Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LIV, вып. 2, 1968 г.

УДК 548.32 : 553.86

ПРИЧИНЫ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЦИРКОНА

Г. К. Гераничева, Ю. Б. Марин

Циркон — важное полезное ископаемое и один из наиболее распространенных акцессорных минералов изверженных пород. Изучение его ведется в самых различных направлениях. Ряд исследователей пытается использовать акцессорный циркон для корреляции гранитоидных массивов [Куц, Машкина, 1965; Львов, 1964; Ляхович, 1963], другие — для выяснения магматического или метасоматического способа образования гранитов [Норре, 1963], третьи видят в цирконе ключ для выяснения источников сноса.

Решая эти задачи, большинство авторов использовало в качестве своеобразного индикатора морфологические особенности циркона. Чрезвычайная изменчивость облика его кристаллов отмечается почти всеми. Некоторые исследователи ставят и пытаются решить вопрос о ее причинах. Единой точки зрения еще не выработано, но после ознакомления с литературой можно выделить следующие шесть факторов *, с каждым из которых большее или меньшее количество исследователей связывает изменчивость облика кристаллов циркона: 1) особенности кристаллической структуры циркона; 2) концентрация циркония в породе; 3) температура кристаллизации; 4) глубина образования пород; 5) влияние изоморфных примесей (Hf и др.); 6) химизм вмещающих пород.

Вопрос о связи внешнего ограничения кристаллов циркона с его внутренним строением неоднократно рассматривался в работах И. И. Шафрановского [1933, 1937, 1945] и Дж. Д. Г. Доннея [1938]. В основу этой связи прежде всего был положен закон Браве, согласно которому возможность появления и развития каждой рациональной грани кристалла должна быть по крайней мере отчасти пропорциональна плотности ее сетки.

Как показали исследования И. И. Шафрановского [1945], сетки с наибольшей плотностью соответствуют наиболее развитым и частым формам циркона. Однако строгого параллелизма между последовательностью плотностей сеток и статистическим порядком граней нет.

Последующий учет тонких особенностей кристаллической структуры циркона привел Дж. Д. Г. Доннея и И. И. Шафрановского к лучшим, а впоследствии и идеальным соответствиям. И. И. Шафрановский [1957] видит главную ошибку прежних исследователей в том, что структура циркона рассматривалась ими как статически неизменная, в расчет не принималось динамическое поведение структуры в разных средах. Все последующие исследователи, изучая причины морфологической изменчивости циркона, уделяли преимущественное внимание физико-химическим факторам воздей-

* При метасоматическом образовании кристаллов циркона, особенно характерном для щелочных пород [Руденко, 1957], морфология метакристаллов в значительной мере зависит от анизотропии вмещающих пород [Никитин, 1955; Руденко, 1957].

ствия. Такая важная деталь, как кристаллическая структура исследуемого минерала, во внимание не принималась.

Зависимость облика кристаллов циркона от концентрации в породе циркония была рассмотрена главным образом в работе Б. К. Львова [1964] на примере цирконов из гранитоидов восточного склона Урала. Останавливаясь на причинах морфологической изменчивости циркона, Б. К. Львов указывает на возможную связь ее с целым рядом факторов, но основным он считает величину концентрации циркония в породе. Далее он развивает это положение, отмечая, что каждый интрузивный комплекс характеризуется разным содержанием циркония и соответственно разным морфологическим типом кристаллов циркона. Подход Б. К. Львова не отличается строгостью в оценке концентрации (рассуждения чисто качественного характера — больше, меньше). Кроме того, им не принимается во внимание изменение концентрации циркония в процессе раскристаллизации расплава, что, безусловно, необходимо учитывать, если стоять на позиции Б. К. Львова и других исследователей об образовании нескольких генераций в процессе последовательного формирования породы. Приводимые Б. К. Львовым примеры о влиянии величины концентрации циркония на изменение облика кристаллов циркона относятся к породам различного петрографического состава, что позволяет сомневаться в ведущей роли фактора концентрации по сравнению с фактором химизма окружающей среды.

Зависимость облика кристаллов от температуры образования пород * (в неразрывной связи его с эволюцией магматического расплава) на примере цирконов из гранитоидов Северной Киргизии детально разобрал С. Д. Туровский [1955]. Он отметил, что циркон из трех разновозрастных комплексов существенно отличается по морфологическим особенностям. Причина этого явления, по мнению С. Д. Туровского, кроется в различных температурах кристаллизации пород каждого комплекса. Ранние комплексы (протерозойский и каледонский) с высокими исходными температурами магматических расплавов характеризуются длиннопризматическим и игольчатым цирконом, с часто встречающейся формой {*131*}. Поздний варисский комплекс, с более низкими исходными температурами и повышенным содержанием летучих, характеризуется призматическим, короткопризматическим и дипирамидальным цирконом с почти полным отсутствием формы {*131*}. Ту же закономерность отмечает С. Д. Туровский и внутри каждого комплекса. Так, в герцинском комплексе он выделяет две генерации циркона. Более ранние высокотемпературные фазы (более основные) содержат более удлиненный циркон, близкий к цирконам каледонских гранитоидов. Более поздние, с более низкими температурами (и более кислые) характеризуются короткопризматическим, дипирамидальным цирконом. Однако две генерации, выделяемые С. Д. Туровским, — высокотемпературная и низкотемпературная — отвечают в то же время и разным условиям химизма окружающей среды.

Глубина образования пород — фактор, который очень близко примыкает к предыдущему. Изменение морфологии кристаллов циркона в связи с различной глубиной его кристаллизации в массиве рассмотрено в работах многих исследователей [Баженов, Ермолаев, 1964; Ляхович, 1963; Львов, 1964; Норре, 1963]. Обращает внимание тот факт, что выводы, сделанные разными авторами о характере морфологии циркона апикальных и глубинных частей, далеко не однозначны, а нередко и противоречивы. Характерно, что сведения о максимальных различиях в морфологии появляются тогда, когда породы апикальных и глубинных частей ощутимо отличаются по составу. Сопоставление морфологии цирконов из однотипных по составу пород — гранитов крупных интрузий и гранит-порфиров мелких субвулканических и жильных тел — более строго отвечает выяснению влияния рассматриваемого фактора. В последних циркон обычно представлен сильно удлиненными

* Частичные указания на роль этого фактора содержатся в работе И. С. Ипатьевой [1960].

разностями [Соболев, 1961; Ляхович, 1963], в то время как в гранитах — призматическими, короткопризматическими кристаллами.

Однако и в случае признания влияния скорости охлаждения на изменение морфологии циркона рассуждения о характере этого влияния могут быть двоякими. Поэтому нужно иметь в виду, что различный характер эволюции расплава в условиях быстрой или замедленной кристаллизации [Дмитриев, 1953], безусловно, должен отразиться и на облике циркона. Здесь скорость охлаждения предстает как бы косвенной причиной. Кроме того, следует учитывать непосредственное влияние скорости охлаждения. Как показывают эксперименты, в условиях быстрого охлаждения образуются удлиненные и игольчатые кристаллы (нередко скелетные), растущие в направлении максимального теплоотвода.

Изменение облика кристаллов циркона в зависимости от содержания изоморфных примесей изучается в последнее время большой группой исследователей [Рудовская, 1960; Ляхович, Шевалеевский, 1962; Халезова, 1963; Прощенко, 1964 и др.]. Наиболее пристальное внимание привлечено к гафнию, точнее — к выяснению цирконий-гафниевого отношения в цирконах различных морфологических типов. Почти все указанные авторы приходят в общему выводу о том, что величина этого отношения меняется для цирконов разного облика вполне закономерно. Однако о характере этой закономерности единодушного мнения нет. Так, Л. И. Рудовская, изучавшая пегматиты Северной Карелии, отмечает, что ранние призматические циртолиты характеризуются пониженным содержанием гафния (1,6—2,3%), а более поздние — короткопризматические и дипирамидальные — повышенным (3,1—5,5%). Подобную закономерность для цирконов гранитоидов отмечают В. В. Ляхович и И. Д. Шевалеевский [1962]. С другой стороны, Е. Г. Прощенко [1964], изучавший цирконы гранитных пегматитов, приходит к выводу о значительно более высоком отношении HfO_2/ZrO_2 (0,035) в призматических кристаллах по сравнению с дипирамидальными (0,017).

В то же время Е. Б. Халезова [1963], проделавшая большую работу по изучению цирконов гранитных и щелочных пород Вишневых гор, установила, что для цирконов из гранитных пегматитов, обладающих наибольшим количеством гафния (2,80), характерна длиннопризматическая форма кристаллов.

Для цирконов из миаскитовых пегматитов, обладающих таким же или несколько меньшим содержанием гафния (2,35%), характерен дипирамидальный габитус. Цирконы из поздних гранитных пегматитов содержат 1,23% гафния и имеют также длиннопризматический габитус.

Итак, рассмотрение даже этих сравнительно немногочисленных примеров показывает, что выводы о содержании изоморфных примесей (в данном случае гафния) и влиянии их на облик кристаллов циркона весьма противоречивы. Противоречивость выводов позволяет предположить, что содержание изоморфных примесей вряд ли существенно влияет на изменение облика кристаллов циркона, в силу чего этот фактор в данном случае может оцениваться лишь как второстепенный.

Изменение облика циркона в зависимости от химизма среды одним из первых отмечалось И. И. Шафрановским [1933]. Изучая цирконы щелочных пород Вишневых гор, И. И. Шафрановский пришел к выводу, что габитус этого минерала зависит от химизма среды. С нефелиновыми сиенитами связан дипирамидальный, изометрический облик кристаллов, с сиенитами — призматический. С породами промежуточного состава — промежуточный облик кристаллов.

Идея о зависимости облика циркона от химизма среды оказалась наиболее плодотворной. При объяснении причин изменчивости морфологических особенностей циркона она дает наиболее сближенные результаты у большинства исследователей. Так, для гранитоидов всеми геологами признается, что удлиненность цирконов (отношение длины к ширине) уменьшается от более основных разностей к более кислым. Большинством исследо-

вателей удлиненность циркона из нормальных гранитов оценивается от 2,0 до 3,0, из лейкократовых и аляскитовых 2,0—1,5, причем здесь нередко отмечаются дипирамидальные кристаллы.

В последние годы внимание к циркону особенно усилилось в связи с изучением акцессорных минералов [Бартошевский и др., 1963; Львов, 1964; Ляхович, 1963; Туровский, 1955]. В каждой из работ названных авторов выделяются кристаллографические разновидности циркона, свойственные тому или иному типу пород, что затем с успехом используется для расчленения и корреляции гранитоидов.

Совершенно обособленно шло изучение цирконов из щелочных пород (где он образует промышленные месторождения). Роль химизма окружающей среды признавалась здесь большинством исследователей [Кашин, Стороженко, Гуреев, 1965; Халезова, 1963]. Названные геологи не просто отмечают, что циркон в сиенитах — призматический, а в нефелиновых сиенитах — дипирамидальный, а видят решение вопроса в меняющейся щелочности среды, указывая на ведущую роль Na в этом процессе [Кашин, Стороженко, Гуреев, 1965]. С возрастанием концентрации Na в породе циркон меняется от призматического в сиенитах до дипирамидального в мариуполитах (и альбититах).

Однако увлечение «щелочников» ролью Na вызвало недоумение у «гранитчиков». Хотя в гранитах и мало Na (по сравнению с щелочными породами), но дипирамидальный и короткопризматический «псевдоромбододекаэдрический» циркон не является редкостью в лейкократовых и аляскитовых гранитах, пегматитах и аплитах, т. е. в наиболее кислых разностях.

Из обзора видно, что мнения многих авторов о связи морфологических особенностей циркона с теми или иными факторами очень различны, нередко противоречивы, а иногда и взаимоисключаемы. Для циркона, как и для других минералов, изменение габитуса, огранки и облика индивидов вызывается влиянием изменяющихся внешних условий, причем необходимо говорить о совокупном влиянии ряда факторов, хотя один из них и может иметь превалирующее значение [Григорьев, 1961]. Учитывая перечисленные выше замечания, в данном случае превалирующим фактором можно считать химизм окружающей среды (на чем, впрочем, и настаивает большинство исследователей). С другой стороны, уже было показано, что в ряде случаев одни и те же типы циркона появляются как будто бы в разных по химизму породах, относящихся к совершенно различным петрографическим группам (рисунок *). Как уже отмечалось, это привело ряд исследователей к выводу о том, что в группе щелочных пород определяющее влияние на морфологию циркона имеет величина щелочности (имеется в виду суммарное содержание щелочей), а в кислых — кремнекислотности. Представляется целесообразным провести сопоставление этих разных петрографических групп на какой-то общей, единой платформе. ** Такой основой может быть величина относительной щелочности, предложенная И. В. Давиденко [1962, 1965] и отражающая щелочные свойства пород с учетом индивидуальных щелочных особенностей наиболее сильных и характерных катионов Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}. Нами были рассчитаны величины относительной щелочности для пород гранитоидного ряда и характерных представителей щелочных пород, для которых известны наиболее типичные морфологические представители

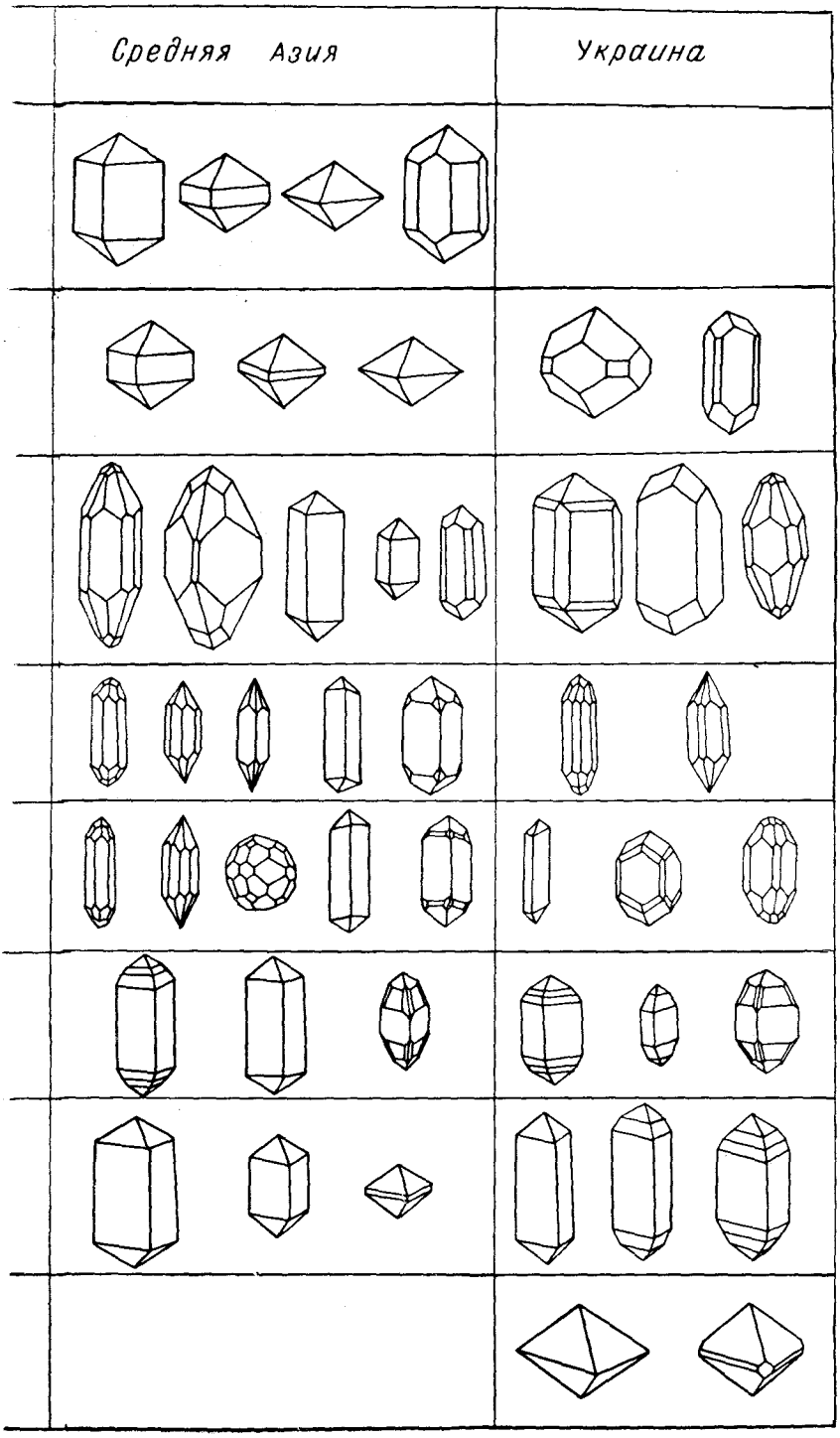
---

* Морфологические типы кристаллов циркона из пород различных петрографических групп приводятся по данным следующих исследователей: Урал — по Б. К. Львову [1964], Е. Б. Халезовой [1963], И. И. Шафрановскому [1933]; Казахстан — по В. И. Бартошевскому и др. [1963] и нашим данным; Средняя Азия — по С. Д. Туровскому [1955]; Украина — по С. А. Кашину, А. А. Стороженко, В. Ф. Гурееву [1965], В. П. Куцу, А. А. Машкиной [1965].

** Конечно, наиболее объективным показателем было бы выяснение режима кислотности — щелочности образования той или иной породы. К сожалению, имеющиеся в настоящее время данные по определению pH образования интрузивных пород весьма немногочисленны и имеют малую достоверность [Давиденко, 1962, 1965].

Порода	Урал	Казахстан
Письменный гранит		
Лейкократовый (аляскитовый) гранит		
Нормальный гранит		
Гранодиорит (плагиогранит)		
Диорит		
Габбро		
Сиенит		
Нефелиновый сиенит		

Морфологические типы кристаллов циркона из



пород различных петрографических групп.

циркона (табл. 1). Табл. 1 показывает, что по возрастанию величины относительной щелочности породы образуют закономерный ряд — от габбродиоритов до нефелиновых сиенитов. Обращаясь к морфологическим типам циркона, видим, что определенные типы его грубо укладываются в определенные рамки относительной щелочности:

Игольчатые разности	$\leqslant 1{,}25$
Длиннопризматические	1,25—1,35
Призматические	1,35—1,55
Короткопризматические	1,55—1,9
Дипирамидальные	$\geqslant 1{,}9$

Интересно отметить, что если для нефелиновых сиенитов, в меньшей степени сиенитов и габбро, определяющий их морфологический тип циркона практически встречается в 99 случаях из 100, то для гранитоидов характерно разнообразие типов, из которых преобладающий выводится лишь статистически. Причиной этого, видимо, является достаточно резкое изменение щелочности в процессе кристаллизации расплава, из которого образуются гранитоиды. Возможность этого видна уже при анализе величин относительной щелочности минералов *, слагающих различные петрографические группы:

Альбит из нефелиновых сиенитов	1,699
Альбит-олигоклаз из гранитов	1,605
Андезин	1,330
Микроклин	2,680
Нефелин	3,248
Роговая обманка	1,165
Биотит	2,025
Щелочная роговая обманка	1,600
Кварц	0,00
Эгирин	1,772

Если для минералов нефелиновых сиенитов, щелочных сиенитов и габбро они не очень резко отличаются друг от друга, то для гранитоидов эти различия весьма значительны. Более четко (и строго) проанализировать изменение относительной щелочности в процессе эволюции кристаллизующегося магматического расплава можно на примере образования лейкократовых гранитов. В соответствии с представлениями Л. В. Дмитриева [1956], Н. В. Белова [1959], В. С. Коптева-Дворникова и др. [1962] в этих породах выделяется до трех структурных групп минералов, отвечающих различным этапам раскристаллизации расплава и имеющих соответственно различный минеральный и химический состав. Величины относительной щелочности этих структурных групп, вычисленные по данным Л. В. Дмитриева [1956], весьма существенно отличаются друг от друга: 1,250; 1,500 и 2,130 соответственно для I, II и III групп при валовом составе 1,498.

Так, I структурная группа отвечает по своим особенностям гранодиоритам, II — лейкократовым гранитам, а III — по величине относительной щелочности приближается к нефелиновым сиенитам. Значит, цирконы, образующиеся в I этап, должны быть (с учетом ранее сказанного) длиннопризматическими, во II этап — призматическими и короткопризматическими, а в III (заключительный этап кристаллизации расплава) — короткопризматическими и дипирамидальными.

Ныне большинство исследователей [Ляхович, 1963; Львов, 1964; Сиротин, Задумина, 1965; Туровский, 1955] склоняется к мнению, что хотя акцессорный циркон в гранитоидах выделяется на протяжении всего времени кристаллизации расплава, основная масса его выделяется в заключительные стадии (характеризующиеся высоким уровнем относительной щелочности). С другой стороны, имеющийся фактический материал свидетельствует, что

* Химические составы минералов взяты из сводки Р. М. Кочуровой [1957].

Таблица 1

Относительная щелочность различных интрузивных пород

№ п/п	Порода	Главные компоненты и их относительная щелочность								Относительная щелочность пород
		CaO	b_{Ca}	MgO	b_{Mg}	Na_2O	b_{Na}	K_2O	b_K	$B=b_{Ca}+b_{Mg}+b_{Na}+b_K$
1	Габбро	10,64	0,426	6,62	0,199	2,82	0,395	0,98	0,19	1,210
2	Диорит	6,74	0,270	4,17	0,125	3,39	0,475	2,12	0,403	1,273
3	Гранодиорит	4,5	0,180	2,5	0,075	3,8	0,536	2,65	0,503	1,294
4	Нормальный гранит	2,0	0,08	1,0	0,03	4,00	0,56	4,00	0,76	1,430
5	Лейкократовый гранит	0,8	0,032	0,3	0,009	3,8	0,532	4,90	0,931	1,503
6	Письменный гранит	0,5	0,020	0,18	0,005	3,8	0,532	5,40	1,026	1,583
7	Щелочной гранит	0,50	0,020	1,1	0,033	4,20	0,588	5,8	1,102	1,743
8	Граносиенит	2,9	0,116	0,7	0,021	3,7	0,518	4,60	0,874	1,485
9	Монцонит	6,5	0,260	3,27	0,098	3,67	0,514	3,76	0,714	1,586
10	Сиенит	4,3	0,172	2,5	0,075	4,00	0,56	4,5	0,855	1,662
11	Щелочной сиенит	2,3	0,092	0,9	0,027	5,9	0,826	5,2	0,988	1,933
12	Нефелиновый сиенит	2,5	0,100	0,9	0,027	8,2	1,148	5,5	1,045	2,320
13	Миаскит	2,0	0,08	0,7	0,021	8,4	1,176	5,2	0,988	2,265
14	Мариуполит	0,5	0,020	0,1	0,003	11,8	1,652	1,8	0,342	2,017

Примечание: 1, 9, 10, 11, 12, 13, 14 по Р. Дели и А. Н. Заварицкому [Заварицкий, 1960]; 2, 3, 4, 5, 6—по В. Ф. Морковкиной [1964] и нашим данным; 7, 8—по И. В. Гинзбург и А. И. Морозову [Щелочные граниты. . . , 1958].

наиболее ранние цирконы имеют длиннопризматический облик, а поздние — короткопризматический и дипирамидальный.

Таким образом, высказанные предположения [1) определенные типы циркона довольно четко укладываются в соответствующие рамки относительной щелочности; 2) становится сравнительно понятным многообразие типов циркона в одних и тех же гранитах при преобладании какого-либо одного определенного; 3) объясняется возможность появления в гранитах дипирамидального циркона, свойственного полярной группе щелочных пород] соответствуют фактическому материалу.

Ориентация на величину относительной щелочности пород имеет смысл не только при признании синхронного образования акцессорного циркона с определенной породой, но и в случае постмагматического (метасоматического) образования. Однако в этом случае зависимость уже более сложная, так как приходится говорить о взаимодействии раствора с породой той или иной щелочности. При этом, если в щелочных, основных и других породах слагающие их минералы имеют примерно одинаковые величины относительной щелочности, а следовательно, и условия образования циркона в различных по минеральному составу участках этих пород примерно одинаковы, то в гранитоидах, образованных минералами с резко отличными величинами относительной щелочности, условия образования циркона в участках разного минерального состава отнюдь не идентичны. Это может приводить к появлению разных морфологических типов. Однако, учитывая влияние вмещающих пород, следует отметить, что в целом оно вряд ли очень существенно может менять режим кислотности — щелочности постмагматических растворов, из которых образуются цирконы. Оценка величин относительной щелочности разных минералов показывает, что практически все минералы щелочных пород имеют такую величину относительной щелочности, при которой образуются дипирамидальные (реже короткопризматические) разности. С учетом того, что автометаморфические растворы имеют явно щелочной характер, вполне естественно образование в нефелиновых сиенитах лишь дипирамидального циркона. Аналогичные рассуждения могут быть проведены и для основных, средних и кислых пород. Так, в гранитоидах — кварц, роговая обманка, андезин относятся к минералам с очень низкой относительной щелочностью, а такие минералы, как биотит, калишпат, — с достаточно высокой. В этом случае при воздействии сравнительно щелочных автометаморфических растворов (с которыми иногда связывают образование циркона) на минералы с разной щелочностью, вероятно, возможно появление различных условий, в которых образуется циркон различных морфологических типов.

Преобладающее развитие дипирамидальных разностей циркона в породах повышенной щелочности * (в нефелиновых сиенитах или лейкократовых и аляскитовых гранитах) может быть объяснено с позиции динамического поведения структуры в разных средах [Михеев, Шафрановский, 1948]. Доминирующей формой в кристаллах этого типа является {*111*}. В структурном отношении грань {*111*} сложена пакетами из частиц одного сорта Zr^{4+} или $[SiO_4]^{4-}$.

По И. И. Шафрановскому [1957], грани, состоящие из одного сорта частиц, особенно чувствительны к изменениям, происходящим в среде, окружающей кристалл. Поэтому в условиях, когда нет сильного взаимодействия между окружающей средой и частицами, входящими в состав кристалла, морфологический аспект будет определяться преимущественно структурно-геометрическими факторами. При наличии же взаимодействия грани с частицами одного сорта выступают на первый план. В рассматриваемом случае (условия повышенной щелочности, т. е. активности среды) грани {*111*} с частицами одного сорта Zr^{4+} или $[SiO_4]^{4-}$ должны быть доминирующими.

---

* По данным И. В. Давиденко [1962, 1965], изменения относительной щелочности в пределах 0—2,8 соответствуют изменению pH в пределах 6,5—8.

В случае же образования кристаллов циркона в условиях субнейтральных сред (каковым, видимо, отвечают условия образования габбро и диоритов) на первый план выступает структурно-геометрический (плотностной) фактор.

В начале работы уже отмечались недостатки чисто качественного подхода при обсуждении влияния фактора изменения концентрации циркония на облик кристаллов циркона. Представляется, что это может быть сделано более точно. Для этого нужно не ограничиваться ориентацией на средние содержания циркония в породе, а попытаться решить вопрос о характере изменения концентрации циркония в процессе образования породы, что отчасти может быть достигнуто изучением распределения циркония по минералам пород. В табл. 2 сведены данные о кларковых содержаниях циркония в разных типах пород; о доле циркония, приходящегося на циркон и прочие (в основном породообразующие) минералы. Анализ табл. 2 показывает, что грубо могут быть выделены три группы пород: 1) характеризующиеся сравнительно высокими кларковыми содержаниями циркония, концентрирующегося на 90% в цирконах: нефелиновые сиениты. в меньшей степени лейкократовые (аляскитовые) граниты; 2) характеризующиеся несколько меньшими содержаниями циркония, к тому же до 50% сосредоточенного в породообразующих минералах: сиениты, в меньшей степени нормальные биотитовые граниты; 3) с малыми содержаниями циркония, сосредоточенного в породообразующих минералах: сиениты, в меньшей степени нормальные биотитовые граниты; габбро, диориты. Исходя из этого, можно предполагать образование циркона в породах 1 группы — в условиях высоких концентраций (пересыщенности), 2-й — средних, а 3-й — низких. Н. З. Евзикова [1958], Д. П. Григорьев [1961] развивают представления о том, что в пересыщенных растворах кристаллы покрываются гранями с высокой ретикулярной плотностью, а в условиях низких концентраций — гранями с низкой плотностью. Отсюда вправе ожидать появления в породах 1 группы (отличающихся к тому же высокой щелочностью) кристаллов с хорошо развитыми гранями в таком порядке: {*111*} (вне конкуренции в щелочной среде)— {*110*}, {*100*}; в породах 2 группы: {*110*}, {*100*}, {*111*}, {*311*}, {*331*}; в породах 3 группы (в условиях невысоких концентраций и субнейтральной среды) — сложноограненных кристаллов с гранями {*110*}, {*100*}, {*331*}, {*311*}, {*111*}, {*511*}. Именно подобные соотношения и наблюдаются в действительности (см. рисунок).

Таблица 2

Особенности распределения Zr в различных типах пород

Породы	Содержание Zr		
	в породе *, вес. %	в цирконах, %	в породообразующих минералах, %
Ультраосновные	0,0045	—	100
Габбро	0,009	10	90
Диорит	0,012	20	80
Гранодиорит	0,014	30	70
Нормальный гранит	0,020	65	35
Лейкократовый гранит	0,020	90	10
Сиенит	0,031	50	50
Нефелиновые сиениты (миаскитового ряда)	0,065	90	10

* По И. П. Тихоненкову и Р. П. Тихоненковой [1964].

Таким образом, учет фактора концентрации (в тесной связи с химизмом среды) необходим, но следует также иметь в виду, что в процессе эволюции расплава возможность накопления циркония к конечным этапам его раскристаллизации опять-таки, видимо, определяется изменением (увеличением) щелочности в этом же направлении [Тихоненков, Тихоненкова, 1964].

Аналогичная ситуация складывается и с другим фактором — влиянием изоморфных примесей (в частности наиболее обычной Hf). Несмотря на то,

что присутствие значительных количеств Hf вряд ли оказывает решающее воздействие на изменение облика циркона, приходится считаться с обстоятельством частого обогащения Hf дипирамидальных разностей (по сравнению с призматическими). Поэтому возникает вопрос: нет ли одной причины, приводящей к накоплению Hf и к «укорачиванию» кристаллов циркона. Рассмотрение кристаллохимических свойств Zr и Hf показывает, что Hf является более сильным основанием по сравнению с Zr (электроотрицательности их 1,4 и 1,5 — по Полингу) [Григорьев, 1962], поэтому увеличение коэффициента активности его должно происходить одновременно с повышением щелочности. Отсюда вполне естественно, что наиболее ранние кристаллы циркона (призматические) в лейкократовых гранитах будут менее богаты Hf по сравнению с поздними (короткопризматическими и дипирамидальными). В связи с тем, что индивидуальные щелочные свойства калия выше, чем у натрия, можно предположить более значительное накопление Hf в однотипных цирконах в существенно калиевых породах по сравнению с существенно натриевыми, что на примере калиевых и натриевых метасоматитов было показано И. Д. Шевалеевским, А. С. Павленко, Э. С. Вайнштейном [1960], В. В. Ляховичем и И. Д. Шевалеевским [1962].

Выводы

1. Изменение облика кристаллов циркона всецело определяется химизмом среды (режимом кислотности — щелочности), в которой он образуется. На примере кристаллов циркона можно еще раз убедиться в безусловной справедливости положения о том, что «... рассмотрение поведения структуры в отрыве от среды теперь уже невозможно: и то и другое составляет одно неразрывное целое» [Шафрановский, 1960, стр. 133].

2. Образование различных морфологических типов циркона происходит в определенных рамках щелочности среды, для суждения о порядке которой может быть использована величина относительной щелочности по И. В. Давиденко [1965]. Использование ее дает возможность более строгой увязки и сопоставления морфологических типов циркона в разных петрографических группах пород.

3. Учет представлений Н. В. Белова [1959] и Л. В. Дмитриева [1956] о стадийности кристаллизации расплава, из которого образуются гранитоиды, с оценкой изменения величин относительной щелочности от стадии к стадии, позволяет вполне удовлетворительно объяснить различие в морфологии цирконов, образующихся в различные стадии кристаллизации расплава (так называемые ранние и поздние цирконы).

4. Такие факторы, как величина концентрации, содержание изоморфных примесей, в определенной степени регулируются режимом кислотности — щелочности, а потому при обсуждении вопроса о влиянии их на изменение облика кристаллов циркона представляются второстепенными, хотя в отдельных случаях они и могут выглядеть определяющими. Более сложен учет температурного фактора. Хотя, с одной стороны, его влияние представляется косвенным — на фоне изменения температурного режима происходит изменение режима кислотности — щелочности, что и является определяющим, с другой стороны — в ряде случаев воздействие температурного фактора (в плане влияния скорости охлаждения) на облик кристаллов циркона может рассматриваться как непосредственное, прямое влияние.

ЛИТЕРАТУРА

Баженов А. И., Ермолаев В. А. Распределение и типоморфия кристаллов акцессорного циркона в породах Элекмонарского массива (Горный Алтай). Тр. Томск. отд. МОИП, вып. 2, 1964.

Бартошевский В. И. и др. Структурно-петрологические особенности и акцессорная минерализация некоторых плутонов Северного Казахстана. Сб. науч. работ Киевского гос. ун-та (мат-лы по геол. и геохим.), № 1, 1963.

Белов Н. В. Кристаллохимия основного процесса кристаллизации магмы. Тр. геохим. симпозиума 1957 г. Изд-во АН СССР, 1959.

Григорьев Д. П. Онтогения минералов. Изд. Львовск. гос. ун-та, 1961.
Григорьев Д. П. Основы конституции минералов. М., Госгеолтехиздат, 1962.
Давиденко И. В. Некоторые геолого-структурные особенности и условия образования хрусталеносных пегматитов. Тр. ВНИИП, т. 7, 1962.
Давиденко И. В. Некоторые геохимические особенности процессов образования редкометальных, слюдоносных и хрусталеносных пегматитов. В сб. Минералогия и генезис пегматитов. М., Недра, 1965.
Дмитриев Л. В. Химические особенности кристаллизации гранитов главной интрузивной фазы Каибского массива. Геохимия, № 3, 1956.
Донней Дж. Д. Г. Морфология кристаллов циркона и рутила. ЗВМО, ч. 66, вып. 1, 1938.
Евзикова Н. З. К вопросу об изменении формы роста кристаллов минералов в процессе их роста. ЗВМО, ч. 87, вып. 6, 1958.
Заварицкий А. Н. Пересчеты химических анализов изверженных горных пород. М., Госгеолтехиздат, 1960.
Ипатьева И. С. О морфологических особенностях циркона из гранитоидов Омчикандинского массива. Науч. сообщ. СО АН СССР, вып. 4, 1960.
Кашин С. А., Стороженко А. А., Гуреев В. Ф. Морфологические типы циркона и особенности его распределения в одном из массивов щелочных пород. Тр. ЦНИГРИ, вып. 63, 1965.
Кочурова Р. М. Геометрические методы количественно-минералогического анализа горных пород. Изд. ЛГУ, 1957.
Коптев-Дворников В. С. и др. Палеозойские интрузивные комплексы гранитоидов Бет-Пак-Дала, т. 2. Изд-во АН СССР, 1962.
Куц В. П., Машкина А. А. Морфологические типы акцессорных цирконов из гранитоидов Приазовья. В сб. Морфологич. свойства и генезис минералов. Киев, Наукова думка, 1965.
Львов Б. К. Акцессорный циркон из гранитоидов восточного склона Южного Урала. В сб. Минералогия и геохимия. Изд. ЛГУ, вып. 1, 1964.
Ляхович В. В. Акцессорные минералы как индикаторы геологических процессов. Мат-лы совещ. по новым методам исследов. в минерал. и петрограф. Изд-во АН СССР, 1963.
Ляхович В. В., Шевалеевский И. Д. О соотношении циркония и гафния в акцессорном цирконе гранитоидов. Геохимия, № 5, 1962.
Михеев В. И., Шафрановский И. И. О совпадении теоретических и генетических типов кристаллов цинковой обманки. ЗВМО, ч. 77, вып. 4, 1948.
Морковкина В. Ф. Химические анализы изверженных горных пород. Наука, 1964.
Никитин В. Д. Особенности процессов формирования минералов при метасоматических явлениях. Кристаллография, вып. 4. Изд. ЛГИ, 1955.
Прощенко Е. Г. Отношение HfO_2/ZrO_2 и типоморфизм кристаллов циркона в щелочных гранитных пегматитах и альбититах. В сб. Минерал. и генетич. особен. щелочных массивов. Наука, 1964.
Рудовская Л. Н. Циркон и его парагенетические ассоциации в месторождениях гранитных пегматитов Чупинско-Лоухского и Енского пегматитовых полей. Краткие сообщ. по науч.-исслед. работе за 1959 г. ИМГРЭ, вып. 1, 1960.
Руденко С. А. О способе и механизме образования кристаллов циркона в мариуполите. ЗВМО, ч. 86, вып. 4, 1957.
Сиротин К. М., Задумина М. И. К вопросу о времени кристаллизации акцессорных минералов. Вопр. геохим. и литологии изверж. и осадочных пород Юж. Урала и Поволжья. Геохимия, сб. № 2. Изд. Саратовского гос. ун-та, 1965.
Соболев Р. Н. О распределении акцессорных минералов в породах Амактауского массива (Центр. Казахстан). Вестн. МГУ, сер. геол., № 4, 1961.
Тихоненков И. П., Тихоненкова Р. П. Цирконий. Гафний. В сб. Геохим., минерал. и генетич. типы м-ний редких элементов, т. 1. Наука, 1964.
Туровский С. Д. О морфологических особенностях циркона из изверженных пород Сев. Киргизии. Тр. Ин-та геол. АН Кирг. ССР, вып. 6, 1955.
Халезова Е. Б. О типоморфизме циркона из щелочных пород Вишневых гор. Минералы СССР. Тр. Минерал. музея АН СССР, вып. 14, 1963.
Шафрановский И. И. Цирконы Вишневых гор. ЗВМО, ч. 62, вып. 1, 1933.
Шафрановский И. И. К вопросу о развитии граней циркона в связи с его строением. ЗВМО, ч. 66, вып. 1, 1937.
Шафрановский И. И. Демонстрация закона Бравэ на кристаллах циркона. ЗВМО, ч. 74, вып. 3, 1945.
Шафрановский И. И. Кристаллы минералов, т. 1. Изд. ЛГУ, 1957.
Шафрановский И. И. Лекции по кристалломорфологии минералов. Изд. Львовск. гос. ун-та, 1960.
Шевалеевский И. Д., Павленко А. С., Вайнштейн Э. С. Зависимость поведения циркония и гафния от петрохимических особенностей магматических и щелочно-метасоматических пород. Геохимия, № 3, 1960.
Щелочные граниты Кольского полуострова. Изд-во АН СССР, 1958.
Hoppe G. Die Verwendbarkeit morphologischer Erscheinungen an akzessorischen Zirconen für petrogenetiche Auswertungen. Acad. Verlag. Berlin, 1963.