

## SILICATES IN NATURE AND IN HUMAN PRACTICE

M. M. SHULTZ

*The general properties of silicates as well as natural occurrences and practical implementation are briefly described. The reasons for silicate diversity are revealed. The evolution of the scientific ideas on the nature of silicates is traced.*

**В статье даны общая характеристика силикатов, их распространенность в природе и использование в практике человека, вскрыты причины их многообразия. Прослежена эволюция научных представлений о природе силикатов.**

© Шульц М.М., 1997

## СИЛИКАТЫ В ПРИРОДЕ И ПРАКТИКЕ ЧЕЛОВЕКА

М. М. ШУЛЬЦ

Санкт-Петербургский государственный университет

### ВВЕДЕНИЕ

Силикаты – это обширный класс соединений, образованных диоксидом кремния (кремнеземом) и оксидами других элементов. Многообразие силикатов связано со способностью атомов кремния соединяться между собой через атомы кислорода, образуя в зависимости от природы оксидов металлов и их соотношения с оксидом кремния кремнекислородные радикалы различного строения, изоструктурно замещаться на атомы алюминия и в меньшей степени на атомы Ge, Ti, Fe, Be и P, с наличием полиморфизма для кристаллических силикатов (способностью реализовывать различные структурные варианты при одинаковом химическом составе). Так, например, для кремнезема наиболее известными полиморфными модификациями являются кварц (две формы), кристобалит (две формы), тридимит (по крайней мере три модификации), стишовит, коэсит.

Как правило, силикаты являются тугоплавкими и химически пассивными веществами, плохо или практически нерастворимыми в воде. В зависимости от температуры они могут быть газообразными, жидкими (расплавленными) и твердыми, а также образовывать высокодисперсные (коллоидные) системы с размером частиц силикатов  $10^{-6}$ – $10^{-9}$  м. В отличие от растворов в коллоидах имеется поверхность раздела между частицами силикатов и дисперсионной средой. Халцедоны и опалы ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), в которых вода (ее содержание непостоянно) является дисперсионной средой, – пример таких систем. Спектр химического состава силикатов чрезвычайно широк. Это и алюмосиликаты, то есть силикаты, в которых часть атомов кремния замещена на атомы алюминия, и гидросиликаты – силикаты, содержащие воду, и др. Силикаты могут иметь как природное, так и искусственное происхождение.

### СИЛИКАТЫ В ПРИРОДЕ

Для того чтобы понять роль силикатов в жизни человека, остановимся сначала на строении земного шара [1]. По современным представлениям земной шар состоит из ряда оболочек. Наружная оболочка Земли, земная кора, или литосфера, образована гранитной и базальтовой оболочками и тонким осадочным слоем. Гранитная оболочка в основном состоит из гранита – плотных сростков из полевых шпатов, слюды, амфиболов и пироксенов, а базальтовая – из таких гранитоподобных, но более тяжелых силикатных пород, как габбро, диабазы и

базальты. Осадочные горные породы образуются при разрушении других пород под влиянием условий, характерных для поверхности Земли. Составной частью осадочного слоя являются, в частности, глины, основа которых — силикатный минерал каолинит. Литосфера на 95 мас. % образована силикатами. Ее средняя мощность в области материков составляет 30–40 км. Затем располагается симатическая оболочка, или верхняя мантия, среди минералов которой, вероятно, преобладают силикаты железа и магния. Эта оболочка охватывает земной шар сплошь и распространяется до глубины 1200 км. Далее от 1200 до 2900 км располагается промежуточная оболочка. Ее состав спорен, но и в ней предполагается существование силикатов. Под этой оболочкой на глубине от 2900 до 6370 км находится ядро. В последнее время высказано предположение, что ядро имеет также силикатный состав. При движении от поверхности Земли к ее центру возрастают плотность и основность слагающих пород (увеличивается соотношение между содержанием оксидов металлов и кремнезема), давление и температура.

Древнейшие орудия труда были изготовлены человеком из кремня — плотного агрегата из халцедона, кварца и опала (800–60 тыс. лет до н.э.). Позднее для этого стали использовать яшмы, горный хрусталь, агаты, обсидиан (вулканическое силикатное стекло), нефрит.

Для силикатных минералов нет общепринятой систематики (минералогической номенклатуры), их названия чаще всего происходят от внешнего вида кристаллов, их физических свойств, места нахождения или имени ученого, их открывшего. Плаггиоклаз в переводе с греческого означает косо раскалывающийся, а пироксен — тугоплавкий, что отвечает свойствам этих минералов. Минералы кварца в зависимости от природы примесей имеют широкий спектр окраски, которая и определяет их названия: аметист — фиолетовый, цитрин — желтый, горный хрусталь — лед. Модификации кремнезема стишовита и коэсита и минерала биотита произошли от фамилий ученых, их открывших, С.М. Стишова, Л. Коэса и Ж.Б. Био, а минерал каолинит получил свое название от горы Каолинга в Китае, где издавна добывалась глина для производства фарфора.

Природные силикаты и сам кремнезем играют важную роль в качестве сырья и конечных продуктов в промышленных процессах. Алумосиликаты — плаггиоклазы, калиевый полевой шпат и кремнезем используются как сырье в керамической, стекольной и цементной промышленности. Для изготовления несгораемых и обладающих электроизоляционными свойствами текстильных изделий (ткани, шнуры, канаты) широко используются асбесты, относящиеся к гидросиликатам — амфиболам. Некоторые виды асбестов обладают высокой кислотостойкостью и применяются в химической промыш-

ленности. Биотиты, представители группы слюд, используются как электро- и теплоизоляционные материалы в строительстве и приборостроении. Пироксены применяются в металлургии и каменнолитейном производстве, а пироксен  $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$  — для получения металлического лития. Пироксены являются составной частью доменных шлаков и шлаков цветной металлургии, которые, в свою очередь, также используются в народном хозяйстве. Такие горные породы, как граниты, базальты, габбро, диабазы, являются прекрасными строительными материалами.

### СИЛИКАТЫ ИСКУССТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Без силикатных материалов — различных видов цемента, бетона, шлакобетона, керамики, стекла, покрытий в виде эмалей и глазурей едва ли можно представить себе нашу повседневную жизнь. Масштабы производства силикатных материалов представляются внушительными цифрами. В статье мы не будем касаться природы и применения стекол. Эти вопросы уже были рассмотрены в [2].

Наиболее древними силикатными материалами являются керамические, получаемые из глин и их смесей с различными минеральными добавками, обожженными до камневидного состояния. В древнем мире керамические изделия были распространены по всей территории Земли. Со второй половины XIX века и до настоящего времени индустриальная керамическая промышленность неизмеримо расширила выпуск и ассортимент керамики. Универсальную классификацию керамик создать трудно, но можно выделить следующие типы.

1. Благодаря экономичности производства, высоким физико-механическим и художественно-декоративным качествам, керамические материалы широко используются как строительные и декоративные. Это кирпич, пустотелые блоки для стен, перегородок, перекрытий, облицовочные плитки, изразцы, терракотовые и майоликовые детали в архитектуре, канализационные и дренажные трубы.

2. Огнеупорная керамика используется в производстве металлов, цемента, стекла, для кладки высокотемпературных печей, футеровки их внутренних поверхностей.

3. Химически стойкие керамики заменяют или защищают металлы в производствах, связанных с агрессивными средами, например в химической промышленности.

4. Тонкая керамика включает в себя изделия из фарфора и фаянса. К ним относятся бытовая и химическая посуда, художественные изделия, изоляторы разных типов.

Процессы производства керамики многообразны и в общих чертах сводятся к: 1) обработке сырья,

2) приготовлению керамической массы, 3) формованию и сушке массы, 4) обжигу, 5) отделке изделий. В современном производстве эти операции обеспечиваются специальным оборудованием, порой очень сложным, а сами процессы проводятся в оптимальных технологических режимах, разработанных на серьезной научной основе учеными различных профилей.

Примером искусственного силикатного материала является портландцемент, один из наиболее распространенных видов минеральных вяжущих веществ. Цемент используется для связывания строительных деталей при получении массивных строительных блоков, плит, труб и кирпича. Цемент является основой таких широко применяемых строительных материалов, как бетон, шлакобетон, железобетон. Строительство любого масштаба не может существовать без цемента. В школьном курсе по химии даны основные представления о химическом составе и технологии цемента, поэтому остановимся лишь на некоторых уточняющих деталях. Прежде всего цементным клинкером называется продукт обжига смеси глины и известняка, а цементом — мелкоизмельченный клинкер с минеральными добавками, регулирующими его свойства. Цемент применяется в смеси с песком и водой. Его вяжущие свойства обусловлены способностью цементных минералов взаимодействовать с  $H_2O$  и  $SiO_2$  и при этом затвердевать, образуя прочную камневидную структуру. При схватывании цемента происходят сложные процессы: гидратация минералов с образованием гидросиликатов и гидроалюминатов, гидролиз, образование коллоидных растворов и их кристаллизация. Исследования процессов твердения цементного раствора и минералов цементного клинкера сыграли большую роль в становлении науки о силикатах и их технологии.

## СТАНОВЛЕНИЕ НАУКИ О СИЛИКАТАХ

Хотя история развития человеческого общества тесно переплетена с использованием силикатов как природного, так и искусственного происхождения, научный подход к изучению этих соединений сформировался относительно поздно — в конце XVIII — начале XIX столетия вместе со становлением химической науки. Это объясняется и специфическими особенностями силикатов: сложностью строения, вариациями химического состава, нерастворимостью и химической пассивностью, способностью к переходу в нестабильные состояния и высокой температурой плавления.

Первой научной теорией по систематике силикатов была так называемая поликремневая теория силикатов, которая на протяжении длительного времени (конец первой половины XIX—20-е годы XX века) играла важную роль в химии силикатов. Согласно этой теории, силикаты рассматривались как соли кремниевых кислот общей формулы

$nSiO_2 \cdot mH_2O$  ( $n, m$  — целые числа). Значениям  $n > 1$  соответствовали поликремневые кислоты. Простейшими представителями кремниевых кислот являются метакремневая  $H_2SiO_3$  ( $n = 1, m = 1$ ), ортокремневая  $H_4SiO_4$  ( $n = 1, m = 2$ ), двуметакремневая  $H_2Si_2O_5$  ( $n = 2, m = 1$ ), пирокремневая  $H_6Si_2O_7$  ( $n = 2, m = 3$ ). Соли этих кислот получили названия мета-, двумета-, орто- и пиросиликатов соответственно. Для простых силикатов такие названия общеприняты и в настоящее время. Невозможность выделения кремниевых кислот в чистом виде из-за их коллоидного характера оставляла открытым вопрос о солеобразной природе силикатов. Более того, многообразие силикатов не укладывалось в рамки этой теории. Например, минералы жадеита  $NaAlSi_2O_6$  и лейцита  $KAlSi_2O_6$  относятся, казалось бы, к солям метакремниевой кислоты, но по своим свойствам сильно отличаются друг от друга. В приведенном случае поликремневая теория не смогла дать ответ о связи между химическим составом силикатных соединений и их строением, что является основной задачей любой систематики. Однако при формировании поликремневой теории была высказана гениальная догадка о полимеризации атомов кремния через атомы кислорода.

В своих трудах [3], посвященных природе силикатов, Д.И. Менделеев указывал на противоречия поликремневой теории. Он высказал идею об изоморфном замещении в силикатах не только оксидов одинакового типа, но и разных, таких, как  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ . Это наводило на мысль о сходстве и химических свойств этих оксидов. Далее на основании достаточно широкой вариации соотношения между основными и кислотными оксидами в силикатах Д.И. Менделеев отмечал, что нельзя объяснить все многообразие силикатов только существованием полимерных форм кремниевых кислот. По его мнению, силикаты представляют собой не соли, а “неопределенные соединения”, такие, например, как сплавы, но не простых тел, а близких по своим свойствам оксидов. Д.И. Менделеев объяснял особенности силикатных “неопределенных соединений” не существованием различных видов поликремневых кислот, а полимеризацией большинства соединений кремния. Учение Д.И. Менделеева сыграло большую роль в дальнейшем понимании природы силикатов. В конце XIX века химические методы исследования (аналитические и синтетические) исчерпали свои возможности в познании силикатов. Исследователи начали искать новые пути решения проблем силикатов. Наиболее значительные результаты были достигнуты в физико-химическом и геохимическом направлениях.

Метод физико-химического анализа, созданный Н.С. Курнаковым в 20-е годы XX столетия, представляет собой синтез идей химической термодинамики и топологии. В рамках этого метода наиболее информативным оказалось рассмотрение диаграммы температура—состав (диаграмма состояния).

Диаграммы состояния позволяют судить о температурно-концентрационных интервалах существования кристаллических и жидких силикатов, их превращениях (плавление, кристаллизация, разложение или соединение). Результаты многочисленных исследований диаграмм состояния (бинарных, тройных и более компонентных систем) обобщаются в соответствующих справочниках, в компьютерных банках данных, монографиях и учебных пособиях. Особенный интерес диаграммы состояния представляют для понимания процессов минералообразования, в материаловедении и технологии силикатов. В настоящее время использование термодинамического метода позволяет корректировать экспериментально полученные диаграммы состояния, предсказывать диаграммы состояния неизученных систем, судить о возможности протекания тех или иных процессов превращений силикатов, рассчитывать энергоёмкость этих процессов, сравнивать устойчивость образовавшихся соединений по отношению к распаду на близлежащие по диаграмме состояния. Эти выводы делаются как на базе экспериментальных данных, так и с помощью разнообразных модельных представлений. В этой области автором и его сотрудниками получены интересные результаты, касающиеся устойчивости силикатных соединений, определения областей кристаллизации из расплавов тех или иных силикатов [4].

Видным представителем геохимического направления является В.И. Вернадский, который интересовался именно строением силикатов [5]. Он создал свою теорию строения алюмосиликатов (1891–1937 годы). В.И. Вернадский так же, как и Д.И. Менделеев, говорил о близости химических функций  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и отвергал мысль о том, что алюмосиликаты есть соли кремниевых кислот. По его мнению, алюмосиликаты являются производными сложных алюмосиликатных радикалов, “каолиновых ядер”. Гипотеза о “каолиновом ядре” как о замкнутой группировке атомов Si, Al и O оказалась актуальной при расшифровке структуры полевых шпатов.

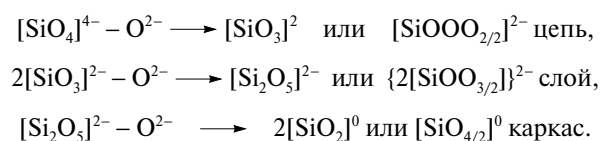
## СОЗДАНИЕ СТРУКТУРНОЙ КРИСТАЛЛОХИМИИ

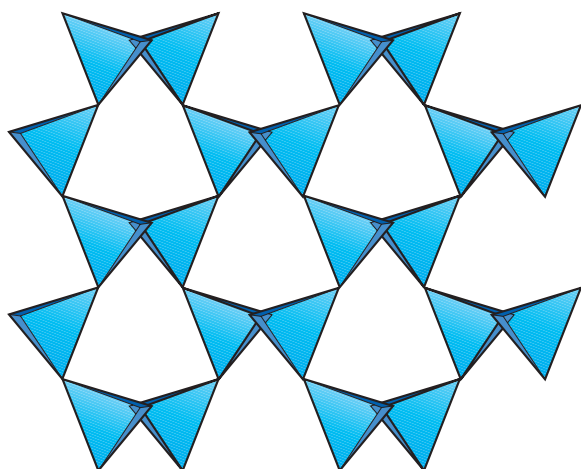
Несмотря на обширный экспериментальный материал, накопленный к началу XX века, и ряд провидческих гипотез относительно сходства структурной роли  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полимеризации атомов кремния через атом кислорода, отнесение силикатов к разряду сложных оксидов переменного состава, структура силикатов оставалась загадкой. Только открытие в 1912 году явления дифракции рентгеновских лучей на кристаллах немецкими физиками М. Лауэ, П. Книппингом и В. Фридрихом и создание У.Г. и У.Л. Брэггами на его основе принципиально нового метода исследования вещества — рентгеноструктурного анализа оказали решающее влияние на изучение структуры силикатов в XX ве-

ке. С 1925 по 1931 год проводились интенсивные рентгеноструктурные исследования силикатов. Итогом этих исследований явилась предложенная У.Л. Брэггом структурная классификация силикатов, рассмотренных им как единый класс химических соединений [5]. Было установлено, что основным “строительным кирпичом” силикатов и алюмосиликатов является атом кремния (алюминия), окруженный четырьмя атомами кислорода, — кремне(алюмо)кислородный тетраэдр  $\text{SiO}_4(\text{AlO}_4)$ . Многообразие же силикатов объясняется разными способами соединения этих тетраэдров, которые обычно сочленяются вершинами с образованием связей  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  и  $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ . Атомы кислорода, соединяющие тетраэдры, называются мостиковыми, а не соединяющие — немостиковыми. У.Л. Брэгг приводит следующие типы кремнекислородных радикалов:

- ортосиликаты — соединения, в которых имеются изолированные кремнекислородные тетраэдры  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ , то есть все атомы кислорода немостиковые;
- соединения с “островными” радикалами, такими, как  $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$  (пиросиликатный ион, в котором два тетраэдра сочленяются вершинами), кольцевые радикалы, состоящие из трех  $[\text{Si}_3\text{O}_6]^{6-}$ , четырех  $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]^{8-}$  и шести  $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$  тетраэдров, в каждом из которых два атома кислорода используются для образования кольца, а два других — немостиковые;
- соединения, построенные из изолированных  $[\text{SiO}_3]^{2-}$  и сдвоенных  $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$  бесконечных цепочек;
- слоистые структуры, образованные радикалами  $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$ ;
- каркасные структуры.

Видоизменения структуры силикатов можно продемонстрировать на примере кристаллов, образующихся в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ . Ортосиликат натрия  $2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$  построен из изолированных тетраэдров  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ , соединенных между собой ионами натрия. При последовательном уменьшении содержания оксида натрия (следовательно, и ионов кислорода в расчете на атом кремния) начинается полимеризация этих тетраэдров с образованием сначала кремнекислородных изолированных цепочек, характерных для метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ , затем цепочки объединяясь образуют слои, состоящие их шестичленных колец, как в дисиликате натрия (рис. 1), и, наконец, объединение слоев приводит к образованию каркаса, как в кремнеземе. Эти превращения можно представить в виде следующей схемы:

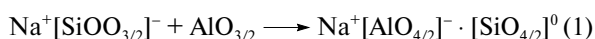




**Рис. 1.** Структура кремнекислородных слоев в высокотемпературной модификации  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$

В предпоследнем столбце схемы атомы кислорода без индексов немостиковые, а с индексами мостиковые, числитель индекса показывает, сколько атомов кислорода в кремнекислородном тетраэдре идет на образование цепи (два атома), слоя (три атома) и каркаса (четыре атома). Иначе говоря, с увеличением степени полимеризации кремнекислородных тетраэдров количество немостиковых атомов кислорода уменьшается. Отрицательно заряженные кремнекислородные цепочки и слои соединяются между собой положительно заряженными ионами натрия.

Способность атомов алюминия выполнять структурные функции атомов кремния в алюмосиликатах можно продемонстрировать записав реакцию взаимодействия слоистого дисиликата натрия и глинозема:



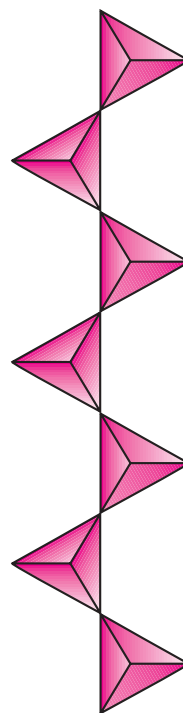
В результате реакции (1) образуется минерал нефелин, структура которого представляет собой объемно-увязанный каркас, построенный из тетраэдров алюминия и кремния, в пустотах которого расположены ионы натрия, компенсирующие отрицательный заряд алюминиево-кислородного тетраэдра.

Структурная классификация У.Л. Брэгга базировалась на представлении об определяющей роли в структуре силикатов кремнекислородного мотива и подчиненной роли катионов, которые подстраивались под этот основной мотив. Такой взгляд не противоречил и большой энергии связи Si—O. Последующие исследования минералов дополнили классификацию Брэгга. Большой вклад в развитие систематики силикатных радикалов внесли академик Н.В. Белов и его школа (1955–1965 годы) и немецкий кристаллохимик Ф. Либау [6]. Согласно взглядам Н.В. Белова, главенствующая роль в фор-

мировании структуры силикатов принадлежит катионкислородным полиэдрам, образующим цепи, ленты, колонки [5]. Кремнекислородная составляющая структуры, несмотря на большую энергию связей, обладает большой гибкостью связей Si—O—Si (Si—O—Al) и за счет этого приспосабливается к основному катионному остову и как бы обволакивает его. Структура кремнекислородных радикалов очень многообразна и зависит от природы катионов.

## ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Теперь рассмотрим минеральный состав земной коры с позиций строения кремнекислородных радикалов. За счет внутренней энергии Земли магма — расплав, состоящий из основных пород (ортосиликаты магния и железа и их твердые растворы), поднимаясь по трещинам на поверхность, обогащается кремнеземом, глиноземом, водой. При этом с понижением температуры из него кристаллизуются сначала тугоплавкие минералы, а оставшийся расплав снова взаимодействует с встречающимися на его пути породами, образуя кристаллы взаимодействующих с гидротермальными водами. Из образовавшихся растворов выкристаллизовываются минералы, содержащие воду. Безусловно, это очень упрощенная картина сложных геохимических процессов, происходящих в действительности. К основным минералам относятся оливины — ортосиликат



**Рис. 2.** Пироксеновая цепочка

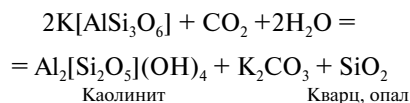
магния  $Mg_2SiO_4$ , в котором часть катионов магния может быть замещена на  $Fe^{2+}$ . Поэтому для оливинов принимается общая формула  $[Mg, Fe]_2[SiO_4]$ , а их структура образована изолированными тетраэдрами  $[SiO_4]^{4-}$ , соединенными между собой катионами. При увеличении содержания  $SiO_2$  образуются пироксены — метасиликаты натрия, магния, кальция, железа, содержащие бесконечные метасиликатные цепочки  $(SiO_3)_\infty$  (рис. 2). В зависимости от природы катиона найдены различные виды изолированных и более сложных цепочек. Минерал жадит  $NaAl[Si_2O_6]$ , о котором шла речь, также относится к группе пироксенов, то есть к минералам с цепочной структурой. Ионы натрия и алюминия образуют катионную составляющую структуры.

Следующей ступенью полимеризации являются соединения, содержащие ленточные кремнекислородные радикалы. Некоторые виды этих радикалов, зависящие от природы катионов, представлены на рис. 3. Во времена У.Л. Брэгга такие соединения еще не были известны. К ленточным силикатам относятся амфиболы — гидросиликаты  $Ca, Mg, Fe$ , содержащие группы  $[Si_4O_{11}]^{6-}$ . К амфиболом относится и один из древнейших минералов, используемых человеком, — нефрит —  $Ca_2(Mg, Fe)[Si_4O_{11}](OH)_2$  (рис. 3, б), и асбесты.

Дальнейшая конденсация приводит к образованию слоистых силикатов. К их числу относятся слюды и глины, содержащие в своей структуре группировки  $[Z_4O_{10}]$ , где  $Z=Si$  и  $Al$  в четверной координации относительно кислорода. В слюдах слои состоят из шестичленных колец, построенных из алюмо- и кремнекислородных тетраэдров. Слоистых силикатов существует множество: слои могут быть построены из пяти- и шестичленных колец (см. рис. 1); состоять из чередующихся в определен-

ном отношении восьми- и пятичленных колец; могут существовать слои, в которых кремнекислородный тетраэдр обязательно имеет три мостиковых атома кислорода, и др.

И наконец, последней ступенью полимеризации являются силикаты с каркасным строением, которых тоже существует великое множество. Примером каркасных силикатов могут служить кремнезем и полевые шпаты. Полевые шпаты делятся на плагиоклазы (непрерывный ряд твердых растворов в системе альбит—анортит ( $NaAlSi_3O_8-CaAl_2Si_2O_8$ )) и калиевый полевой шпат  $K[AlSi_3O_8]$ . Их структура представляет собой бесконечный объемно-увязанный каркас из тетраэдров  $SiO_4$  и  $AlO_4$ , в пустотах которого расположены ионы  $Na, Ca, K$  (рис. 4). Сам же кремнезем — это вязь из кремнекислородных тетраэдров. К разряду каркасных силикатов, но не полевых шпатов относится и упоминаемый ранее минерал лейцит  $K[AlSi_2O_6]$ , казалось бы, метасиликат калия и алюминия. В действительности это каркасный алюмосиликат, в котором атомы алюминия выполняют структурную функцию атомов кремния. Каркас состоит из тетраэдров  $AlO_4$  и  $SiO_4$  (все атомы кислорода мостиковые), в пустотах которого расположены ионы калия. Полевые шпаты, в свою очередь, в результате процессов выветривания превращаются в глины и различные виды кремнезема:



Каолинит — минерал со слоистой структурой. Слои состоят из шестичленных кремнекислородных колец. В конечном итоге процессы выветривания полевых шпатов, слюд, талька, нефелина приводят к образованию растворимых солей щелочных

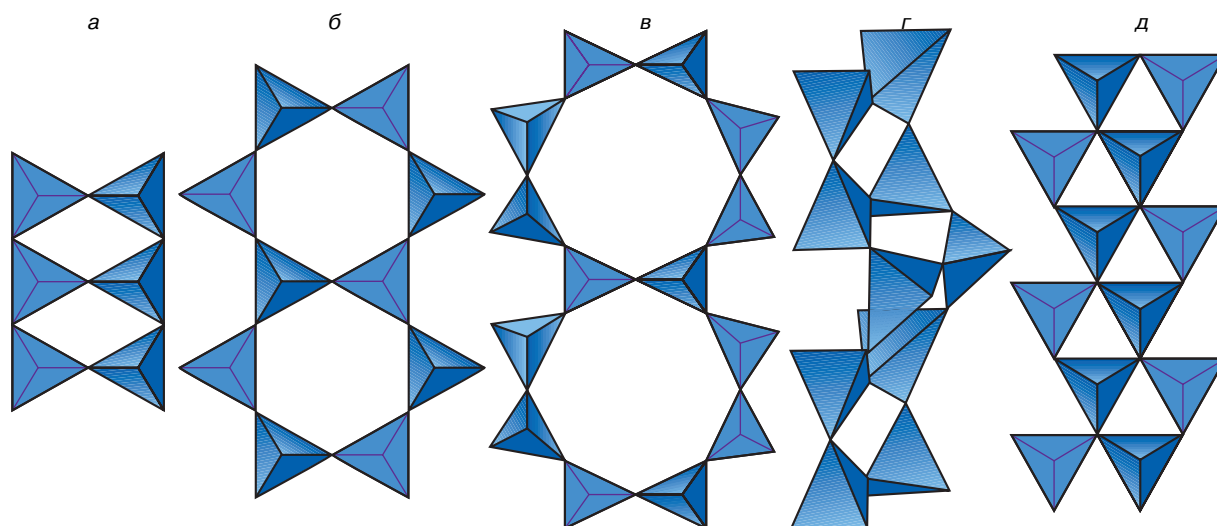


Рис. 3. Ленточные кремнекислородные радикалы

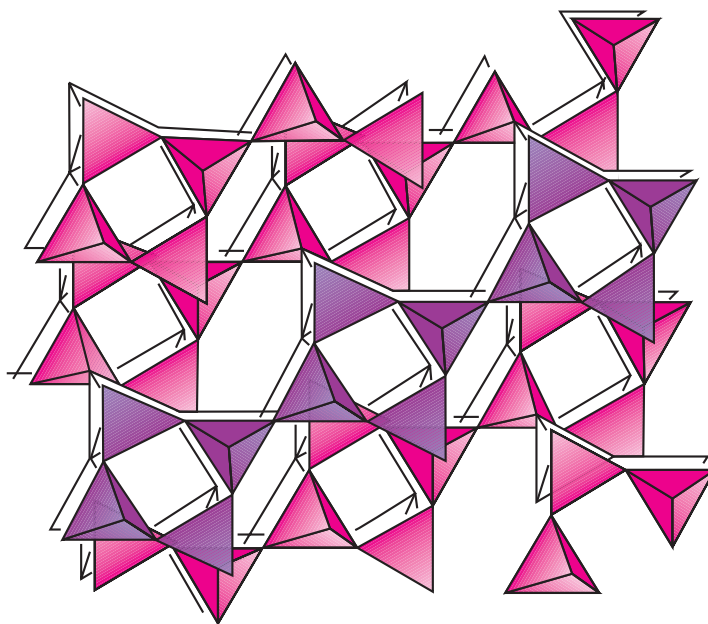


Рис. 4. Структура алюмокремнекислородного каркаса калиевого полевого шпата  $K[AlSi_3O_8]$

и щелочноземельных металлов, плохо растворимых гидратов оксидов железа и алюминия и гидросиликатов, которые переносятся водными растворами и дают начало образованию новых минералов, с которых как бы начинается новый виток образования силикатных минералов.

В заключение еще раз подчеркнем значение результатов структурных кристаллохимических исследований силикатов, которые перевели на более высокий качественный уровень основополагающие принципы химии, минералогии, геохимии, кристаллохимии и технологии силикатов, позволив увязать в единый комплекс химический состав силикатов, их структуру, свойства и химизм превращений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Торопов Н.А., Булак Л.Н.* Кристаллография и минералогия. Л.: Изд-во лит. по строительству, 1972. 503 с.
2. *Шульц М.М.* Стекло: Структура, свойства, применение // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 3. С. 49–55.

3. *Барзаковский В.П., Добротин Р.Б.* Труды Д.И. Менделеева в области химии силикатов и стеклообразного состояния. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 217 с.

4. *Шульц М.М., Мазурин О.В.* Современные представления о строении стекол и их свойствах. Л.: Наука, 1979. 197 с.

5. *Смолеговский А.М.* Развитие представлений о структуре силикатов. М.: Наука, 1979. 231 с.

6. *Лйбау Ф.* Структурная химия силикатов. М.: Мир, 1988. 410 с.

\* \* \*

Михаил Михайлович Шульц, доктор химических наук, академик РАН, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, директор Института химии силикатов РАН, дважды лауреат Государственной премии СССР. Область научных интересов: химическая термодинамика, электрохимия стекла, высокотемпературные оксиды. Автор пяти монографий и свыше 400 публикаций.