

В. И. ЛЕБЕДЕВ

ОБ ОДНОМ ВЕРОЯТНОМ ИСТОЧНИКЕ СИЛ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

(Представлено академиком Д. С. Белянкиным 28 II 1953)

Характерной особенностью состава и строения земной коры является абсолютное господство атомов кислорода. Атомарный кларк твердой части земной коры — литосферы — по А. П. Виноградову равен 58,0%. Объемное же значение кислорода равно примерно 90—92%⁽³⁾. Отсюда следует, что литосфера в своей основе представляет как бы упаковку из атомов кислорода, в которой все остальные элементы играют роли «цемента».

Законом строения кристаллических соединений является закон плотнейшей упаковки⁽¹⁾. Однако далеко не всегда соединения, построенные с кристаллохимической точки зрения по закону плотнейшей упаковки, действительно являются соединениями максимально плотными, и, наоборот⁽⁴⁾.

Для пояснения сказанного возьмем две пары соединений кианит — силлиманит (Al_2SiO_5) и арагонит — кальцит ($CaCO_3$). Кианит и силлиманит построены по закону плотнейшей упаковки. Разница лишь в том, что кианит имеет кубическую укладку атомов кислорода, а силлиманит — гексагональную. Однако кианит имеет удельный вес 3,6 (3,56—3,67), а силлиманит 3,23 (3,23—3,24). Наоборот, арагонит построен с нарушением плотнейшей упаковки, так как его ионы Ca^{++} расположены в полостях, окруженных девятью атомами кислорода, а кальцит полностью отвечает плотнейшей упаковке. Удельный же вес арагонита составляет 2,94, а кальцита 2,71.

Причины различной плотности кианита и силлиманита объясняются следующим⁽⁴⁾. В кианите и силлиманите (поскольку они построены по закону плотнейшей упаковки) на каждые 5 атомов О имеется 5 октаэдрических и 10 тетраэдрических пустот. Как в кианите, так и силлиманите Si находится в тетраэдрических полостях, что же касается Al, то в кианите оба атома Al находятся в октаэдрических полостях, а в силлиманите один в октаэдрической, а другой — в тетраэдрической полостях. Представляя атомы кислорода в виде шаров с радиусами 1,32 Å и принимая за истинные пустоты сферические объемы, могущие быть вписанными между этими шарами, уложенными в плотнейшую укладку, легко подсчитать, что у кианита Si и 2 Al занимают 32,7% «истинных» пустот, а у силлиманита — только 20%. Разница в заполнении пустот составляет 12,7%, а разница в удельных весах 10,3%.

Отсюда следует, что причиной уменьшения удельного веса или увеличения удельного объема силлиманита по сравнению с кианитом является переход одного из атомов Al из октаэдрической полости в тетраэдрическую. Более или менее одинаковый размер атомов Al, находящихся в октаэдрической пустоте, большей по объему, при межатомном расстоянии Al—O около 1,9 Å обеспечивает более плотное общее расположе-

ние атомов в решетке, т. е. более сильное стягивание атомов кислорода, так как последние, будучи отрицательно заряженными, стремятся расположиться друг от друга как можно дальше. Наоборот, переходя в тетраэдрическое окружение — в полость меньшего размера и имея межатомное расстояние Al—O около 1,7Å атомы Al не будут оказывать столь же сильного стягивающего действия на атомы кислорода и последние расположатся менее плотно

Аналогичную картину мы вправе ожидать — и она действительно имеет место — во всех тех случаях, когда при одном и том же химическом составе имеется два или несколько соединений, где Al имеет разные координационные числа. Например, α -сподумен и β -сподумен ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) или гроссуляр и анортит + геленит + волластонит ($2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} \rightarrow \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 + 3\text{CaSiO}_3$). В α -сподумене и гроссуляре Al имеет к. ч. = 6, а в β -сподумене, анортите и гелените к. ч. = 4.

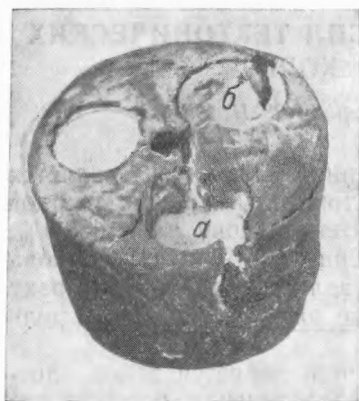


Рис. 1. Никелевый блок, разорванный порошком α -сподумена при превращении в β -сподумен (гнезда *a* и *б*). В гнезде *a* опыт проведен 3 раза, в гнезде *б* — 2 раза. Нат. вел.

При переходе α -сподумена в β -сподумен при температуре около 1050° наблюдается быстрое и значительное увеличение объема. Это увеличение настолько значительно и обладает такой энергией, что, как правило, в момент превращения приводит к разрыву тигельков. Например, при снятии кривых нагревания был разорван никелевый блок в местах минимальной толщины стенок в 2—3 мм* (рис. 1). При переходе гроссуляра в анортит + геленит + волластонит при 1060°⁽¹²⁾ также наблюдается значительное увеличение объема, так как молекулярный объем гроссуляра, равен 260, а сумма молекулярных объемов образующихся соединений равна 309,9.

Рассматривая состояние Al в минералах различного происхождения, легко убедиться, что в минералах магматического и глубинно-метаморфического генезиса (в полевых шпатах, фельдшпатах и ряде других) Al имеет преимущественно к. ч. = 4, а в минералах гипергенных (в каолине и др.) и образованных в неглубоких и средних зонах метаморфизма (в слюдах, хлоритах, эпидотах, кианите, гранатах) Al имеет к. ч. = 6. Из сказанного выше следует ожидать, что минералы глубинного и высокотемпературного происхождения за исключением ультраосновных пород должны быть менее плотными, а минералы гипергенного и неглубоких и средних зон метаморфизма должны быть более плотными, что и имеет место в действительности^(4, 2). Чтобы убедиться в этом достаточно сравнить молекулярные объемы соединений и суммы молекулярных объемов окислов, из которых эти соединения образованы, или сравнить удельные объемы атомов кислорода⁽¹¹⁾ в различных соединениях (см. табл. 1).

Из табл. 1 ясно, что минералы магматического и глубинно-метаморфического происхождения: полевые шпаты и др. (что было показано еще в 1898 г. ^(9, 10)) образуются с увеличением молекулярного объема; они же имеют значительный атомный объем кислорода — в среднем около 22 Å³. Минералы же, возникающие при разрушении полевых шлатов, в зоне выветривания или при их изменении в процессах серицитизации или эпидотизации, а также минералы неглубоких и средних зон метамор-

* При этом порошок сподумена остается порошком, лишь значительно уплотняясь.

физма образуются с уменьшением молекулярного объема по сравнению с суммой молекулярных объемов окислов; они же имеют значительно меньший молекулярный объем кислорода, в среднем около $19,3 \text{ \AA}^3$.

Аналогичный факт можно отметить при сравнении горных пород. Граниты и гранитогнейсы, т. е. породы высокотемпературные и обычно глубокие, имеют удельные веса значительно меньше, чем породы неглубоких и средних зон метаморфизма: удельный вес гранита 2,52—2,81 (или в среднем 2,667 — из 155 анализов), серицитовых сланцев 2,8—3,0. Породы осадочные, близкие, по составу к гранитам имеют, правда, еще меньший удельный вес (2,0—2,6), но это объясняется большой микропористостью и значительным количеством непрочно связанной воды.

Итак, на дневной поверхности образуются минералы, где Al находится преимущественно в октаэдрическом окружении и где атомный объем кислорода является наибольшим. Эти минералы, накапливаясь в виде мощных толщ осадочных пород, например, глинистых сланцев, в целом довольно рыхлых, под влиянием нагрузки вышележащих пород и повышающейся температуры преобразовываются в другие, но примерно с тем же количеством Al в октаэдрическом окружении и тем же атомным объемом кислорода ($19,3 \text{ \AA}^3$). За счет этого преобразования возникают филлиты, затем серицитовые и вообще слюдястые сланцы, хлоритовые сланцы и др. Эти породы являются наиболее плотными. Следовательно, происходит значительное сокращение объема пород, что может вести к оседанию и разрывам, а учитывая наличие обломочно-осадочных пород, уплотняющихся обычно раньше, возможны прогибы, соскальзывания, и, может быть, явления складчатости.

При дальнейшем погружении под нарастающей сверху мощностью осадочных пород серицитовые, хлоритовые сланцы и др. попадают в зону еще более высоких температур и давлений. Однако, вследствие того, что влияние температуры, источником которой является совокупность радиоактивных процессов и экзотермических реакций — особенно нижележащих толщ (2, 7, 8) сказывается сильнее, чем влияние давления, которое оказывает значительное действие только при первых сотнях атмосфер (6), наступает новый этап преобразования минералов. Начинаются интенсивные процессы фельдшпатизации — образования различных гнейсов, а местами и возникновение расплавленных масс. В этих процессах Al переходит из окружения шести атомов кислорода в окружение четырех атомов кислорода, так что объем, приходящийся на атом кислорода, значительно возрастает. Так как в полевых шпатах объем атома кислорода в среднем равен 22 \AA^3 , а в гранито-гнейсовых и гранитоподобных породах полевые шпаты составляют 65—75% объема породы, то объем породы возрастает примерно на 10%. Начинаясь вследствие этого расширение пород должно идти во все стороны, и силы, развивающиеся при этом, громадны. Например, принимая кислород за однозарядный (5), легко подсчитать, что стремление к расталкиванию, если оно не нейтрализуется стягивающим действием катионов, равно примерно 20—25 кг·м на 1 г-атом кислорода. (Это же подтверждается и вышеописанными опытами со сподуменом в процессе перехода α - в β -сподумен.)

Таблица 1

Наименование минерала	Молекулярные объемы			Объем на 1 атом O в \AA^3
	соединения	суммы окислов	разность в %	
Нефелин	111	92	+20,2	22,7
Лейцит	175	157	+11,5	—
Ортоклаз	218	202	+7,9	22,3
Анортит	100	88	+13,6	21,0
Альбит	201	188	+6,9	21,6
Геленит	—	—	—	22,6
Скаполит	—	—	—	23,5
Каолин	99	107	—7,5	—
Мусковит	265	290	—8,6	19,3
Хлорит	—	—	—	19,3
Цоизит	138	149	—7,4	—
Кианит	—	—	—	15,0
Силлиманит	—	—	—	16,2
Гроссуляр	—	—	—	17,3

Так как расширение пласта в различных участках будет встречать препятствия, например, пород в прошлом обломочного происхождения, лежащих на продолжении этого пласта, то расширение может пойти в каком-либо одном направлении наименьшего сопротивления. При расширении вверх образуется куполовидное поднятие, при расширении в какую-либо сторону — смятие в складки, поднятие и т. д.

Резюмируя все сказанное, мы приходим к выводу, что источником энергии некоторых тектонических явлений, например, складчатости, в толщах пород, претерпевающих глубинный метаморфизм, и пород к ним прилегающих, разрывов вышележащих толщ и др. является энергия преобразования кристаллического вещества, возникшего в зоне гипергенеза, под действием, главным образом, температуры и, частью, давления, ведущих вначале к явлениям уплотнения, а затем к явлениям расширения вследствие увеличения атомного объема кислорода при переходе Al из одного состояния связи, ионного, в другое, ковалентное (5). Первоисточником этих сил является космическая энергия, главным образом лучистая энергия Солнца, накапливаемая кристаллическим веществом Земли в процессах гипергенеза (7, 8, 2).

Поступило
4 II 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. В. Белов, Структура ионных кристаллов и металлических фаз, 1947.
² Н. В. Белов, Тр. Ин-та кристаллогр. АН СССР, в. 7 (1952). ³ В. М. Гольдшмидт, Основные идеи геохимии, в. 1, 1933. ⁴ В. И. Лебедев, ДАН, 63, № 4 (1948). ⁵ В. И. Лебедев, Вестн. Ленингр. ун-та, № 3 (1948). ⁶ В. И. Лебедев, ДАН, 86, № 1 (1952). ⁷ В. И. Лебедев, ДАН, 51, № 1 (1946). ⁸ В. И. Лебедев, Вестн. Ленингр. ун-та, № 11 (1948). ⁹ Ф. Ю. Левинсон-Лессинг, Избр. тр., 1, 1949. ¹⁰ Ф. Ю. Левинсон-Лессинг, Петрография, изд. 5-е, 1940.
¹¹ Э. Шибольд, Основные идеи геохимии, в. 3 1937. ¹² S. Hatten, Jr. Yoder, J. Geol., 53, No. 3 (1950).