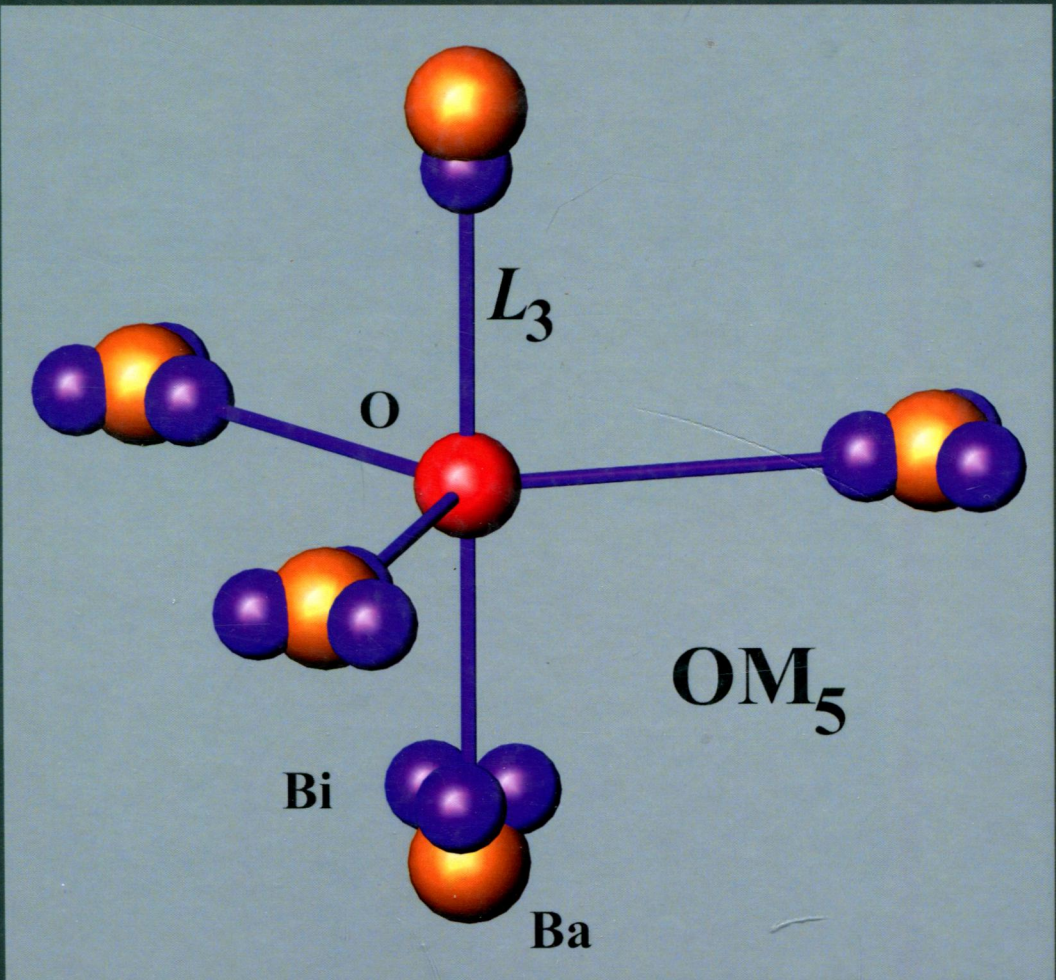




САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛО ХИМИЯ

С. К. Филатов  
С. В. Кривовичев  
Р. С. Бубнова



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

С. К. Филатов, С. В. Кривовичев,  
Р. С. Бубнова

# СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОХИМИЯ

*Учебник*



ИЗДАТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УДК 548  
ББК 24  
Ф51

Авторы: д-р геол.-минерал. наук, проф. *С. К. Филатов* (С.-Петербург. гос. ун-т); д-р геол.-минерал. наук, проф., чл.-корр. РАН *С. В. Кривовичев* (С.-Петербург. гос. ун-т); д-р хим. наук, проф. *Р. С. Бубнова* (Институт химии силикатов РАН, С.-Петербург. гос. ун-т)

Рецензенты: д-р хим. наук, проф. *Н. В. Чежина* (Институт химии С.-Петербург. ун-та); д-р хим. наук, проф. *А. Е. Лапшин* (Институт химии силикатов РАН)

*Рекомендовано к печати  
учебно-методической комиссией по УГСН 05.00.00 Науки о Земле  
Санкт-Петербургского государственного университета*

**Филатов С. К., Кривовичев С. В., Бубнова Р. С.**

Ф51 Систематическая кристаллохимия: учебник. — СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2019. — 231 с.  
ISBN 978-5-288-05958-2

Кристаллохимия как основа учения об атомно-молекулярном строении вещества и взаимосвязи кристаллической структуры и свойств химических соединений естественно разделяется на две части: установление и изучение общих принципов кристаллического строения вещества, с одной стороны, и описание кристаллических структур соединений разных классов — с другой. Первая часть изложена в опубликованном в 2018 г. учебнике «Общая кристаллохимия», второй части посвящается настоящее издание, в котором вначале даются структуры простых веществ (самородных элементов): неметаллов, металлов и близких к ним по составу и строению интерметаллидов, фаз внедрения и т. п., затем излагаются структуры галогенидов, оксидов и халькогенидов. Основной объем учебника отводится кислородным соединениям с кислотными радикалами типа  $\text{TO}_3$  и  $\text{TO}_4$  ( $\text{CO}_3$ ,  $\text{SiO}_4$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{SO}_4$  и др.), которые представляют более половины химических соединений, включаемых обычно в химические и физические справочники. Описываются также соединения с комплексами оксоцентрированных (в общем случае анионоцентрированных) тетраэдров.

Учебник рекомендуется учащимся бакалавриата, магистратуры и аспирантуры, молодым ученым и преподавателям, специализирующимся в науках о Земле, химии, фундаментальном материаловедении, металлургии, физике, почвоведении, генетике и других естественных науках.

УДК 548  
ББК 24

*Издано на средства Санкт-Петербургского государственного университета*

© Санкт-Петербургский  
государственный университет, 2019  
© С. К. Филатов, С. В. Кривовичев,  
Р. С. Бубнова, 2019

ISBN 978-5-288-05958-2

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	7
Введение. Система представления кристаллических структур .....	9
<b>ЧАСТЬ 1. СТРУКТУРЫ ПРОСТЫХ ВЕЩЕСТВ (САМОРОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ) И РОДСТВЕННЫХ ИМ СОЕДИНЕНИЙ.....</b>	<b>13</b>
<b>Глава 1. Структуры простых веществ (самородных элементов).....</b>	<b>13</b>
1.1. Разделение простых веществ на металлы и неметаллы .....	13
1.2. Самородные элементы .....	14
1.3. Молекулярные структуры простых веществ .....	15
1.4. Атомные структуры простых веществ .....	20
1.5. Структуры металлов и их твердых растворов.....	24
Рекомендуемая литература .....	26
<b>Глава 2. Структуры соединений, родственных простым веществам .....</b>	<b>27</b>
2.1. Интерметаллиды .....	27
2.2. Структуры металлических фаз внедрения .....	31
2.3. Структуры соединений мелких атомов (B, C, Si, N) между собой .....	33
Рекомендуемая литература .....	34
<b>ЧАСТЬ 2. СТРУКТУРЫ ГАЛОГЕНИДОВ, ОКСИДОВ И ХАЛЬКОГЕНИДОВ.....</b>	<b>35</b>
<b>Глава 3. Кристаллические структуры галогенидов .....</b>	<b>36</b>
3.1. Химическая связь в галогенидах .....	36
3.2. Галогениды типа АВ.....	37
3.3. Галогениды типа АВ <sub>2</sub> .....	38
Рекомендуемая литература .....	39
<b>Глава 4. Структуры оксидов .....</b>	<b>40</b>
4.1. Структуры простых оксидов.....	40
4.2. Структуры двойных оксидов .....	49
Рекомендуемая литература .....	55

<b>Глава 5. Структуры сульфидов и других халькогенидов.....</b>	<b>56</b>
5.1. Химическая связь в сульфидах.....	56
5.2. Сульфиды с донорно-акцепторной связью.....	57
5.3. Сульфиды с донорно-акцепторной и ковалентной связью.....	58
5.4. Сульфиды с донорно-акцепторной и металлической связью.....	59
5.5. Сульфиды с ионно-ковалентно-металлической связью.....	60
5.6. Молекулярные сульфиды.....	60
Рекомендуемая литература.....	61
<b>ЧАСТЬ 3. КРИСТАЛЛОХИМИЯ КИСЛОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....</b>	<b>62</b>
<b>Глава 6. Систематика и прочностные свойства кислородных соединений.....</b>	<b>62</b>
6.1. Химическая связь в солях кислородных кислот.....	62
6.2. Постановка задачи.....	63
6.3. Параметры систематики.....	64
6.4. Общие черты полимеризации радикалов $\text{TO}_3$ и $\text{TO}_4$ в различных классах кислородных соединений.....	68
6.5. Геометрия кристаллических структур кислородных соединений как функция отношения O/T.....	69
6.6. Прочностные свойства кислородных соединений как функция остаточного заряда тетраэдра $\text{TO}_4$ / треугольника $\text{TO}_3$ .....	69
6.7. Прочность кислородных соединений с высоковалентными, средневалентными и низковалентными центральными атомами ....	72
Рекомендуемая литература.....	73
<b>Глава 7. Структуры карбонатов, нитратов и боратов с изолированными треугольными радикалами.....</b>	<b>74</b>
7.1. Общие сведения.....	74
7.2. Безводные карбонаты, нитраты и бораты кальцитового и арагонитового строения.....	74
7.3. Водные карбонаты.....	82
7.4. Карбонаты — кристаллохимические геотермометры и геобарометры.....	85
Рекомендуемая литература.....	86
<b>Глава 8. Бораты: уникальные черты кристаллохимии.....</b>	<b>87</b>
8.1. Место боратов в структурной химии и структурной минералогии.....	87
8.2. Координация атомов бора и кислорода в боратах.....	90
8.3. Борокислородные группы.....	92
8.4. Обозначения борокислородных жестких групп и иных анионных комплексов.....	97
8.5. Реберносвязные тетраэдры $\text{BO}_4$ .....	98
8.6. Статистика встречаемости борокислородных группировок.....	99

8.7.	Длины и углы связей в $\text{VO}_3$ - и $\text{VO}_4$ -полиэдрах .....	100
8.8.	Анализ длин связей мостиковых атомов кислорода в боратах .....	100
8.9.	Ангармонизм термических смещений катионов и генерация второй гармоники .....	101
	Рекомендуемая литература .....	102
<b>Глава 9.</b>	<b>Бораты: кристаллические структуры и их <i>t-p-x</i>-преобразования .....</b>	<b>103</b>
9.1.	Выборочное описание кристаллических структур боратов .....	103
9.2.	<i>t-p-x</i> -преобразования кристаллических структур боратов.....	110
	Рекомендуемая литература .....	122
<b>Глава 10.</b>	<b>Кристаллохимия силикатов и алюмосиликатов. Общие положения.....</b>	<b>123</b>
10.1.	Значение силикатов в природе, промышленности и быту .....	123
10.2.	Кремнекислородные полиэдры и химическая связь в силикатах.....	123
10.3.	Кристаллохимические классификации силикатов .....	125
10.4.	Октаэдрические силикаты: систематика, примеры структур.....	128
10.5.	Основные черты кристаллохимии тетраэдрических силикатов.....	130
	Рекомендуемая литература .....	133
<b>Глава 11.</b>	<b>Структуры силикатов с конечными линейными группами тетраэдров .....</b>	<b>134</b>
11.1.	Структуры ортосиликатов.....	134
11.2.	Структуры диортосиликатов .....	141
11.3.	Силикаты, содержащие группы $\text{SiO}_4$ и $\text{Si}_2\text{O}_7$ в одной структуре.....	143
	Рекомендуемая литература .....	143
<b>Глава 12.</b>	<b>Кольцевые силикаты.....</b>	<b>144</b>
12.1.	Структуры берилла и родственных ему минералов.....	144
12.2.	Группа турмалина.....	147
12.3.	Силикаты с тройными и четверными кольцами.....	150
	Рекомендуемая литература .....	150
<b>Глава 13.</b>	<b>Цепочечные силикаты и алюмосиликаты.....</b>	<b>151</b>
13.1.	Разнообразие цепочек, кратных пироксеновой .....	152
13.2.	Структуры пироксенов ( <i>Pyroxenes</i> ) .....	152
13.3.	«Брусковое» представление кристаллических структур, основанных на пироксеновых цепочках .....	156
13.4.	Структуры амфиболов ( <i>Amphiboles</i> ).....	157
13.5.	Многорядные ленты .....	160
13.6.	Трубчатые силикаты .....	162
	Рекомендуемая литература .....	164

<b>Глава 14. Слоистые силикаты.....</b>	<b>165</b>
14.1. Общие сведения.....	165
14.2. Систематика и структура слоистых силикатов и алюмосиликатов.....	167
14.3. Вычисление формул слоистых силикатов и алюмосиликатов.....	169
14.4. Политипия слюд.....	170
Рекомендуемая литература.....	171
<b>Глава 15. Каркасные алюмосиликаты.....</b>	<b>172</b>
15.1. Каркасные алюмосиликаты — соединения, производные от кремнезема.....	172
15.2. Общие черты строения полевых шпатов.....	173
15.3. Метод экспериментального определения Al—Si-упорядочения.....	174
15.4. Al—Si-упорядочение в различных полевых шпатах.....	175
15.5. Расщепление позиций катионов.....	177
15.6. Моделирование термических преобразований полевых шпатов.....	178
15.7. Содалиты.....	180
15.8. Цеолиты.....	182
15.9. Терморентгенография гидросодалитов.....	184
15.10. Атомно-молекулярная картина ионного обмена по данным рентгеноструктурного анализа.....	184
Рекомендуемая литература.....	186
<b>ЧАСТЬ 4. КРИСТАЛЛОХИМИЯ — МЕЖДИСЦИПЛИНАРНАЯ НАУКА.....</b>	<b>187</b>
<b>Глава 16. Кристаллохимия минералов и неорганических соединений с комплексами анионоцентрированных тетраэдров.....</b>	<b>187</b>
16.1. Введение. Интеграция науки.....	187
16.2. Становление научного направления.....	189
16.3. Рождение альтернативной кристаллохимии на вулкане.....	191
16.4. Принципы строения эксталяционных минералов-оксосолей и вулканических газов. Естественная систематика оксосолей.....	195
16.5. Атомы, химическая связь и прочностные свойства оксосолей.....	199
16.6. Генезис минералов, содержащих тетраэдры $OA_4$ .....	201
Рекомендуемая литература.....	203
<b>Заключение.....</b>	<b>204</b>
<b>Литература.....</b>	<b>209</b>
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>217</b>
<b>Сокращения.....</b>	<b>230</b>