

Иванов О.К.

**КРИСТАЛЛЫ:  
РАВНОВЕСНЫЕ И НЕРАВНОВЕСНЫЕ,  
И ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИХ ФОРМ**

Екатеринбург, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ ПОЛНОЕ

Оглавление краткое .....	4
Оглавление полное .....	5
<b>ЧАСТЬ 1. ПРОБЛЕМА ФОРМЫ КРИСТАЛЛОВ</b>	
<b>Глава 1. Введение .....</b>	<b>9</b>
<b>Глава 2. Развитие представлений о причинах изменчивости формы кристаллов .....</b>	<b>9</b>
2.1. Мифологический период .....	11
2.2. Н. Стенон и энциклопедический период .....	12
2.3. Кристаллографический период (XIX столетие) .....	15
2.4. Ранний кристаллогенетический период (XIX столетие) .....	15
2.5. Онтогенетический период (XX столетие) .....	16
2.6. Кристаллогенетический период (современное состояние проблемы) .....	18
2.7. Выводы .....	19
<b>Глава 3. Типизация кристаллов по условиям образования. Равновесные и неравновесные кристаллы .....</b>	<b>19</b>
3.1. История вопроса .....	20
3.2. Общая систематика кристаллов .....	20
3.3. Теоретические формы кристаллов .....	21
3.4. Элементарные кристаллы .....	22
3.5. Идеальные кристаллы .....	22
3.6. Реальные кристаллы .....	23
3.6.1. Равновесные и близравновесные кристаллы .....	23
3.6.2. Неравновесные кристаллы .....	26
<b>Часть II. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФОРМ КРИСТАЛЛОВ И ЕЁ ПРИЧИНЫ</b>	
<b>Глава 4. Факторы, влияющие на форму кристаллов .....</b>	<b>27</b>
4.1. История вопроса .....	27
4.2. Типы факторов, влияющих на форму кристаллов .....	30
4.3. <b>Физические факторы</b> .....	31
4.3.1. <b>Температура</b> .....	31
4.3.1.1. Проверка зависимости удлинения петрогенных минералов от температуры кристаллизации .....	34
4.3.1.2. Зависимость облика кристаллов акцессорных минералов от температуры кристаллизации .....	34
4.3.1.3. Влияние температуры на полиморфные превращения .....	35
4.3.1.4. Влияние температуры на адсорбционные процессы .....	35
4.3.1.5. Температура и пересыщение .....	36
4.3.1.6. Выводы .....	37
4.3.2. <b>Давление</b> .....	37
4.3.2.1. Совместное влияние давления и температуры .....	38
4.3.3. <b>Вязкость</b> .....	39
4.3.3.1. Зависимость удлинения кристаллов от вязкости расплава породы .....	39
4.3.3.2. Выводы .....	40
4.4. <b>Химические факторы</b> .....	42
4.4.1. История вопроса .....	42
4.4.2. Зависимость облика минералов от кислотности пород или содержания SiO <sub>2</sub> .....	43
4.4.3. Зависимость удлинения минералов от щелочности пород, содержания щелочных металлов или pH .....	45
4.4.4. Проверка влияния щелочности на облик кристаллов на природном материале ...	48
4.4.5. Зависимость облика кристаллов циркона от содержания изоморфных примесей ..	50
4.4.6. Зависимость облика кристаллов акцессорного циркона от содержания циркония ..	50
4.4.7. Зависимость облика кристаллов от активности компонентов .....	51



4.4.8. Выводы .....	51
4.5. Адсорбция .....	51
4.5.1. История вопроса .....	53
4.5.2. Красители и ПВА .....	53
4.5.3. Выводы .....	55
4.6. Среда кристаллизации .....	55
4.6.1. Агрегатное состояние среды кристаллизации .....	55
4.6.2. Влияние гравитационного поля .....	56
4.6.3. Концентрационные потоки .....	58
4.6.4. Кристаллизация в потоке .....	59
4.6.5. Влияние ориентировки кристаллов .....	60
4.6.6. Влияние механических примесей .....	60
4.6.7. Выводы .....	60
4.7. Влияние структуры на облик кристаллов (общий подход) .....	60
4.7.1. Анализ принципа Браве .....	60
4.7.2. Сравнение удлинений кристаллов и удлинений их элементарных ячеек .....	63
4.7.3. Зависимость удлинений кристаллов от сингонии .....	64
4.7.4. Зависимость удлинения кристалла от двойникования .....	65
4.7.5. Выводы .....	66
4.8. Кинетические факторы .....	66
4.8.1. Пересыщение растворов .....	67
4.8.2. Пересыщение при повышении температуры .....	72
4.8.3. Переохлаждение растворов и расплавов .....	72
4.8.4. Скорость кристаллизации и охлаждения .....	74
4.8.5. Степень и типы неравновесной кристаллизации .....	78
4.8.6. Выводы по влиянию кинетических процессов .....	79
4.9. Оценка влияния разных факторов на облик кристаллов .....	79
4.10. Общие выводы .....	81
<b>Глава 5. Изменение габитуса и огранки кристаллов в зависимости от пересыщения, переохлаждения и скорости кристаллизации .....</b>	<b>82</b>
5.1. Кубическая сингония .....	82
5.1.1. Элементы .....	82
5.1.2. Сульфиды .....	87
5.1.3. Галогениды .....	89
5.1.4. Оксиды .....	92
5.1.5. Сульфаты .....	94
5.1.6. Силикаты .....	94
5.1.7. Выводы по кубической сингонии .....	95
5.2. Тетрагональная сингония .....	96
5.3. Тригональная сингония .....	103
5.4. Гексагональная сингония .....	113
5.5. Выводы для кристаллов средних сингоний .....	119
5.6. Ромбическая сингония .....	119
5.7. Моноклинная сингония .....	128
5.8. Триклинная сингония .....	135
5.9. Выводы по низшим сингониям .....	138
5.10. Общие выводы .....	138
<b>Глава 6. Закономерности изменения форм кристаллов и типы неравновесных кристаллов .....</b>	<b>139</b>
6.1. История развития представлений об эволюции формы кристаллов .....	139
6.2. Типы кристаллогенетических диаграмм .....	140
6.3. Общие закономерности изменения форм кристаллов по сингониям .....	140
6.4. Эволюция облика кристаллов .....	142
6.5. Эволюция габитуса .....	142
6.6. Закономерности эволюции огранки кристаллов .....	142
6.7. О причинах различия между экспериментальными и геологическими данными .....	143
6.8. Типизация кристаллов по степени неравновесности .....	143
6.9. Аномальные формы кристаллов и оценка влияния адсорбции на форму кристаллов .....	145
6.10. Формы равновесных и неравновесных кристаллов .....	145

6.10. Общие выводы по облику, габитусу и огранке. ....	146
--	-----

### **Часть III. ФОРМЫ РАВНОВЕСНЫХ КРИСТАЛЛОВ**

<b>Глава 7. Методы определения равновесных форм кристаллов. ....</b>	<b>146</b>
7.1. Теоретические и расчетные методы . . . . .	146
7.1.1. Термодинамический подход. ....	146
7.1.2. Метод Вульфа геометрический. ....	149
7.1.3. Метод расчета поверхностной энергии кристалла. ....	150
7.2. Структурно-геометрические методы (метод Браве и его модификации). ....	151
7.3. Условно энергетические методы . . . . .	152
7.3.1. Метод средних работ отрыва Странского и Каишева. ....	152
7.3.2. Метод периодических цепочек связи Гартмана и Пердока (ПЦС). ....	153
7.3.3. Вычислительные методы. ....	153
7.4. Экспериментальные методы . . . . .	154
7.4.1. Методы экспериментального определения поверхностного натяжения. ....	155
7.4.2. Метод растворения-кристаллизации шаров. ....	156
7.4.3. Метод Леммлейна-Клии. ....	156
7.4.4. Метод трехмерного зародыша Шефталя. ....	156
7.4.5. Метод кристаллизации при малом пересыщении, испарении, переохлаждении или малой скорости кристаллизации. ....	156
7.4.6. Метод установления тенденции изменения формы кристаллов при разных физико-химических условиях. ....	157
7.4.7. Метод определения насыщения раствора. ....	157
7.5. Кристаллографические методы. ....	157
7.5.1. Метод Стенона. ....	157
7.5.2. Метод простых форм и малого числа граней или метод простейших форм. ....	157
7.5.3. Статистически-кристаллографический метод. ....	158
7.5.4. Среднестатистический кристаллографический метод. ....	158
7.5.5. Рентгенометрический метод. ....	159
7.5.6. Структурно-кристаллографический метод. ....	159
7.6. Эвристический метод. ....	160
7.7. Геологические методы. ....	161
7.7.1. Оценка по форме кристаллов, образующихся в близравновесных условиях. ....	161
7.7.2. Оценка по тенденции изменения формы кристаллов в зависимости от условий кристаллизации. ....	162
7.7.3. Метод по относительной глубине кристаллизации. ....	162
7.7.4. Метод по мощности интрузий. ....	162
7.7.5. Метод по пространственному распределению форм кристаллов. ....	162
7.7.6. Метод оценки по эволюции форм кристаллов по времени кристаллизации. ....	163
7.8. Сравнительный анализ предложенных методов. ....	163
7.9. Ожидаемая форма равновесных кристаллов. ....	162
<b>Глава 8. Формы равновесных кристаллов. ....</b>	<b>166</b>
8.1. Кубическая сингония. ....	166
8.1.1. Элементы. ....	166
8.1.2. Сульфиды. ....	168
8.1.3. Галогениды. ....	169
8.1.4. Оксиды. ....	171
8.1.5. Сульфаты. ....	172
8.1.6. Бораты. ....	172
8.1.7. Силикаты. ....	173
8.1.8. Выводы по кубической сингонии. ....	174
8.2. Тетрагональная сингония. ....	175
8.3. Тригональная сингония. ....	178
8.4. Гексагональная сингония. ....	182
8.5. Ромбическая сингония. ....	183
8.6. Моноклиная сингония. ....	186

8.7. Триклинная сингония .....	190
8.8. Общие выводы .....	191
8.9. Сопоставление равновесных кристаллов с простейшими формами кристаллов .....	191

## **Часть 1У. ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМ КРИСТАЛЛОВ**

<b>Глава 9. Сопоставление с габитуса и огранки равновесных кристаллов с их кристаллической структурой .....</b>	<b>195</b>
9.1. Элементы формы кристаллов и элементарных ячеек .....	195
9.2. Сравнение форм равновесных кристаллов и их элементарных ячеек .....	196
9.3. Кубическая сингония.....	197
9.4. Тетрагональная сингония.....	199
9.5. Тригональная сингония.....	201
9.6. Гексагональная сингония.....	201
9.7. Ромбическая сингония .....	203
9.8. Моноклинная сингония.....	204
9.9. Триклинная сингония.....	205
9.10. Выводы .....	205
<b>Глава 10. Влияние энергетических факторов на форму кристаллов.....</b>	<b>206</b>
10.1. Сравнение форм термодинамически и геологически равновесных кристаллов .....	207
10.2. Оценка поверхностной энергии равновесных и неравновесных кристаллов.....	209
10.3. О причинах расхождения между термодинамическими и геологическими результатами.....	210
10.4. Выводы .....	211
10.5. Объемная поверхностная энергия кристаллов .....	211
10.6. Энергетические зоны кристаллов .....	212
10.7. Энергетические расчеты .....	213
<b>Глава 11. Структурно-кинетический закон формы роста равновесных и неравновесных кристаллов... ..</b>	<b>213</b>
11.1. История вопроса .....	213
11.2. Формулировка структурно-кинетического закона .....	215
<b>Заключение и следствия .....</b>	<b>215</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>217</b>
<b>Consequeses .....</b>	<b>218</b>
<b>Литература.....</b>	<b>221</b>
<b>Приложения:</b>	
Указатель кристаллов минералов для которых построены кристаллогенетические диаграммы или даны равновесные формы кристаллов.....	233
Рецензия доктора геолого-минералогических наук В.А. Попова .....	234
Рецензия доктора геолого-минералогических наук В.И. Ракина .....	235