической зоне Олари Домайн (Южная Австралия); выполнено химическое датирование монацита, образующего включения в лейстах биотита; получен возраст в 1585±22 млн. лет, что согласуется с U-Pb-изотопными данными по титаниту из этих пород – 1588-1583 млн. лет (метод SHRIMP). В работе

(Evins et al., 2005) представлены данные о рекристаллизации уранинита с потерей Рb в природном ядерном реакторе в Габоне (Африка) с возрастом порядка 2 млрд. лет; для уранинита получены значения возраста в 2.4-1.7 и 555-538 млн. лет; отмечено, что часть уранинита подверглась наложенной коффинитизации. В работе (Be Mezeme et al., 2005) приведены данные химического датирования монацита из мигматитов варисцийского Центрального массива (Франция); для монацита из включений в калиевом полевом шпате получен возраст в 331±4 млн. лет; для монацита из интерстиций этой породы – 320±5 млн. лет; сделан вывод, что процесс мигматитизации кислых пород происходил в течение 10 млн. лет. В работе (Feenstra et al., 2005) описаны высокобарические метаморфические породы с острова Самос (Греция, Эгейское море); в них установлены гранаты с включениями монацита; при химическом датировании последнего получены значения возраста в интервале от 320 до 220 млн. лет. В статье (Saka et al., 2005) проведено изучение акцессорного циркона из гранатовых гранулитов разрывной зоны Нагури (горы Канто, центральная Япония); получен возраст в 432±40 млн. лет, что соответствует изотопным датировкам гор Канто (447-378 млн. лет). В работе (Berry et al., 2005) выполнено химическое датирование монацита из протерозойских метаморфических сланцев острова Короля в Южной Австралии близ о. Тасмания; получен возраст в 1290 млн. лет, что согласуется с ранее проведенными изотопными датировками циркона и монацита. В работе (Gaweda, Burda, 2005) исследована геохронология гранитоидов из западной части Татр (Словакия); возрастные характеристики пород даны исключительно по данным химического датирования монацита; в лейкогранитах его возраст составляет 309±20, в окружающих мигматитах возраст монацита из включений в кварце - 398±20, из включений в биотите - 337±20, возраст интерстициального монацита – 297±16 млн. лет.

В работе (Santosh et al., 2005) приведено химическое датирование монацита и циркона из двух гранитных плутонов в южной части Индии; для ядер цирконов получены древние значения возраста в 1149–961, для краевых зон – 560–540 млн. лет; у монацитов также как и у цирконов более древние ядра – 550–560, их краевые зоны значительно омоложены – 515–505 млн. лет.

Все эти датировки соотносены с Пан-Африканским орогенезом. В статье (Swain et al., 2005) проведено химическое датирование монацита из разрывных зон в архейских и мезопротерозойских породах кратона Гаулер (Южная Австралия); для проб из архейских метаморфических пород получен возраст в 1.69–1.7 млрд. лет, для пробизпротерозойских-от 1.52 до 1.45 млрд. лет; большая часть значений возраста монацита согласуется с изотопными результатами. В работе (Martignole, Martelat, 2005) изучены протерозойские метабазитовые дайки из тектонической зоны Гренвилль (Западный Квебек, Канада); проведено химическое датирование акцессорного монацита из различных базитов, метаморфизованных в гранулитовой фации; получен широкий спектр датировок – от древних в 2.8-2.9 до «молодых» в 0.9 млрд. лет; химические датировки подтверждены изотопными исследованиями акцессорного циркона. В работе (Ziemann et al., 2005) проведено исследование силлиманитовых пегматитов из Рейнболт Хиллс (Восточная Антарктида); среди акцессорных минералов установлены срастания апатита с монацитом, а также включения последнего в фосфате кальция; по данным химического датирования возраст монацита составляет 538-528 млн. лет, что подтверждено изотопными аргон-аргоновыми данными по слюдам; образование пегматита связывается с Пан-Африканским орогенезом. В работе (Bhowmik et al., 2005) выполнено химическое датирование монацита из фельзитовых гранулитов Центральной тектонической зоны Индии; минерал отмечен в виде включений в гранате; его возраст составляет 2090-2040 млн. лет; в рекристаллизованных метаморфитах и милонитах (тонкоперетертых породах) встречены более молодые монациты с датировками в 1525-1450 млн. лет. В работе (Alexander, Kyser, 2005) приведены сведения об урановой минерализации из гидротермальных месторождений в северной части Saskatchewan (Канада); рудники расположены в метаморфизованных палеопротерозойских осадочных породах; для уранинита получены химические датировки в 1600 млн. лет; изотопный возраст этого минерала оценивается в 1570±21 млн. лет; установлено замещение уранинита коффинитом; для последнего получены датировки в 700 млн. лет. В статье (Asami et al., 2005) приведено химическое датирование монацита и циркона из двенадцати комплексов парагнейсов Восточной Антарктилы: для центральной части зерен монацитов получены датировки в 760-620, для краевых зон - 553-514 млн. лет; для центральной части цирконов – 1100–730, для краевых зон – 530– 485 млн. лет. В статье (Wang et al., 2005) приведены данные по химическому датированию минералов группы эпидота из эклогитов террейна Даби-Сулу (Африка); эпидот и алланит широко распространены в этих глубинных метаморфических породах; возраст эпидота определен в 485 млн. лет (ранняя генерация); возраст алланита в 236 млн. лет (поздняя генерация). В статье (Jercinovic, Williams, 2005) детально проанализирован монацит из пород Великого Каньона (США); приведены его химические датировки (1688 – для центральной зоны и 1659 млн. лет – для краевых зон), согласующиеся с изотопными данными; выполнен критический обзор ранее опубликованных результатов. В статье (Pyle et al., 2005а) рассмотрены литературные и оригинальные данные для монацитов из формации Кавендиш (Вермонт, США); для последних получен возраст в 420 млн. лет, что согласуется с изотопными SIMS-данными в 430 млн. лет. В работе (Pyle et al., 2005б) датированы монациты из пелитовых мигматитов юго-западного Нью-Гемпшира (США); приведены изотопные SIMS-данные и результаты химического датирования; выделено четыре возрастные популяции минерала - с возрастом 400±10, 381±8, 372±6 и 352±14 млн. лет; для каждой популяции рассмотрены возможные геодинамические и тектонические условия их формирования. В статье (Goncalves et al., 2005) выполнено возрастное картирование проб монацита из тектонической зоны Snowbird, Канада и из основных пород Мадагаскара с целью выявления метаморфических и тектонических событий в эволюции древних метаморфических пород гранулитовой фации; проведено картирование зерен, выявившее их сложную зональность, отражающую длительную эволюцию минерала; выполнены датировки проб: для канадского монацита получены значения в 2562±237, для мадагаскарского монацита – 2500-730 млн. лет. В статье (Cocherie et al., 2005) приведено химическое датирование акцессорных монацитов из мигматических ультраметаморфических комплексов Западной Франции и Южной французской Гвианы; изучены три разновозрастных мигматических ком-

плекса; полученные датировки удовлетворительно согласуются с изотопным возрастом цирконов; в одном из мигматических комплексов массива Арморикан (Западная Франция) исследован монацит и ксенотим; для монацита получена датировка в 387±6 млн. лет, для ксенотима – 546±63 млн. лет; предположено, что монацит образовался в процессе мигматитизации кислых пород, а ксенотим – реликт раннекембрийских пород. В статье (Dahl et al., 2005а) приведено сравнение изотопного и возраста монацита из докембрийских метаморфических пород восточного Вайоминга (США); обоими методами получены датировки в интервале 1790-1680 млн. лет; сделан вывод, что возраст монацита достаточно хорошо отражает этапы метаморфизма пелитовых осадков Вайомингского кратона. В публикации (Dahl et al., 2005b) проанализирована микрохрононология монацитов из метаморфизованных докембрийских пелитов Вайомингского кратона (Южная Дакота, США); в метапелитах установлены гетерогенные разновозрастные монациты: для центральной части зерен получены датировки в 1750 млн. лет, для краевой – 1692 млн. лет; химические датировки подтверждены изотопными исследованиями по монациту (U-Pb-возраст, SHRIMP-II) и по слюдам (Ar-Arвозраст); возрастные данные по монациту использованы при анализе сложной эволюционной схемы тектонического преобразования метаморфических пород, происходивших в интервале 1850–1710 млн. лет. В статье (Kuiper, 2005) приведено сопоставление изотопных и химических датировок монацитов; однако геологических привязок проб не приводится; использован ряд стандартных образцов; показано, что при химическом датировании возраст, как правило, занижен. В статье (Mahan et al., 2006) изучен состав и возраст монацита из метаморфических пород гранулитовой и амфиболитовой фаций тектонической зоны Сноуберд (западная часть Канадского щита); монацит, в основном, слагает включения в гранате; при возрастном картировании для него прослежена длительная эволюция формирования: центральная часть, богатая Ү, датирована в 2.5-2.55 млрд. лет, промежуточная зона, обедненная Ү, - в 2.5-2.15 млрд. лет, а кайма - от 1.9 млрд. лет и моложе. Значения возраста от 1.3 до 0.5 млрд. лет подтверждены изотопными ID-TIMS иссдедованиями. В работе (Budzun et al., 2006) проанализированы низкотемпературные

изменения в гнейсах и гранулитах Силезии (Польша); среди акцессорных минералов обнаружены монацит, ксенотим, уранинит и торианит; последний образует включения в монаците; для него получена датировка в 300-260 млн. лет; другие радиоактивные минералы не датировались. В работе (Tropper et al., 2006) рассмотрена циркониевая минерализация из контактовых метаморфитов в Восточных Альпах (Австрия); кварцевые жилы с бадделеитом, цирконолитом и цирконом, генетически связанные с близлежащим гранитным массивом, рвут метаморфиты; для цирконолита получен возраст в 263±16 млн. лет, что соответствует датировкам пермской гранитной интрузии. В статье (Kaur et al., 2006) выполнено химическое датирование цирконов из гранитных массивов Раджастана (Индия); акцессорный циркон выделен из двух внутриплитных массивов гранитов А-типа; получены близкие датировки в интервале от 1780 до 1710 млн. лет; которые согласуются с изотопным возрастом этих массивов. Для монацита из базитовых магматических пород одного из этих массивов получена датировка в 910±10 млн. лет; более молодая датировка интерпретирована, как связанная с наложенной неопротерозойской активизацией, перезапустившей радиоактивную систему монацита. В работе (Yang, Pattison, 2006) проанализированы монациты из метапелитов (сланцев различного состава с биотитом, гранатом, хлоритоидом и т.д.) в контакте гранитной интрузии из местечка Черные Холмы в Южной Дакоте (США); проведено картирование и химическое датирование минерала; получен возраст в 1713 млн. лет, который соотносится с датировками самой гранитной интрузии в 1715 млн. лет. В статье (Janots et al., 2006) приведены данные о редкоземельной минерализации в «молодых» метапелитах комплекса Себтида (Марокко); исследованы акцессорные монацит и торит; для монацита проведены изотопные исследования и получен возраст в 20 млн. лет; для торита получен возраст в 12 млн. лет. В работе (Pyle, 2006) приведены данные по температуре образования и возрасту монацита из докембрийских и палеозойских пород Юго-восточной Пенсильвании (США); для монацита из метавулканических фельзитовых гнейсов получены три значения -1009±4, 965±6 и 876±10 млн. лет; для монацита из метабазитов – два значения возраста в 714±24 и 586±88 млн. лет; последняя датировка подтверж-

дена Rb-Sr-изотопными данными по породе; для монацита в метакварцитах получены значения возраста в 378±28 и 272±44 млн. лет. В работе (Baldwin et al., 2006) приведены данные по геохронологии и эволюции высокобарических гранулитов из тектонической зоны Snowbird (Северный Саскатчеван, Канада); выполнено химическое датирование монацита, получены значения возраста в интервале от 2.6 до 1.9 млрд. лет; близкие данные по U-Pb-возрасту получены для монацита, рутила и циркона изотопным методом ID-ТІМЅ. В статье (Ве Мегете et al., 2006) приведены данные по химическому датированию монацита из варисцийских гранитов и мигматитов Центрального массива (Франция); для центральной части зерен монацита из мигматитов получен возраст в 550-543 млн. лет, для кайм - 323-329 млн. лет; для монацита из гранитов получена датировка в 318±3 млн. лет; для минерала из даек, секущих гранитоиды, - 341-311 млн. лет. В работе (Kelly et al., 2006) представлены данные по химическому датированию монацита из полиметаморфических высокоградных террейнов Центральной Австралии; получены несколько различающиеся значения возраста для лейкосомы (около 1.3 млрд. лет) и меланосомы мигматитов (около 1.2 млрд. лет); для отдельных зерен вторичного монацита, измененного процессами ретроградного метаморфизма, получены датировки в 1130-1150 млн. лет. В работе (Kusiak et al., 2006) выполнено химическое датирование детритового монацита в карбоновых осадках из угольного бассейна Верхней Силезии (Польша); для основной массы обломочного монацита получен возраст в 300-340 млн. лет; сделан вывод, что основным источником минерала послужили кислые породы орогенного Богемского массива.

В статье (Тгоррег et al., 2007) представлены данные о циркониевой минерализации из контактовых метаморфитов в Восточных Альпах (Австрия); кварцевые жилы с бадделеитом, цирконолитом и цирконом генетически связаны с близлежащим гранитным массивом и рвут метаморфиты; для цирконолита получен возраст в 263±16 млн. лет, что согласуется с датировками пермской гранитной интрузии. В публикации (Krenn, Finger, 2007) приведены данные о монаците и рабдофане из метапелитов амфиболитовой фации восточной части Греты (Греция); выполнено их химическое датирование; для монацитов получены как молодые метамор-

фические значения возраста (80 млн. лет), так и древние реликтовые (360-312 млн. лет). Аналогичные реликтовые значения получены и для алланита (906-340 млн. лет); для эпидота зафиксированы молодые значения возраста (от 240 до 10 млн. лет). Авторы считают, что метапелиты испытали ретроградный метаморфизм альпийского возраста, что подтверждают молодые датировки минералов. В статье (Guastoni, Mazzoli, 2007) для Се-чералита из изумрудоносных альбититовых пегматитов (Западные Альпы, Италия) получено значение возраста в 32.7±3.2 млн. лет; результат датирования согласуется с возрастом гранитного плутона (32.9-28 млн. лет), который «породил» изученные жильные тела пегматитов. В работе (Williams et al., 2007) проанализированы перспективы микрозондового датирования монацитов; рассмотрены вопросы кристаллохимии минерала, а также родственного ему хаттонита; представлены результаты картирования монацита из различных геологических объектов США и Канады; рассмотрены методические аспекты проведения анализа и датирования на примере монацитов из различных типов пород – изверженных, метаморфических и других. Проанализирован обломочный монацит из метаморфизованных кварцитов гор Тусас (Нью-Мексико, США); получены датировки в широком интервале значений возраста от 1.7 до 0.5 млрд. лет. Рассмотрен гетерогенный монацит из высокоградных гранулитов тектонической зоны Сноуберд (Саскачеван, Канада). В публикации (Hokada, 2007) приведены данные по акцессорному перрьериту - сложному титаносиликату РЗЭ из группы чевкинита, выделенному из древних сапфирин-кварцевых гнейсов восточной части Антарктиды; возраст минерала определен как 2460±110 млн. лет, для сопутствующего ему монацита получен возраст в 2450±30 млн. лет. В работе (Cocherie, Legendre, 2007) рассмотрены перспективы использования различных минералов-геохронометров (монацита, ксенотима, торита, торианита, бадделеита и циркона). Для монацита из мигматических гранитных комплексов массива Арморикан (Западная Франция) при широком разбросе значений возраста получена изохронная датировка в 307±29 млн. лет. Для ксенотима из гранитов Аппалачей (Западный Коннектикут, США) получена изохрона с возрастом 409±17 млн. лет; из гранитов Швеции – 921±36 млн. лет; для циркона из протерозойских гранодиоритов Котд'Ивуара (Западная Африка) – 2150±22 млн. лет; для торита из гранитов Корсики (Франция) – 290±2 млн. лет; для торианита из гранитного пегматита района Ферейрра Гомез (Бразилия) - 2038±19 млн. лет; для бадделеита из Южной Африки – 2114±67 млн. лет. Все результаты химического датирования минералов сопоставлены с изотопными данными; продемонстрировано их удовлетворительное согласие. В работе (Fujii et al., 2008) приведены данные по изотопному датированию циркона и химическому датированию монацита из гранитоидов террейна Маизуру (Юго-западная Япония); для монацита получено значение возраста в 475-460 млн. лет, для циркона – 424–405 и 249–243 млн. лет; предположено, что более древний возраст монацита обусловлен тем, что он образует включения в матрице циркона. В работе (Naemura et al., 2008) датирован акцессорный торианит из шпинельгранатовых перидотитов Богемского массива (Чехия); торианит совместно с монацитом слагает вкрапленность в лейстах флогопита; для него получен возраст в 333.8±4.5 млн. лет; по цирконам из окружающих пород гранулитовой фации получены близкие изотопные датировки; сделан вывод, что гипербазиты были метаморфизованы в период орогенеза.

Только в последние годы работы по химическому датированию минералов начаты российскими исследователями. В статьях (Кориш, 2008; Савко и др., 2008; Кориш, Пилюгин, 2009) датированы монациты из углеродистых сланцев Курской магнитной аномалии; авторами выделены две «популяции» возрастов – 1629–2134 и 1041-1471 млн. лет; полученные значения удовлетворительно согласуются с геологическим строением Тим-Ястребовской структуры Воронежского кристаллического массива. В статье (Пилюгин, Муханова, 2008) для монацитов из метапелитовых гранулитов Воронежского кристаллического массива получены значения возраста в 3414±22, 3181±27 и 1339±35 млн. лет; первые два значения подтверждены изотопными данными. В работе (Савко и др., 2009) проведено химическое датирование монацитов из гранулитовых метаморфитов Курско-Бесединского блока. В работе (Романенко и др., 2008) исследованы метапелиты из двух комплексов гранито-гнейсового ядра Большого Кавказа; выполнено U-Рb-датирование этих объектов по цирконам на SHRIMP-II; рассчитанный возраст в пределах погрешности совпал с изотопным для новообразованных оболочек цирконов. В работах (Хиллер, Ерохин, 2009б; Иванов и др., 2010; Ерохин и др., 2010б; Иванов и др., 2010а; Ерохин, Хиллер, 2009а; Ерохин, Хиллер, 2009б; Прибавкин и др., 2009; Ерохин и др., 2010а) выполнены датировки монацитов, уранинитов, торитов, торианитов и коффинитов из ряда уральских геологических объектов.

Подводя итоги изложенному, можно констатировать, что основная масса публикаций по датированию монацита посвящена изучению этого минерала из метаморфитов, гнейсов и гранитоидов архейских и докембрийских щитов Африки, Мадагаскара, Индии. Именно в таких древних монацитах накапливается высокое количество радиогенного Pb, что позволяет выполнять достаточно корректные возрастные оценки в предположении пренебрежимо малого содержания нерадиогенного Pb. В серии статей представлены результаты по химическому датированию монацита из молодых пород альпийской складчатости (из Альп, Гималаев и других объектов с возрастом менее 100 млн. лет); при этом опровергнуто распространенное ранее мнение о том, что радиогенный Pb может накапливаться в достаточных для анализа количествах лишь за период 100-200 млн. лет и более. В подавляющем большинстве публикаций химическое датирование сопоставляется с изотопными исследованиями того же минерала или циркона и только в редких случаях с изотопным датированием по валовому составу породы, тем самым химическим датировкам придается геологическая интерпретация и значимость. Это удается при условии, что содержание нерадиогенного Рb в минерале-геохронометре незначительно, и его U-Th-Pb-система закрыта. Заметим, что многочисленными изотопными исследованиями монацитов показано, что содержание нерадиогенного Рь в них, как правило, достаточно низкое – менее 1 ppm (Parrish, 1990). Второе допущение о закрытости системы - традиционное для геохронологии монацита: его U-Th-Pb-система, как правило, закрытая, и на диаграмме соответствующие точки располагаются на конкордии. Подавляющее большинство авторов полагает, что частичная потеря Pb в монацита, в принципе, возможна, но она достаточно значима лишь в единичных пробах, в частности, из метаморфитов.

В части публикаций, в особенности, в прикладных геологических работах при датировках приводятся недопустимо высокие погрешности, что указывает на некорректность подобных оценок, обусловленных, по-видимому, «некондиционностью» выбранного геологического материала, его возрастной гетерогенностью или открытостью U-Th-Pb-системы минерала.

7.2. Химическое датирование минералов из ряда геологических объектов Урала и Сибири

Детальное описание исследованной коллекции минералов приведено в главе 1; ее основу составили зерна монацитов из пегматитов Ильменских гор (Южный Урал, Блюмовская копь и копь 244, пробы К-50, 244; Ильмено-Вишневогорский комплекс, проба К-193), из пегматитов Адуйского гранитного массива и его обрамления (Средний Урал, пробы Оз-2 и Оз-3), из гранитов Джабыкского массива (Урал, проба К-1061), из гнейсов и гранулитов Тараташского комплекса (Южный Урал, проба К-1366б и 1417), из кислых гнейсов Заангарья (Енисейский кряж). Также изучены акцессорные монацит и уранинит из гранитоидов Первомайского массива (Средний Урал); уранинит, торит и монацит из гранитоидов доюрского кристаллического фундамента Западной Сибири и Ямала (скв. 28р Восточно-Шебурской и скв. 10486 Окуневской площади; скв.1 Верхне-Реченской площади); торианит из карбонатитоподобных пород доломитового состава Карабашского гипербазитового массива (Южный Урал), уранинит и коффинит из гранитных пегматитов Липовского жильного поля (Средний Урал); уранинит из кварц-сульфидных жил Пышминско-Ключевского медно-кобальт-золоторудного месторождения (Средний Урал) и монацит из метатерригенных пород Восточно-Воронежской провинции Воронежского кристаллического массива (пробы 700а и 8240).

Расчет возраста минералов после их детального элементного картирования и предварительного выделения монохронных областей кристалла проводился по данным микрозондовых анализов в N точках зерна с использованием оригинальной программы (Вотяков и др., 2010а, б; Хиллер, 2010), в основу которой положен алгоритм ортогональной регрессии (York, 1966), и модифицированной программы Isoplot 3.66 (Ludwig, 1999) в рамках четырех различных процедур. • По точечным определениям содержания U, Th и Pb в зерне минерала с расчетом N значений точечного U-Th-Pb-возраста, а также среднего и средне-взвешенного значения по возрастным гистограммам (далее значения точечного возраста I-II, соответственно).

• По ThO₂*-PbO- и UO₂*-PbO-изохроне для высокоториевых и высокоурановых минералов (далее значения III изохронного Th*/Pb- или U*/ Рb-возраста) с расчетом содержания нерадиогенного Рb при условии фиксированной величины последнего во всех точках кристалла. С целью снижения погрешности датировки, обусловленной малой дисперсией содержания Th, U, Pb в ряде зерен минералов, при построении ThO₂*-PbO- и UO₂*-PbO-изохрон нами был использован расчетный прием, предложенный в (Cocherie, et al., 1998; Cocherie, Albarede, 2001) и состоящий во введении дополнительной «виртуальной» точки с координатами, равными абсолютной погрешности определения Th, U и Pb (далее значения Th*/Pb- или U*/Pb-возраста IIIa).

• По Th/Pb-U/Pb-изохроне с расчетом Th/ Pb- и U/Pb-возраста, а также средне-взвешенного значения, определенного по координатам средне-взвешенной точки на линии регрессии (изохроне) для выборки из N точек (далее значения возраста IV-VI).

• По ThO₂-PbO-UO₂-изохронной плоскости с расчетом значений U/Pb и Th/Pb-возраста (далее значения VII–VIII) и содержания нерадиогенного Pb при условии фиксированной величины последнего во всех точках кристалла.

В главе 6 на примере модельной Th-U-Pb-системы было показано, что для повышения корректности ее химического датирования целесообразно проводить анализ и разбраковку перечисленных выше восьми (I–VIII) значений возраста; этот же методологический подход применен нами и в настоящем разделе при датировании природных минералов: нами проводи-



лось сопоставление и анализ с последующей разбраковкой и усреднением двух значений изохронного Th*/Pb (U*/Pb), Th/Pb и точечного средневзвешанного возраста минералов, рассчитанных регрессионным методом по всей совокупности из N аналитических данных, а также средней и средне-взвешенной величины для N значений его точечного Th-U-Pb-возраста.

Монацитегматитов Блюмовской копи 50, Ильменские горы, Южный Урал. Исследован индивид монацита размером до 3 мм (илл. 13) из амазонитового пегматита, секущего гнейсовое обрамление Ильменогорского щелочного массива (Попова и др., 2010). В табл. I (прил. I) приведены вариации его состава по данным для 87 точечных анализов. Установлено, что образец представляет собой редко встречающийся высокоториевый монацит (илл. 14) с доминирующим хаттонитовым типом изоморфизма над чералитовым. Для монацита К-50, в котором S практически не фиксируется, значение введенного выше отношения β=(Si+Ca)/(Th+U+Pb)



Рис. 7.1. Вариации значений точечного Th-U-Pbвозраста (а), гистограмма их распределения (б) и ThO₂*-PbO-данные (в) для 87 определений локального химического состава в индивиде монацита пегматитов копи 50 Ильменских гор

Fig. 7.1. The age and error values in the points of analysis (a), histogram representation of the data (b) and ThO_2^* vs. PbO data (c) for monazite (sample K-50, Ilmenskiye Mountains, the Urals)

в подавляющем числе аналитических точек отклоняется от 1 менее чем на 5 %, что позволяет предполагать замкнутость Th-U-Pb-системы минерала (исключение составляют лишь единичные точки в краевых областях кристалла). Кристаллохимические данные (глава 2) позволяет предполагать монохронность минерала – близость условий и времени кристаллизации всех секторов кристалла.

По точечным определениям содержания U, Th, Pb проведены оценки значений возраста монацита K-50: они лежат в интервале 240– 259 млн. лет при относительной погрешности измерения U, Th, Pb – 3, 1, 3 отн.% (рис. 7.1, а; табл. 7.1). На гистограмме распределения значений точечного возраста (рис. 7.1, б) выделяется один максимум, что согласуется с предположением о возрастной гомогенности минерала. Значительная дисперсия содержания Th по индивиду позволяет выполнить изохронные построения^{*)} на ThO₂^{*}-PbO-диаграмме (рис. 7.1, в) и оценить его Th^{*}/Pb-возраст III в 242±12 млн. лет

^{*)} Значения изохронного U/Pb-возраста V оцениваются лишь чисто качественно с достаточно высокой погрешностью ввиду малой дисперсии соотношений Th/Pb и U/Pb по индивиду, и нами не рассматриваются; при этом средне-взвешенное значение возраста VI оценивается в 248±3 млн. лет (см. табл. 7.1) и согласуется с приведенной выше Th^{*}/Pb-датировкой III.

Таблица 7.1. Рассчитанные значения возраста монацитов

Table 7.1. Chemical age of monazites

Nº	Геологический объект, проба, область образца	Значения возраста, млн. лет, и величина СКВО					
		II	III	IIIa	IV	VI	VII
1	Ильменские горы, Блюмовская копь 50	$\begin{array}{c} 248\pm3\\(0.06)\end{array}$	242 ± 12 (0.14)	$\begin{array}{c} 248\pm8\\(0.15)\end{array}$	$\begin{array}{c} 249\pm21\\(0.16)\end{array}$	248 ± 3	$\begin{array}{c} 242\pm22\\(0.15)\end{array}$
2	Ильменские горы, копь 244, централь- ная и периферийная область	272 ± 6 (0.05) и 266 ± 7 (0.08)	256 ± 19 (0.18)	263±14 (0.18)	-	269 ± 9	-
3	Ильмено-Вишнево- горский комплекс	256 ± 12 (0.05)	255 ± 20 (0.42)	255±17 (0.41)	253 ± 12 (0.57)	256 ± 4	252 ± 22 (0.43)
4	Адуйский массив, проба Оз-2, централь- ная и периферийная область,	256 ± 5 (0.12) и 255 ± 7 (0.06)	254 ± 15 (0.27) и 239 ± 33 (0.22)	254 ± 14 (0.26) μ 240 ± 24 (0.21)	262 ± 20 (0.37) и 249 ± 21 (0.20)	257 ± 6 И 242 ± 4	256 ± 23 (0.27) и 251 ± 52 (0.21)
	проба Оз-3, централь- ная и периферийная область	$\begin{array}{c} 241 \pm 11 \\ (0.10) \ \text{μ} \\ 241 \pm 10 \\ (0.04) \end{array}$	$\begin{array}{c} 256\pm26\\ (0.13)\ \text{m}\\ 237\pm115\\ (0.08) \end{array}$	$\begin{array}{c} 256\pm 20 \\ (0.12) \ \text{\tiny M} \\ 240\pm 42 \\ (0.07) \end{array}$	$\begin{array}{c} 254\pm 20 \\ (0.16) \ \text{μ} \\ 249\pm 91 \\ (0.10) \end{array}$	256±4 И 242±5	-
5	Джабыкский массив, проба К-1061	284 ± 10 (0.08)	$287 \pm 31 \\ (0.31)$	288 ± 22 (0.36)	283 ± 12 (0.49)	-	$\begin{array}{c} 284\pm40\\(0.38)\end{array}$
6	Тараташский массив, проба К-1366б,	1947 ± 24 (0.03)	$1964 \pm 212 \\ (0.07)$	$\begin{array}{c} 1949\pm89\\(0.07)\end{array}$	$\begin{array}{c} 1935\pm96\\(0.08)\end{array}$	1948 ± 15	1951 ± 281 (0.08)
	проба К-1417	$\begin{array}{c} 1906\pm24\\ (0.08)\end{array}$	1917 ± 76 (0.22)	1912 ± 59 (0.22)	1892 ± 41 (0.23)	1909 ± 14	$\begin{array}{c} 1891\pm98\\(0.22)\end{array}$
7	Енисейский Кряж, Заангарье	$785 \pm 17 \\ (0.08)$	$778\pm89 \\ (0.19)$	$783\pm 60 \\ (0.18)$	$792\pm92 \\ (0.27)$	786 ± 13	$762 \pm 168 \\ (0.20)$
8	Воронежский массив, проба 700а,	2043 ± 54 (0.07)	$2044 \pm 151 \\ (0.30)$	$2040 \pm 180 \\ (0.02)$	$\begin{array}{c} 2054\pm90\\(0.18)\end{array}$	2042 ± 27	-
	проба 8240	$2045 \pm 99 \\ (0.01)$	$2059 \pm 861 \\ (0.02)$	$2040 \pm 179 \\ (0.02)$	$2022 \pm 722 \\ (0.04)$	2047 ± 80	-

(последний близок средне-взвешенному точечному значению возраста II, см. табл. 7.1). Содержание нерадиогенного Pb в 66 ± 140 ppm, рассчитанное по пересечению ThO₂*-PbO-изохроны с вертикальной осью, сопоставимо с пределом его обнаружения в 75 ppm в данном кристалле, т.е. оно может быть оценено как пренебрежимо малое. При введении на ThO₂*-PbOдиаграмме дополнительной «виртуальной» точки с координатами, равными абсолютной погрешности определения Th и Pb, для монацита K-50 получено значение Th*/Pb-возраста ІПа в 248±8 млн. лет (СКВО=0.15) с несколько более низкой погрешностью, чем значение III без введения виртуальной точки. Таким образом, использованные подходы к датировке монохронного монацита, обладающего достаточно высокой дисперсией содержания Th и пренебрежимо малым содержанием нерадиогенного Pb, дают близкие значения возраста в 242–249 млн. лет. Полученные значения сопоставимы с изотопными данными в 240 млн. лет для минералов из амазонитовых пегматитов Ильменских гор (Попов, Попова, 2006).



Рис. 7.2. ThO₂*-PbO-данные для монацита пегматитов копи 244 Ильменских гор (а) и Ильмено-Вишневогорского комплекса (б)

Fig. 7.2. Th O_2^* vs. PbO data for monazite of pegmatites from mine 244, Ilmensky Mountains (a) and for monazite from Ilmeno-Vishnevogorskii complex (b)

Монацит пегматитов копи 244, Ильменские горы. Исследовано зерно монацита (илл. 15) размером до 1.5 мм из копи 244 в пегматитах среди гнейсов и амфиболитов Селянкинской толщи в средней части Ильменского заповедника в 3 км западнее оз. Таткуль. Монацит отмечается в породе с альмандином, цирконом, ильменитом и ганитом. В табл. I (прил. I) представлены вариации состава зерна монацита по данным для 100 аналитических точек; доминирует хаттонитовый тип изоморфизма; в кристалле выделены две зоны центральная и периферийная; на основании кристаллохимических данных (глава 2) нельзя исключить различие времени и условий кристаллизации этих зон. В связи с этим точечные возрастные определения для двух зон образца проводились независимо. Параметр β отклоняется от 1 менее чем на 5 % как в центре зерна, так и на его периферии, на основании чего Th-U-Pb-систему минерала можно предполагать замкнутой.

Точечные значения возраста центральной и периферийной зоны монацита лежат в интервале от 258 до 289 и от 251 до 281 млн. лет, соответственно (относительная погрешность измерения U, Th, Pb – 3, 2, 5 отн.%); при этом средневзвешенные значения возраста II практически совпадают. Вследствие этого анализ данных на изохронной ThO₂^{*}-PbO-диаграмме^{*)} выполнен нами для всей совокупности из 100 аналитических точек кристалла (рис. 7.2, а); полученная линия регрессии с использованием виртуальной точки соответствует изохроне с Th*/Pb-возрастом IIIa в 263 ± 14 млн. лет, CKBO=0.18; содержание нерадиогенного Pb (100 ± 150 ppm) сопоставимо с пределом его обнаружения (110 ppm) в данном кристалле. Полученные химические датировки (см. табл. 7.1) согласуются с представлениями о последовательности формирования пегматитов в Ильменских горах (Попов, Попова, 2006).

Монацит Ильмено-Вишневогорского комплекса, Южный Урал. Исследовано пять зерен монацита размером до 150 мкм (илл. 16); в табл. І (прил. I) приведены вариации состава монацита по данным для 51 точки на зернах; фиксируется значительная композиционная неоднородность; выделяется как минимум три различные области (см. главу 2). Для всех областей параметр В значимо отклоняется от 1: он составляет 1.06-1.19 в первой и второй областях и 1.34-1.66 - в третьей, что может быть отражением различий по степени замкнутости Th-U-Pb-системы кристалла. Нами предпринята попытка оценки возраста для ограниченной выборки из 25 точек, представляющих первую и вторую области, в которых параметр В не превышает 1.1; для них точечные значения возраста лежат в интервале от 244 до 271 млн. лет при относительной погрешности измерения U, Th, Pb - 3, 2, 8 отн.%; гистограмма распределения значений точечного возраста имеет один максимум (средне-взве-

^{*)} Линию (плоскость) регрессии на Th/Pb-U/Pb (ThO₂-PbO-UO₂) диаграмме построить не удается вследствие малой дисперсии соотношений Th/Pb и U/Pb.



Рис. 7.3. ThO₂*-PbO-данные для центральной (а) и периферийной (б) зоны кристалла монацита O3-2 пегматитов Адуйского массива

Fig. 7.3. ThO₂^{*} vs. PbO data for the central (a) and peripheral areas (6) of monazite (sample Oz-2, Aduiskii massif, the Urals)

шенное значение II составляет 256 ± 12 млн. лет, СКВО=0.05). ThO₂*-PbO-изохрона, построенная с использованием виртуальной точки, представлена на рис. 7.2, б, значение Th*/Pb-возраста составляет 255 ± 17 млн. лет, СКВО=0.41. Несмотря на близость всех полученных оценок возраста (см. табл. 7.1), вопрос об их корректности требует дополнительных исследований из-за существенной композиционной гетерогенности зерен монацита и возможной незамкнутости их Th-U-Pb-системы.

Монацитгранитных пегматитов Адуйского массива, Средний Урал. Исследованы крупные индивиды монацита из двух проб: Оз-2 (илл. 17, 18) – из жилы 1 Костоустовского участка в 4 км к юго-западу от пос. Озерное и Оз-3 (илл. 2, к-м) из жилы гранитного пегматита «Ильменорутиловая» в 1 км к западно-северо-западнее жилы 1. В первой пробе кристаллы монацита размером до 1 см отмечаются совместно с ксенотимом, апатитом, аннитом и ильменитом, во второй – размером до 4 мм с ксенотимом, ильменорутилом и ильменитом. В табл. I (прил. I) приведены вариации состава монацитов, определенного для 93 точек кристалла Оз-2 и 80 точек Оз-3. Кристаллы зональны, выделяется центральная зона и периферия кристалла (см. главу 2). Параметр β для подавляющего большинства точек в обоих кристаллах не отклоняется от 1 более чем на 5 %, что указывает на замкнутость их Th-U-Pb-систем (при датировании единичные точки с β<0.95 и >1.05 были нами отбракованы).

Датирование проведено как для неизмененной центральной, так и для преобразованной периферийной области кристаллов; при этом относительная погрешность измерения Th, U, Рь составляла в них 3, 2, 8 отн.%. Средне-взвешенные значения возраста II составляют 256±5 (СКВО=0.12), 255±7 (СКВО=0.06) и 241±11 (СКВО=0.10) и 241±10 млн. лет (СКВО=0.04) для центральной и периферийной областей проб Оз-2 и 3, соответственно. ThO₂*-PbO-изохроны для двух зон монацита Оз-2 представлены на рис. 7.3; установлено, что содержание нерадиогенного Рb ниже предела его обнаружения в минерале. Для центральной и периферийной областей монацитов Оз-2 и 3 значение Th*/Pb-возраста III составляет 254±15 (СКВО=0.27) и 239±33 (СКВО=0.22) 256±26 (СКВО=0.13) и 240±35 (СКВО=0.07), соответственно (табл. 7.1). Видно, что датировки зон в обоих кристаллах не совпадают; представляется, что с учетом кристаллохимических данных о гетерогенности образцов (см. главу 2) возрастные данные, полученные для преобразованных периферийных зон, следует отбраковать. Химические датировки центральных зон монацитов в 250-260 млн. лет удовлетворительно соотносятся с изотопными данными для минералов из пегматитов Адуйского массива: время их образования оценивается от 291±8 млн. лет по акцессорному циркону (Краснобаев и др., 2006) до 256±0.6 млн. лет по монациту (Ферштатер и др., 2003) и 241-255 млн. лет по слюдам (Смирнов и др., 2006).



Рис. 7.4. ThO₂^{*}-PbO- и Th/Pb-U/Pb-данные (a, б) для монацита K-1061 из гранитоидов Джабыкского массива Fig. 7.4. ThO₂^{*} vs. PbO data (a) and the Th/Pb vs. U/Pb data (b) for monazite K-1061 from Dzhabyksky massif

Монацит гранитоидов Джабыкского массива, Южный Урал. Изучены монациты размером 200–300 мкм (илл. 21) из биотитового гранита пробы К-1061. В табл. 1 (прил. I) приведены вариации их состава по данным для 54 точек; кристаллы зональны (см. илл. 21); параметр β варьирует от 1.00 до 1.17 (при последующей датировке точки с β>1.05 были отбракованы).

ThO₂^{*}, мас. %

Точечные значения возраста монацита лежат в интервале от 267 до 305 млн. лет при относительной погрешности измерения Th, U, Pb в 3, 3, 9 отн. %; средне-взвешенное значение возраста II составляет 284 \pm 10 млн. лет (СКВО=0.08); изохронные построения представлены на рис. 7.4; получены значения Th*/Pb- и Th/Pb-возраста IIIa (с использованием виртуальной точки) и IV в 288 \pm 22 и 283 \pm 12 млн. лет. В целом, все химические датировки удовлетворительно согласуются как между собой (см. табл. 7.1), так и с изотопными определениями для минералов и пород Джабыкского массива, интервал формирования которого составляет 263–281 млн. лет.

Монацит Тараташского массива, Южный Урал. Изучены зерна монацитов размером от 200–300 до 400–500 мкм из биотит-амфибол-плагиоклазового пегматита, залегающего среди гранитизированных метаморфических пород (проба К-1366б, илл. 22, 23), и из очковых гнейсов (К-1417, илл. 24) Тараташского массива. В табл. I (прил. I) приведены вариации состава монацитов, определенные по 62 и 95 точечным анализам зерен монацитов К-1366б и К-1417, соответственно. Для монацита К-1366б параметр β не отклоняется от 1 более чем на 2 %, т.е. условие зарядовой компенсации примесей выполняется в нем достаточно строго, что позволяет предполагать замкнутость его Th-U-Pbсистемы. Напротив, для монацита К-1417 параметр β =1.04–1.16 и существенно варьирует по зернам, что указывает на возможные потери радиогенного Pb в отдельных зонах кристалла.

U/Pb

Для монацитов К-1366б и 1417 точечные значения возраста лежат в интервалах 1922-1986 и 1795-1969 млн. лет при относительной погрешности измерения Th, U, Pb в 3, 3, 1 и 3, 7, отн. %, соответственно; средне-взвешен-2 ные значения возраста II составляют 1947±24 (СКВО=0.03) и 1906±24 млн. лет (СКВО=0.08). На рис. 7.5 представлена ThO₂*-PbO-изохрона*) с введенной виртуальной точкой для монацита К-1417, значение Th*/Pb-возраста IIIa составляет 1912±59 млн. лет (для К-13666 -1949±89 млн. лет). Из табл. 7.1 видно, что введение на диаграммах виртуальной точки в 1.5-2 раза снижает погрешность датирования. Представляется, что заниженное значение возраста монацита К-1417 связано с потерями радиогенного Pb, о чем свидетельствует значимое отличие от 1 параметра в этой пробе. Полученные химические датировки монацитов не противоречат имеющимся изотопным данным: основ-

^{*)} Вследствие малой дисперсии соотношений U/Pb и Th/Pb изохронные Th/Pb-U/Pb- и ThO₂-PbO-UO₂-датировки можно рассматривать лишь как качественные оценки.



Рис. 7.5. ThO₂*-PbO-данные для монацитов Тараташского массива (а, проба К-1417) и гнейсов Енисейского кряжа (б). Звездой здесь и далее обозначено положение виртуальной точки

Fig. 7.5. ThO₂^{*} vs. PbO data for monazite K-1417 (Taratashsky massif, the Urals) (a) and for monazite 9-05 (Yeniseiskii Kryazj, Siberia) (δ)

ная часть метаморфических пород Тараташского комплекса образовалась при метаморфизме гранулитовой фации около 2.6 млрд. лет (Краснобаев, 1986); диафторез амфиболитовой фации и гранитизация пород проявились в интервале 2.1–1.7 млрд. лет (Ленных, 1980).

Монацит кислых гнейсов Заангарья Енисейского кряжа. В кислых гнейсах из района среднего-нижнего течения р. Гаревки, правого притока р. Енисей, монацит слагает акцессорную вкрапленность и образует короткопризматические индивиды (до 50 мкм) с коронарными структурами (илл. 25), сложенными апатитом, обогащенным РЗЭ. В табл. I (прил. I) представлены вариации состава монацита по данным для 53 точек в зернах. Зональности в распределении элементов в зернах не выявлено; фиксируется значительный избыток суммарного содержания (Si+Ca) над (Th+U+Pb), вследствие чего параметр β=1.13-1.63 существенно отличен от 1. Можно предполагать, что избыточное содержание Si обусловлено наличием в образцах фтора, присутствие которого связано с замещением монацита апатитом, что согласуется с наличием коронарных апатитовых структур. Вопрос о замкнутости Th-U-Pb системы минерала остается открытым, и нельзя исключить факт его вторичных преобразований.

Точечные датировки заангарского монацита дают значения в интервале от 742 до 823 млн. лет при относительной погрешности измерения Th, U, Pb в 5, 1 и 3 отн. %; гетерогенности по возрасту у зерен монацита не выявлено. Дисперсия содержаний U, Th, Pb по зернам незначительна, вследствие чего изохронные датировки удается выполнить лишь со значительной (на уровне 60–100 млн. лет) погрешностью; значения изохронного возраста лежат в интервале 762–792 млн. лет (рис. 7.5); при этом минимальная погрешность характерна для средне-взвешенного значения VI, оцененного на Th/Pb-U/ Pb-диаграмме (см. табл. 7.1).

Изотопные данные по возрасту заангарских гнейсов нам неизвестны. Цирконы из гранитоидов Тейского комплекса указывают на возраст метаморфических событий в интервале 880– 864 млн. лет (Vernikovsky et al., 2007); данные Ar-Ar-возраста биотитов из изученных метапелитов свидетельствуют о том, что главная стадия метаморфизма пород происходила не ранее 848– 851 млн. лет (Лиханов и др., 2007). Меньшие значения возраста монацитов кислых гнейсов Заангарья и особенности их кристаллохимии могут быть связаны с вторичными преобразованиями минерала под влиянием более поздних термальных процессов на заключительной стадии становления гранитоидов Тейского комплекса.



Рис. 7.6. Биминеральные UO₂^{*}-PbO- (а) и Th/Pb-U/Pb-данные (б) для уранинита и монацита из гранитоидов Первомайского массива

Fig. 7.6. UO_2^* vs. PbO data (a) and Th/Pb vs. U/Pb data (b) for the bimineral system of uraninite and monazite (sample Ml-6, Pervomaisky massif, the Urals)

Монацит и уранинит гранитоидов Первомайского массива, Средний Урал. Сосуществующие монацит и уранинит (илл. 26) размером до 100 и 20 мкм, соответственно, слагают акцессорную вкрапленность в лейкогранитах массива; последние по своей петрологогеохимической характеристике приближаются к редкометальным гранитоидам. Оба минерала встречаются по всей матрице гранитоида, совместных срастаний не образуют. В табл. II (прил. I) приведены вариации состава монацита и уранинита по данным для 6 и 4 точечных анализов, соответственно. С учетом кристаллохимических данных, изложенных в главе 2-3, можно предполагать высокую степень замкнутости Th-U-Pb системы минералов и корректность выполнения их химических датировок.

Точечные датировки зерен монацита дают значения от 266 до 284 млн. лет, а уранинита – от 273 до 275 млн. лет; гистограммы распределения возраста свидетельствуют о возрастной гомогенности минералов со средне-взвешенными значениями возраста II в 275±23 (СКВО=0.04) и 274±6 млн. лет (СКВО=0.03), соответственно. Использование изохронных подходов для их датировки некорректно вследствие малой дисперсии содержаний U и Th по зернам минералов. Учитывая синхронность формирования радиоактивных акцессорных минералов (уранинита и монацита) в первомайских гранитах, а также близость их средне-взвешенных значений точечного возраста II, представляется возможным использовать данную биминеральную систему для построения единых изохрон. Результаты, представленные на UO₂*-PbOи Th/Pb-U/Pb-диаграммах (рис. 7.6), свидетельствуют о корректности предложенного подхода: линии регрессии, полученные по всей совокупности точек для монацита и уранинита, близки к изохронам. U*/Pb-возраст III составляет 274±4 (СКВО=0.07), Th/Pb-возраст IV – 277±17, a U/Pbвозраст V - 274±4 млн. лет (СКВО=0.08). Заметим, что при расчете возраста по биминеральным изохронам погрешности их определения существенно ниже по сравнению с таковыми для мономинеральных. Изотопные датировки минералов гранитоидов Первомайского массива нам не известны.

Монацит и уранинит из гранитов фуноамента Ямала (скв. 1 Верхне-Реченской площади). Монацит из гранитов (скв. 1, гл. 1748– 2034 м) обычно тяготеет к скоплениям биотита и слагает хорошо образованные короткопризматические индивиды размером до 100 мкм по удлинению (илл. 4, 27). В табл. II (прил. I) приведены вариации состава монацита по данным для 30 микрозондовых анализов; зерна гетерогенны и имеют отчетливую зональность по Th. Значение параметра β составляет 0.97–1.03, что свидетельствует о замкнутости Th-U-Pb-системы минерала.

Точечные датировки монацита В.-Реч. дают значения в достаточно широком интервале - от 237 до 286 млн. лет; но их статистическая обработка свидетельствует о возрастной гомогенности минерала со средне-взвешенным значением возраста II в 258±11 млн. лет, СКВО=0.13. Значительная дисперсия содержания Th по зернам монацита позволяет выполнить изохронные построения. На ThO₂*-PbO и Th/Pb-U/Pbдиаграммах точки удовлетворительно ложатся на линии регрессии, близкие к изохронам; значения Th*/Pb- и Th/Pb-возраста III и IV составляют 249±28 (СКВО=0.24) и 270±20 млн. лет (СКВО=0.28), соответственно; при этом U/Pbвозраст V оценивается лишь качественно с погрешностью ±118 млн. лет, что вполне закономерно для высокоториевого минерала. Th*-Pbизохрона проходит практически через начало координат, т.е. содержание нерадиогенного Рb оценивается как пренебрежимо малое (менее 0.0009 мас. %), что ниже предела его обнаружения в данном монаците.

В верхне-речинских гранитах в лейстах биотита установлены отдельные индивиды уранинита, размером до 30 мкм, обычно кубического облика (илл. 31). Кроме того, он встречается в виде мелких включений в зернах монацита и сопутствующего ему ксенотима. В табл. II (прил. I) приведены вариации состава



Рис. 7.7. Вариации значений точечного Th-U-Pbвозраста и их средне-взвешенная величина для 11 определений локального состава в уранините и 40 в монаците из гранитов фундамента Ямала

Fig. 7.7. The age and error values, the weighted mean value for 11 points of analysis in uraninite and 40 points of analysis in monazite of granites from Yamal basement

уранинита по данным для 11 точечных анализов. Согласно кристаллохимическим данным (глава 3) значительных вторичных преобразований уранинита не установлено. Его точечные датировки дают значения в интервале от 254 до 266 млн. лет со средне-взвешенной величиной возраста II в 259±5 млн. лет (СКВО=0.26). Использование изохронных подходов для датировки уранинита некорректно вследствие малой дисперсии содержаний U и Th по зернам. Учи-



Рис. 7.8. Биминеральные UO₂^{*}-PbO- (а) и Th/Pb-U/Pb-данные (б) для уранинита и монацита из гранитов фундамента Ямала

Fig. 7.8. PbO vs. UO_2^* data (a) and Th/Pb vs. U/Pb data (b) for the bimineral system of uraninite and monazite from Yamal basement

тывая близость формирования уранинита и монацита в верхнеречинских гранитах (их ассоциированность исключительно с лейстами биотита), а также близость средне-взвешенных значений возраста II, вычисленных по точечным анализам (см. рис. 7.7), нами выполнены биминеральные изохронные построения для системы уранинит-монацит. Результаты представлены на рис. 7.8; видно, что все точки по двум минералам ложатся на линии регрессии, близкие к изохронам; при этом U*/Pb-возраст III составляет 259±4 млн. лет (СКВО=0.29), а значения Th/Pbи U/Pb-возраста IV и V - 260±8 и 259±4 млн. лет (СКВО=0.33). Полученные возрастные данные согласуются между собой и не противоречат имеющимся геологическим представлениям.

Монацит, уранинит, торит гранитоидов фундамента Западной Сибири (скв. 28р Восточно-Шебурской и скв. 10486 Окуневской площади). В гранитоидах скважины В-Шеб 28р (гл. 2528 м) обнаружены достаточно крупные акцессорные монациты (илл. 28) короткопризматического габитуса, размером около 100 мкм; в табл. II (прил. I) приведены вариации состава монацита по данным для 11 точечных анализов. Минерал обладает сложной зональностью. Кристаллохимические данные (глава 2) указывают на различие условий кристаллизации центральной части кристалла и его каймы и позволяют предполагать факт вторичных преобразований краевой части кристалла. Отметим, что параметр β для образца составляет 0.99-1.27; при датировании кристалла аналитические точки краевых областей со значениями β>1.05 были отбракованы.

Точечные датировки В.-Шеб. монацита лежат в интервале от 242 до 274 млн. лет (средне-взвешенное значение возраста II – 255±16 млн. лет, СКВО=0.30). Несмотря на то, что дисперсия содержаний U и Th по зерну монацита значительна, изохронные датировки удается выполнить лишь со значительными погрешностями, что связано с повышенной погрешностью определения содержания элементов вследствие относительно низкого времени накопления сигналов от них при микрозондовом анализе минерала (повышение последнего недопустимо из-за существенного выгорания поверхности зерна под пучком электронов). Th*-Pb-возраст III составляет 275±21 млн. лет (СКВО=0.52); средне-взвешенное значение VI по Th/Pb-U/

Рb-регрессии – 257±10 млн. лет (Th/Pb- и U/ Pb-возраст оцениваются лишь качественно). Полученные химические датировки монацита не противоречат изотопным данным по ассоциирующим цирконам, для которых по точечным анализам с использованием ионного зонда SHRIMP-II получен конкордантный U-Pb-возраст 277.5±2.0 млн. лет (Иванов и др., 2010б).

В граносиенитах (скв. Оку 10486; гл. 1734 и 1744 м) обнаружены акцессорные уранинит (Хиллер, Ерохин, 2009) и торит; в табл. II прил. I приведены вариации их состава. Уранинит образует округлые зерна (илл. 2, 11, 32) до 40 мкм в диаметре в лейстах биотита. Они имеют отчетливые плеохроичные дворики, которые хорошо выделяются в слюдистой матрице. В крупных зернах фиксируется зональность; кристаллохимические данные (глава 3) свидетельствуют о высокой сохранности U-Th-Рb-системы уранинита и возможности проведения корректных возрастных определений на его основе. Точечные датировки минерала лежат в интервале от 298 до 310 млн. лет (средне-взвешенное значение возраста II составляет 303±6 млн. лет); значения U*/Pb и U/Pbвозраста III и VI - 303±6 и 303±24 млн. лет (СКВО=0.53 и 0.63); при этом содержание нерадиогенного Pb пренебрежимо мало.

Торит образует мелкие (до 10 мкм) хорошо окристаллизованные зерна (илл. 33) изометричного габитуса в кварцевой матрице. Как отмечалось выше, торит, в отличие от монацита, сильно подвержен радиационной деструкции (метамиктизации) и гидратации (илл. 9, 12), что может сильно нарушать замкнутость его Th-U-Pb-системы. Однако для торита Окуневской площади можно предполагать высокую степень сохранности структуры (глава 3). Точечные значения возраста торита лежат в интервале от 296 до 303 млн. лет (средне-взвешенное значение возраста II составляет 301±11 млн. лет, СКВО=0.01); значения изохронного Th*/Pbи Th/Pb-возраста III и IV - 307 и 303 млн. лет (СКВО=0.02 и 0.03); содержание нерадиогенного Рb – на грани погрешности определения данного элемента. Видно, что химические датировки, выполненные для уранинита и торита, удовлетворительно согласуются как между собой, так и с изотопными U-Pb-данными в 301.6±3.6 млн. лет для цирконов из граносиенитов скв. 10486 (Иванов и др., 2010а).

Торианит золотоносных пород Карабашского гипербазитового массива. Минерал обнаружен в виде рассеянных мелких включений (илл. 34) размером до 10–15 мкм в золотоносных карбонатитоподобных породах в юго-западной части Карабашского гипербазитового массива. Торианит слагает изометричные округлые индивиды среди доломитовой матрицы; в табл. II (прил. I) приведены вариации состава минерала по данным для 9 точечных анализов.

Точечные датировки торианита лежат в интервале от 305 до 332 млн. лет со средне-взвешенным значением возраста II в 317±8 млн. лет (СКВО=0.29). Наличие некоторой дисперсии содержания Th и U по зернам минерала позволяет использовать аналитические данные для изохронных построений. Установлено, что на ThO₂*-PbO-диаграмме экспериментальные точки ложатся на линию регрессию, проходящую практически через начало координат; содержание нерадиогенного Pb, рассчитанное по пересечению линии регрессии с РЬО-осью, сопоставимо с пределом его обнаружения в минерале. Однако Th*/Pb-возраст III оценивается из угла наклона линии регрессии с недопустимо высокой погрешностью (321±70 млн. лет, СКВО=0.88). Расчеты изохронного возраста IIIа с виртуальной точкой дают значение 316±6 млн. лет (СКВО=0.77).

На Th/Pb-U/Pb-диаграмме все аналитические точки группируются в ограниченной области около оси ординат, вследствие чего построение соответствующей изохроны и датировки минерала достаточно спорны. Оценка средне-взвешенного значения возраста VI по средним величинам X_{ср} и Y_{ср} дает 317±7 млн. лет и удовлетворительно согласуется со средне-взвешенным значением возраста II, определенного по точечным содержаниям U, Th, Pb. По-видимому, приведенную величину можно принять за достаточно корректную оценку возраста торианита. Изотопные данные по возрасту золотоносных карбонатных пород Карабашского массива нам неизвестны. Можно предполагать, что формирование торианита в карбонатных породах связано с коллизионной стадией развития Сысертско-Ильменогорского блока в интервале 320-360 млн. лет, во время которой проходили процессы метаморфизма с основным этапом около 350 млн. лет (Echtler et al., 2007 и др.).

Уранинит и коффинит гранитных пегматитов Липовского жильного поля. Изучены акцессорные зерна уранинита (илл. 33, а) размером до 20–25 мкм и мелкие индивиды коффинита (илл. 33, б) размером до 5–10 мкм в закономерных сростках циркона с ксенотимом из матрицы редкометального гранитного пегматита Липовского никелевого месторождения (Ерохин и др., 2010). В табл. II (прил. I) приведены вариации состава уранинита и коффинита по данным для 6 и 4 точечных анализов, соответственно. Полученные кристаллохимические данные (глава 3) указывают на возможность корректных датировок с использованием данного уранинита.

Точечные датировки уранинита лежат в интервале от 263 до 267 со средне-взвешенным значением возраста II в 269±7 млн. лет. Для коффинита получен более широкий интервал датировок - от 265 до 271 со средне-взвешенным значением II в 269±7 млн. лет, что в целом, удовлетворительно согласуется с датировками уранинита и допускает использование изохронного подхода для всей совокупности данных по двум минералам. Значения биминерального изохронного U*/Pb- и U/Pbвозраста III и V, полученные для системы из двух минералов уранинита и коффинита, составляют 269±5 и 296±24 млн. лет. Изотопные данные по возрасту пегматитов Липовского никелевого месторождения малочисленны; известны лишь К-Аг-датировки слюд, которые охватывают достаточно широкий интервал времени от 300 до 250 млн. лет (данные В.Н. Смирнова).

Уранинит кварц-сульфидных жил Пышминско-Ключевского месторождения. Уранинит слагает мелкую вкрапленность в кварцсульфидных жилах и вмещающих метасоматитах Си-Со-Аи месторождения, залегающего среди девонских вулканогенно-осадочных пород. Обычно встречается в виде включений до 5–10 мкм (илл. 36) в матрице магнетита, реже ассоциирует с пиритом и халькопиритом. В табл. II (прил. I) приведены вариации состава уранинита по данным для 20 точечных анализов. Анализ кристаллохимических данных (глава 3) указывает на высокую степень преобразованности исследуемых зерен.

Точечные датировки уранинита дают значения в интервале от 350 до 382 млн. лет со



Рис. 7.9. Вариации значений точечного возраста для 29 определений локального состава монацита 700a (a) и 10 монацита 8240 (б)

Fig. 7.9. The age and error values in 29 points of analysis for monazite 700a (a) and in 10 points of analysis for monazite 8240 (b)

средне-взвешенной величиной возраста II в 371±9 млн. лет (СКВО=0.14). Проведение корректных изохронных построений невозможно вследствие малой дисперсии содержаний Th и U в зернах. Полученные возрастные данные носят предварительный характер и требуют дополнительных исследований. Отметим, что имеющиеся в литературе K-Ar и U-Pb-изотопные данные по Пышминско-Ключевскому месторождению достаточно противоречивы и охватывают интервал от 382 до 223 млн. лет.

Монацит метатерригенных пород Восточно-Воронежской провинции Воронежского кристаллического массива. Исследованы монациты, представляющие две пробы 700а и 8240 - кордиерит-силлиманит-гранатовый гнейс и гранат-мусковит-силлиманитовый сланец, удаленные друг от друга на расстояние в 300 км. Зерно монацита 700а - крупное, удлиненное с размером 50×50 мкм; зерно монацита 8240 – также удлинённое с размером 50×10 мкм. Элементное картирование зерен в рентгеновских лучах Y, U, Pb, Th и во вторичных электронах представлено на илл. 29, 30. В табл. II (прил. I) приведены вариации состава зерен монацита 700а и 8240 по данным для 29 и 12 точечных анализов, соответственно. Для монацита 700а отмечено выраженное зональное строение, выделяются высоко- и низкоиттриевые зоны (илл. 29). Анализ кристаллохимических данных (глава 3) указывает на достаточно высокую степень сохранности исследуемых зерен.

Точечные датировки монацита 700а дают значения в интервале от 1950 до 2116 млн. лет со средне-взвешенной величиной возраста II в 2043±54 млн. лет (СКВО=0.07) (см. табл. 7.1 и рис. 7.9), причем полихронности для высокои низкоиттриевых зон не выявлено: значения точечного возраста лежат в пределах погрешности измерений. Наличие для зерна монацита 700а значимой дисперсии содержаний Th и U позволяет выполнить изохронные построения. На Th*-Pb-диаграмме экспериментальные точки удовлетворительно ложатся на изохрону (рис. 7.10, а), проходящую практически через начало координат; содержание нерадиогенного Pb (0.002 %) близко к пределу его обнаружения в минерале; Th*/Pb-возраст II оценивается в 2044±151 млн. лет (СКВО=0.30). На Th/Pb-U/Pb-диаграмме (рис. 7.10, б) аналитические точки группируются в двух областях - около оси ординат и в центральной части диаграммы, вследствие чего построение изохроны и оценка значений возраста представляются вполне корректными; значения Th/Pb- и U/Pb-возраста IV и V составляют 2054±90 и 2023±143 млн. лет (СКВО=0.18), а средне-взвешенное значение возраста VI - 2042±27 млн. лет.



-

Fig. 7.10. ThO $_2^{\,*} \rm vs.$ PbO data (a) and Th/Pb vs. U/Pb data (b) for monazite 700a

По-видимому, величину в 2020–2050 млн. лет можно принять за достаточно корректную оценку возраста монацита 700а.

Точечные датировки монацита 8240 дают значения в интервале от 2024 до 2074 млн. лет со средневзвешенной величиной возраста II в 2045±99 млн. лет (СКВО=0.01) (см. табл. 7.1 и рис. 7.11). Дисперсия содержаний Th и U в зерне незначительна^{*)} (рис. 7.11); введение на Th*-Pbдиаграмме виртуальной точки с координатами, равными абсолютной погрешности определения элементов, позволяет оценить Th*/Pb-возраст III а в 2040±180 млн. лет (СКВО=0.02). Представляется, что величину в 2030–2050 млн. лет можно принять за достаточно корректную оценку возраста зерна монацита 8240.

Полученные данные позволяют высказать некоторые предположения о возрасте метаморфизма пород воронцовской серии. Акцессорный монацит формировался во время метаморфического события 2042–2046 млн. лет, что согласуется с геологической историей в палеопротерозое на границе Сарматии и Волгоуралии. Факт близких значений возраста для монацитов 700а и 8240 из пород, достаточно удаленных друг от друга, свидетельствует об их надежности. Накопление мощных толщ терригенных осадков воронцовской серии происходило в интервале 2100–2150 млн. лет (Савко и др., 2011 в печати; Бибикова и др., 2009); после формирования этих пород в период 2060– 2100 млн. лет происходило внедрение магматических масс ультраосновного и основного состава (Чернышов и др., 1990).

Кратко суммируя полученные результаты, отметим следующее. На основе усовершенствованной методики микрозондового анализа выполнены исследования локального состава и проведено химическое датирование U-Th-содержащих минералов – уранинита, торита, торианита, коффинита и монацита из ряда уральских и сибирских геологических объектов. Для повышения корректности возрастных определений выполнен сопоставительный анализ значений точечного возраста, полученных по локальному содержанию Th, U и Pb, с данными трех изохронных Th*/Pb-, Th/Pb- и U/Pb-методов расчета, основанных на определении возраста регрессионным методом по всей совокупности аналитических точек. На ряде примеров продемонстрировано, что детальное исследование текстуры микрокристаллов, их состава, композиционной гетерогенности, особенностей изоморфизма ионов U и Th является необходимым этапом, предваряющим химическое датирование и позволяющим сделать заключение о моно- или полихронности зерен минералов (сходстве или различии условий и времени кристаллизации

^{*)} Значения изохронного Th/Pb и U/Pb-возраста IV и V оцениваются лишь чисто качественно с достаточно высокой погрешностью и нами не рассматриваются; при этом средне-взвешенное значение возраста VI оценивается в 2047±80 млн. лет (см. табл. 7.1) и согласуется с приведенной выше Th*/Pb-датировкой III.



Рис. 7.11. ThO₂*-PbO- (а) и Th/Pb-U/Pb-данные (б) для монацита 8240

Fig. 7.11. ThO₂^{*} vs. PbO data (a) and Th/Pb vs. U/Pb data (b) for monazite 8240

их различных зон, о возможных искажениях и переустановке U-Th-Pb-системы) с отбраковкой части аналитических данных. Полученные химические датировки минералов, в том числе и биминеральные сопоставлены с известными изотопными данными, отмечено удовлетворительное согласие результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ CONCLUSION

Материалы, изложенные в настоящей работе, расширяют круг сведений о физико-химических свойствах U-Th-содержащих минералов монацитов, уранинитов, торианитов, коффинитов, цирконов из ряда геологических объектов Урала и Сибири – магматических, метаморфических и других типов пород. Основу исследованной коллекции составили кристаллы монацитов из пегматитов Ильменских гор (Южный Урал) и Адуйского гранитного массива (Средний Урал), из гнейсов и гранулитов Тараташского комплекса (Урал), из гнейсов Заангарья Енисейского кряжа, из гранитоидов Первомайского, Джабыкского массива (Урал) и фундамента Западной Сибири и Ямала, из карбонатитоподобных пород Карабашского гипербазитового массива (Южный Урал), из пегматитов Липовского жильного поля (Средний Урал), из кварц-сульфидных жил Пышминско-Ключевского медно-кобальт-золоторудного месторождения (Средний Урал) и из метатерригенных пород Восточно-Воронежской провинции Воронежского кристаллического массива.

В основе исследования – микрозондовый метод анализ локального элементного состава минералов-геохронометров с углубленным вниманием к оценкам содержания U, Th и Pb. Кроме того в работе использовался ряд методов спектроскопии твердого тела – рамановская микроспектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная и эмиссионная спектроскопия и рентгенография; кратко освещены вопросы, связанные с приложением этих методик к исследованию разупорядочения минералов-геохронометров. Сущность и возможности использования этих достаточно специализированных методов и подходов еще малоизвестны среди специалистов по материаловедению минералов-геохронометров. Вследствие этого авторы ставили перед собой задачу по отработке приемов работы с минералами и ознакомлению широких кругов специалистов-геохронологов с возможностями применения данных методик к изучению процессов авторадиационной деструкции минералов-геохронометров на примере проб из ряда эталонных геологических объектов Урала.

Кратко суммируя полученные результаты, отметим следующее.

1. На основе анализа публикаций в области химического датирования U-Th-содержащих минералов сформулированы три основные группы проблем в этой области: первая связана с развитием методов микрозондового анализа (его аппаратурной реализацией, выбором стандартов и др.) и совершенствованием процедуры химического датирования минералов; вторая с анализом фундаментальных вопросов материаловедения природных оксидных, силикатных и фосфатных минералов-геохронометров, включающих экспериментальное и теоретическое исследование на микро- и наноуровне их кристаллохимии и физики радиационно-термических эффектов как основы для обоснования и геологической интерпретации датировок; третья – с выполнением систематических прикладных работ по химическому микрозондовому датированию U-Th-содержащих минералов из различных геологических объектов Урала и Сибири.

2. Рассмотрены вопросы геохронологической изученности геологических объектов Урала; обоснован вывод об актуальности проведения работ в новом для уральских объектов направлении – химической геохронологии; кратко рассмотрены вопросы геологии этих объектов, прведен анализ петрологических, геохимических и изотопных геохронологических данных по пегматитам Ильменских гор и «самоцветной полосе» восточного склона Среднего Урала, верхнепалеозойским гранитоидам, Ильмено-

Вишневогорскому метаморфическому комплексу, интрузивным комплексам кристаллического фундамента Западной Сибири, метасоматическим породам и рудам Пышминско-Ключевского, Шабровского тальк-магнезитового месторождения и др.

3. Рассмотрена методика микрозондового анализа U-Th-содержащих минералов, включающая получение и анализ энергодисперсионных спектров, BSE-изображений минералов, а также карт распределения элементов; качественный и количественный анализ состава минералов с выбором аналитических линий, СО, условий измерения, учетом фона, коррекцией содержания и наложения пиков, с выбором времени измерения элементов и оценкой погрешности их определения. Аналитическая методика опробована на минералах – монаците, уранините, торите, торианите и коффините; показано, что использование методики позволяет снизить погрешности определения содержания элементов U, Th, Pb и повысить воспроизводимость данных при их микрозондовом анализе.

4. Выполнено исследование кристаллохимии, радиационного разупорядочения и проблемы замкнутости U-Th-Pb-системы монацитов, уранинита, торита, торианита, коффинита и циркона на примере проб из ряда геологических объектов Урала и Сибири. Показано, что изучение состава, зональности, изоморфизма и спектроскопических свойств минералов – необходимые этапы, предшествующие химическому датирования минерала и создающие некую эмпирическую основу для выявления возрастной гетерогенности (полихронности) зерен; в ряде случаев они позволяют также констатировать факт его вторичных преобразований.

5. Проведено компьютерное моделирование атомной и электронной структуры U-Thсодержащих минералов, выполнены расчеты степени их радиационного повреждения неэмпирическим спин-поляризованным нерелятивистским методом Хα-дискретного варьирования и методами полуэмпирического структурного моделирования.

6. Проведено обоснование новых подходов и совершенствование обсчета аналитических геохронологических данных на основе исследования временной эволюции модельной U-Th-Pbсистемы: разработана методология и созданы программные продукты для выполнения вычислительного эксперимента по моделированию системы и расчета значений ее Th-Pb- и U-Pbвозраста; выполнен большой объем расчетных экспериментов, моделирующих датирование минералов; изучено влияние на датировку различных параметров конкордантной системы (U-Th-состава, соотношения содержаний U и Th, возраста, дисперсии содержаний U и Th, статистики выборки данных, погрешности определения элементов), а также наличия нерадиогенного Рb и потерь радиогенного, суперпозиции нескольких разновозрастных данных; предложены рекомендации для повышения объективности анализа с возможностью отбраковки недостоверных результатов, сформулированы условия, при которых могут быть получены корректные возрастные определения.

7. На основе усовершенствованной методики микрозондового анализа выполнены исследования локального состава и проведены химические датировки U-Th-содержащих минералов сосушествующих уранинита, торита, торианита, коффинита и монацита из ряда уральских и сибирских геологических объектов. Для повышения корректности возрастных определений проведено сопоставление значений точечного возраста, полученных по локальному содержанию Th, U и Pb, с данными трех изохронных Th*/Pb-, Th/Pb- и U/Pb-методов расчета, основанных на определении возраста регрессионным методом по всей совокупности аналитических точек. Показано, что детальное исследование текстуры микрокристаллов, их состава, химической гетерогенности, особенностей изоморфизма ионов U и Th является необходимым этапом химического датирования, позволяющим делать предварительные заключения о сходстве или различии условий и времени кристаллизации различных зон минерала, о возможных искажениях (переустановке) его U-Th-Pb-системы под действием внешних воздействий с возможной отбраковкой части аналитических данных для повышения корректности определения возраста. Полученные химические датировки минералов, в том числе и биминеральные сопоставлены с известными изотопными данными, отмечено удовлетворительное согласие результатов двух методик.

8. Метод химического датирования, ставший в настоящее время уже классическим, и сегодня не утратил своей привлекательности на фоне широко используемых изотопных подходов. Это связано как с использованием современных микрозондов высокой чувствительности для анализа минералов, так и сопоставительных схем расчета химического возраста, в том числе и изохронного для нескольких минералов с существенно различным U-Th-составом на основе использования современных программных продуктов, а также детального анализа кристаллохимических особенностей зерен и степени сохранности их U-Th-Pb-системы. Основные достоинства метода – экспрессность, высокая локальность, низкая стоимость единичного анализа минерала очевидны. Достаточно перспективным представляется его использование для датирования монацитов и ряда других минералов из молодых (с возрастом 100 млн. лет и ниже) пород альпийской складчатости. Актуальны работы по корректному датированию древних минералов с низким содержанием U и Th, таких как ксенотим, циркон и др., при этом важным представляется прогнозирование процесса их авторадиационной деструкции и возможных U-Th-Pb-потерь на основе экспериментальных и теоретических исследований их кристаллохимии и спектроскопических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА LITERATURE

Азовскова О.Б., Зинькова Е.А., Левин В.Я. Монацитовая минерализация юго-западной части Сысертского блока (Средний Урал). Минералогия Урала-2007 // Материалы V Всероссиского совещания. Миасс-Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С. 99–102.

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

Андросенко П.А., Белоусов В.И., Коньков А.В., Царина А.Г. Современный статус комплекса программ BRAND // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2006. Вып. 1. С. 74–84.

Анималу А. Квантовая теория кристаллических твердых тел. М.: Мир, 1981. 574 с.

Белов В.В. Монацит из района Вишневых гор // Записки ВМО, 1937. Ч. 66. № 4. С. 648–650.

Бибикова Е.В., Богданова С.В., Постников А.В., Попова Л.П. и др. Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракрустальных пород и гранитоидов // Стратиграфия и геологическая корреляция, 2009. № 6. С. 3–16.

Богомолова Л.К. Жильное поле Ильменских гор // Путеводитель геологической экскурсии Вишневые горы – Карабаш – Ильменские горы, 1961. С. 42–54.

Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2004. 384 с.

Быковский Ю.А., Неволин В.Н. Лазерная массспектрометрия. М.: Энергоатомиздат, 1985. 128 с.

Вахрушева Н.В., Шагалов Е.С, Ерохин Ю.В., Суставов С.Г. Монацит-(Се) из гранитных пегматитов жилы Южная (Адуйское пегматитовое поле) // Вестник УрО РМО, Екатеринбург: УГГГА, 2004. № 3. С. 5–9.

Вертушков Г.Н. Мурзинско-Адуйские пегматитовые копи // Минералогия Урала, 1954. Т. 1. С. 116–135.

Вест А. Химия твердого тела. Теория и приложения. Часть 1. М.: Мир, 1988. 558 с.

Вертц Дж., Болтон Дж. Теория и практические применения метода ЭПР. М.: Мир, 1975. 548 с.

Виноградов В.И., Щербаков С.А., Горожанин В.М., Гольцман Ю.В., Буякайте М.И. Возраст метаморфитов Восточно-уральского поднятия: Sm-Nd и Rb-Sr-изотопное датирование // Доклады АН, 2000. Т. 371. № 6. С. 784–787.

Владимирова М.Е. Возраст минералов Ильменских гор по радиоактивным данным // Труды Радиевого ин-та АН СССР, 1957. Вып. 5. С. 139–166.

Вотяков С.Л., Адамович Н.Н., Главатских С.П. Особенности лазерной абляции минералов как основа для разработки методики их локального химического анализа // Ежегодник-2009. Труды ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2010. Вып 157. С. 310–316.

Вотяков С.Л., Быков В.Н., Борисов Д.Р., Кориневская Г.Г., Краснобаев А.А. О влиянии метамиктного состояния цирконов на их колебательные спектры, лазеро- и ренгенолюминесценцию // Уральский минералогический сборник. Миасс, 2000. № 10. С. 201–212.

Вотяков С.Л., Быков В.Н., Борисов Д.Р., Уйманова Е.Ю., Краснобаев А.А. О влиянии метамиктного состояния цирконов на их колебательные спектры лазеро- и рентгенолюминесценции // Уральский минералогический сборник. Миасс, 1995. № 4. С. 65–72.

Вотяков С.Л., Иванов И.П., Краснобаев А.А., Крохалев В.Ю., Коржинская В.С. Спектроскопические и люминесцентные свойства ортосиликата циркония, выращенного гидротермальным методом // Неорг. Матер., 1986. Т. 22. С. 281–286.

Вотяков С.Л., Иванов К.С., Хиллер В.В., Бочкарев В.С., Ерохин Ю.В. Химическое микрозондовое Th-U-Pb датирование монацита и уранинита из гранитов фундамента Ямала // Доклады АН, 2011б. Т. 439. № 2. С. 244–247.

Вотяков С.Л., Хиллер В.В., Поротников А.В., Щапова Ю.В. О погрешности определения возраста и воспроизводимости данных при химическом датировании минералов-концентраторов радиоактивных элементов // Ежегодник-2009. Труды ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2010б. Вып. 157. С. 300–320. Вотяков С.Л., Хиллер В.В., Щапова Ю.В. Особенности состава и химическое микрозондовое датирование U-Th-содержащих минералов. Часть 1. Монациты ряда геологических объектов Урала и Сибири // Записки РМО, 2012. Принято в печать.

Вотяков С.Л., Хиллер В.В., Щапова Ю.В., Поротников А.В. Моделирование временной эволюции U-Th-Pb-системы как основа для химического микрозондового датирования минералов-концентраторов урана и тория // Доклады АН, 2011а. Т. 437. № 4. С. 526–529.

Вотяков С.Л., Хиллер В.В., Щапова Ю.В., Поротников А.В. Химическое электронно-зондовое датирование минералов-концентраторов радиоактивных элементов: методические аспекты // Литосфера, 2010а. № 4. С. 94–115.

Гафт М.Л., Рогожин А.А., Рассулов В.А., Жукова В.А. Многоцентровый характер желтой фотолюминесценции циркона // Минералогический журнал, 1987. Т. 9. № 6. С. 63–67.

Герасимов В.Н., Доливо-Добровольская Е.М., Каменцев И.Е., Кондратьева В.В., Косой А.Л., Лесюк Г.И., Рождественская И.В., Строганов Е.В., Филатов С.К., Франк-Каменецкая О.В. Руководство по рентгеновскому исследованию минералов / Под ред. В.А. Франк-Каменецкого. Л.: Недра, 1975. 399 с.

Герасимов В.Ю., Савко К.А. Геоспидометрия и температурная эволюция гранат-кордиеритовых метапелитов Воронежского кристаллического массива // Петрология, 1995. Т. 3. № 6. С. 563–577.

Горобец Б.С., Рогожин А.А. Спектры люминесценции минералов. Справочник. М.: РИЦ ВИМС «Минеральное сырье». 2001. 316 с.

Грабежев А.И., Краснобаев А.А. U-Pb возраст и изотопно-геохимическая характеристика Томинско-Березняковского рудного поля (Южный Урал) // Литосфера, 2009. № 2. С. 14–27.

Губанов В.А., Курмаев Э.З., Ивановский А.Л. Квантовая химия твердого тела. М.: Наука, 1984. 304 с.

Дунаев В.А., Краснобаев А.А. Об абсолютном возрасте пород Ильменских гор // Ильменогорский комплекс магматических и метаморфических пород, 1971. С. 148–157.

Емлин Э.Ф., Вахрушева Н.В., Кайнов В.И. Самоцветная полоса Урала. Режевской природноминералогический заказник. Путеводитель. Екатеринбург–Реж, 2002. 160 с.

Еремин Н.Н., Урусов В.С. Разработка и усовершенствование методов атомистического компьютерного моделирования твердых растворов замещения // Сборник «Проблемы кристаллологии». М.: ГЕОС, 2009. Вып. 6. С. 29–83. **Еремин Н.Н., Деянов Р.З., Урусов В.С.** Выбор сверхячейки с оптимальной атомной конфигурацией при моделировании неупорядоченных твердых растворов // Физика и химия стекла, 2008. Т. 34. № 1. С. 9–18.

Еремин Н.Н., Урусов В.С. Разработка и усовершенствование методов атомистического компьютерного моделирования твердых растворов замещения // Проблемы кристаллологии. Вып. 6. М.: ГЕОС, 2009. С. 29–83.

Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Торианит из золотоносных карбонатных пород Карабашского гипербазитового массива // Уральская минералогическая школа – 2009. Материалы Всероссийской научной конференции. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009а. С. 98–100.

Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Монацит из слюдитов Шабровского рудного поля // Онтогения минералов и её значение для решения геологических прикладных и научных задач. Годичное собрание РМО. СПб: СПбГГИ, 2009б. С. 213–215.

Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Захаров А.В. Уранинит и коффинит из гранитных пегматитов Липовского жильного поля (Средний Урал) // Вестник УрО РМО. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010а. № 7. С. 58–64.

Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Иванов К.С. Торит из гранитоидов фундамента Западной Сибири // Тезисы докладов XI Съезда РМО. СПб: СПбГГИ, 2010б. С. 105–107.

Еськова Е.М. К геохимии Nb и Ta в массивах нефелиновых сиенитов Вишневых гор // Геохимия, 1959. № 2. С. 130–139.

Ефимов А.А., Ронкин Ю.Л., Матуков Д.И. Новые U–Pb (SHRIMP-II) – данные по циркону из щелочных тылаитов Косьвинского камня: изотопный возраст горячего меланжа Платиноносного пояса Урала // Доклады АН, 2008. Т. 423. № 2. С. 243–247.

Заварицкий А.Н. Геологический и петрографический очерк Ильменского минералогического заповедника и его копей. М.: Изд. Главн. Управл. по заповедникам. 1939. 318 с.

Замятин Д.А., Щапова Ю.В., Вотяков С.Л., Еремин Н.Н, Урусов В.С. Структура и термодинамические свойства твердых растворов циркон – коффинит по данным полуэмпирического атомистического моделирования // Ежегодник-2008. Труды ИГГ УрО РАН, 2009. Вып. 156. С. 303–311.

Зацепин А.Ф., Кортов В.С., Щапова Ю.В. Электронная структура стеклообразных фосфатов со сложным строением кислородной подрешетки // ФТТ, 1997. № 8. С. 1366–1372. Зигбан К., Нордлинг К., Фальман А., Нордберг Р., Хамрин К., Хедман Я., Йоханссон Г., Бергмарк Т., Карлссон С., Литндгрен И., Линдберг Б. Электронная спектроскопия. М.: Мир, 1971. 494 с.

Иванов В.Ю., Шлыгин Е.С., Пустоваров В.А., Мазуренко В.В., Чепкасова А.В., Шульгин Б.В. Собственная люминесценция редкоземельных силикатов // ФТТ, 2008. № 9. С. 1628–1684.

Иванов К.С. Основные черты геологической истории (1.6–0.2 млрд. лет) и строения Урала. Диссертация доктора геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1998. 252 с.

Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Федоров Ю.Н., Хиллер В.В., Пономарев В.С. Изотопное и химическое U-Pb-датирование гранитоидов Западно-Сибирского мегабассейна // Доклады АН, 2010а. Т. 433. № 5. С. 671–674.

Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Возраст гранитоидов фундамента Восточно-Шебурской площади (Западная Сибирь) // Уральская минералогическая школа – 2010. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010б. С. 76–79.

Ивановский А.Л., Швейкин Г.П. Квантовая химия в материаловедении. Неметаллические тугоплавкие соединения и неметаллическая керамика. Екатеринбург: Изд-во Екатеринбург, 2000. 179 с.

Келли Б. Радиационное повреждение твердых тел. М.: Атомиздат, 1970. 240 с.

Клява Я.Г. ЭПР-спектроскопия неупорядоченных твердых тел. Рига: Зинатне, 1988. 320 с.

Конилов А.Н., Романенко И.М., Филиппов М.Н., Петров Д.Б. Возможности геохронологии монацитов Th-U-Pb методом по данным рентгеноспектрального микроанализа // Тезисы докладов Всероссийской конференции Аналитика России-2004. Москва, 2004. С. 265–266.

Кориш Е.Х. U-Th-Pb датирование монацитов из чёрных сланцев КМА (Курская магнитная аномалия) по результатам рентгеноспектрального микроанализа // Материалы VI Всероссийской конференции по рентгеноспектральному анализу. Краснодар: КГУ, 2008. С. 156.

Кориш Е.Х., Пилюгин С.М. Редкоземельные фосфаты, силикаты, карбонаты в высокоуглеродистых сланцах Тим-Ястребовской структуры (Воронежский кристаллический массив) и датирование возраста метаморфизма по монацитам «In situ» // Материалы XIII международного научного симпозиума «Проблемы геологии и освоения недр». Томск, 2009. С. 73–75.

Коровко А.В., Калеганов Б.А. Новые данные по абсолютному возрасту интрузивных пород Мурзинс-кой и Режевской зон (Средний Урал) // Ежегодник-1988. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 1989. С. 112–113.

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

Краснобаев А.А., Беа Ф., Ферштатер Г.Б., Монтеро П. Полихронность цирконов габброидов Платиноносного пояса Урала и проблема докембрия Тагильского мегасинклинория // Доклады АН, 2007. Т. 413. № 6. С. 785–790.

Краснобаев А.А., Беа Ф., Ферштатер Г.Б., Монтеро П. Цирконовая геохронология Мурзинского метаморфического комплекса (Средний Урал) // Доклады АН, 2005. Т. 404. № 3. С. 407–410.

Краснобаев А.А., Беа Ф., Ферштатер Г.Б., Монтеро П. Цирконы и проблема докембрия в Главном гранитном поясе Урала (Кожубаевский метаморфический комплекс) // Доклады АН, 2006. Т. 408. № 3. С. 370–374.

Краснобаев А.А., Вотяков С.Л., Крохалев В.Я. Спектроскопия цирконов (свойства, геологические приложения). М.: Наука, 1988. 150 с.

Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Ларионов А.Н., Нехорошева А.Г., Бережная Н.Г. Полигеннополихронная цирконология и проблема возраста Барангуловского габброгранитного комплекса // Доклады АН, 2007. Т. 416. № 2. С. 241–246.

Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Родионов Н.В., Нехорошева А.Г., Кисеева К.Н. Ахмеровский гранитный массив – представитель мезопротерозойского интрузивного магматизма на Южном Урале // Доклады АН, 2008. Т. 418. № 2. С. 241–246.

Краснобаев А.А., Кузнецов Г.П., Давыдов В.А. Возраст и происхождение гнейсов Челябинского комплекса // Доклады АН, 1998. Т. 360. № 3. С. 386–389.

Краснобаев А.А., Русин А.И., Русин И.А. Цирконология лерцолитов (массив Узянский Крака, Южный Урал) // Доклады АН, 2009. Т. 425. № 5. С. 656–659.

Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Монтеро П. Полигенные цирконы Адуйского батолита (Средний Урал) // Доклады АН, 2006. Т. 410. № 2. С. 244–250.

Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Бушарина С.В. Цирконология дунитов Южного Урала (Сахаринский, Восточно-Хабарнинский массивы) // Доклады АН, 2009. Т. 426. № 4. С. 523–527.

Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Степанов А.И., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. Петрология и рубидий-стронциевая геохронология Бердяушского массива рапакиви (южный Урал) // Известия АН СССР. Серия геологическая, 1981. № 1. С. 21–37.

Краснобаев А.А., Чередниченко Н.В. Цирконовая геохронология метаморфических пород Марииновского комплекса (Южный Урал) // Доклады АН, 2005. Т. 404. № 4. С. 532–536. Краснобаев А.А., Чувашов Б.И., Бушарина С.В. Цирконология гранит-порфиров восточного склона Среднего Урала // Доклады АН, 2008. Т. 422. № 3. С. 354–358.

Кривоглаз М.А. Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах. Киев: Наукова думка, 1983. 408 с.

Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Горохов И.М., Каурова О.К., Крупенин М.Т., Маслов А.В. Sr-изотопная характеристика и Pb-Pb-возраст известняков бакальской свиты (типовой разрез нижнего рифея, Южный Урал) // Доклады АН, 2003. Т. 391. № 6. С. 794–798.

Куклин Н.В., Бондарева Т.И., Мусатова Э.И. Результаты обобщения геологических материалов по месторождениям цветных и редких металлов Урала. Ч. VIII. Редкие металлы (Be, Li, Rb, Cs, Nb, Ta, Zr, TR). Свердловск: УГУ, 1956.

Куклин Н.В., Бондарева Т.К, Олерская Р.С, Сазонов В.Н. Карта пегматитовых полей (гранитного типа) Урала в масштабе 1:1000000 (на территории деятельности Уральского геологического управления). Свердловск: УГУ, 1960.

Курмаев Э.З., Черкашенко В.М., Финкельштейн Л.Д. Рентгеновские спектры твердых тел. М.: Наука, 1988. 175 с.

Лейман К. Взаимодействие излучения с твердым телом и образование элементарных дефектов. М.: Атомиздат, 1979. 296 с.

Ленных В.И. Метаморфические комплексы западного склона Урала // Доордовикская история Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. С. 3–40.

Лиханов И.И., Козлов П.С., Полянский О.П., Попов Н.В., Ревердатто В.В., Травин А.В., Вершинин А.Е. Неопротерозойский возраст коллизионного метаморфизма в Заангарье Енисейского кряжа (по ⁴⁰Ar-³⁹Ar данным) // Доклады АН, 2007. Т. 412. № 6. С. 799–803.

Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Попов Н.П. Кианит-силлиманитовый метаморфизм докембрийских комплексов Заангарья Енисейского кряжа // Геология и геофизика, 2009. Т. 50. № 12. С. 1335–1356.

Львов Б.К. Петрология, минералогия и геохимия гранитоидов Кочкарского района (Ю. Урал). Л.: Изд-во ЛГУ, 1965. 164 с.

Ляхович В.В. Акцессорные минералы горных пород. М.: Недра, 1979. 296 с.

Малич К.Н., Ефимов А.А., Ронкин Ю.Л. Архейский U–Pb-изотопный возраст циркона дунитов Нижне-Тагильского массива (Платиноносный пояс Урала) // Доклады АН, 2009. Т. 427. № 1. С. 101–105.

Мурзин В.В. Типы золотого оруденения в альпинотипных гипербазитах Урала и проблемы их генезиса // Металлогения древних и современных океанов – 2009. Миасс: ИМин УрО РАН, 2009. С. 119–123.

Мурзин В.В., Варламов Д.А., Попов В.А., Ерохин Ю.В., Рахов Е.В. Минералого-геохимические особенности золото-редкометально-редкоземельной минерализации хлорит-карбонатных пород Карабашского массива гипербазитов (Южный Урал) // Уральский минералогический сборник. Миасс: ИМин УрО РАН, 2005. № 13. С. 123–145.

Нефедов В.И., Вовна В.И. Электронная структура химических соединений. М.: Наука, 1987. 347 с.

Осипова Т.А., Горожанин В.М., Гольцман Ю.В., Виноградов В.И., Буякайте М.И. Sm–Nd- и Rb–Sr-датирование высокобарических метагранитов в Восточно-Уральском поднятии (Южный Урал) // Доклады АН, 2006. Т. 406. № 4. С. 528–532.

Осипова Т.А., Каллистов Г.А., Травин А.В., Дриль С.И. Первые данные о мезозойских гранитоидах в составе Челябинского плутонга (Южный Урал) // Литосфера, 2010. № 4. С. 163–169.

Осипова Т.А., Тевелев Ал.В., Попов В.С., Беляцкий Б.В. Sm-Nd и Rb-Sr возраст габброидных пород в Джабыкском батолите (Южный Урал) // Доклады АН, 2008. Т. 418. № 5. С. 670–675.

Петров Г.А., Ронкин Ю.Л., Маегов В.И., Тристан Н.И., Маслов А.В., Пушкарев Е.В., Лепихина О.П. Новые данные о составе и возрасте комплексов основания Тагильской островодужной системы // Доклады АН, 2010. Т. 432. № 4. С. 499–505.

Петров Д.Б. Рентгеноспектральное определение тория, урана и свинца в акцессорных минералах // Автореф. дисс. канд. техн. наук. М.: ГТУ МИСИ, 2007. 22 с.

Пилюгин С.М., Муханова А.А. U-Th-Pb датирование монацитов из метапелитовых гранулитов Воронежского кристаллического массива по результатам рентгеноспектрального микроанализа // Материалы VI Всероссийской конференции по рентгеноспектральному анализу. Краснодар: КГУ, 2008. С. 171.

Поляков В.О., Баженова Л.Ф. К минералогии акцессорных редкоземельных фосфатов Ильменских гор // Минералогические исследования эндогенных месторождений Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982. С. 37–43.

Попов В.А., Попова В.И. Минералогия пегматитов Ильменских гор. Минералогический аьманах. Вып. 9. М.: Экост, 2006. 151 с.

Попов В.С., Беляцкий Б.В. Sm-Nd-возраст дунитклинопироксенит-тылаитовой ассоциации Кытлымского массива, Платиноносный пояс Урала // Доклады АН, 2006. Т. 409. № 1. С. 104–109. Попов В.С., Богатов В.И., Журавлев Д.З. Источники гранитных магм и формирование земной коры Среднего и Южного Урала: Sm–Nd и Rb–Sr изотопные данные // Петрология, 2002. Т. 10. № 4. С. 389–410.

Попов В.С., Богатов В.И., Петрова А.Ю., Беляцкий Б.В. Возраст и возможные источники гранитов Мурзинско-Адуйского блока, Средний Урал: Rb-Sr и Sm-Nd изотопные данные // Литос-фера, 2003. № 4. С. 3–18.

Попов В.С., Тевелев Ал.В., Беляцкий Б.В., Богатов В.И., Осипова Т.А. Изотопный Rb-Sr возраст Неплюевского плутона и близлежащих интрузивных тел (Южный Урал) // Доклады АН, 2003. Т. 391. № 1. С. 89–94.

Попова В.И., Губин В.А., Муфтахов В.А., Чурин Е.И. Морфология, состав и парагенезисымонацита в пегматитах адуйского массива // Материалы V Всероссийского совещания. Миасс-Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С. 250–252.

Попова В.И., Губин В.А., Попов В.А., Баженова Л.Ф. К характеристике некоторых акцессорных минералов пегматитов Зенковского и Адуйского гранитных массивов // Материалы к минералогии рудных районов Урала. Свердловск: УрО РАН, 1988. С. 67–73.

Попова В.И., Попов В.А., Канонеров А.А. Мурзинка: Алабашское пегматитовое поле. Минералогический альманах. Т. 5. М.: Экост, 2002. 128 с.

Попова В.И., Попов В.А., Поляков В.О., Щербакова Е.П. Пегматиты Ильменских гор. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982. 48 с.

Попова В.И., Хиллер В.В., Ерохин Ю.В., Попов В.А. Монациты поздних гранитных пегматитов Ильменских гор: химическое датирование возраста зонально-секториальных кристаллов // Новые данные о минералах. М., 2010. № 45. С. 72–78.

Попова В.И., Чурин Е.И. Зональность и секториальность состава монацита-(Се) гранитных пегматитов Среднего и Южного Урала // Записки РМО, 2009. Ч. 138. Вып. 5. С. 77–90.

Прибавкин С.В., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Пушкарев Е.В. Возрастные отношения Шабровского гранитного массива и одноименного месторождения тальк-магнезитового камня: данные U-Pb и К-Аг-датирования // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Пермь: ПермГУ, 2010. Вып. 13. С. 149–154.

Прибавкин С.В., Ронкин Ю.Л., Травин А.В., Пономарчук В.А. Новые данные о возрасте лампроит-лампрофирового магматизма Урала // Доклады АН, 2007. Т. 412. № 5. С. 682–684. Пучков В.Н., Розен О.М., Журавлев Д.З., Бибикова Е.В. Контаминация вулканитов силура Тагильской синформы докембрийскими цирконами // Доклады АН, 2006. Т. 411. № 6. С. 794–797.

Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии. М.:Мир, 1970. 558 с.

Рассказов С.В., Брандт С.Б., Брантд Н.С., Иванов А.В. Радиоизотопная геология в задачах и примерах. Новосибирск: Гео, 2005. 268 с.

Романенко И.М., Муханова А.А., Петров Д.Б, Конилов А.Н. Методика датирования минералов горных пород и руд с помощью рентгеноспектрального микроанализа // Материалы VI Всероссийской конференции по рентгеноспектральному анализу. Краснодар: КГУ, 2008. С. 175.

Ронкин Ю.Л., Гражданкин Д.В., Маслов А.В., Мизнес Г.А., Матуков Д.И., Крупенин М.Т., Петров Г.А., Лепихина О.П., Корнилова А.Ю. U-Pb (SHRIMP-II)-возраст цирконов из пепловых туфов чернокаменской свиты сылвицкой серии венда (Средний Урал) // Доклады АН, 2006. Т. 411. № 3. С. 354–359.

Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Казак А.П., Матуков Д.И., Лепихина О.П. Граница нижнего и среднего рифея на Южном Урале: новые изотопные U–Pb SHRIMP-II ограничения // Доклады АН, 2007. Т. 415. № 3. С. 370–376.

Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Петров Г.А., Матуков Д.И., Суслов С.Б., Синдерн С., Крамм У., Лепихина О.П. In situ U–Pb (Shrimp)-датирование цирконов граносиенитов Троицкого массива (Кваркушско-Каменногорский мегантиклинорий, Средний Урал) // Доклады АН, 2007. Т. 412. № 1. С. 87–92.

Рыжков М.В., Доценко В.П., Батезат О.Ю., Ефрюшина Н.П., Губанов В.А. Электронное строение фтороборатов, активированных редкоземельными элементами // ЖСХ, 1991. Т. 32. № 5. С. 9–16.

Рыжков М.В., Доценко В.П., Ефрюшина Н.П., Губанов В.А. Оптические свойства и электронное строение европия и самария в флюоборите // Оптика и спектроскопия, 1991. Т. 70. Вып. 2. С. 466–468.

Рыжков М.В. Новый метод вычисления эффективных зарядов на атомах в молекулах, кластерах и твердых телах // ЖСХ, 1998. Т. 39. № 6. С. 1134–1139.

Рыжков М.В., Ивановский А.Л., Поротников А.В., Щапова Ю.В., Вотяков С.Л. Электронное строение примесного центра урана в цирконе // ЖСХ, 2008. Т. 49. № 2. С. 215–220.

Савко К.А. Зональность минералов и прогрессивные метаморфические реакции в среднетемпературных метапелитах воронцовской серии (Воронежский кристаллический массив) // Известия АН СССР, сер. геол., 1990. № 11. С. 79–87. Савко К.А. Низкотемпературные породы в метаморфической зональности воронцовской серии ВКМ // Геология и геофизика, 1994. № 3. С. 50–59.

Савко К.А., Бочаров В.Л. Петрохимия габбродолеритов восточной части Воронежского кристаллического массива // Известия вузов, геология и разведка, 1988. № 7. С. 42–51.

Савко К.А., Герасимов Ю.В. Петрология и геоспидометрия метаморфических пород востока Воронежского кристаллического массива // Труды НИИГ ВГУ, Воронеж, 2002. Вып. 8. 131 с.

Савко К.А, Кориш Е.Х., Пилюгин С.М. Редкоземельная минерализация в чёрных сланцах Тим-Ястребовской структуры (Воронежский кристаллический массив) и датирование возраста метаморфизма по монацитам «In situ» // Вестник ВГУ, серия «Геология», 2008. № 1. С. 47–64.

Савко К.А., Самсонов А.В., Базиков Н.С. Метатерригенные породы воронцовской серии воронежского кристаллического массива: геохимия, особенности формирования и источники сноса // Вестник ВГУ, серия «Геология», 2011. № 1. С. 70–94.

Савко К.А., Самсонов А.В., Пилюгин С.М., Сальникова Е.Б., Артеменко Г.В. Новые данные о возрасте гранулитового метаморфизма Курско-Бесединского блока Воронежского кристаллического массива // Вестник ВГУ, серия «Геология», 2009. № 1. С. 84–93.

Силинь А.Р., Трухин А.Н. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO₂. Рига: Зинатне, 1985. 244 с.

Смирнов В.Н., Иванов К.С., Краснобаев А.А., Бушляков И.Н., Калеганов Б.А. Результаты К-Аг датирования Адуйского гранитного массива (восточный склон Среднего Урала) // Литосфера, 2006. № 2. С. 148–156.

Смирнов В.Н., Иванов К.С., Ронкин Ю.Л. Результаты К-Аг и Rb-Sr датирования Малышевского лейкогранитного массива (восточный склон Среднего Урала) // Доклады АН, 2005. Т. 405. № 1. С. 108–112.

Соболь И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1985. 76 с.

Соболев А.С. Развитие магниторезонансных методов исследования и контроля парамагнитных гетерогенных объектов // Тезисы Международной научной конференции по спектроскопии и кристаллохимии минералов. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С. 100–103.

Солнцев В.П., Щербакова М.Я., Дворников Э.В. Радикалы SiO₂⁻, SiO₃⁻ и SiO₄⁻⁵⁻ в структуре ZrSiO₄ по данным ЭПР // ЖСХ, 1974. Т. 15. № 2. С. 217–221.

Степанов А.Л., Валеев В.Ф., Нуждин В.И. Профили распределения атомов переходных металлов, имплантированных в матрицу диоксида титана при средних энергиях // Ж. технической физики, 2008. Т. 78. № 8. С. 112–115.

Степанов А.Л., Жихарев В.А., Хайбуллин И.Б. Особенности профилей распределения по глубине ионов металлов, имплантированных в диэлектрик при низких энергиях // ФТТ, 2001. Т. 43. № 4. С. 733–738.

Таран М.Н. Исследование природы окраски ювелирных цирконов // Вопросы геохимии, минералогии, петрологии и рудообразования. Киев: Наукова Думка, 1979. С. 50–56.

Таращан А. Люминесценция минералов. Киев: Наукова Думка, 1978. 296 с.

Тевелев А.В., Кошелева И.А., Попов В.С., Кузнецов И.Е., Осипова Т.А., Правикова Н.В., Вострецова Е.С., Густова А.С. Палеозоиды зоны сочленения Восточного Урала и Зауралья. Труды лаб. Геологии складчатых поясов МГУ (вып. 4). М.: Геологический ф-т МГУ, 2006. 300 с.

Тихомирова Н.Н., Воеводский В.В. Метод анализа формы линий электронного парамагнитного резонанса // Оптика и спектроскопия, 1959. Т. 7. № 6. С. 829–832.

Уилкинсон Г.Р. Спектры комбинационного рассеяния ионных, ковалентных и металлических кристаллов. В кн.: Применение спектров комбинационного рассеяния. Пер. с англ. / Под ред. А. Андерсона. М.: Мир, 1977. С. 408–578.

Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. 632 с.

Урусов В.С., Еремин Н.Н. Компьютерное моделирование структуры и свойств кристаллов – современные достижения и возможности // Сборник «Проблемы кристаллологии». М.: ГЕОС, 1999. Вып. 5. С. 228–266.

Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия. М.: МГУ, 1987. 275 с.

Урусов В.С., Таусон В.Л., Акимов В.В. Геохимия твердого тела. М.: ГЕОС, 1997. 500 с.

Ферштатер Г.Б. Структурно-формационная зональность Урала и магматизм // Геотектоника, 1992. № 6. С. 3–17.

Ферштатер Г.Б., Гердес А., Смирнов В.Н. Возраст и история формирования Адуйского гранитного массива // Ежегодник-2002. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2003. С. 146–150. Ферштатер Г.Б., Краснобаев А.А., Беа Ф., Монтеро П., Левин В.Я., Холоднов В.В. Изотопногеохимические особенности и возраст цирконов из дунитов уральских массивов Платиноносного типа, петрогенетические следствия // Петрология, 2009. Т. 17. № 5. С. 539–558.

Фишер И.3. Применение метода Монте-Карло в статистической физике // Успехи физических наук, 1959. Т. 69. № 3. С. 349–369.

Фор Г. Основы изотопной геологии / Пер. с англ. И.М. Горохова, Ю.А. Шуколюкова. М.: Мир, 1989. 589 с.

Хиллер. В.В. Количественный химический анализ монацитов на электронно-зондовом микроанализаторе Сатеса SX100 // Ежегодник-2008 г. Труды ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2008. Вып. 156. С. 344–349.

Хиллер В.В. Состав, кристаллохимия, эволюция U-Th-Pb-системы ряда минералов-геохронометров по данным экспериментального исследования и компьютерного моделирования. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. 23 с.

Хиллер В.В., Ерохин Ю.В. Разработка методики анализа монацитов на электронно-зондовом микроанализаторе SX 100 (Cameca) // Материалы Всероссийской научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования». Миасс: ИМин УрО РАН, 2009а. С. 288–290.

Хиллер В.В., Ерохин Ю.В. Химическое датирование уранинита из гранитоидов фундамента Шаимского района (Западная Сибирь) // XVI Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твёрдых тел. Тезисы докладов. Черноголовка: ИПТМ РАН, 2009б. С. 74.

Чернышов Н.М., Баянова Т.Б., Альбеков А.Ю., Левкович Н.В. Новые данные о возрасте габбродолеритовых интрузивов трапповой формации Хоперского мегаблока ВКМ // Доклады АН, 2001. Т. 380. № 5. С. 661–663.

Чернышов Н.М., Пономаренко А.Н., Бартницкий Е.Н. Новые данные о возрасте никеленосных дифференцированных плутонов Воронежского кристаллического массива // Доклады АН УССР, 1990. Сер. Б. № 6. С. 11–19.

Шацкий В.С., Смирнов В.А., Ягоутц Э., Козьменко О.А., Куренков С.А. Новые данные о возрасте эклогитов Полярного Урала // Доклады АН, 2000. Т. 371. № 4. С. 519–523.

Шацкий В.С., Ягоутц Э., Козьменко О.А. Sm-Nd-датирование высокобарического метаморфизма Максютовского комплекса (Южный Урал) // Доклады АН, 1997. Т. 352. № 6. С. 812–815. Шеин И.Р., Банников В.В., Ивановский А.Л. Влияние примесей замещения (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co и Ni) на электронные и магнитные свойства циркона по данным первопринципных расчетов // ФТТ. 2011 – в печати.

Шеин И.Р., Ивановский А.Л. Зонная структура и параметры упругости циркона по данным ab initio расчетов // ЖСХ. 2011 – в печати.

Щапова Ю.В., Вотяков С.Л. Спектроскопические исследования и компьютерное моделирование радиационного разупорядочения и рекристаллизации циркона // Геология Урала и сопредельных территорий. Сборник научных трудов. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2007. 482 с.

Щапова Ю.В., Вотяков С.Л., Вотяков К.С., Ивановский А.Л. Электронная структура и природа собственной окраски кристаллического и слабометамиктизированного циркона (по данным квантовохимических расчетов) // Ежегодник-2004. Труды ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2005. Вып. 152. С. 433–443.

Щапова Ю.В., Вотяков С.Л., Ивановский А.Л. Методические аспекты квантовохимического моделирования электронного строения циркона и кварца как продукта его радиационной метамиктизации // Ежегодник-2003. Труды ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2004. Вып 151. С. 296–306.

Щапова Ю.В., Вотяков С.Л., Кузнецов М.В., Ивановский А.Л. Влияние радиационных дефектов на электронную структуру циркона по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // Ж. структурной химии, 2010. Т. 51. № 4. С. 687–682.

Щапова Ю.В., Вотяков С.Л., Поротников А.В. Локальная структура примесных центров редкоземельных и радиоактивных элементов в цирконе по данным компьютерного моделирования // Ежегодник-2005. Труды ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2006. Вып 153. С. 287–296.

Щапова Ю.В., Замятин Д.А., Вотяков С.Л. Моделирование атомной и электронной структуры радиационных повреждений в цирконе // Материалы международного семинара «Структура и разнообразие минерального мира». Сыктывкар, 2008. С. 51–53.

Щапова Ю.В., Юрьева Э.И., Рыжков М.В., Ивановский А.Л., Быков Н.В., Вотяков С.Л. Квантово-химические расчеты в минералогии: моделирование электронного строения и параметров мессбауэровских спектров. Миасс: Изд-во Института минералогии УрО РАН. 2000. 100 с.

Шардакова Г.Ю., Шагалов Е.С., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Попова О.Ю. Rb-Sr-возраст и геохимия интрузивных гранитоидов Уфалейской зоны (Южный Урал) // Доклады АН, 2005. Т. 405. № 6. С. 799–803. Щипанский А.А., Самсонов А.В., Петрова А.Ю., Ларионова Ю.О. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое // Геотектоника, 2007. № 1. С. 43–70.

Adachi H. Relativistic molecular orbital theory in the Dirac-Slater model // Technol. Reports Osaka Univ., 1977. V. 27 (1364-1393). P. 569–576.

Adelstein N., Mun B.S., Ray H.L., Ross P.N., Neaton J.B., De Jonghe L.C. Structure and electronic properties of cerium orthophosphate: Theory and experiment // Phys. Rev. B., 2011. V. 83. P. 205–214.

Akhtar M.J., Waseem S. Atomistic simulation study of zircon // Chem. Phys. 2001. V. 274. P. 109–120.

Alexandre P., Kyser T.K. Effects of cationic substitutions and alteration in uraninite, and implications for the dating of uranium deposits // Canad. Miner., 2005. V. 43. P. 1005–1017.

Allegre C.J. Isotope Geology. UK: Cambridge University Press, 2008. 512 p.

Anderson E.B., Burakov B.E., Pazukhin E.M. High-uranium zircon from «Chernobyl Lavas» // Radiochim. Acta., 1993. V. 60. P. 149–151.

Asami M., Suzuki K., Grew E.S. Chemical Th-U-total Pb dating by electron microprobe analysis of monazite, xenotime and zircon from the Archean Napier Complex, E. Antarctica: evidence for ultra-hightemperature metamorphism at 2400 Ma // Precam. Res., 2002. V. 114. P. 249–275.

Asami M., Suzuki K., Grew E.S. Monazite and zircon dating by the chemical Th-U-total Pb isochron method (CHIME) from Alasheyev Bight to the Surr Rondane Mountains, Antarctica: a reconnaissance study of the Mozambique Suture in eastern Queen Maud Land // J. Geol., 2005. V. 113. P. 59–82.

Averill F.V., Ellis D.E. An efficient numerical multicenter basis set for molecular orbital calculations: Applications to FeCl_4 J // Chem. Phys., 1977. V. 59. P. 6412–6418.

Balan E., Mauri F., Muller J.-P., Calas G. First principles study of water adsorption on the (100) surface of zircon: Implications for zircon dissolution // Amer. Miner., 2001. V. 86. P. 910–914.

Balan E., Mauri F., Pickard C.J., Farnan I., Calas G. The aperiodic states of zircon: an ab initio molecular dynamics study // Amer. Miner., 2003. V. 88. P. 1769–1777.

Baldwin J.A., Bowring S.A., Williams M.L., Mahan K.H. Geochronological constraints on the evolution of high-pressure felsic granulites from an integrated electron microprobe and ID-TIMS geochemical study // Lithos, 2006. V. 88. P. 173–200. **Barnes J.D., Selverstone J., Sharp Z.D.** Interactions between serpentinite devolatilization, metasomatism and strike-slip strain localization during deep-crustal shearing in the Eastern Alps // J. Metamorphic Geol., 2004. V. 22. P. 283–300.

Barr T.L. Recent advances in X-ray photoelectron spectroscopy studies of oxides // J. Vac. Sci. Technol. A., 1991. V. 9. P. 1793–1805.

Bayer G. Thermal expansion of ABO_4 compounds with zircon and scheelite structures // J. Less. Common Metals, 1972. V. 26. P. 255–262.

Be Mezeme E., Faure M., Cocherie A., Chen Y. In situ chemical dating of tectonothermal events in the French Variscan Belt // Terra Nova, 2005. V. 17. P. 420–426.

Be Mezeme E., Cocherie A., Faure M., Legendre O., Rossi Ph. Electron microprobe monazite geochronology of magmatic events: Examples from Variscan migmatites and granitoids, Massif Central, France // Lithos, 2006. V. 88. P. 276–288.

Bea F. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths; implications for the chemistry of crustal melts // J. Petrol., 1996. V. 37. P. 21–552.

Bea F., Fershtater G.B., Montero P., Smirnov V.N., Molina J.F. Deformation-driven differentiation of granitic magma: The Stepninsk pluton of the Uralides, Russia // Lithos, 2005. V. 81. P. 209–233.

Beall G.W., Boatner L.A., Mullica D.F., Milligan W.O. The Structure of Cerium Orthophosphate, a Synthetic Analogue of Monazite // +Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, 1981.V. 43. P. 101–105.

Begun G.M., Beall G.W., Boatner L.A., Gregor W.J. Raman // J. Spectrosc., 1981. V. 11. 273 p.

Berman R.M. The role of lead and excess oxygen in uraninite // Amer. Miner., 1957. V. 42. P. 705–731.

Berry R.F., Holm O.H., Steele D.A. Chemical U– Th–Pb monazite dating and the Proterozoic history of King Island, southeast Australia // Austral. J. Earth Sci., 2005. V. 52. P. 461–471.

Bhowmik S.K., Sarbadhikari A.B., Spiering B., Raith M.M. Mesoproterozoic Reworking of Palaeoproterozoic Ultrahigh-temperature Granulites in the Central Indian Tectonic Zone and its Implications // J. Petrol., 2005. V. 46. № 6. P. 1085–1119.

Biermeier C., Stuwe K., Foster D.A., Finger F. Thermal evolution of the Redbank thrust system, Australia: geochronological and phase-equilibrium constraints // Tectonics, 2003. V. 22. N. 1. P. 1–23.

Biersack J.P., Eckstein W. Sputtering Studies with the Monte Carlo Program TRIM.SP // J. Phys. D: Appl. Phys., 1984. V. A34. P. 73–94.

Blumenthal W.B. The Chemical Behavior of Zirconium Van Nostrand, Princeton. 1958. P. 201–219.

Boatner L.A. Sinthesis, structure and properties of monazite, pretulite and xenotime // In: Phosphates. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2002. V. 48. P. 87–122.

Boggs K., Kamo S., Moore J., Simony P. A monazite-forming reaction, CHIME U-Pb ages and the choice of background for analyzing Pb // J. Czech Geol. Soc., 2003. V. 48. P. 1–2.

Borisov O.V., Mao X.L., Russo R.E. Effects of crater development on fractionation and signal intensity during laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry // Spectrochimica Acta, 2000. Part B. P. 1693–1704.

Bowles J.F.W. Age dating of individual grains of uraninite in rocks from electron microprobe analyses // Chem. Geol., 1990. V. 83. P. 47–53.

Braun I., Montel J.M., Nicollet C. Electron microprobe dating of monazites from high-grade gneisses and pegmatites of the Kerala Khondalite Belt, southern India // Chem. Geol., 1998. V. 146. P. 65–85.

Bregiroux D., Terra O., Audubert F., Dacheux N., Serin V., Podor R., Bernache-Assollant D. Solid state synthesis of monazite-type compounds containing tetravalent elements // Inorg. Chem., 2007. V. 46. № 24. P. 10372–10382.

Breiter K., Forster H.-J, Skoda R. Extreme P-, Bi-, Nb-, Sc-, U- and F-rich zircon from fractionated perphosphorous granites: the Podlesi granite system, Czech Republic // Lithos, 2006. V. 88. P. 15–34.

Budzyn B., Michalik M., Malata T., Poprawa P. Low temperature metamorphic event recorded in the gneiss and granulite pebbles from the Silesian Unit (Western Outer Carpathians, S. Poland) // Geoph. Res. Abst., 2006. V. 8. 150 p.

Burakov B.E. A study of high-uranium technogeneous zircon (Zr,U)SiO₄ from Chernobyl "lavas" in connection with the problem of creating a crystalline matrix for high-level waste disposal // Proc. Safe Waste, 1993. V. 2. P. 19–33.

Burakov B.E., Anderson E.B., Rovsha V.S., Ushakov S.V., Ewing R.C., Lutze W., Weber W.J. Synthesis of zircon for immobilization of actinides // Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1996. V. 412. P. 33–39.

Burakov B.E., Yagovkina M.A., Zamoryanskaya M.V., Petrova M.A., Domracheva Y.V., Kolesnikova E.V., Nikolaeva L.D., Garbuzov V.M., Kitsay A.A., Zirlin V.A. Behavior of actinide host-phases under self-irradiation: zircon, pyrochlore, monazite and cubic zirconia doped with Pu-238 // Miner. Advanced Mater. I, 2008. P. 209–217.

Burns P.C. The crystal chemistry of uranium. In: Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Uranium: mineralogy, geochemistry and the environment, 1999. V. 38. P. 23–90. **Cameron-Shiman M.** Electron microprobe study of uranium minerals and its application to some Canadian deposits // Unpublished Ph.D. Thesis, Edmonton University, Ont., Dissertation, 1978.

Car R., Parrinello M. Unified approach for molecular dynamics and density-functional theory // Phys. Rev. Lett., 1985. V. 55. P. 2471–2474.

Caruba R., Iacconi P. Les zircons des pegmatites de Narssbrssuk (Groлnland) – L'eau et les groupements OH dans les zircons mйtamictes // Chem. Geol., 1983. V. 38. P. 75–92.

Casillas R., Nagy G., Panto G., Brandle J., Forizs I. Occurrence of Th, U, Y, Zr, and REE-bearing accessory minerals in late-Variscan granitic rocks from the Sierra de Guadarrama (Spain) // Eur. J. Miner., 1995. V. 7. P. 989–1006.

Castaing, R. Application des sondes electroniques Ii une methode d'analyse ponctuelle chimique et cristallographique. Paris University, Paris, France, 1951.

Catlow C.R.A. library: http://www.ri.ac.uk/DFRL/ research pages/resources/Potential database/O/index.html.

Charoy B., Pollard P.J. Albite-rich, silica-depleted metasomatic rocks at Emuford, northeast Queensland: mineralogical, geochemical, and fluid inclusion constraints on hydrothermal evolution and tin mineralization // Econ. Geol., 1989. V. 84. P. 1850–1874.

Cherniak D.J., Pyle J., Rakovan J. Synthesis of REE and Y phosphates by Pb-free flux methods and their utilization as standards for electron microprobe analysis and in design of monazite chemical U-Th-Pb dating protocol // Amer. Miner., 2004. V. 89. P. 1533–1539.

Cherniak D.J., Watson E.B. Diffusion in zircon // Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Eds Hanchar J.M., Hoskin P.W.O. Washington: The Mineralogical Society of America, 2003. V.53, P.113–143.

Cherniak D.J., Pyle J.M. The diffusion in monazite // Chem. Geol., 2008. V. 256. Iss. 1–2. P. 52–61.

Cherniak D.J., Watson E.B., Harrison T.M., Grove M. Pb diffusion in monazite: a progress report on a combined RBS/SIMS study // EOS Transc. Amer. Geophys. Union., 2000. V. 81. 525 p.

Cherniak D.J., Watson E.B., Grove M., Harrison T.M. Pb diffusion in monazite: a combined RBS/SIMS study // Geoch. Cosmoch. Acta, 2004. V. 68. P. 829–840.

Claridge R.F.C., Lees N.S., Tennant W.C., Walsby C.J. Oxigening-hole centers in X-irradiated zircon: 10 K EPR studies // J. Phys.: Condens. Matter., 2000. V. 12. P. 1431–1440.

Clark C., Mumm A.S. Timing and nature of fluid flow and alteration during Mesoproterozoic shear zone formation, Olary Domain, S. Australia // J. Metam. Geol., 2005. V. 23. P. 147–164. **Cocherie A., Albarede F.** An improved U-Th-Pb age calculation for electron microprobe dating of monazite // Geochim. Cosmoch. Acta, 2001. V. 65. № 24. P. 4509–4522.

Cocherie A., Legendre O. Potential minerals for determining U–Th–Pb chemical age using electron microprobe // Lithos, 2007. V. 93. P. 288–309.

Cocherie A., Legendre O., Peucat L.L., Kouamelan A.N. Geochronology of polygenetic monazites constrained by in situ electron microprobe Th–U– total lead determination: Implications for lead behavior in monazite // Geochim. Cosmoch. Acta, 1998. V. 62. P. 2475–2497.

CocherieA.,MezemeE.,LegendreO.,FanningC.M., Faure M., Rossi P. Electron-microprobe dating as a tool for determining the closure of Th-U-Pb systems in migmatitic monazites // Amer. Miner., 2005. V. 90. P. 607–618.

Copeland P., Parrish R.R., Harrison T.M. Identification of inherited radiogenic Pb in monazite and its implication for U-Pb systematics // Nature, 1988. V. 333. P. 760–763.

Correcher V., Garcia-Guinea J., Robredo L.M., Sanchez-Mucoz L. Spectra luminescence characterization of metamictization in a Brazilian zircon megacryst // Radiation Measurements. 2007. doi:10.1016/j.radmeas. 2007.10.041

Cressey G., Wall F., Cressey B.A. Differential REE uptake by sector growth of monazite // Miner. Mag., 1999. V. 63. P. 813–828.

Crocombette J.-P. Theoretical study of point defects in crystalline zircon // Phys. Chem. Miner., 1999. V. 27. P. 138–-143.

Crocombette J.-P., Ghaleb D. Modeling the structure of zircon (ZrSiO₄): empirical potentials, ab initio electronic structure // J. Nucl. Mater., 1998. V. 3. P. 282–286.

Crocombette J.-P., Ghaleb D. Molecular dynamics modeling of irradiation damage in pure and uraniumdoped zircon // J. Nucl. Mater., 2001. V. 295. P. 167–178.

Cromwell E.F., Arrowsmith P. Fractionation effects in laser ablation inductively couples plasma mass spectrometry // Appl. Spectrosc., 1995. V. 49. P. 1652–1660.

Crowley J.L., Ghent E.D. An electron microprobe study of the U–Th–Pb systematics of metamorphosed monazite: the role of Pb diffusion versus overgrowth and recrystallization // Chem. Geol., 1999. V. 157. P. 85–302.

Cuney M., Friedrich M. Physicochemical and crystal-chemical controls on accessory mineral paragenesis in granitoids: implications for uranium metallogenesis // Bull. Min., 1987. V. 110. P. 235–247.

Da Silva L.F., Ganduglia M.V., Sauer J., Bayer V., Kresse G. Hybrid functionals applied to rare-earth oxides: The example of ceria // Phys. Rev. B., 2007. V. 75 (4). P. 045121 (10).

Dahl P.S., Hamilton M.A., Jercinovic M.J., Terry M.P., Williams M.L., Frei R. Comparative isotopic and chemical geochronometry of monazite, with implications for U-Th-Pb dating by electron microprobe: An example from metamorphic rocks of the eastern Wyoming Craton (U.S.A.) // Amer. Miner., 2005. V. 90. P. 619–638.

Dahl P.S., Terry M.P., Jercinovic M.J., Williams M.L., Hamilton M.A., Foland K.A., Clement S.M., Dawson P., Hargreave M.M., Wilkinson G.R. The vibrational spectrum of zircon $(ZrSiO_4) // J$. Phys. C: Solid State Phys., 1971. V. 4. P. 240–256.

Deditius A.P., Utsunomiya S., Ewing R.C. Alteration of coffinite $(USiO_4)$ under reducing and oxidizing conditions // Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 2007. V. 985. 0985-NN01-08.

Demiray T., Nath D.K., Hammel F. Zircon-vanadium blue pigment // J. Amer. Ceram. Soc., 1970. V. 53. P. 1–4.

Devanathan R., Weber W.J., Boatner L.A. Response of zircon to electron and Ne+ irradiation // Phase Transformations and Systems Driven Far from Equilibrium. Eds.: Atzmon M., Bellon P., Trivedi R., 1998. V. 481. P. 419–424.

Dick B.G., Overhauser A.W. Theory of the dielectric constants of alkali halide crystals // Phys. Rev., 1958. V. 112. P. 90–103.

Dickin A.P. Radiogenic Isotope Geology. UK: Cambridge University Press, 2005. 492 p.

Dobmeier C., Simmat R. Post-Grenvillean transpression in the Chilka Lake area, E. Ghats Belt implications for the geological evolution of peninsular India // Precam. Res., 2002. V. 113. P. 243–268.

Dodson M.H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems // Contrib. Miner. Petrol., 1973. V. 40. P. 259–274.

Dollase W.A. Optimum distance model of relaxation around substitutional defects // Phys. Chem. Miner., 1980. V. 6. P. 295–304.

Du J., Davanathan R., Renй C.L., Weber W.J. First-principles calculations of the electronic structure, phase transition and properties of ZrSiO₄ polymorphs // Comput. Theor. Chem., 2011. in press.

Echtler H.P., Ivanov K.S., Ronkin Y.L., Karsten L.A., Hetzel R., Noskov A.G. The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals, Russia: a reapprisal // Tectonophysics, 1997. V. 276. P. 229–251. **Eckstein W.** Computer Simulation of Ion-Solid Interactions. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 42 p.

Ellis D.E., Painter G.S. Discrete Variational Method for the Energy-Band Problem with General Crystal Potentials // Phys. Rev. B 2., 1970. Iss. 8–15. P. 2887–2898.

Enami M., Suzuki K., Zhai M. The chemical Th-U-total Pb isochron ages of Jiaodong and Jiaonan metamorphic rocks in the Shandong Peninsula, E. China // Island Arc., 1993. V. 2. P. 104–113.

Evins L.Z., Jensen K.A., Ewing R.C. Uraninite recrystallization and Pb loss in the Oklo and Bangombe natural fission reactors, Gabon // Geoch. Cosmoch. Acta, 2005. V. 69. N. 6. P. 1589–1606.

Ewing R.C., Meldrum A., Wang L., Weber W.J., Corrales L.R. Radiation effects in zircon // Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, eds. J.M. Hanchar, P.W.O. Hoskin, 2003. V. 53. P. 387–425.

Fabris S., Gironcoli S., Baroni S., Vicario G., Balducci G. Taming multiple valency with density functionals: A case study of defective ceria // Phys. Rev., 2005. B 71 (4). P. 041102 (4).

Farges F. The structure of metamict zircon: A temperature-dependent EXAFS study // Phys. Chem. Minerals, 1994. V. 20. P. 504–514.

Farges F., Calas G. Structural analyses of radiation damage in zircon and thorite: an X-ray absorption spectroscopic study // Amer. Miner., 1991. V. 76. P. 60–73.

Farnan I. Si-29 NNR characterization of the crystalline-amorphous transition in ZrSiO_4 // Phase Transitions, 1999. V. 69. P. 47–60.

Farnan I., Balan E., Pickard C.J., Mauri F. The effect of radiation damage on local structure in crystalline $ZrSiO_4$: Investigating the 29Si NMR response to pressure in zircon and reidite // Amer. Miner., 2003. V. 88. P. 1663–1667.

Farnan I., Salje E.K.H. The degree and nature if radiation damage in zircon observed by ²⁹Si nuclear magnetic resonance // J. Phys. D: Appl. Phys., 2001. V. 89. P. 2084–2090.

Fayek M., Janeczek J., Ewing R.C. Mineral chemistry and oxygen isotopic analyses of uraninite, pitchblende and uranium alteration minerals from the Cigar Lake deposit, Saskatchewan, Canada // Appl. Geochem., 1997. V. 12. P. 549–565.

Feely M., McCabe E., Williams C.T. U-, Th- and REE bearing accessory minerals in a high heat production leucogranite within the Galway Granite, western Ireland // Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, 1989. V. 98. P. B27–B32.

Feenstra A., Petrakakis K., Rhede D. Multi-stage carboniferous-alpine high-P metamorphism in northern Samos (Greece): evidence from garnet zoning and inclusions // Mitt. Österr. Miner. Ges., 2005. V. 150. P. 142–149.

Ferriss E.D.A., Ewing R.C., Becker U. Simulation of thermodynamic mixing properties of actinidecontaining zircon solid solutions // Amer. Miner., 2010. V. 95. P. 229–241.

Fielding P.E. Colour centers in zircon containing both Eu³⁺ and U⁴⁺ ions // Austral. J. Chem., 1970. V. 23. P. 1513–1521.

Finch R.J., Ewing R.C. The corrosion of uraninite under oxidizing conditions // J. Nucl. Mater., 1992. V. 190. P. 133–156.

Finch C.B., Harris L.A., Clark G.W. The thoritehuttonite phase transformation as determined by growth of synthetic thorite and huttonite single crystals // Amer. Miner., 1964. V. 49. P. 782–785.

Finch R.J., Hanchar J.M. Structure and chemistry of zircon and zircon-group minerals // In: Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003. V. 53. P. 1–25.

Finch R.J., Hanchar J.M., Hoskin P.W.O., Burns P.C. Rare-earth elements in synthetic zircon: Part 2. A single-crystal X-ray study of xenotime substitution // Amer. Miner., 2001. V. 86. P. 681–689.

Finch R.J., Kropf J., Hanchar J.M. EXAFS investigation of rare earth elements in synthetic zircon // Proc. Eleventh Annual V. M. Goldschmidt Conference, 2001. P. 3791.

Finch R.J., Murakami T. Systematics and paragenesis of uranium minerals // In: Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Uranium, 1999. V. 38. P. 91–179.

Finger F., Broska I., Roberts M.P., Schermaier A. Replacement of primary monazite by apatite-allaniteepidote coronas in an amphibolite facies granite gneiss from the eastern Alps // Amer. Miner., 1998. V. 83. P. 248–258.

Finger F., Krenn E., Riegler G., Romano S., Zulauf G. Resolving Cambrian, Carboniferous, Permian and Alpine monazite generations in the polymetamorphic basement of eastern Crete (Greece) by means of the electron microprobe // Terra Nova, 2002. V. 14. P. 233–240.

Firestone, R.B., Shirley, V.S., Baglin, C.M., Chu, S.Y.F., and Zipkin, J. Table of isotopes, 8-th ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. 3168 p.

Fitzsimons I.C.W., Kinny P.D., Harley S.L. Two stages of zircon and monazite growth in anatectic leucogneiss: SHRIMP constraints on the duration and intensity of Pan-African metamorphism in Prydz Bay, East Antarctica // Terra Nova, 1997. V. 9. P. 47–51.

Foord E.E., Cobban R.R., Brownfield I.K. Uranoan thorite in lithophysal rhyolite // Miner. Mag., 1985. V. 49. P. 729–731.

Forster H.J. The chemical composition of REE-Y-Th-U-rich accessory minerals from the Erzgebirge-Fichtelgebirge region, Germany. Part I: the monazite-(Ce)-brabantite solid solution series // Amer. Miner., 1998. V. 83. P. 259–272.

Forster H.J. The chemical composition of uraninite in Variscan granites of the Erzgebirge, Germany // Miner. Mag., 1999. V. 63(2). P. 239–252.

Forster H.J. Composition and origin of intermediate solid solutions in the system thorite-xenotimezircon-coffinite // Lithos, 2006. V. 88. P. 35–55.

Forster H.J., Harlov D.E. Monazite-(Ce)-huttonite solid solutions in granulite-facies metabasites from the Ivrea-Verbano Zone, Italy // Miner. Mag., 1999. V. 63. P. 587–594.

Forster H.J., Harlov D.E., Milke R. Composition and Th-U-totalPb ages of huttonite and thorite from Gillespies beach, South Island, New Zealand // Canad. Miner., 2000. V. 38. P. 675–684.

Foster G., Kinny P., Vance D., Prince C., Harris N. The significance of monazite U-Th-Pb age data in metamorphic assemblages; a combined study of monazite and garnet chronometry // Earth and Planetary Science Letters, 2000. V. 181. P. 327–340.

French J.E., Heaman L.M., Chacko T. Feasibility of chemical U-Th-total Pb baddeleyite dating by electron microprobe // Chem. Geol., 2002. V. 188. P. 85–104.

Friberg L.M. Electron probe (Ultrachron) microchronometry of metamorphic monazite: Unraveling the timing of polyphase thermotectonism in the eastern Wyoming Craton (Black Hills, South Dakota) // Amer. Miner., 2005. V. 90. P. 1712–1728.

Frondel C. Systematic mineralogy of uranium and thorium // U.S. Geol. Surv. Bull., 1958. V. 1064. 400 p.

Frondel C. Hydroxyl substitution in thorite and zircon // Amer. Miner., 1953. V. 38. P. 1007–1018.

Fuchs L.H., Gebert E. X-ray studies of synthetic coffinite, thorite and uranothorite // Amer. Miner., 1958. V. 78. P. 1262–1274.

Fujii M., Hayasaka Y., Terada K. SHRIMP zircon and EPMA monazite dating of granitic rocks from the Maizuru terrane, South-West Japan: Correlation with East Asian Paleozoic terranes and geological implications // Island. Arc, 2008. V. 17. P. 322–341.

Gaft M. Application of thermal treatment of zircon for the interpretation of luminescence centers // J. Thermal Anal., 1992. V. 38. P. 2281–2290.

Gaft M., Shinno, Panczer G., Reisfeld R. Laserinduced time-resolved spectroscopy of visible broad luminescence bands in zircon // Miner. Petrology, 2002. V. 76. P. 235–246.

Gale J.D. GULP: a computer program for the symmetry-adapted simulation of solids // J. Chem. Soc. Faraday Trans., 1997. V. 93 (4). P. 629–37.

Gale J.D. GULP: Capabilities and prospects // Z. Kristallogr., 2005. V. 220. P. 552–554.

Gay D.H., Rohl A.L. MARVIN: a new computer code for studying surfaces and interfaces and its application to calculating the crystal morphologies of corundum and zircon // J. Chem. Soc. Faraday Trans., 1995. V. 91. P. 925–936.

Gale J.D., Rohl A.L. The General Utility Lattice Program // Mol. Simul., 2003. V. 29. 291 p.

Gardes E., Jaoul O., Montel J., Seydoux-Guillaume A.M. Pb diffusion in monazite: an experimental study of $Pb^{2+}+Th^{4+}\leftrightarrow 2Nd^{3+}$ interdiffusion // Geoch. Cosm. Acta, 2006. V. 70. P. 2325–2336.

Gaweda A., Burda J. Partial melting processes in the western Tatra Mts.: geochronological and geochemical study // Prace Specjalne Mineralogical Society of Poland, 2005. V. 26. P. 162–166.

Geisler T. Isothermal annealing of partially metamict zircon: evidence for a three-stage recovery process // Phys. Chem. Miner., 2002. V. 29. P. 420–429.

Geisler T., Burakov B.E., Zirlin V., Nikolaeva L., Pöml P. A Raman spectroscopic study of high-uranium zircon from the Chernobyl "lava" // Eur. J. Miner., 2005. V. 17. P. 883–894.

Geisler T., Pidgeon R.T. Raman scattering from metamict zircon: Comments on "Metamictisation of natural zircon: accumulation versus thermal annealingof radioactivity-induced damage" by Nasdala et al., 2001 (Contrib Mineral Petrol. 141:125–144) // Contrib. Miner. Petrol., 2002. V. 143. N. 6. P. 750–755.

Geisler T., Pidgeon R.T., van Bronswijk W., Kurtz R. Transport of uranium, thorium, and lead in metamict zircon under low-temperature hydrothermal conditions // Chem. Geol., 2002. V. 191. P. 141–154.

Geisler T., Pidgeon R.T., van Bronswijk W., Pleysier R. Kinetics of thermal recovery and recrystallization of partially metamict zircon: a Raman spectroscopic study // Eur. J. Miner., 2001. V. 13. P. 1163–1176.

Geisler T., Rashwan A.E.A., Rahn M.K.W., Poller U., Zwingmann H., Pidgeon R.T., Schleicher H., Tomaschek F. Low-temperature hydrothermal alteration of natural metamict zircons from the Eastern Desert, Egypt // Miner. Mag., 2003. V. 67. Is. 3. P. 485–508.

Geisler T., Schaltegger U., Tomaschek F. Re-equilibration of zircon in aqueous fluids and melts // Elements, 2007. V. 3. P. 43–50.

Geisler T., Schleicher H. Improved U-Th-total Pb dating of zircons by electron microprobe using a simple new background modeling procedure and Ca as a chemical criterion of fluid-induced U-Th-Pb discordance in zircon // Chem. Geol., 2000. V. 163. P. 269–285.

Geisler T, Ulonska M, Schleicher H, Pidgeon RT, van Bronswijk W. Leaching and differential recrystallization of metamict zircon under experimental hydrothermal conditions // Contrib. Miner. Petrol., 2001. V. 141. P. 53–65.

Gerdes A., Montero P., Bea F., Fershtater G., Borodina N., Osipova T., Shardakova G. Peraluminous granites frequently with mantle-like isotope compositions: the continental-type Murzinka and Dzhabyk batholith of the Eastern Urals // Internat. J. Earth Sci., 2002. V. 91. P. 3–19.

Gervais F., Piriou B., Cabannes F. Anharmonicity in silicate crystals: Temperature dependence of Au type vibrational modes in $ZrSiO_4$ and $LiAlSi_2O_6$ // J. Phys. Chem. Solids, 1973. V. 34 (11). P. 1785–1796.

Gibbs G.V., Cox D.F., Crawford T.D., et. al. A mapping of the electron localization function for the silica polymorphs: evidence for domains of electron pairs and sites of potential electrophilic attack // Phys. Chem. Miner., 2002. V. 29. P. 307–318.

Gibson H.D., Carr S.D., Brown R.L. Correlations between chemical and age domains in monazite, and metamorphic reactions involving major pelitic phases: an integration of ID-TIMS and SHRIMP geochronology with Y-Th-U X-ray mapping // Chem. Geol., 2004. V. 211. P. 237–260.

Goncalves P., Nicollet C., Montel J.M. Petrology and in situ U-Th-Pb monazite geochronology of ultrahigh-temperature metamorphism from the Andriamena Mafic Unit, North-Central Madagascar. significance of a petrographical P-T path in a polymetamorphic context // J. Petrol., 2004. V. 45. № 10. P. 1923–1957.

Goncalves P., Williams M.L., Jercinovic M.J. Electron-microprobe age mapping of monazite // Amer. Miner., 2005. V. 90. P. 578–585.

Gordon R.A., Seidler G.T., Fister T.T., Haverkort M.W., Sawatzky G.A., Tanaka A., Shamhigh T.K. Multipole transitions in NIXS: Valence and hybridization in 4f systems // Letters J. Exploring the Frontiers of Physics. EPL., 2008. V. 81 (2). P. 26004 (6).

Gottfried D., Senftle F.E., Waring C.L. Age determination of zircon crystals from Ceylon // Amer. Miner., 1956. V. 41. P. 157–161.

Gotze J., Kempe U., Habermann D., Nasdala L., Neuser R.D., Richter D.K. Hight-resolution cathodoluminiscence combined with SHRIMP ion probe measurments of detrial zircons // Miner. Mag., 1999. V. 63. P. 179–187. **Grandstaff D.E.** A kinetic study of the dissolution of uraninite // Econ. Geol., 1976. V. 71. P. 1493–1506.

Gray A.L. Solid sample introduction by laser ablation for inductively coupled plasma source mass spectrometry // Analyst., 1985. V. 110. P. 551–556.

Grew E.S., Suzuki K., Asami M. CHIME ages of xenotime, monazite and zircon from beryllium pegmatites in the Napier Complex, Khmara Bay, Enderby Land, East Antarctica // Polar Geosci., 2001. V. 14. P. 99–118.

Griscom D.L. The electronic structure of SiO₂: a review of recent spectroscopic and theoretical advances// Journ. Non-Cryst. Solids, 1977. V. 24. P. 155–234.

Guastoni A., Mazzoli C. Age determination by m-pixe analysis of cheralite-(Ce) from emerald-bearing pegmatites of Vigezzo Valley (Italy) // Mitt. Österr. Miner. Ges., 2007. V. 153. P. 279–282.

Guillong M., Horn I., Gunther D. A comparison of 266 nm, 213 nm and 193 nm produced from a single solid state Nd: YAG laser for laser ablation ICP MS // J. Analyt. Atom. Spectrom., 2003. V. 18. P. 1224–1230.

Guittet M.J., Crocombette J.P., Gautier-Soyer M. Bonding and XPS chemical shifts in $ZrSiO_4$ versus SiO_2 and ZrO_2 : Charge transfer and electrostatic effects // Phys. Rev. B., 2001. V. 63. P. 125111–125117.

Gunn J.S., Harrowfield I.R., Proctor C.H., Thresher R.E. Electron probe microanalysis of fish otolithsyevaluation of techniques for studying age and stock discrimination // J. Experimental Marine Biology Ecology, 1992. V. 158. P. 1–36.

Gunnarsson O., Lundqvist B.I. Exchange and correlation in atoms, molecules and solids by the spindensity-functional formalism // Phys. Rev. B., 1976. V. 13. № 10. P. 4274–4298.

Hager J.W. Laser Sampling ICP-MS: Quantization without matrix matched standards // PE SCIEX, 1990. 9 p.

Halden N.M., Hawthorne F.C., Campbell J.L., Teesdale W.J., Maxwell J.A., Higuchi D. Chemical characterization of oscillatory zoning and overgrowths in zircon using 3 MeV μ-PIXEn // Canad. Miner., 1993. V. 31. P. 637–647.

Hanchar J.M., Finch R.J., Hoskin P.W.O., Watson E.B. Rare earth elements in synthetic zircons: Part 1. Synthesis, and rare earth element and phosphorus doping // Amer. Miner., 2001. V. 86. P. 667–680.

Hanchar J.M., Rudnic R.L. Revealing hidden structures: the application of cathodoluminescence and backscattered electron imaging to datting zircons from lower crustal xenoliths // Lithos, 1995. V. 36. P. 289–303.

Hansley P., Frtzpatrick J. Compositional and crystallographic data on REE-bearing coffinite from the Grants utanium region, nothwestern New Mexico // Amer. Miner., 1989. V. 74. P. 263–270. Harlov D.E., Wirth R., Forster H.J. An experimental study of dissolution-reprecipitation in fluorapatite: fluid infiltration and the formation of monazite // Contrib. Miner. Petrol., 2005. V. 150. Is. 3. P. 268–286.

Hawkins D.P., Bowring. S.A. U-Pb systematics of monazite and xenotime: case studies from the Paleoproterozoic of the Grand Canyon, Arizona // Contrib. Miner. Petrol., 1997. V. 127. P. 87–103.

Hawkins D.P., Bowring S.A. U-Pb monazite, xenotime and titanite geochronological constraints on the prograde to post-peak metamorphic thermal history of Paleoproterozoic migmatites from the Grand Canyon, Arizona // Contrib. Miner. Petrol., 1999. V. 134. P. 150–169.

Hazen R.M., Finger L.W. Crystal structure and compressibility of zircon at high pressure // Amer. Miner., 1979. V. 64. P. 196–201.

Heinrich W., Andrehs G., Franz G. Monazitexenotime miscibility gap thermometry. 1. An empirical calibration // J. Metamor. Geol., 1997. V. 15. P. 3–16.

Hess N.J., Weber W.J., Conradson S.D. U and Pu L XAFS of Pu-doped glass and ceramic waste forms // J. Alloys and Compounds, 1998. V. 271. P. 240–243.

Hokada T. Perrierite in sapphirine-quartz gneiss: geochemical and geochronological features and implications for accessory-phase paragenesis of UHT metamorphism // J. Miner. Petrol. Sci., 2007. V. 102. P. 44–49.

Holmes A. The association of lead with uranium in rock-minerals, and its application to the measurement of geological time // Proceed Rev. Soc., 1911. Ser. A. V. 85. P. 248–256.

Horn I., Gunther D., Guillong M. Evaluation and design of a solid state 193 nm OPO Nd:YAG laser ablation system // Spectrochim. Acta B., 2003. V. 58. P. 1837–1846.

Hoskin P.W.O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metemorphic petrogenesis // In: Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003. V. 53. P. 27–62.

Hoskin P.W.O., Black L.P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon // J. Metamor. Geol., 2000. V. 18. P. 423–439.

Hoskin P.W.O., Kinny P.D., Wyborn D., Chappell B.W. Identifying accessory mineral saturation during differentiation in granitoid magmas: an integrated approach // J. Petrol., 2000. V. 41. P. 1365–1396.

Hoskin P.W.O., Rodgers K.A. Raman spectral shift in the isomorphous series $(Zr_{1,\chi}Hf_{\chi})SiO_{4}$ // Eur. J. Solid. State Inorg. Chem., 1996. V. 33. P. 1111–1121.

Howard C.J., Sabine T.M. X-rzy diffraction profiles from - (1940b) Dichte und Struldur des Zirkons IV. Zeitschrift fiir Krisneutron-irradiated magnesium oxide // J. Physical Chemistry: tallographie, 102, 207-208. Solid State Physics, 1974. V. 7. P. 3453–3466. Howard W.J., Howard T.E., Chapman J.W., Chapman R.W. Occurrence and age of chevkinite from the Devil's slide fayalite-quartz syenite near Stark, New Hampshire // Amer. Miner., 1956. V. 41. P. 474–487.

Huminicki D.M.C., Hawthorne F.C. The crystal chemistry of the phosphate minerals // In: Reviews in mineralogy and geochemistry, 2002. V. 48. P. 123–253.

Iacconi P., Deville A., Gaillard B. Trapping and emission centers in X-irradiated zircon (II. Contribution of the SiO_4^+ groups) // Phys. Stat. solidi (a), 1980. V. 59. P. 639–646.

Irmer G. Zum EinfluB der Apparatefunktion auf die Bes-timmung von Streuquerschnitten und Lebensdauern aus optis-chen Phononenspektren // Exp. Tech. Phys., 1985. V. 33. P. 501–506.

Isobe H., Murakami T., Ewing R.C. Alteration of uranium minerals in the Koongara deposit, Australia: unweathered zone // J. Nucl. Mater., 1992. V. 190. P. 174–187.

Ivanov V.Yu., Pustovarov V.A., Shirinskyi K.I., Shlygin E.S., Kruzhalov A.V. Intrinsic electronic excitation A_2SiO_5 (A = Y, Lu, Gd) and Sc_2SiO_5 scintillators // In: Proceedings of the International conference on inorganic scintillators and their industrial applications. Ukraine. Kharkov: Institute for scintillation materials, 2005. P. 33–35.

Ivanov V.Yu., Shirinskii K.I., Shlygin E.S., Pustovarov V.A. VUV spectroscopy of intrinsic electronic excitations in Gd_2SiO_5 and Gd_2SiO_5 –Ce crystals // Известия вузов. Физика, 2006. № 4. С. 53–56.

Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology // Chem. Geol., 2004. V. 211. P. 47–69.

Janak M., Konecny P., Siman P., Holicky I. A metamorphic history from electron microprobe dating of monazite: variscan evolution of the Tatra mountains // GeoLines, 2004. V. 17. P. 47–48.

Janeczek J., Ewing R.C. Coffinitization – a mechanism for the alteration of UO_2 under reducing conditions // Mater. Res. Soc. Symp., 1992b. V. 257. P. 497–504.

Janeczek J., Ewing R.C. Dissolution and alteration of uraninite under reducing conditions // J. Nucl. Mater., 1992c. V. 190. P. 157–173.

Janeczek J., Ewing R.C. Mechanisms of lead release from uraninite in natural fission reactors in Gabon // Geochim. Cosmochim. Acta, 1995. V. 59. P. 1917–1931.

Janeczek J., Ewing R.C. Phosphatian coffinite with rare earth elements and Ce-rich franzoisite-(Nd) from sandstone a natural fission reactor at Bangombe, Gabon // Miner. Mag., 1996. V. 60. P. 665–669.

Janeczek J., Ewing R.C. Structural formula of uraninite // J. Nucl. Mater., 1992a. V. 190. P. 128–132.

Janeczek J., Ewing R.C., Thomas L.E. Oxidation of uraninite: does tetragonal U₃O₇ occur in nature // J. Nucl. Mater., 1993. V. 207. P. 177–191.

Janots E., Negro F., Brunet F., Goffe B., Engi M., Bouybaoue M.L. Evolution of the REE mineralogy in HP–LT metapelites of the Sebtide complex, Rif, Morocco: monazite stability and geochronology // Lithos, 2006. V. 88. P. 214–234.

Jeffries T.E., Jeckson S.E., Longerich H.P. Application of a frequency quintupled Nd:YAG source (π =213 nm) for laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometric analysis of minerals // J. Analyt. Atom. Spectrom., 1998. V. 13. P. 935–940.

Jercinovic M.J., Gillerman V.S., Stein H.J. Application of microprobe geochronology to hydrothermal monazite and thorite, Lemhi Pass District, Idaho // Geol. Soc. America, Abstracts, 2002. V. 34. 172 p.

Jercinovic M.J., Williams M.L. Analytical perils (and progress) in electron microprobe trace element analysis applied to geochronology: Background acquisition, interferences, and beam irradiation effects // Amer. Miner., 2005. V. 90. P. 526–546.

Johan Z., Johan V. Accessory minerals of the Cinovec (Zinnwald) granite cupola, Czech Republic: indicators of petrogenetic evolution // Miner. Petrol., 2004. V. 83. P. 113–150.

Kamineni D.C., Lemire R.J. Thorite in fault zones of a granitic pluton, Atikokan, Canada: implications for nuclear fuel waste disposal // Chem. Geol., 1991. V. 90. P. 133–143.

Kanaya K., Okayama S. Penetration and energyloss theory of electrons in solid targets // J. Phys. D: Appl. Phys., 1972. V. 5. P. 43–58.

Kato T., Suzuki K., Adachi M. Computer program for the CHIME age calculation // J. Earth Planet, 1999. V. 46. P. 49–56.

Kaur P., Chaudhri N., Biju-Sekhar S., Yokoyama K. Electron probe microanalyser chemical zircon ages of the Khetri granitoids, Rajasthan, India: Records of widespread late Paleoproterozoic extension-related magmatism // Current Science, 2006. V. 90. № 1. P. 65–73.

Kawamoto A., Cho K., Griffin P., Dutton R. First Principles Investigation of Scaling Trends of Zirconium Silicate Interface Band Offsets // J. Appl. Phys., 2001. V. 90. P. 1333-1341.

Keevil N.B. The calculation of geological age // Amer. J. Sci., 1939. V. 237. P. 195–214.

Kelly N.M., Clarke G.L., Harley S.L. Monazite behaviour and age significance in poly-metamorphic highgrade terrains: a case study from the western Musgrave Block, central Australia // Lithos, 2006. V. 88. P. 100–134. Kelsey D.E., Powell R., Wilson C.J.L., Steele D.A. (Th+U)-Pb monazite ages from Al-Mg-rich metapelites, Rauer Group, East Antarctica // Contrib. Miner. Petrol., 2003. V. 146. P. 326–340.

Kempe U. Precise electron microprobe age determination in altered uraninite: consequences on the intrusion age and the metallogenic significance of the Kirchberg granite (Erzgebirge, Germany) // Contrib. Miner. Petrol., 2003. V. 145. P. 107–118.

Kempe U., Grunner T., Nasdala L., Wolf D. Relevance of cathodoluminescence for the interpretation of U-Pb zircon ages, with an example of an application to a study of zircons from the Saxonians Granulite Complex, Germany // Cathodoluminescence in Geosciences. Springer, Berlin-Heidelberg, 2000. P. 415–455.

Kirsh Y., Townsend P.D. Electron and hole centers produced in zircon by X-irradiation at room temperature // J. Phys. C: Solid State Phys., 1987. V. 20. P. 967–980.

Kosler J. Laser ablation sampling strategies for concentration and isotope ratio analyses by ICP-MS. In Laser ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues (P. Sylveter, ed.) // Miner. Asoc. Can. Short Course Series, 2008. V. 40. P. 79–92.

Kosler J., Wiedenbeck M., Wirth R., Horvorka J., Sylvester P., Mikova J. Chemical and phase composition of particles produced by laser ablation of silicate glass and zircon implications for elemental fractionation during ICP MS analysis // J. Analyt. Atom. Spectrom., 2005. V. 20. P. 402–409.

Kotzer T.G., Kyser T.K. O, U, and Pb isotopic and chemical variations in uraninite: implications for determining the temporal and fluid history of ancient terrains // Amer. Miner., 1993. V. 78. P. 1262–1274.

Krenn E., Finger F. Formation of monazite and rhabdophane at the expense of allanite during Alpine low temperature retrogression of metapelitic basement rocks from Crete, Greece: Microprobe data and geochronological implications // Lithos, 2007. V. 95. P. 130–147.

Kroger F.A., Vink H.J. Relations between the concentration of imperfections in crystalline solids // Solid State Physics, 1956. V. 3. P. 307–435.

Kruza R. Monazite as a geochronometer: useful, inexpensive – but not simple // Prace Specjalne Miner. Soc. Poland, 2003. V. 23. P. 15–17.

Kruza R., Sveshnikov K.I., Charnley N., Montel J.M. Monazite in Precambrian granites of the Ukrainian shield: selected aspects of geochemistry and chemical age dating // Prace Specjalne Miner. Soc. Poland, 2004. V. 24. P. 255–258.

Kucha H. Continuity in the monazite-huttonite series // Miner. Mag., 1980. P. 1031–1034.

Kuhn H.R., Gunther D. Elemental fractionation studies in laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry on laser induced brass aerosols // Anal. Chem., 2003. V. 75. P. 747–753.

Kuhn H.R., Gunther D. The agglomeration state of nanosecond laser generated aerosol particles entering the ICP // Anal. Bioanal. Chem., 2005. V. 383. P. 434–441.

Kuiper J.D. Isotopic age constraints from electron microprobe U-Th-Pb dates, using a three-dimensional concordia diagram // Amer. Miner., 2005. V. 90. P. 586–591.

Kullgren J., Castleton C. W.M., Muller C., Ramo D.M., Hermansson K. B3LYP calculations of cerium oxides// J. Chem. Phys., 2010. V. 132 (5). P. 054110 (12).

KusiakM.A.,KedziorA.,PaszkowskiM.,SuzukiK., Gonzalez-Alvarez I., Wajsprych B., Doktor M. Provenance implications of Th-U-Pb electron microprobe ages from detrital monazite in the Carboniferous Upper Silesia Coal Basin, Poland // Lithos, 2006. V. 88. P. 56–71.

Lanzirotti A., Hanson G.N. Geochronology and geochemistry of multiple generations of monazite from the Wepawaug Schist, Connecticut, USA: implications for monazite stability in metamorphic rocks // Contrib. Miner. Petrol., 1996. V. 125. N 4. P. 332–340.

Larsson C.U.S., Beutler A., Bjurneholm O., Federmann F., Hahn U., Rieck A., Verbin S., Muller T. First results from the high resolution XUV undulator beamline BW3 at HASYLAB // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A., 1994. V. 337. P. 603–608.

LaruhinM.A., van Es H.J., BulkaG.R., TurkinA.A., Vanshtein D.I., den Hartog H.W. EPR study of radiation-induced defects in the thermoluminescence dating medium zircon $(ZrSiO_4) // J$. Phys.: Condens. Matter, 2002. V. 14. P. 3813–3831.

Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues. Eds.: P. Sylveter // Vancover: Miner. Asoc. Can. Short Course Series, 2008. V. 40. 356 p.

Law M.E., Gilmer G.H., Jaraiz M. Simulation of defects and diffusion phenomena in silicon // MRS Bulletin, 2000. P. 45–50.

Lee S.H. Chemical age dating of zircon and monazite by electron microprobe // J. Petrol. Soc. Korea, 2001. V. 10. № 3. P. 179–189.

Lewis G.V., Catlow C.R.A. Potential models for ionic oxides // J. Phys. C: Solid State Phys., 1985. V. 18. P. 1149–1161.

Lian J., Rios S., Boatner L.A., Wang L.M., Ewing R.C. Microstructural evolution and nanocrystal formation in Pb⁺-implanted ZrSiO₄ single crystals // J. Phys. D: Appl. Phys., 2003. V. 94. \mathbb{N} 9. P. 5695–5703. Lide D.R. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 87th Edition. Boca Raton, FL: CRC Press / Taylor and Francis., 2004. 2475 p.

Linkang S., Chun C., Liwen L. The discovery of Y-high thorite in the Guposhan granite (China) // Acta Miner. Sinica, 1992. V. 12. P. 87–90.

Lisowiec N. Precision estimation in electron microprobe monazite dating: Repeated measurements versus statistical (Poisson) based calculations // Chem. Geol., 2006. V. 234. P. 223–235.

Liu C.Y., Mao X.L., Mao S.S., Greif R., Russo R.E. Particle size dependent chemistry from laser ablation of brass // Anal. Chem., 2005. V. 77. P. 6687–6691.

Liu H.C., Borisov O.V., Mao X.L., Shuttleworth S., Russo R.E. Pb/U fractionation during Nd:YAG 213 nm and 266 nm laser ablation sampling with inductively coupled plasma mass spectrometry // Appl. Spectrosc., 2000. V. 54. P. 1435–1442.

Lucovsky G., Rayner G. B., Kang Jr. D., Appel G., Johnson R.S., Zhang Y., Sayers D.E., Ade H., Whitten J.L. Electronic structure of noncrystalline transition metal silicate and aluminate alloys // Appl. Phys. Lett., 2001. V. 79. № 12. P. 1775–1777.

Ludwig K.R. Users manual for ISOPLOT/EX, version 2. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center: Spec. Pub. № 1a, 1999. 120 p.

Ludwig K.R., Simmons K.R., Webster J.D. U-Pb isotope systematics and apparent ages of uranium ores, Ambrosia Lake and Smith Lake districts, Grant mineral belt, New Mexico // Econ. Geol., 1984. V. 79. 322 p.

Lumpkin G.R., Chakoumakos B.C. Chemistry and radiation effects of thotite-group minerals from the Harding pegmatite, Taos County, New Mexico // Amer. Miner., 1988. V. 73. P. 1405–1419.

Mahan K.H., Goncalves P., Williams M.L., Jercinovic M.J. Dating metamorphic reactions and fluid flow: application to exhumation of high-P granulites in a crustal-scale shear zone, Western Canadian Shield // J. Metam. Geol., 2006. V. 24. P. 193–217.

Mank A.J.G., Mason P.R.D. A critical assessment of laser ablation ICP MS as an analytical tool for depth analysis in silica based glass samples // J. Analyt. Atom. Spectrom., 1999. V. 14. P. 1143–1153.

Mao J., Du A., Seltmann R., Yu J. Re-Os ages for the Shameika porfyry Mo deposit and the Lipovy Log rare metall pegmatite, Central Urals, Russia // Miner. Deposita, 2003. V. 38. P. 251–257.

Martignole J., Martelat J.E. Proterozoic mafic dykes as monitors of HP granulite facies metamorphism in the Grenville Tectonic Zone (W. Quebec) // Precam. Res., 2005. V. 138. P. 183–207.

Mattinson J.M. Analysis of zircon by multi-step partial dissolutions: the good, the bad and the ugly // GAC/MAC Ottawa '97 Abst., 1997. V. A98.

Mattinson, J.M. Low-temperature U–Pb discordance mechanisms in zircons: the role of radiation damage and fluids // Fall Meeting Suppl. Abstract V21D-35, Eos Trans, AGU. 2000. V. 81 (48).

Mattinson, J.M. U–Pb zircon analysis by chemical abrasion: combined high-temperature annealing and partial dissolution analysis // Suppl. Eos, Trans.-Am. Geophys. 2000. Union 8 (19), S27 (GS32A-02).

Mattinson J.M. Zircon U–Pb chemical abrasion («CA-TIMS») method: combined annealing and multistep partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages // Chem. Geol., 2005. N_{\odot} 220. P. 47–66.

Mazeina L., Ushakov S.V., Navrotsky A. Formation enthalpy of ThSiO_4 and enthalpy of the thorite \rightarrow huttonite phase transition // Geochim. Cosmoch. Acta, 2005. V. 69. Nº 19. P. 4675–4683.

McFarlane C.R.M., Harrison T.M. Pb-diffusion in monazite: constraints from a high-T contact aureole setting // Earth Plan. Sci. Lett., 2006. V. 250. Is. 1–2. P. 376–384.

Meis C., Gale J.D. Computational study of tetravalent uraniun and plutonium lattice diffusion in zircon // Mat. Sci. Eng. B., 1998. V. 57. P. 52–61.

Meldrum A., Boatner L.A., Ewing. R.C. A comparison of radiation effects in crystalline ABO₄-type phosphates and silicates // Miner. Mag., 2000. V. 64. P. 185–194.

MeldrumA.,BoatnerL.A.,WangL.M.,EwingR.C. Ion-beam-induced amorphization of LaPO₄ and ScPO₄ // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1997. V. 127/128. P. 160–165.

Meldrum A., Boatner L.A., Weber W.J., Ewing R.C. Radiation damage in zircon and monazite // Geochim. Cosmoch. Acta, 1998. V. 62. Is. 14. P. 2509–2520.

Meldrum A., Wang L. M., Ewing R. C. Ion beam induced amorphization of monazite // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1996. V. 116. Is. 1-4. P. 220–224.

Mikulski S.Z., Baginski B., Dzierzanowski P. The CHIME age calculation on monazite and xenotime in aplogranite from the Szklarska Poreba Huta quarry // Prace Specjalne Mineralogical Society of Poland, 2004. V. 24. P. 287–290.

Montel J.-M., Devidal J.L., Avignant D. X-ray diffraction study of brabantite-monazite solid solutions // Chem. Geol., 2002. V. 191. 89 p.

Montel J.-M., Foret S., Veschambre M., Nicollet C., Provost A. Electron microprobe dating of monazite // Chem. Geol., 1996. V. 131. P. 37–53.

Montel J.-M., Kornprobst J., Vielzeuf D. Preservation of old U-Th-Pb ages in shielded monazite: example from the Beni Bousera Hercynian kinzigites (Morocco) // J. Metam. Geol., 2000. V. 18. P. 335–342.

Montero P., Bea F., Gerdes A., Fershtater G., Zin'kova E., Borodina N., Osipova T., Smirnov V. Single-zircon evaporation ages and Rb-Sr dating of four major Variscan batholiths of the Urals A perspective on the timing of deformation and granite generation // Tectonophysics, 2000. V. 317. P. 93–108.

Montero P., Floor P., Corretge G. The accumulation of rare earth and high-field strength elements in peralkaline granitic rocks: the Galineiro orthogneiss complex, northwestern Spain // Canad. Miner., 1998. V. 36. P. 683–700.

Moser F., Urbach F. Optical absorption of pure silver halides // Phys. rev., 1956. V. 102. № 6. P. 1519–1523.

Mott N.F., Littleton M.J. Conduction in polar crystals electrolytic conduction in solid salts // Trans. Faraday Soc., 1938. V. 34. P. 485.

Mullica D.F., Milligan W.O., Grossie D.A., Beall G.W. Ninefold coordination in LaPO₄: pentagonal interpenetrating tetrahedral polyhedron // Inorgan. Chimica Acta, 1984. V. 95. P. 231–236.

Mullica D.F., Grossie D.A, Boatner L.A. Structural refinements of praseodymium and neodymium orthophosphate // J. Solid State Chem., 1985. V. 58. P. 71–77.

Mumpton F.A., Roy R. Hydrothermal stability studies of the zircon–thorite group // Geochim. Cosmochim. Acta, 1961. V. 21. P. 217–238.

Murakami T., Chakoumakos B.C., Ewing R.C., Lumpkin G.R., Weber W.J. Alpha-decay event damage in zircon // Amer. Miner., 1991. V. 76. № 9/10. P. 1510–1532.

Mursic Z., Vogt T., Boysen H., Frey F. Single-crystal neutron diffraction study of metamict zircon up to 2000 K // J. Appl. Crystallogr., 1992. V. 25. P. 519–523.

NaemuraK., YokoyamaK., HirajimaT., SvojitkaM. Age determination of thorianite in phlogopite-bearing spinel-garnet peridotite in the Gfuhl Unit, Moldanubian Zone of the Bohemian Massif // J. Miner. Petrol. Sciences, 2008. V. 103. P. 285–290.

Nasdala L., Finger F., Kinny P. Can monazite become metamict? // Eur. J. Miner., 1999. № 11. V. 1. 164 p.

Nasdala L., Hanchar J.M., Kronz A., Whitehouse M.J. Long-term stability of alpha particle damage in natural zircon // Chem. Geol., 2005. V. 220. P. 83–103. **Nasdala L., Irmer G., Jonckheere R.** Radiation damage ages: Practical concept or impracticalvision? – Reply to two comments on "Metamictisation of natural zircon: Accumulation versus thermal annealing of radioactivity-induced damage", and further discussion // Contrib. Miner. Petrol., 2002. V. 143. P. 758–765.

Nasdala L., Lengauer C. L., Hanchar J.M., Kronz A., Wirth R., Blanc P., Kennedy A.K., Seydoux-Guillaume A.-M. Annealing radiation damage and the recovery of cathodoluminescence // Chem. Geol., 2002. V. 191. P. 121–140.

Nasdala L., Wenzel M., Vavra G., Irmer G., Wenzel T., Kober B. Metamictisation of natural zircon accumulation versus thermal annealing of radioactivityinduced damage // Contrib. Miner. Petrol., 2001. V. 141. P. 125–144.

Nasdala L., Wolf D., Irmer G. The degree of metamictization in zircon: a Raman spectroscorpic study // Eur. J. Miner, 1995. V. 7. P. 471–478.

Zhang M., Salje E.K.H. Infrared spectroscopic analysis of zircon: radiation damage and the metamict state // J. Phys.: Condens. Matter., 2001. V. 13. P. 3057–3071.

Nasdala L., Zhang M., Panczer G., Gaft M., Andrut M. Plotze Spectroscopic methods applied to zircon // Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003. V. 53. № 1. P. 427–467.

Ni Y., Hughes J.M., Mariano A.N. Crystal chemistry of the monazite and xenotime structures // Amer. Miner., 1995. V. 80. P. 21–26.

Okudaira T., Hayasaka Y., Himeno O., Watanabe K., Sakurai Y., Ohtomo Y. Cooling and inferred exhumation history of the Ryoke metamorphic belt in the Yanai district, South-West Japan: Constraints from Rb–Sr and fission-track ages of gneissose granitoid and numerical modeling // Island Arc., 2001. V. 10. P. 98–115.

Outridge P.M., Doherty W., Gregroire D.C. Ablative and transport fractionation of trace elements during laser sampling of glass and copper // Spectrochim. Acta, 1997. Part B. V. 52. P. 2093–2102.

Outridge P.M., Doherty W., Gregroire D.C. The formation of trace element enriched particulates during laser ablation of refractory materials // Spectrochim. Acta, 1996. Part B. V. 51. P. 1451–1462.

Ouyang L., Ching W. Y. Electronic structure and dielectric properties of dielectric gate material $(ZrO_2)_x(SiO_2)_{1-x} // J$. Appl. Phys., 2004. V. 95. No 12. P. 7918–7924.

Ozkan H., Crtz L., Jamieson J.C. Elastic constants of nonmetamict zirconium silicate // J. Appl. Phys., 1974. V. 45. P. 556–568.

Pacchioni G.J. Modeling doped and defective oxides in catalysis with density functional theory methods: Room for improvements // Chem. Phys., 2008. V 128 (18). 182505 (10).

Palenik C.S., Nasdala L., Ewing R.C. Radiation damage in zircon // Amer. Miner., 2003. V. 88. P. 770–781.

Pagel M. The mineralogy and geochemistry of uranium, thorium, and rare-earth elements in two radioactive granites from the Vosges // Miner. Mag., 1982. V. 46. P. 149–161.

Park B., Weber W.J., Corrales L.R. Molecular dynamics simulation study of threshold displacements and defect formation in zircon // Phys. Rev. B., 2001. V. 64. P. 174108–174108.

Parslow G.R., Brandstaetter F., Kurat G., Thomas D.J. Chemical ages and mobility of U and Th in anatectites of the Cree Lake zone, Saskatchewan // Canad. Miner., 1985. V. 23. P. 543–551.

Paquette J.L., Montel J.M., Chopin C. U-Th-Pb dating of the Brossasco ultrahigh-pressure metagranite, Dora-Maira massif, western Alps // Eur. J. Miner., 1999. V. 11. P. 69–77.

Parrish R.R. U-Pb dating of monazite and its application to geological problems // Canad. J. Earth Sci., 1990. V. 27. P. 1431–1450.

PearcyE.C.,PtikrylJ.D.,MurphyW.M.,LeslieB.W. Altaration of uraninite from Nopal I deposit compared to degradation of spent nuclear fuel in the proposed U.S. high-level nuclear waste repository at Yucca Mountain, Nevada // Appl. Geochem., 1994. V. 9. P. 713–732.

Picot V., Deschanels X., Peuget S., Glorieux B., Seydoux-Guillaume A.M., Wirth R. Ion beam radiation effects in monazite // J. Nucl. Mater., 2008. V. 381. P. 290–296.

Poller U., Huth J., Hoppe P., Williams I.S. REE, U, Th, and Hf distribution in zircon from Western Carpathian Variscan granitoids: a combined cathodoluminescence and ion microprobe study // Amer. J. Sci., 2001. V. 301. P. 858–876.

Rietveld H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures // J. Appl. Cryst., 1969. V. 2. P. 65–71.

Plant J.A., Simpson P.R., Smith B., Windley B.F. Uranium ore deposits: products of the radioactive Earth // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Uranium, 1999. V. 38. P. 255–319.

Robinson M.T. Basic physics of radiation damage production // J. Nucl. Mater., 1994. V. 216. P. 1–28.

Podor R., Cuney M. Experimental study of Thbearing $LaPO_4$ (780 8C, 200 MPa): Implications for monazite and actinide orthophosphate stability // Amer. Miner., 1997. V. 82. P. 765–771.

Podor R., Raman spectra of the actinide-bearing monazites // Eur. J. Miner., 1995. V. 7. P. 1353–1360.

Poitrasson F., Freydier R., Mao X., Mao S.S., Russo R.E. Femtosecond laser ablation ICP MS analysis of trace elements in solids // Geochim. Cosmochim. Acta, 2005. V. 69 (10). P. A54

Poitrasson F., Mao X.L., Mao S.S. Freydier R., Russo R.E. Comparison of ultraviolet femtosecond and nanosecond laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis in glass, monazite, and zircon // Anal. Chem., 2003. V. 75. P. 6184–6190.

Pointer C.M., Ashworth J.R., Ixer R.A. The zircon-thorite mineral group in metasomatized granite, Ririwai, Nigeria. Geochemistry and metastable solid solution of thorite and coffinite // Mineral. Petrol., 1988a. V. 38. P. 245–262.

Pointer C.M., Ashworth J.R., Ixer R.A. The zircon-thorite mineral group in metasomatized granite, Ririwai, Nigeria. Zoning, alteration and exsolution in zircon // Miner. Petrol., 1988b. V. 39. P. 21–37.

Pouchou, J. L., Pichoir, F. A new model for quantitative analyses. I. Application to the analysis of homogeneous samples // La Recherche Aérospatiale, 1984. V. 3. P. 13–38.

Pruneda J.M., Artacho E. Energetics of intrinsic point defects in $ZrSiO_4$ // Phys. Rev. B., 2005. V. 71. P. 94–113.

Purton J., Urch D.S. High-resolution silicon K Xray spectra and crystal structure // Miner. Mag., 1989. V. 53. P. 239–244.

Pyle J.M. Temperature-time paths from phosphate accessory phase paragenesis in the Honey Brook Upland and associated cover sequence, Pennsylvania, USA // Lithos, 2006. V. 88. P. 201–232.

Pyle J.M., Spear F.S., Wark D.A. Electron microprobe analysis of REE in apatite, monazite and xenotime: Protocols and pitfalls // Rev. Miner. Geochem., 2002. V. 48. P. 337–362.

Pyle J.M., Spear F.S., Wark D.A., Daniel C.G., Storm L.C. Contributions to precision and accuracy of monazite microprobe ages // Amer. Miner., 2005a. V. 90. P. 547–577.

Pyle J.M., Spear F.S., Cheney J.T., Layne G. Monazite ages in the Chesham Pond Nappe, SW New Hampshire, USA: Implications forassembly of central New England thrust sheets // Amer. Miner., 2005b. V. 90. P. 592–606.

Pyykko P., Toivonen H. Tables of representation and rotation matrices for the relativistic irreducible representations of 38 point groups. Acta Academ. Aboensis. Ser. B. 1983. N 2. 50 p.

Ramakrishnan S.S., Gokhale K.V.G.K., Subbarao E.C. Solid solubility in the system zircon-hafnon // Mater. Res. Bull., 1969. V. 4. P. 323–328.

Remond G., Cesbron F., Chapoulite R., Ohnenstetter D., Roques-Carmes C., Schvoerer M. Cathodoluminescence applied to the microcharacterization of mineral materials: a present status in experimentation and interpretation // Scanning Microsc. Intl., 1992. V. 6. P. 23–68.

Remond G., Phillips M.R., Roques-Carmes C. Importance of instrumental and experimental factors on the interpretation of cathodoluminescence data from wide band gap materials // Cathodoluminescence in Geosciences. Springer, Berlin-Heidelberg, 2000. P. 59–126.

Reviews in mineralogy and geochemistry. Phosphates: Geochemical, Geobiological, and Materials Importance. Eds.: Kohn M.L., Rakovan J., Hughes J.M.: Mineralogical society of America, 2003. V. 48. 742 p.

Reviews in mineralogy and geochemistry. Zircon. Eds.: Hanchar J.M., Hoskin P.W.O. Washington D.C.: Mineralogical society of America, 2004. V. 53. 500 p.

Rhede D., Wendt I., Forster H.-J. A three-dimensional method for calculating independent chemical U/Pb- and Th/Pb-ages of accessory minerals // Chem. Geol., 1996. V. 130. P. 247–253.

Richman I., Kisliuk P., Wong E.J. Absorption specrtum of U^{4+} in zircon (ZrSiO₄) // Phys. Rev. B., 1967. V. 155. P. 262–267.

Rignanese G.-M., Gonze X., Pasquarello A. Firstprinciples study of structural, electronic, dynamical, and dielectric properties of zircon // Phys. Rev. B., 2001. V. 63. P. 104305 (7).

Rignanese G.-M., Detraux F., Gonze X., Bongiorno A., Pasquarello A. Dielectric Constants of Zr Silicates: A First-Principles Study // Phys. Rev. Lett., 2002. V. 89 (11). P. 117601 (4).

Rios S., Malcherek T., Salje E.K.H., Domeneghetti C. Localized defects in radiation-damaged zircon // Acta Cryst., 2000b. 56. P. 947–952.

Rios S., Salje E.K.H., Zhang M., Ewing R.C. Amorphization in zircon: evidence for direct impact damage // J. Phys.: Condens. Matter., 2000a. V. 12. P. 2401–2412. **Robertson J.** Band structures and band offsets of high K dielectrics on Si // Appl. Surf. Sci., 2002. V. 190. P. 2–10.

Robinson K., Gibbs G.V., Ribbe P.H. The structure of zircon: a comparison with garnet // Amer. Miner., 1971. V. 56. P. 782–790.

Robit-Pointeau V., Poinssot C., Vitorge P., Grambow B., Cui D., Spahiu K., Catalette H. Assessment of the relevance of Coffinite formation within the near-field environment of spent nuclear fuel geological disposals // Mat. Res. Soc. Symp., 2006. V. 932. P. 489–496.

Rosen A., Ellis D.E. Relativistic molecular calculations in the Dirac-Slater model // J. Chem. Phys., 1975. 62. № 8. P. 3039–3049.

Rudra J.K., Fowler W.B. Oxygen vacancy and the E_1 center in crystalline SiO₂ // Phys. Rev. B., 1987. V. 35. P. 8223–8230.

Russo R.E., Mao X.L., Borisov O.V., Liu H.C. Influence of wavelength on fractionation in laser ablation ICP MS // J. Analyt. Atom. Spectrom., 2000. V. 15. P. 1115–1120.

Saaduone I., Leeuw N.H. A computer simulation study of the accommodation diffusion of He in uranium and plutonium-dopd zircon $(ZrSiO_4)$ // Geoch. Cosm. Acta., 2009. V. 73. P. 3880–3893.

Saetveit N.J., Bajic S.J., Baldwin D.P., Houk R.S. Influence of particle size on fractionation with nanosecond and femtosecond laser ablation in brass by online differential mobility analysis and inductively coupled plasma mass spectrometry // J. Analyt. Atom. Spectrom., 2008. V. 23. P. 54–61.

Saka Y., Saruwatari F., Suzuki K. CHIME zircon age of garnet-granite from the Naguri Fault Zone, Kanto Mountains, central Japan // J. Geol. Soc. Japan, 2005. V. 111. № 6. P. 361–368.

Salje E.K.H., Chrosch J., Ewing R.C. Is «metamictization» of zircon a phase transition? // Amer. Miner., 1999. V. 84. P. 1107–1116.

Santosh M., Tanaka K., Yokoyama K., Collins A.S. Late Neoproterozoic-Cambrian felsic magmatism along transcrustal shear zones in southern India: U-Pb electron microprobe ages and implications for the Amalgamation of the Gondwana continent // Gond. Res., 2005. V. 8. P. 31–42.

Santosh M., Yokoyama K., Biju-Sekhar S., Rogers J.J.W. Multiple tectonothermal events in the granulite blocks of southern India revealed from EPMA dating: implications on the history of supercontinents // Gond. Res., 2003. V. 6. N^o 1. P. 29–63.

Scherrer N.C., Engi M., Gnos E., Jakob V. Monazite analysis: from sample preparation to microprobe age dating and REE quantification // Schweiz. Miner. Petrogr. Mitt., 2000. V. 80. P. 93–105.

Schmitz S., Moller A., Wilke M., Malzer W., Kanngiesser B., Bousquet R., Berger A., Schefer S. Chemical U-Th-Pb dating of monazite by 3D-Micro Xray fluorescence analysis with synchrotron radiation // Eur. J. Miner., 2009. V. 21. P. 927–945.

Seydoux A.M., Montel J.-M. Experimental determination of the thorite-huttonite phase transition // EUG IX. Terra Nova 9. Abstract Supplement, 1997. V. 1. 42119 p.

Seydoux-Guillaume A.M., Paquette J.L., Wiedenbeck M., Montel J.M., Heinrich W. Experimental resetting of the U-Th-Pb systems in monazite // Chem. Geol., 2002. V. 191. P. 165–181.

Seydoux-Guillaume A.M., Wirth R., Deutsch A., Scharer U. Microstructure of 24-1928 Ma concordant monazites; implications for geochronology and nuclear waste deposits // Geoch. Cosmochim. Acta, 2004. V. 68. № 11. P. 2517–2527.

Seydoux-Guillaume A.M., Wirth R., Ingrin J. Contrasting response of ThSiO_4 and monazite to natural irradiation // Eur. J. Miner., 2007. V. 19. P. 7–14.

Seydoux-Guillaume A.M., Wirth R., Nasdala L., Gottschalk M., Montel J.M., Heinrich W. An XRD, TEM and Raman study of experimentally annealed natural monazite // Phys. Chem. Miner., 2002. V. 29. P. 240–253.

Seydoux-Guillaume A.M., Paquette J.-L., Wiedenbeck M., Montel J.-M., Heinrich W. Experimental resetting of the U-Th-Pb system in monazite // Chem. Geol., 2002. V. 191. P. 165–181.

Shaub B.M. The occurrence, crystal habit and composition of the uraninite from the Ruggles Mine, near Crafton Centre, New Hampshire // Amer. Miner., 1938. V. 23. № 5. P. 334–341.

Shaub B.M. Age of the uraninite from the McLear pegmatite, near Richville station, St. Lawrence County, New York // Amer. Miner., 1940. V. 25. № 7. P. 480–487.

Skuja L. Optically active oxygen-defiency-related centers in amorphous silicon dioxide // J. Non-Crystal-line Solids, 1998. V. 239. P. 16–48.

Silva E.N., Ayala A.P., Guedes I., Paschoal C.W.A., Moreira R.L., Loong C.-K., Boatner L.A. Vibrational spectra of monazite-type rare-earth orthophosphates // Optic. Mater., 2006. № 29. P. 224–230. Smellie, J.A.T., Cogger, N., Herrington, J. Standards for quantitative microprobe determination of uranium and thorium with additional information on the chemical formulae of davidite and euxenite–polycrase // Chem. Geol., 1978. V. 22. P. 1–10.

Smits G. (U, Th)-bearings silicates in reefs of the Witwatersrand, South Africa // Canad. Miner., 1989. V. 27. P. 643–655.

Smith D.K. Uranium mineralogy. In: Uranium Geochemistry, Mineralogy, Geology, Exploration and Resources / Eds. De Vivo B., Ippolito F., Capaldi G., Simpson P.R. London: the Institution of Mining and Metallurgy, 1984. P. 43–88.

Snetsinger K.G., Polkowsky G. Rare accessory uraninite in a Sierran granite // Amer. Miner., 1977. V. 62. P. 587–588.

Speer J.A. The actinide orthosilicates. In: Ribbe, P.H. (Ed.), Orthosilicates // Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America, Washington, DC, 1982. V. 5. P. 113–135.

Speer J.A. Zircon // Rev. Miner., 1982. V. 5. (2nd edn) P. 67–112.

Spear F.S., Pyle J.M. Apatite, monazite, and xenotime in metamorphic rocks // Rev. Miner. Geochem., 2002. V. 48. P. 293–335.

Spray J.G., Rae D.A. Quantitative electron-microprobe analysis of alkali silicate glasses: A review and user guide // Canad. Miner., 1995. V. 33. P. 323–332.

Stalbauer E., Wichmann V., Lott V., Keller C. Relationships of the ternary La-U-O system // J. Solid State Chem., 1974. V. 10. P. 341–350.

Steiger R.H., Jдger E. Subcommision on geochronology: convention on the use of decay constants in geoand cosmochronology // Earth Plan. Sci. Lett., 1977. V. 36. P. 359–362.

Stormer J.C., Jr., Pierson M.L., Tacker R.C. Variation in F and Cl X-ray intensity due to anisotropic diffusion in apatite during electron microprobe analysis // Amer. Miner., 1993. V. 78. P. 641–648.

Subbarao E.C., Agrawal D.K., McKinstry H.A., Sallese C.W., Roy R. Thermal expansion of compounds of zircon structure // J. Amer. Ceram. Soc., 1990. V. 73. P. 1246–1252.

Suljoti E., Nagasono M., Pietzsch A., Hickmann K., Trots D.M., Haase M., Wurth W., Fuhlisch1 A. Geometric and electronic structure of lanthanide orthophosphate nanoparticles determined with X-rays // J. Chem. Phys., 2008. V. 128. P. 134701–134709. **Sun S.S.** Chemical composition and origin of the Earts primitive mantie // Geochim. Cosmohim. Acta., 1982. V. 46. P. 179–192.

Sunder S., Cramer J.J., Miller N.H. Geochemistry of the CigarLake deposit: XPS studies // Radiochem. Acta, 1996. V. 74. P. 303–307.

Suzuki K. Grain-boundary enrichment of incompatible elements in some mantle peridotites // Chem. Geol., 1987. V. 63. P. 319–334.

Suzuki K., Adachi M. Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids // J. Metamorp. Geol., 1998. V. 16. P. 23–37.

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

Suzuki K., Adachi M., Tanaka T. Middle Precambrian provenance of Jurassic sandstone in the Mino Terrane, central Japan: Th-U-total Pb evidence from an electron microprobe monazite study // Sediment. Geol., 1991. V. 75. P. 141–147.

Suzuki K., Adachi M., Kajizuka I. Electron microprobe observations of Pb diffusion in metamorphosed detrital monazite // Earth Plan. Sci. Lett., 1994. V. 128. P. 391–405.

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

Swain G.M., Hand M., Teasdale J., Rutherford L., Clark C. Age constraints on terrane-scale shear zones in the Gawler Craton, southern Australia // Precamb. Res., 2005. V. 139. P. 164–180.

Szczygiel I., Macalik L., Radominrska E., Znamierowska T., Maczka M., Godlewska P., Hanuza J. Luminescence, electronic absorption and vibrational IR and Raman studies of binary and ternary cerium ortho-, pyro- and meta-phosphates doped with Pr³⁺ ions // Optic. Mater., 2007. V. 29. P. 1192–1205.

Taylor M., Ewing R.C. The crystal structures of the ThSiO₄ polymorphs: huttonite and thorite // Acta Crystallog. B: Structural Crystallogr. Crystal Chem., 1978. V. B34. P. 1074–1079.

Tennant W.C., Claridge R.F.C., Walsby C.J., Lees N.S. Point defects in crystalline zircon (zirconium silicate), ZrSiO₄: electron paramagnetic resonance studies // Phys. Chem. Miner., 2004. V. 31. P. 203–223. Terki R., Bertrand G., Aourag H. Full potential investigations of structural and electronic properties of $ZrSiO_4$ // Microelectr. Engin., 2005. V. 81. P. 514–523.

Terra O., Dacheux N., Clavier N., Podor R., Audubert J., Auduberty F. Preparation of Optimized Uranium and Thorium Bearing Brabantite or Monazite/Brabantite Solid Solutions // J. Amer. Ceram. Soc., 2008. V. 91. № 11. P. 3673–3682.

Terry M.P., Robinson P., Hamilton M.A., Jercinovic M.J. Monazite geochronology of UHP and HP metamorphism, deformation, and exhumation, Nordoyane, Western Gneiss Region, Norway // Amer. Miner., 2000. V. 85. P. 1651–1664.

Tickyj H., Hartmann L.A., Vasconcellos M.A.Z., Philipp R.P., Remus M.V.D. Electron microprobe dating of monazite substantiates ages of major geological events in the southern Brazilian shield // J. South Amer. Earth Sci., 2004. V. 16. P. 699–713.

Tomaschek F., Kennedy A., Villa I., Lagos M., Ballhaus C. Zircons from Syros, Cyclades, Greece – recrystallisation and mobilization of zircon during high pressure metamorphism // J. Petrol., 2003. V. 44. Iss.11. P. 1977–2002.

Townsend K.J., Miller C.F., D'Andrea J.L., Ayers J.C., Harrison T. M., Coath C.D. Low temperature replacement of monazite in the Ireteba granite, Southern Nevada: Geochronological implications // Chem. Geol., 2001. V. 172. P. 95–112.

Trachenko K.O., Dove M.T., Salje E.K. Atomistic modelling of radiation damage in zircon // J. Phys.: Condens. Matter, 2001. V. 13. P. 1947–1959.

Tracy R.J. Retrogression of monazite in sheared and unsheared rocks and the resetting of monazite U-Th-Pb ages // Geol. Soc. America, 2002. Abstracts. V. 34. 171 p.

Tropper P., Harlov D., Krenn E., Finger F., Rhede D., Bernhard F. Baddeleyite + W-bearing zirconolite + zirconbearing veins as indicators for the polymetamorphic evolution of the eastern, lower Austroalpine nappes (Stubenberg Granite contact aureole, Styria, Eastern Alps, Austria) // Geophys. Res. Abst., 2006. V. 8. P. 04968.

Tropper P., Harlov D., Krenn E., Finger F., Rhede D., Bernhard F. Zr-bearing minerals as indicators for the polymetamorphic evolution of the eastern, lower Austroalpine nappes (Stubenberg Granite contact aureole, Styria, Eastern Alps, Austria) // Lithos, 2007. V. 95. P. 72–86.

UshakovS.V., GongW., YagovkinaM.M., Helean K.B., Lutze W., Ewing R.C. Solid solution of Ce, U, and Th in zircon // Ceramic Transactions, 1999. V. 93. P. 357–363. Verma P., Abbi S.C., Jain K.P. Raman-scattering probe of anharmonic effects in GaAs. // Phys. Rev. B., 1995. V. 51, P. 16660–16667.

Vernikovsky V.A., Vernikovskaya A.E., Wingate M.T.D., Popov N.V., Kovach V.P. The 880-864 Ma granites of the Yenisey Ridge, Western Siberian margin: geochemistry, SHRIMP geochronology, and tectonic implications // Precamb. Res., 2007. V. 154. P. 175–191.

Vlach S.R.F., Gualda G.A.R. Microprobe monazite dating and the ages of some granitic and metamorphic rocks from South-Eastern Brazil // Revista Brasil. Geoscienc, 2000. V. 30(1). P. 214–218.

Wallace P., Carmichael I.S.E. Oxidation state of sulfur in submarine glassy lavas as determined by electron microprobe // EOS, 1992. V. 73. 607 p.

Wang R.-C., Wang D.-Z., Zhao G.-T., Lu J.-J., Chen X.-M., Xu S.-J. Accessory mineral record of magma–fluid interaction in the Laoshan I- and A-type granitic complex, Eastern China // Physics and Chemistry of the Earth, 2001. Series A. V. 26. P. 835–849.

Wang R.C., Wu J.W., Wang S. Allanite as UHP phase in Sulu UHP eclogites (CCSD): evidence from electron-microprobe chemical dating of epidote-group minerals // Mitt. Österr. Miner. Ges., 2005. V. 150. P. 236–245.

Weber W.J. Alpha-decay-induced amorphization in complex silicate structures // J. Amer. Ceram. Soc., 1993. V. 76. P. 1729–1738.

Weber W.J. Models and mechanisms of irradiationinduced amorphization in ceramics // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section. B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2000. V. 166. P. 98–106.

Weber W.J. Radiation-induced defects and amorphization in zircon // J. Mater. Res., 1990. V. 5. P. 2687–2697.

Weber W.J., Devanathan R., Meldrum A., Boatner L.A., Ewing R.C., Wang L.M. The effect of temperature and recoil spectra on amorphization in zircon // Microstructural Processes in Irradiated Materials. Eds.: Zinkle S.J., Lucas G.E., Ewing R.C., Williams J.S. Mater., 1999. V. 540. P. 367–372.

Weber W.J., Ewing R.C., Wang L.M. The radiation-induced crystalline-to-amorphous transition in zircon // J. Mater. Research, 1994. V. 9. P. 688–698.

Westrenen V.W, Frank M.R., Hanchar J.M., Fei Y., Finch R.J., Zha C.-S. In situ determination of the compressibility of synthetic pure zircon ($ZrSiO_4$) and the onset of the zircon-reidite phase transition // Amer. Miner., 2004. V. 89. P. 197–203. **Williams I.S.** U-Th-Pb geochronology by ion microprobe: Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes // Rev. Econ. Geol., 1998. V. 7. P. 1–35.

Williams M.L., Jercinovic M.J. Microprobe monazite geochronology: putting absolute time into microstructural analysis // J. Struct. Geol., 2002. V. 24. P. 1013–1028.

Williams M.L., Jercinovic M.J., Goncalves P., Mahan K. Format and philosophy for collecting, compiling, and reporting microprobe monazite ages // Chem. Geol., 2006. V. 225. P. 1–15.

Williams M.L., Jercinovic M.J., Hetherington C.J. Microprobe Monazite Geochronology: Understanding Geologic Processes by Integrating Composition and Chronology // Annual Rev. Earth Planet. Sci., 2007. V. 35. P. 137–175.

Williams M.L., Jercinovic M.J., Terry M.P. Age mapping and dating of monazite on the electron microprobe: deconvoluting multistage tectonic histories // Geol., 1999. V. 27. № 11. P. 1023–1026.

Williford R.E., Begg B.D., Weber W.J., Hess N.J. Computer simulation of Pu³⁺ and Pu⁴⁺ substitutions in zircon // J. Nucl. Mater., 2000. V. 278. P. 207–211.

Williford R.E., Devanathan R., Weber W.J. Computer simulation of displacement threshold energies for several ceramic materials // Nucl. Instr. Methods, 1998. V. 141. P. 98–103.

Williford R.E., Weber W.J., Devanathan R., Cormack A.N. Native vacancy migrations in zircon // J. Nucl. Mater., 1999. V. 273. P. 164–170.

Wyckoff R.W.G. Crystal Structures, Miscellaneous Inorganic Compounds, Silicates, and Basic Structural Information.2nd ed., V. 1-4, Interscience Publishers, New York. 1968. 566 p.

Woodhead J.A., Rossman G.R., Silver L.T. The metamictization of zircon: radiation dose-dependant structural characteristics // Amer. Miner., 1991. V. 76. P. 74–82.

Xie L., Wang R., Chen X., Qiu J., Wang D. Thrich zircon from peralka line A-type granite: Mineralogical features and petrological implications // Chinese Sci. Bulletin, 2005. V. 50. P. 809–817.

Xu H.F., Wang Y.F. Electron energy loss spectroscopy study of oxidation states of Ca and U in pirochlore and uraninite – natural analogues for Pu- and U-bearing waste forms // J. Nucl. Mater., 1999. V. 265. P. 117–123. Xu Y.-N., Ching W.Y. Electronic and optical properties of all polymorphic forms of silicon dioxide // Phys. Rev. B., 1999. V. 44. P. 110–148.

Yang B., Luff B.J., Townsend P.D. Cathodoluminescence of natural zircons // J. Phys.: Condens. Matter., 1992. V. 4. P. 5617–5624.

Yang P., Pattison D. Genesis of monazite and Y zoning in garnet from the Black Hills, South Dakota // Lithos, 2006. V. 88. P. 233–253.

York D. Least-squares fitting of a straight line // Canad. J. Phys., 1966. V. 44. P. 1079–1086.

Yu S.C., Tung S.F., Lee J.S., Bai W.J., Yang J.S., Fang Q.S., Zhang Z.M., Kuo C.T. Mantle zircon from Tibet // Western Pacific Earth Sci., 2001. № 1. P. 47–57.

Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The stopping and range of ions in solids. New York: Pergamon press, 1985. V. 1. 321 p.

Zhang M., Boatner L.A., Salje E.K.H., Ewing R.C. Daniel P., Weber W.J., Zhang Y., Farnan I. Micro-Raman and micro-infrared spectroscopic studies of Pband Au-irradiated ZrSiO₄: Optical properties, structural damage, and amorphization // Phys. Rev. B., 2008. V. 77. P. 144110–144123.

Zhang M., Boatner L.A., Salje E.K.H., Honda S., R.C. Ewing R.C. Pb+ irradiation of synthetic zircon $(ZrSiO_4)$: Infrared spectroscopic investigation // Amer. Miner., 2008. V. 93. P. 1418–1423.

Zhang M., Salje E.K.H., Capitani G.C., Leroux H., Clark A.M., Schluter J., Ewing R.C. Annealingof adecay damage in zircon: a Raman spectroscopic study // J. Phys.: Condens Matter, 2000b. V. 12. P. 3131–3148.

Zhang M., Salje E.K.H., Farnan I., Graeme-Barber A., Daniel P., Ewing R.C., Clark A.M., Lennox H. Metamictization of zircon: Raman spectroscopic study // J. Phys.: Condens Matter, 2000a. V. 12. P. 1915–1925.

Zhu X.K., O'Nions R.K. Monazite chemical composition: some implications for monazite geochronology // Contrib. Miner. Petrol., 1999. V. 137. P. 351–363.

Ziemann M.A., Forster H.J., Harlov D.E., Frei D. Origin of fluorapatite-monazite assemblages in a metamorphosed, sillimanite bearing pegmatoid, Reinbolt Hills, East Antarctica // Eur. J. Miner., 2005. V. 17. P. 567–579.

Zimmerer G. Status report on luminescence investigations with synchrotron radiation at HASYLAB // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A., 1991. V. 308. P. 178–186. http://www.cse.clrc.ac.uk/msi/software/DL_POLY/ http://www.cse.scitech.ac.uk/ccg/software/DL_POLY/MANUALS/USRMAN2.20.pdf http://www.geo.umass.edu/probe/Monazite%20techn iques-analysis%20frames.html http://www.nendai.nagoya-u.ac.jp/gsd/CHIME/