- технического обеспечения производственных процессов и технологических систем: материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 312-317.
3. Глушков И.Н., Лимарев А.С., Константинов М.М., Пашинин С.С. Совершенствование производственных процессов агропромышленного предприятия на основе внедрения инновационной стратегии // В сборнике: Молодежь и наука XXI века: материалы Международной научной конференции, том 2. Ульяновск. 2017. С. 203-208.
 4. Закшевская Е.В. Инновационные технологии управления аграрным производством: монография / Е.В. Закшевская, С.С. Чумаков; под ред. д.э.н., проф. Закшевской Е.В. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – 170 с.
 5. Константинов, М.М. Оценка качественных показателей формирования хлебных валков, их подбора и обмолота при использовании порционной жатки на раздельной уборке зерновых культур [Текст] / М.М.Константинов, И.Н.Глушков, И.В. Герасименко, А.А. Панин, В.И. Квашенников, А.П. Ловчиков // Известия оренбургского государственного аграрного университета. - 2016. №6 (62). – С. 68-72.
 6. Константинов, М.М. Рекомендации по механизированной уборке зерновых культур, севу озимых и обработке почвы [Текст] / М.М. Константинов, А.П. Козловцев, И.В. Герасименко, И.Н. Глушков, С.С. Пашинин и другие. – МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ, Оренбургский государственный аграрный университет. Оренбург, 2015 – 46 с.
 7. Лимарев, А.С. Повышение эффективности производства на основе внедрения инновационной стратегии предприятия [Текст] / А.С. Лимарев, А.Б. Моллер, М.М. Константинов, И.Н. Глушков // Известия оренбургского государственного аграрного университета. - 2015. №4 (54). – С. 69-72.
 8. М.М. Константинов, И.Н. Глушков, С.С. Пашинин, Т.В. Бедыч. Повышение эффективности работы порционной жатки посредством применения программно-аппаратного навигационного комплекса // Материалы XI Международной научно-практической конференции – «Трансформация опыта менеджмента агробизнеса Европейского Союза в Казахстан и страны Центральной Азии», «Дулатовские чтения – 2019», Часть 2 – С. 53-58.
 9. Пашинин, С.С. Повышение качества формирования валковой полосы при работе порционной жатки / С.С. Пашинин, И.Н. Глушков, А.Н. Кондрашов, М.И. Теляшов // В сборнике: Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем: материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 182-188.
 10. Дворкин, В.В. Российская навигационно-информационная спутниковая система [Текст] / Дворкин В.В., Бакитько Р.В., Куршин В.В., Поваляев А.А. // «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы» - 2018, том 5, выпуск 3, с. 3-16.

Денисова Ю.В.

Акцессорные минералы-геотермометры для гранитов

*Институт геологии Коми НЦ УрО РАН
(Россия, Сыктывкар)*

doi: 10.18411/lj-05-2020-22

idsp: ljjournal-05-2020-22

Аннотация

Изучение акцессорных минералов позволяет решить многие вопросы петрогенезиса, в том числе, определить температурные условия формирования той или иной породы. В настоящее время разработано большое разнообразие термодинамических методов (изотопные и геохимические геобаротермометры), часть из которых используется при изучении особенностей условий формирования гранитов. В представленной работе показана возможность применения основных акцессорных минералов гранитов (циркона, апатита, граната, монацита) в качестве индикаторов температур (метод Пюпена, метод Ватсона, метод Никитиной и др.).

Ключевые слова: циркон, апатит, гранат, монацит, геотермометр, гранит.

Abstract

The study of accessory minerals allows us to solve many questions of petrogenesis, including determining the temperature conditions for the formation of a particular rock.

Currently, a wide variety of thermodynamic methods (isotope and geochemical geobarothermometers) have been developed, some of which are used in the study of the features of the conditions for the formation of granites. This paper shows the possibility of using the main accessory minerals of granites (zircon, Apatite, garnet, monazite) as temperature indicators (the Pupin method, the Watson method, the Nikitina method, etc.).

Key words: zircon, apatite, garnet, monazite, geothermometer, granite.

Первые попытки применения отдельных минералов или минеральных пар в качестве геотермометров датированы 50-ыми годами прошлого века. Г. Рамберг и Т. Барт почти одновременно высказали предположение, что наличие зависимости температуры от химических констант реакций обмена компонентами между твердыми растворами минералов позволит создать минеральные индикаторы температур. Большой вклад в геотермобарометрию был внесен Л. Л. Перчуком. Советский исследователь на основе идей Г. Рамберга и В. С. Соболева разработал теорию фазового соответствия, с помощью которой откалибровал несколько согласованных геотермометров: гранат-биотит, гранат-кордиерит, гранат-амфибол, амфибол-плагиоклаз, амфибол-клинопироксен и др. На сегодняшний момент учеными известно как минимум 50 минералов, пригодных к применению в качестве геотермометров [6, 7].

Типичными акцессорными минералами гранитов, используемыми как индикаторы температур, являются циркон, апатит, гранат, монацит. Для каждого минерала разработаны свои методы (таблица 1.).

Таблица 1

Минеральные индикаторы температур для гранитов

Акцессорный минерал	Метод
Циркон	эволюционно- морфологический анализ, термометрия насыщения, «Ti-in-zircon» метод
Апатит	термометрия насыщения
Гранат	метод минеральных равновесий
Монацит	термометрия насыщения

Наиболее распространенной методикой определения температурного режима кристаллизации минерала является классический эволюционно-кристалломорфологический анализ цирконов Ж. П. Пюпина и Г. Тюрко [12]. Французские исследователи, выявив тесную связь между морфологией циркона и температурой и химизмом минералообразующей среды, составили классификационную таблицу морфотипов циркона из гранитов. Эта таблица позволяет определить температуру и отношение щелочности/ глиноземистости среды кристаллизации по соотношению призм и пирамид изучаемого минерала. Так, при изучении автором цирконов Кожимского массива были выделены J₅, D, P₂, P₃, P₄, P₅ типы Пюпена, что позволило сделать вывод о формировании гранитов при температуре 700 - 900 °C [1]. Термометрия насыщения Ватсона охватывает породный уровень организации вещества. На основе многочисленных экспериментов Е. Ватсон совместно с Т. Хариссоном [13] установили связь между температурой образования циркона и цирконсодержащей породой, уровнем насыщения циркония в породе, содержаниями Na₂O, K₂O, Al₂O и Si₂O в расплаве: $\ln D_{Zr} = (-3.80 - [0.85 \cdot (M-1)] + 12900/T^K)$, $Zr = 497644/D_{Zr}$, $M_{Zr} = 100(Na+K+2Ca)/(Al \cdot Si)$, где D_{Zr} – соотношение концентрации Zr в цирконе и расплаве, масс. вес, M_{Zr} – соотношение катионов, T^K – температура, Кельвин. Применение этой формулы автором для цирконов Кожимского массива показало, что температура насыщения по Ватсону для циркона и цирконсодержащей породы (гранита) находится в диапазоне от 749°C до 816°C [4]. При использовании «Ti-in-zircon» метода принимается во внимание структурный уровень организации вещества. Е. Ватсон [14] установил, что температура выделения циркона может быть определена

по количеству атомов титана в структурной решетке минерала, которые при повышении температуры минералообразующей среды заменяют атомы циркония и кремния. На основании чего ученым была определена расчетная формула: $\log(\text{Ti}^{\text{zircon}}) = (6.01 \pm 0.03) - 5080 \pm 30T^{\text{K}}$, где $\text{Ti}^{\text{zircon}}$ – содержание Ti в цирконе и расплаве, масс. вес, T^{K} – температура, Кельвин. О. В. Удоратина, используя «Ti-in-zircon» термометрию, определила, что температура кристаллизации цирконов Кожимского массива находится в интервале 717–868°C [8]. Как мы можем видеть, по каждому выше рассмотренному методу получены подобные температурные диапазоны. Это позволяет говорить, что методы термометрии для циркона взаимозаменяемы.

Термометрия насыщения апатита, разработанная Е. Ватсоном и Т. Харрисоном [13], позволяет определять температуру формирования апатита и породы по распределению содержания окисла фосфора между апатитом и апатитсодержащей породой. Согласно исследованиям ученых, уровень насыщения фосфора, необходимый для образования апатита, зависит от содержания SiO_2 в породе и температуры: $\ln D_p = (8400 + 26400(\text{SiO}_2 - 0,5))/T - 3,1 - 12,4(\text{SiO}_2 - 0,5)$, $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ (HW)} = 42 / D_p$, где D_p – соотношение концентрации P в апатите и расплаве, P_2O_5 , SiO_2 – весовая доля оксида фосфора, кремнезема в расплаве, масс. вес, T – температура, Кельвин. Однако, эта формула репрезентативна лишь для металаюминиевой породы ($A/\text{CNK} < 1$). Позднее для пералаюминиевых пород ($A/\text{CNK} > 1$) Ф. Беа [9] и М. Пичевант [11] разработали дополнения к формуле Е. Ватсона и Т. Харрисона для апатита: Ф. Беа: $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ (Bea)} = \text{P}_2\text{O}_5 \text{ (HW)} * e^{\frac{6429(A/\text{CNK}-1)}{T-273,15}}$, М. Пичевант: $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ (PV)} = \text{P}_2\text{O}_5 \text{ (HW)} + (A/\text{CNK} - 1) * e^{\frac{-5900}{T-3,22\text{SiO}_2+9,31}}$, $A/\text{CNK} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, где Al_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O – весовая доля оксида алюминия, кальция, натрия и калия в расплаве, масс. вес. Применяя метод Е. Ватсона и Т. Харрисона для апатита и апатитсодержащей породы Кожимского массива с корректировками Ф. Беа, автором был получен следующий температурный диапазон: от 722°C до 856°C [4], что позволяет утверждать, что кожимские граниты являются высокотемпературными.

Существуют множество вариантов геотермометров, основанных на реакциях ионного обмена элементов в разных средах. К наиболее популярным относится равновесие гранат-биотит, благодаря широкой распространенностью данного парагенезиса (в глиноземистых породах и гранитах Grt, ассоциирующий с Bt, в основном представлен твердым раствором Alm-Pyr), и повышенной чувствительности к изменению температуры распределения Mg и Fe между биотитом и гранатом. На сегодняшний день насчитывается более двадцати вариантов его калибровок. В одних вариантах учитывается только соотношение Fe/Mg в биотите и гранате, другие рассматривают влияние примесей Ca, Mn, предполагаемый интервал температур и давлений и др. Одной из последних разработок является гранат – биотитовый термометр Л. Н. Никитиной [5]. Этот индикатор температур построен на основе температурной зависимости коэффициента распределения железа и магния между гранатом и биотитом. Расчетные данные по температурному режиму, полученные по этому методу, не зависят от концентрации определенных элементов (кальция и марганца в гранатах, алюминия и титана в биотитах и др.), а так же давления. Геотермометр Никитиной представлен следующей формулой: $T = (-14811,25A + 60034,08A^2 - 97177A^3 + 46500A^4) / (\ln K_{\text{Fe}} + \text{Mn} - 10,95A + 48,24A^2 - 81,78A^3 + 43,80A^4 + C + D + E)$, где $A = 1 - X_{\text{Fe+Mg}}^{\text{Gr}}$, $C = -2,55(X_{\text{Ca-0,100}}^{\text{Gr}} - 0,100) - 2,70(X_{\text{Ca-0,100}}^{\text{Gr}})^2 + 3,54(X_{\text{Ca-0,100}}^{\text{Gr}})^3$, $D = -4,08(X_{\text{Al-0,15}}^{\text{Bt}} - 0,15) - 21,6(X_{\text{Al-0,15}}^{\text{Bt}})^2 - 634,5(X_{\text{Al-0,15}}^{\text{Bt}})^3 + 3628,8(X_{\text{Al-0,15}}^{\text{Bt}})^4$, $E = 1,8(X_{\text{Ti-0,033}}^{\text{Bt}} - 0,033) - 1,8(X_{\text{Ti-0,033}}^{\text{Bt}})^2$, где K_{Fe} – коэффициент распределения железа между биотитом и гранатом, $X_{\text{Fe+Mg}}^{\text{Gr}}$ – содержание железа и магния в гранате, масс. вес, $X_{\text{Ca}}^{\text{Gr}}$ – содержание кальция в гранате, масс. вес, $X_{\text{Al}}^{\text{Bt}}$ – содержание алюминия в биотите, масс. вес, $X_{\text{Ti}}^{\text{Bt}}$ – содержание титана в биотите,

масс. вес. На основе гранат – биотитового геотермометра автором был рассчитан температурный режим для гранатов Кожимского массива, который составляет от 713°C до 815°C, что подтверждает высокотемпературность пород рассматриваемого массива.

Для монацита Дж. Монтелем [10] была разработана термометрия насыщения подобная методике Ватсона для циркона и апатита. Исследователь установил взаимосвязь между содержаниями легких редкоземельных элементов, основных элементов и H₂O в расплаве и температурой для монацита и монацитсодержащей породы:

$$\ln(\text{LREE}) = 9,5 + 2,34M_{\text{mz}} + 0,3879 \cdot (\text{H}_2\text{O})^{0,5 - 13318/T^K},$$

$\text{LREE} = (\sum(\text{REE}_i)/\text{REE})/X_{\text{mz}}$, $M_{\text{mz}} = 100(\text{Na} + \text{K} + \text{Li} + 2\text{Ca})/(\text{Al}(\text{Al} + \text{Si}))$ [3], где REE_i – содержание La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd в расплаве, атом. вес, REE – суммарное содержание LREE в расплаве, атом. вес, X_{mz} – суммарное содержание LREE в расплаве, мол. вес, M_{mz} – соотношение катионов, H₂O – предполагаемое содержание воды в расплаве, T^K – температура, Кельвин. На основе методики Дж. Монтеля для монацита, отобранного в гранитах Кожимского массива, и монацитсодержащей породы, автором была определена температура образования, которая составляет 762°C–842°C [4]. Минерал, являющийся фосфатом лантаноидов, обычно кристаллизуется на завершающем этапе формирования гранитоидов. Это позволяет говорить, что граниты Кожимского массива образовались при очень высокой температуре и формирование массива произошло за достаточно короткий временной период.

Разнообразие методов термометрии для акцессорных минералов гранитов при их комплексном использовании позволяет получить более точный температурный диапазон формирования гранитов. Кроме того, зная последовательность кристаллизации отдельных минералов при становлении того или иного гранитного массива, можно определить температуру на отдельных этапах гранитогенеза.

1. Денисова Ю. В. Термометрия циркона из гранитоидов Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, № 12, 2016. С. 37–44.
2. Денисова Ю. В. Апатит Николайшорского гранитного массива (Приполярный Урал) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, № 9, 2018. С. 24–29. doi: 10.19110/2221-1381-2018-9-24-29.
3. Денисова Ю. В. Монацит - геотермометр Монтеля // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, Апатиты, 2019. № 16. С. 151–154.
4. Денисова Ю. В. Термометрия насыщения циркона, апатита, монацита (Кожимский массив, Приполярный Урал) // Известия Коми научного центра УрО РАН, № 3 (39). Сыктывкар, 2019. С. 25–30. doi 10.19110/1994-5655-2019-3-47-52.
5. Никитина Л. П. Межфазовые геотермометры, геобарометры и геооксобарометры. СПб, 2005, 17-23 с.
6. Перчук Л. Л. Термодинамический режим глубинного петрогенеза. М.: Наука, 1973. 318 с.
7. Перчук Л. Л., Рябчиков И. Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. М.: Недра, 1976. 287 с.
8. Удоратина О. В., Шуйский А. С., Капитанова В. А. Гранитоиды Кожимского массива (Приполярный Урал): U-Pb, Lu-Hf данные // Известия Коми научного центра УрО РАН, № 1 (41). Сыктывкар, 2020. С. 96–105. doi 10.19110/1994-5655-2020-1-96-105.
9. Bea F., Fershtater G. B., Corretgé L. G. The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effects of aluminium // Lithos. 1992. V. 48, P. 43–56.
10. Montel J. M. A model for monazite/melt equilibrium and application to the generation of granitic magmas // Chem. Geol. V. 110. 1993. P. 127–146.
11. Pichavant M., Montel J. M., Richard L. R. Apatite solubility in peraluminous liquids: experimental data and extension of the Harrison- Watson model // Geochim. Cosmochim. Acta. 1992. V. 56. P. 3855–3861.
12. Pupin J.-P. Zircon and granite petrology // Contrib. Miner. Petrol. Vol. 73. 1980. P. 207–220.
13. Watson E. B., Harrison T. M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types // Earth and Planetary Science Letters, v. 64. 1983. P. 295–304.
14. Watson E. B., Wark, D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile. Contrib. Miner. Petrol. Vol. 151 (4), 2006. P. 413–433. doi: 10.1007/s00410-006-0068-5.