

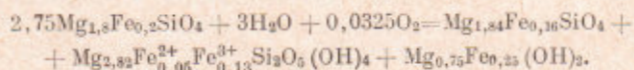
И. А. МАЛАХОВ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СЕРПЕНТИНИЗАЦИИ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОД

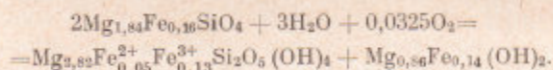
(Представлено академиком Д. С. Коржинским 23 VI 1970)

Серпентинизация является наиболее распространенным процессом метаморфизма ультраосновных пород — дунитов и перидотитов. Полученный за последние годы обширный материал по составу ультрабазитов и слагающих их минералов (¹⁻³), характеру серпентинизации (³) и по термодинамическим свойствам различных минералов (⁴) позволяет количественно оценить соотношение температуры и давлений на различных этапах серпентинизации. Обширные данные по составу ультраосновных пород и продуктов их метаморфизма (^{1, 3, 5}) позволяют представить серпентинизацию дунитов и гарцбургитов в виде нескольких этапов.

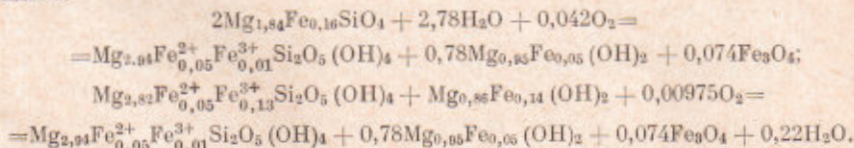
Согласно данным Д. С. Штейнберга и И. С. Чашукина (⁵), в начальный этап серпентинизации помимо серпентина образуется наиболее железистый брусит. При этом может происходить частичная перекристаллизация оливина с некоторым понижением его железистости:



Главный этап серпентинизации приводит к образованию за счет оливина дунитов такого же по составу, что и в начальный этап, серпентина, представляющего собой, согласно рентгеноструктурным определениям, смесь хризотила и lizardita. Однако состав сосуществующего с ним брусита становится менее железистым:

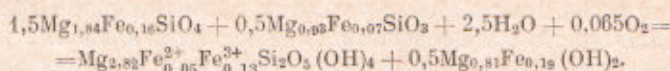


Конечный этап серпентинизации дунитов связан с образованием существенно магнезиальных по составу антигортитов, более магнезиального брусита и вторичного пылевидного магнетита. В зависимости от исходного состава пород — дунитов или хризотил-лизардитовых аподунитовых серпентинитов — метаморфизм этого этапа характеризуется следующими реакциями:

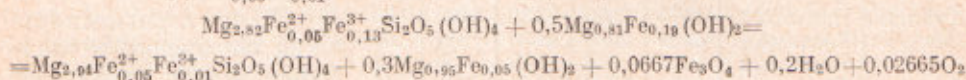
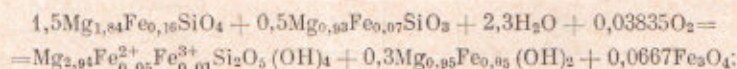


В соответствии с результатами петрографического изучения, состав главных породообразующих минералов ультраосновных пород массивов эвгеосинклинальных областей Урала (¹), Сибири (⁷) и Кавказа (⁸) весьма стабилен — железистость оливина, дунитов и гарцбургитов в среднем составляет 8% фаялитовой составляющей, а железистость энстатита 7% ферросилитовой составляющей. Если считать, что первичный состав гарцбургитов чаще всего на 75% представлен оливином и на 25% — энстатитом

том ⁽¹⁾, то реакцию главного этапа серпентинизации гарцбургитов можно представить следующим образом:



В конечный этап серпентинизации в перидотитах, так же как и в дунитах, вместо железисто-магнезиальной безмагнетитовой ассоциации серпентина и брусита образуется магнетитсодержащая, причем железистость серпентина и брусита существенно уменьшается. Если брать за основу исходный состав пород — гарцбургиты или хризотил-лизардитовые апогарцбургитовые серпентиниты, можно охарактеризовать образование брусит-антигоритовых серпентинитов с магнетитом следующими реакциями:



Как видно из этих реакций, при образовании магнетит-антигоритовых серпентинитов по хризотил-лизардитовым в конечный этап метаморфизма происходит частичная дегидратация пород, что, по Д. С. Коржинскому ⁽⁹⁾, свидетельствует об их образовании в условиях более высоких температур.

На основе величин термодинамических потенциалов для чисто магнезиальных и железистых разновидностей пород ⁽⁴⁾ нами были рассчитаны значения ΔZ для реальных составов минералов ультрабазитов в интервале температур от 500 до 300° (табл. 1).

В соответствии с расчетными величинами термодинамических потенциалов минералов нами рассчитаны ΔZ реакции серпентинизации в том же диапазоне температур, а по ним, согласно данным С. В. Писториуса и В. Е. Шарпа ⁽¹⁰⁾, — равновесные давления водяного пара (табл. 2).

Экспериментальные исследования серпентинизации и работы по синтезу серпентинитов ⁽¹¹⁾ позволяют рассматривать этот процесс как происходящий в основном в диапазоне температур от 300 до 440° и равновесных давлений водяного пара от 150 до 3000 атм. Лишь Н. Л. Боуэн и О. Ф. Таттл ⁽¹²⁾ указывают на несколько более высокую температуру серпентинизации: около 490° при давлении водяного пара до 2,8 кбар.

Таблица 1

Изменение величин термодинамических потенциалов минералов в зависимости от температуры

Минералы	Состав	Δz , ккал/моль				
		500°	450°	400°	350°	300°
Оливин f_8	$\text{Mg}_{1,84}\text{Fe}_{0,16}\text{SiO}_4$	434,392	439,044	443,700	448,367	452,886
Оливин f_{10}	$\text{Mg}_{1,8}\text{Fe}_{0,2}\text{SiO}_4$	431,298	435,935	440,573	445,223	449,728
Энстатит f_7	$\text{Mg}_{0,83}\text{Fe}_{0,07}\text{SiO}_3$	310,982	314,408	317,843	321,284	324,731
Серпентин f_2	$\text{Mg}_{2,94}\text{Fe}_{0,06}\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	837,348	850,166	862,759	875,364	887,968
Серпентин f_6	$\text{Mg}_{2,82}\text{Fe}_{0,18}\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	827,562	840,356	852,936	865,522	878,111
Брусит f_5	$\text{Mg}_{0,95}\text{Fe}_{0,05}(\text{OH})_2$	161,336	164,938	168,540	172,169	175,799
Брусит f_{14}	$\text{Mg}_{0,86}\text{Fe}_{0,14}(\text{OH})_2$	153,954	157,535	161,117	164,723	168,328
Брусит f_{20}	$\text{Mg}_{0,8}\text{Fe}_{0,2}(\text{OH})_2$	149,033	152,600	156,168	159,759	163,349
Брусит f_{25}	$\text{Mg}_{0,75}\text{Fe}_{0,25}(\text{OH})_2$	144,931	148,487	152,044	155,622	159,199
Магнетит	Fe_3O_4	206,777	209,915	213,838	217,578	221,375
Вода (газ)	H_2O	48,988	49,622	50,249	50,870	51,480

Поскольку серпентинизация из-за ограниченной растворимости летучих в ультраосновном расплаве (¹³) в основном связана с привнесом воды из вмещающих пород и происходит в условиях альбит-эпидот-амфиболитовой ступени регионального метаморфизма, при котором давление на твердые и жидкие фазы практически одинаково, по величине P_{H_2O} для оптимальных температур серпентинизации в 350—400° можно подсчитать глубину метаморфизма массивов ультрабазитов. Исходя из величины средней плотности ультраосновных пород, можно полагать, что серпентинизация дунитов в начальный и главный этапы должна происходить на глубине 2,8—6,2 км, а гардбургитов — на глубине от 1 до 4 км.

Таблица 2

Изменение равновесного давления водяного пара в зависимости от температуры при серпентинизации

Исходные породы	Этап серпентинизации	Давление, атм				
		500°	450°	400°	350°	300°
Дуниты	Начальный	4470	3280	2150	1100	76
	Главный	4205	2980	1870	845	65
	Конечный	1095	330	115	38	11
Гардбургиты	Главный	3480	2300	1185	250	46
	Конечный	435	163	63	22	8

Если серпентинизация начального и главного этапов характеризуется региональным распространением, то конечный ее этап имеет локальное проявление и связан с разломами и тектонически ослабленными зонами. Как следует из приведенных выше данных, для него характерно P_{H_2O} , значительно меньшее давлений нагрузки. В областях интенсивных тектонических нарушений и подвижек серпентинизированные ультрабазиты могут выживаться и перемещаться согласно механизму, описанному А. В. Пейве (¹⁴) и А. Л. Книппером. При этом они изменяют свой состав в магнетит-антгоритовый. Весьма вероятно, что их образование, по сравнению с хризотил-лизардитовыми серпентинитами, происходило в условиях более высоких температур, на что указывал на основе анализа геологических данных еще В. Н. Лодочников (¹⁵).

Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого
Уральского филиала Академии наук СССР
Свердловск

Поступило
18 VI 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. А. Малахов, Тр. Инст. геол. Уральск. фил. АН СССР, в. 79 (1966). ² С. S. Ross, M. D. Foster, A. T. Myers, Am. Min., 39, № 9—10 (1954). ³ Д. С. Штейнберг, И. А. Малахов и др., Тр. II Уральск. петр. сов., 2, Свердловск, 1969. ⁴ R. A. Robie, D. R. Waldbaum, Geol. Surv. Bull., № 1259, Washington, 1968. ⁵ Д. С. Штейнберг, И. А. Малахов, ДАН, 156, № 2 (1964). ⁶ Д. С. Штейнберг, И. С. Чашухин, ДАН, 186, № 2 (1969). ⁷ Г. В. Пинус, Ю. Н. Колесник, Альпийские гипербазиты юга Сибири, М., 1966. ⁸ Н. Д. Соболев, Ультрабазиты Большого Кавказа, М., 1952. ⁹ Д. С. Коржинский, Минералогич. сборн. № 14 Львовск. ун-в., Львов, 1960. ¹⁰ C. W. Pistorius, W. E. Sharp, Am. J. Sci., 258, № 10 (1960). ¹¹ Н. И. Нестерчук, Т. А. Макарова, А. Д. Федосеев, Зап. Всесоюз. мин. общ., № 1 (1966). ¹² Н. Л. Боуэн, О. Ф. Таттл, Сборн. Вопросы физико-химии в минералогии и петрографии, М., 1950. ¹³ А. А. Кадик, Н. И. Хитаров, Е. Б. Лебедев, Геохимия, № 5 (1968). ¹⁴ А. В. Пейве, Геотектоника, № 4 (1969). ¹⁵ В. Н. Лодочников, Тр. Центр. н.-и. геол.-разв. инст., в. 38 (1936).