

**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЦИРКОНА КУМИРСКОГО
ШТОКА ГОРНОГО АЛТАЯ**

А.И. Гусев

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М.

Шукишина, Бийск, Алтайский край, 659333, Россия

**MINERALOGY-GEOCHEMICAL PECULIARITIES OF ZIRCON KUMIR STOCK
GORNÝ ALTAI**

A.I. Gusev

Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy, Biysk, Altay krai, 659333, Russia

В работе впервые приведены данные по абсолютному возрасту (по циркону методом SHRIMP II), составу циркона Кумирского штока и грейзенов. Выявлены закономерности изменения главных и рассеянных элементов в магматогенном, метамиктном и пневматолито-гидротермальном цирконах. В указанном направлении отмечено увеличение в составе минерала высокозарядных элементов - U, Nb, Sc, $\sum\text{REE}$, $\sum\text{Sc}$, лёгких РЗЭ и уменьшение Eu/Eu*, Ce/Ce*. В зависимости от состава и активности летучих компонентов во флюидах, степени окисленности среды и фугитивности кислорода менялись составы редкоземельных элементов (РЗЭ) и их дифференциации, что отразилось на особенностях проявления тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М- и W- типов.

Илл. 8. Табл. 3. Библ. 24.

Ключевые слова: циркон, высоко-зарядные элементы, U, Nb, Sc, РЗЭ, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ.

Data on absolute age (on zircon of method SHRIMP II), composition of zircon Kumirskii stock and greisen lead in paper. Regularities of changing basic and trace elements in magmatic, metamict and pneumatolytic-hydrothermal zircons discovered. Increasing in composition of mineral of high field strength elements - U, Nb, Sc, $\sum\text{REE}$, $\sum\text{Sc}$, light REE and decreasing of Eu/Eu*, Ce/Ce* noted in point out. Contents of REE its differentiation changed in dependence from composition and activity of volatile components in fluids, degree oxidizing of environment and fugacity oxygen, that it reflected on peculiarities of manifestation tetradic effect fractionation REE M- and W- types.

Figures 8. Tables 3. References 24.

Key words: zircon, high field strength elements - U, Nb, Sc, REE, tetradic effect fractionation REE.

Введение

Комплексное Кумирское скандий-уран-редкоземельное месторождение пространственно и парагенетически связано с Кумирским штоком гранитоидов. По запасам скандия и редких земель оно относится к крупным объектам мирового класса (Гусев, Гусев, 2020). В аляскитовых эгирин-рибекитовых гранитах штока присутствуют цирконы магматические, метамиктные, а в грейзенах Кумирского месторождения фиксируется и гидротермальный силикат циркония. В этой связи целесообразно исследовать состав элементов-примесей указанных цирконов и выявить закономерности их поведения в указанном ряду от магматического процесса до пневматоито-гидротермального.

Известно, что циркон (ZrSiO_4) обнаруживается в широком ряду изверженных пород от пералюминиевых до паралкалиновых (Dai et al. [2011](#); Liu et al. [2006](#)), и он является химически и физически надёжным акцессорным минералом, который может быть обнаружен в метаморфических (Sláma et al. [2007](#); Wang and Griffen [2004](#)) и осадочных породах (Anthony et al. [2003](#); Shao et al. [2016](#); Zhou et al. [2015](#)). Циркон является ключевым минералом в понимании в геологической истории Земли (Cherniak and Watson [2003](#)), обязанный двум важным характеристикам:

а- он является вмещителем для многих геохимических индикаторных элементов (таких как высоkozарядных элементов (HFSE), редкоземельных элементов (REE) и радиоактивных элементов урана и тория (Fourcade and Allegre [1981](#); Gromet and Silver [1983](#); Harrison et al. [1986](#)), которые обладают противоположными линиями поведения в течение магматической кристаллизации (Belousova et al. [2002](#));

б – он широко используется в геохронологии (U–Th–Pb датировании) (Williams, 1998).

Аналитические методы

Пробо-подготовка и изотопно-геохронологические исследования выполнены в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург). Изотопные измерения в цирконах проводилось по классической методике (Williams, 1998) на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-II. При выборе в цирконах участков для анализа использовались оптические и катодолюминисцентные наблюдения. U-Pb отношения были нормированы на значение 0,0668 по соответствующему стандарту «Темора», что отвечает его возрасту 416,75 млн лет. Погрешность измерений единичных анализов в пределах 1s, для расчетных конкордантных возрастов и их пересечений с конкордией - 2s. Графики строились с использованием программы ISOPLOT/EX. Нормирование редких элементов и РЗЭ на спайдеграммах проведено по составу соответственно примитивной мантии и хондрита (Mc Donough, Sun, 1995) .

Микроэлементный состав циркона исследован методом LAICP-MS с использованием масс-спектрометра ELEMENT фирмы FinninganMat в комплексе с лазерной приставкой UP-213, Nd:YAG фирмы New Wave Research (в Аналитическом центре Института Геологии и минералогии СО РАН г. Новосибирска).

Геологическое строение участка и состав Кумирского штока

Кумирский шток входит в одноименное рудное поле, расположенное в пределах Холзунско-Чуйского тектонического блока и приурочено к наложенной Коргонской вулкано-плутонической структуре (BTC) (Коргонский прогиб) (рис. 1).

В Коргонской BTC вулканический разрез имеет трёхчленное строение. Нижним юнитом этого разреза является ергольская свита (O_2), сложенная доминирующими пёстро-цветными лавами, туфами андезитов, андезибазальтов, базальтов, редко андезидацитов и дацитов. Значительно меньшие объёмы занимают пирокласто-осадочные и вулканогенно-терригенные образования. Мощность свиты составляет 1550 м. Среднюю часть разреза занимают отложения кумирской свиты ($O-S?$), сложенной песчаниками, алевролитами, сланцами, известняками (в том числе микритами), среди которых отмечаются линзы и прослои лав и туфов андезитов, андезибазальтов, риодацитов, дацитов и риолитов. Мощность кумирской свиты варьирует от 500 до 2800 м. Верхним членом разреза Коргонской BTC является коргонская свита (D_{1-2}), представленная пёстро-окрашенными сваренными и спекшимися туфами и туфолавами дацитов, риодацитов и риолитов. Общая мощность коргонской свиты варьирует от 5 до 5,5 км. Внутренне строение свит усложняется многочисленными телами вулканитов жерловой фации и субвулканическими телами (Коргонский, Щербнухинский, Красноярский штоки), с которыми связаны месторождения железо-оксидного медно-золоторудного класса и субвулканического золото-серебряного (Холзунское, Коргонское, Красноярское, Щербнухинское и другие месторождения).

Дискордантный Кумирский шток имеет площадь около 3 км² и вытянут в северо-восточном направлении, круто погружаясь - в западном (рис. 2).

Он состоит из кварцевых порфиров и аляскит – порфиров. Породы экзоконтакта подверглись ороговиканию, скарнированию, грейзенизации, альбитизации и биотитизации. В эндоконтакте штока проявлена интенсивная альбитизация.

Щелочной аляскит-порфир эгирин-рибекитовый имеет светлую окраску с розоватым оттенком, характеризуется массивной текстурой и сложной структурой: порфировой, а в цементирующей массе породы – аплитовой. Лейкократовые минералы, составляющие 97% ее объема, представлены кали-натровыми полевыми шпатами (альбит, ортоклаз-микрпертит, санидин) – 65%, кварцем – 32%, образующими редкие идиоморфные

порфировые вкрапленники, но преимущественно выполняющими цементирующую аплитовидную массу породы. Меланократовые минералы, составляющие порядка 1% ее объема, представлены идиоморфными зернами эгирина и рибекита, размеры которых почти на порядок превышают размеры зерен цементирующей массы породы. Вторичные минералы представлены серицитом – 2%, развитым за счет фенокристаллов щелочных полевых шпатов и образующим неравномерно рассеянные скопления в кварц-полевошпатовой массе породы. Рудные минералы представлены лейкоксенизированным магнетитом; аксессуарные – апатитом, лейкоксеном.

По совокупности петрологических параметров порода лейкокатовая, крайне высокоглиноземистая ($Al^I=13,71$), принадлежит к кислым плутоническим породам щелочного ряда кали-натровой серии, относится к семейству щелочных лейкогранитов, соответствует виду щелочной аляскит, разновидности – щелочной аляскит-порфир эгирин-рибекитовый.

Оруденение скандия, редких земель и урана представлено грейзеновым и гидротермально-метасоматическим типами среди грейзенизированных пород и пропилитов в пространственной связи с умеренно щелочными гранитоидами штока, классифицируемыми анорогеном А- типом (в эндо-экзоконтактной части штока сформировалось месторождение Кумирское и проявления Кумирское II, Спартак, Кумирское III). Детальное описание оруденения Кумирского месторождения приведено в работе (Гусев, Гусев, Ефимова, 2009). Дополнительно к ранее известным типам оруденения в 2013 году при обследовании отвалов и стенок штольни нами выявлен новый тип оруденения, ранее не привлекавший к себе внимания. Это грейзеновая минерализация по ороговикованным песчаникам, где среди окварцованных и грейзенизированных пород совместно с вкрапленностью и гнездами пирита отмечена вкрапленность цинвальдита, литионита, поллуцита с содержанием лития от 0,1 до 0,5 %, цезия от 0,05 до 0,3 %. Кроме того, в этих рудах отмечаются повышенные содержания висмута, бериллия, олова, галлия, церия, циркония.

Абсолютный возраст аляскитовых эгирин-рибекитовых гранитов и описание цирконов

Породы Кумирского штока показали высокие содержания короткопризматического непрозрачного метамиктного циркона, очевидно рудной стадии, непригодного для измерений возраста. Многозональные чистые зерна магматического циркона (точки КМ-1.1.1, 1.6.1, 1.7.1, 1.8.1, 1.9.1 на рис.3) дали «нижнее» пересечение с конкордией в области возраста 421 и 405 млн. лет, что в совокупности с геологическими данными свидетельствует о правомерности отнесения Кумирского штока, наряду с другими

многочисленными субвулканическими телами в северной периферической полосе Коргонского прогиба, к лудлову позднего силура (421 ± 16 млн. лет) (рис. 4). и более позднему раннедевонскому, связанному с наложенным коргонским вулканическим комплексом.

Отдельные зерна прозрачного зонального циркона магматического облика, показавшие высокие значения отношений изотопов U-Pb и Pb-Pb на уровне раннего протерозоя и даже позднего архея (верхние пересечения с конкордией), являются ксеногенными и свидетельствуют о наличии докембрийских пород в области магмогенерации Кумирского штока.

В магматогенном цирконе Кумирского массива чаще развиты грани $\{100\}$ и отсутствуют грани призмы $\{110\}$, что указывает на высокую температуру расплава, из которого кристаллизовался циркон (Pupin, Turco, 1972).

Циркон из грейзенов Кумирского месторождения имеет дипирамидальный облик, как правило, эвгедральный с хорошо развитыми гранями $\{111\}$, близкими по облику к синтетическим кристаллам и гидротермальным цирконам (McNaughton et al., 2005; Schaltegger, 2007).

Состав цирконов

Магматогенный циркон по химизму близок к стехиометрическому по соотношению главных компонентов, что свойственно циртолитам (табл. 1). Он характеризуется повышенными концентрациями Y, Hf и пониженными U, а также суммой [Wasson, Kallemeyn, 1988] [Wasson, Kallemeyn, 1988]редкоземельных элементов (ΣREE). В некоторых зёрнах проявлен невысокий тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М- типа четвёртой тетрады (анализируется четвёртая тетрада, так как в составе минерала проявлена цериевая аномалия и теряет смысл использовать среднее значение между первой и третьей тетрадами). Это указывает на слабую активность фтор-комплексов в магматогенных флюидах. На спайдер-диаграмме отчётливо фиксируются негативные аномалии по Pr и Eu (рис. 5, а). [Wasson, Kallemeyn, 1988] [Wasson, Kallemeyn, 1988]Метамиктный циркон, в отличие от магматогенного обладает пониженными значениями в своём составе Zr, Y, Hf и повышенной суммой редкоземельных элементов, а также отношений Ce/Ce* (табл. 2). Хондрит-нормализованная модель распределения редких земель свидетельствует об отрицательных аномалиях Pr и Eu и положительной – Sm (рис. 5, б). ТЭФ РЗЭ М- типа четвёртой тетрады значительно выше в отдельных зёрнах минерала указывает на значительно более высокую активность фтор-комплексов в перераспределении редких земель в условиях воздействия гидротермальных флюидов на магматогенный циркон.

Циркон из грейзенов характеризуется резким увеличением концентраций U, Nb, Sc, ΣREE , ΣSc , лёгких РЗЭ и уменьшение Eu/Eu^* , Ce/Ce^* (табл. 3). В отдельных индивидах цирконосиликата проявлен ТЭФ РЗЭ М- и W- типов, что указывает на активную роль таких летучих компонентов, как H_2O и F. В спектре распределения РЗЭ наблюдается европиевая негативная аномалия, но исчезает цериевая положительная, за счёт относительного увеличения концентраций лёгких РЗЭ и их перераспределения (рис. 6).

Интерпретация результатов

Ярко проявленная позитивная аномалия церия в магматогенном цирконе указывает на окислительные условия его кристаллизации (Hinton, Upton, 1991), связанные с тем, что коэффициенты распределения ионов Ce^{4+} и Ce^{3+} в системе циркон—расплав более благоприятны в условиях повышенной фугитивности кислорода. Это подтверждается также и негативной аномалией европия в цирконосиликате Кумирского штока, которая оптимальна при повышенных значениях $f\text{O}_2$ (Burnham, Berry, 2012).

В большинстве публикаций по циркону из числа высокозарядных элементов в различных типах цирконосиликата анализируется поведение РЗЭ, Nb, Ta, U, Th, Rb, Sr, Hf, Re и Mo. Скандий, также входящий в группу высокозарядных элементов, не подвергался анализу. Кумирское месторождение в отличие от других объектов, связанных с анорогенными гранитоидами, в комплексных рудах имеет существенно скандиевый состав и тесно ассоциирует с редкими землями. Поэтому логично оценить особенности поведения скандия в магматогенном цирконе. Известно, что скандий, как и многие другие редкие и редкоземельные элементы в магматогенных флюидах, тесно связан с поведением таких летучих компонентов, как F, B, Li, P. Так как в цирконах Куира проявлен ТЭФ РЗЭ М- типа, обусловленный активностью фтор-комплексов, нами проанализировано поведение скандия в зависимости от величин ТЭФ РЗЭ (рис. 7). Тренд увеличения концентраций скандия в цирконе прямо зависит от величины ТЭФ РЗЭ М- типа. На диаграмме $\text{Eu}/\text{Eu}^* - \text{TE}_4$ наблюдается также увеличение значений Eu/Eu^* с повышением величин ТЭФ РЗЭ М- типа (рис. 8). Увеличение величины Eu/Eu^* при проявлении ТЭФ РЗЭ М- типа согласно рядам кислотности- щёлочности элементов по (Маракушев, 1976) ряда элементов Sm, Gd, Eu в водно-сероводородных растворах при стандартных условиях отвечает повышению кислотности среды. Следовательно, среда при кристаллизации цирконосиликата при которой происходило увеличение содержаний скандия в цирконе Кумирского штока, помимо, высокой окисленности обстановки, характеризовалась и увеличением кислотности.

Последующие процессы метамиктизации циркона и кристаллизация его в грейзенах происходила из флюидов, в которых важную роль играли, помимо фтора и водная составляющая.

Заключение

В результате исследований распределения редких и редкоземельных элементов в магматогенных, метамиктных и цирконах из грейзенов установлены закономерные изменения составов в зависимости от физико-химических изменений среды кристаллизации, а также и от флюидного режима анализируемых процессов. В направлении от магматогенного к гидротермальному процессу наблюдается увеличение концентраций высокочargedных элементов, в том числе и скандия, на фоне увеличения активности водных флюидов. Накопление скандия и других высоко-зарядных элементов в составе циркона происходило при повышении кислотности среды и повышении фугитивности кислорода.

Литература

1. **Виноградов А.П.** (1962) Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры. *Геохимия* (7), 555-572.
2. **Гусев А.И., Гусев Н.И.** (2020) Редкоземельное оруденение Коргонского прогиба. *Природные ресурсы Горного Алтая: геология, геофизика, экология, минеральные, водные и лесные ресурсы Алтая*. (1-2), 5-12.
3. **Гусев А.И., Гусев Н.И., Ефимова И.В.** (2009) Магматизм и оруденение Кумирского рудного поля, Горный Алтай. *Руды и металлы* (6), 21-28.
4. **Маракушев А.А.** (1976) Термодинамические факторы образования рудной зональности /Термодинамические факторы образования рудной зональности скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений. М.: Наука, 36-51.
5. **Anthony J.W, Bideaux R.A, Bladh K.W, Nichols M.C.** (2003) Handbook of mineralogy. / Mineralogical Society of America, Chantilly, 565.
6. **Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I.** (2002) Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib Mineral Petrol*, **143**, (3), 602–622.
7. **Burnham A.D., Berry A.J.** (2012) An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as function of oxygen fugacity. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **95**, (10), 196—212.
8. **Cherniak D.J., Watson E.B.** (2003) Diffusion in zircon. *Rev Miner Geochem.*, **53**, (1), 113–143.

9. **Dai J.G., Wang C.S., Hébert R., Li Y.L., Zhong H.T., Guillaume R., Bezard R., Wei Y.S.** (2011) Late Devonian OIB alkaline gabbro in the Yarlung Zangbo Suture Zone: Remnants of the Paleo-Tethys? *Gondwana Res* , **19**, (1), 232–243
10. **Fourcade S., Allegre C.J.** (1981) Trace elements behavior in granite genesis: a case study. The Calc-alkaline plutonic association from the Querigut complex (Pyrenees, France). *Contrib Mineral Petrol* , **76**, (2), 177–195.
11. **Gromet L.P., Silver L.T.** (1983) Rare earth element distributions among minerals in a granodiorite and their petrogenetic implications. *Geochim Cosmochim Acta*, **47**, (5), 925–939.
12. **Harrison T.M., Watson E.B., Rapp R.P.** (2006) Does anatexis deplete the lower crust in heat producing elements? Implications from experimental studies. *Trans Am Geophys Union (EOS)*., **67** (5), 386.
13. **Hinton R.W., Upton G.J.** (1991) The chemistry of zircon: variation within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, (2), 3287—3302.
14. **Liu Y.C., Li S.G., Gu X.F., Hou Z.H.** (2006) Zircon SHRIMP U-Pb dating for olivine gabbro at Wangmuguan in the Beihuaiyang zone and its geological significance. *China Sci Bull.*, **51**, (11), 2500–2506.
15. **Mc Donough W.F., Sun S.** (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, (3-4), 223-253.
16. **McNaughton N.J. Mueller A.G., Groves D.I.** (2005) The age of the giant Golden Mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia: ion-microprobe zircon and monazite U-Pb geochronology of a synmineralization lamprophyre dike. *Econ. Geol.*, **100**, (7), 1427–1440.
17. **Pupin J. P., Turco G.** (1972) Unetypologie originale du zircon accessoire. *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie*, **95**, (3), 348–359.
18. **Shao T., Cheng N., Song M.** (2016) Provenance and tectonic-paleogeographic evolution: Constraints from detrital zircon U-Pb ages of Late Triassic-Early Jurassic deposits in the northern Sichuan basin, central China. *J Asian Earth Sci* , **127**, (1), 12–31.
19. **Schaltegger U.** (2007) Hydrothermal zircon. *Elements*, **3**, (1), 51–68.
20. **Sláma J., Košler J., Pedersen R.B.** (2007) Behaviour of zircon in high-grade metamorphic rocks: evidence from Hf isotopes, trace elements and textural studies. *Contrib Mineral Petrol.*, **154**, (3), 335–356
21. **Wang X., Griffen W.L.** (2004) Unusual Hf contents in metamorphic zircon from coesite-bearing eclogites of the Dabie Mountains, east-central China: implications for the dating of ultrahigh pressure metamorphism. *J Metamorph Geol.*, **22**, (7), 629–637.

22. **Wasson J.T., Kallemeyn G.W.** (1988) Mean composition of the chondrite groups. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 1988, 5, (7), 535-544.
23. **Williams I.S.** (1998) U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Rev. in Econ Geology.*, 7, (1), 1-35
24. **Zhou Y., Liang X.Q., Liang X.R., Jiang Y., Wang C., Fu J.G., Shao T.** (2015) U-Pb geochronology and Hf-isotopes on detrital zircons of Lower Paleozoic strata from Hainan Island: new clues for the early crustal evolution of southeastern South China. *Gondwana Res.*, 27, (4), 1586–1598.

References

1. **Vinogradov A.P.** (1962) [The middle contents of the chemical elements in the basic types of the igneous rocks of the Earth crust]. *Geochemistry International*, (7), 555-572.
2. **Gusev A.I., Gusev N.I.** (2020) [The rare earth elements ore mineralization of Korgonskii trench]. [*Nature resources of Mountain Altay: geology, geophysics, ecology, mineral, water and forest resources of Altay*]. (1-2), 5-12 (in Russian).
3. **Gusev A.I., Gusev N.I., Efimova I.V.** (2009) [Magmatism and ore mineralization of Kumirskii ore field, Mountain Altay]. *Ores and metals* (6), 21-28 (in Russian).
4. **Marakushev A.A.** (1976) [The thermodynamic factors of forming ore zoning] [*The thermodynamic factors of forming ore zoning of cryptic zoning on the basis zoning hydrothermal deposits*]. Moscow: Science, 36-51 (in Russian).
5. **Anthony J.W., Bideaux R.A., Bladh K.W., Nichols M.C.** (2003) *Handbook of mineralogy.* / *Mineralogical Society of America*, Chantilly, 565.
6. **Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I.** (2003) Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib Mineral Petrol* , 143, (3), 602–622.
7. **Burnham A.D., Berry A.J.** (2012) An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as function of oxygen fugacity. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 95, (10), 196—212.
8. **Cherniak D.J., Watson E.B.** (2003) Diffusion in zircon. *Rev Miner Geochem.*, 53, (1), 113–143.
9. **Dai J.G., Wang C.S., Hébert R., Li Y.L., Zhong H.T., Guillaume R., Bezard R., Wei Y.S.** (2011) Late Devonian OIB alkaline gabbro in the Yarlung Zangbo Suture Zone: Remnants of the Paleo-Tethys? *Gondwana Res* , 19, (1), 232–243

10. **Fourcade S., Allegre C.J.** (1981) Trace elements behavior in granite genesis: a case study. The Calc-alkaline plutonic association from the Querigut complex (Pyrenees, France). *Contrib Mineral Petrol* , **76**, (2), 177–195.
11. **Gromet L.P., Silver L.T.** (1983) Rare earth element distributions among minerals in a granodiorite and their petrogenetic implications. *Geochim Cosmochim Acta*, **47**, (5), 925–939.
12. **Harrison T.M., Watson E.B., Rapp R.P.** (2006) Does anataxis deplete the lower crust in heat producing elements? Implications from experimental studies. *Trans Am Geophys Union (EOS)*., **67**, (5), 386.
13. **Hinton R.W., Upton G.J.** (1991) The chemistry of zircon: variation within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, (2), 3287—3302.
14. **Liu Y.C., Li S.G., Gu X.F., Hou Z.H.** (2006) Zircon SHRIMP U-Pb dating for olivine gabbro at Wangmuguan in the Beihuaiyang zone and its geological significance. *China Sci Bull.*, **51**, (11), 2500–2506.
15. **Mc Donough W.F., Sun S.** (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, (3-4), 223-253.
16. **McNaughton N.J. Mueller A.G., Groves D.I.** (2005) The age of the giant Golden Mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia: ion-microprobe zircon and monazite U-Pb geochronology of a synmineralization lamprophyre dike. *Econ. Geol.*, **100**, (7), 1427–1440.
17. **Pupin J. P., Turco G.** (1972) Unetypologie originale du zircon accessoire. *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie*, **95**, (3), 348–359.
18. **Shao T., Cheng N., Song M.** (2016) Provenance and tectonic-paleogeographic evolution: Constraints from detrital zircon U-Pb ages of Late Triassic-Early Jurassic deposits in the northern Sichuan basin, central China. *J Asian Earth Sci* , **127**, (1), 12–31.
19. **Schaltegger U.** (2007) Hydrothermal zircon. *Elements*, **3**, (1), 51–68.
20. **Sláma J., Košler J., Pedersen R.B.** (2007) Behaviour of zircon in high-grade metamorphic rocks: evidence from Hf isotopes, trace elements and textural studies. *Contrib Mineral Petrol.*, **154**, (3), 335–356
21. **Wang X., Griffen W.L.** (2004) Unusual Hf contents in metamorphic zircon from coesite-bearing eclogites of the Dabie Mountains, east-central China: implications for the dating of ultrahigh pressure metamorphism. *J Metamorph Geol.*, **22**, (7), 629–637.
22. **Wasson J.T., Kallemeyn G.W.** (1988) Mean composition of the chondrite groups. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 1988, **5**, (7), 535-544.
23. **Williams I.S.** (1998) U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Rev. in Econ Geology.*, **7**, (1), 1-35

24. **Zhou Y., Liang X.Q., Liang X.R., Jiang Y., Wang C., Fu J.G., Shao T.** (2015) U-Pb geochronology and Hf-isotopes on detrital zircons of Lower Paleozoic strata from Hainan Island: new clues for the early crustal evolution of southeastern South China. *Gondwana Res.*, **27**, (4), 1586–1598.