

А. А. БЕУС

МОДЕЛЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ПРОТОКОРЫ ЗЕМНОГО ШАРА

(Представлено академиком В. И. Смирновым 29 X 1974)

Проблема химического состава континентальной протокры земного шара имеет большое значение для решения ряда теоретических и практических вопросов, связанных с геологией и металлогенией докембрия.

По-видимому, почти единодушно мнение, что протокры земного шара была образована на ранних стадиях эволюции Земли в процессе выплавления из мантии. Работами многих исследователей ((¹⁻³) и др.) убедительно показано, что наиболее типичными первичными продуктами выплавления из мантии являются базальты, а также андезиты, характерные для островных дуг. В последнем случае отношение изотопов стронция (¹, ⁴) не оставляет сомнения в мантийном происхождении андезитовой магмы, связанной с вулканами островных дуг. Исходя из имеющихся геологических и экспериментальных данных, наиболее вероятными следует считать три варианта литологического состава континентальной протокры: 1) базальтовый, 2) андезитовый и 3) базальт-андезитовый. С геологической точки зрения второй и третий варианты наиболее привлекательны, поскольку выплавление из мантии менее плотных, чем базальты, андезитов позволяет объяснить формирование единых андезитовых протоконтинентов, «плавающих» на еще горячем базальтовом ложе.

Последующая эволюция протоконтинента, в основном происходившая в докембрии, предполагает — в соответствии со схемой, разработанной и опубликованной ранее (⁵, ⁶), — вынос из мантии перегретыми водными растворами калия и кремнезема и взаимодействие этих растворов с породами протокры. Результатом подобного взаимодействия явилось развитие процессов гранитизации протокры и выплавления кислых магм гранитного состава, что привело в конечном итоге к формированию современной континентальной литосферы земного шара.

Средний химический состав континентальной литосферы, который может служить исходным для моделирования состава протокры, был обоснован автором ранее (⁵, ⁶). В качестве моделей составов базальтового и андезитового слоев протокры могут служить средние составы континентальных амфиболитов и андезитов островных дуг, рассчитанные в работе (⁵). Средние химические составы пород, использованные для расчета модели континентальной протокры Земли, приведены в табл. 1. Физические параметры для расчета (объем и масса литосферы) заимствованы из работ М. Хорна и Дж. Адамса (⁷, ⁸), а также А. Б. Рогова и А. А. Ярошевского (⁹). При этом в общий объем литосферы включен вычисленный М. Хорном объем пород, уничтоженных эрозией (их масса $2,04 \cdot 10^{24}$ г). Представление об участии мантийных водных растворов в преобразовании континентальной протокры предполагает прогрессирующее увеличение ее объема и массы во времени, что соответствует выводам многих исследователей. С целью оценки приращения объема протокры по сравнению с современной литосферой среди породообразующих элементов должна быть выбрана пара элементов, которые не приносились в кору мантийными растворами и не выносились в сколько-нибудь значительных масштабах остаточными глубинными раство-

рами на поверхность земной коры в процессах ее геохимического преобразования. К этой группе элементов наиболее уверенно может быть отнесен Al, среднее содержание которого в «гранитном» (8,0%) и «базальтовом» (8,1%) слоях литосферы, а также в главных типах вулканических горных пород подвержено минимальным колебаниям⁽⁵⁾. Очень мала также вероятность выноса водными растворами из мантии Mg, прочно связанного в структурах оливина и пироксена. Исследователи, занимавшиеся изучением геохимического баланса эродированные породы литосферы — осадочные породы^(7, 8), не встречали затруднений в балансировании этих элементов,

Таблица 1*

	Континентальная литосфера (без осад. оболочки, $d=2,80$)	Андезит островных дуг ($d=2,84$; 60 ан. по 8 районам)	Амфибелит ($d=3,00$; 370 ан. по 25 регионам)	Диорит (678 ан. по 41 региону)
O	46,6 (1,3048)	46,3 (1,3149)	44,8 (1,3440)	46,00
Si	27,7 (0,7756)	27,2 (0,7725)	22,8 (0,6840)	26,20
Al	8,1 (0,2268)	8,9 (0,2528)	8,3 (0,2490)	8,50
Fe	5,70 (0,1596)	5,75 (0,1633)	8,78 (0,2634)	6,13
Mg	2,40 (0,0672)	2,30 (0,0653)	4,30 (0,1290)	2,61
Ca	4,30 (0,1204)	4,76 (0,1352)	7,10 (0,2130)	5,03
Na	2,80 (0,0774)	2,61 (0,0741)	1,85 (0,0555)	2,50
K	1,9 (0,0532)	1,34 (0,0381)	0,69 (0,0207)	1,41
Ti	0,6 (0,0168)	0,54 (0,0153)	0,82 (0,0246)	0,60
P	0,1 (0,0028)	0,10 (0,0028)	0,07 (0,0021)	0,18
Mn	0,09 (0,0023)	0,12 (0,0034)	0,12 (0,0036)	0,12
Li	0,10 (0,0028)	0,11 (0,0031)	0,17 (0,0051)	

* Содержание элементов — в процентах (в скобках — в граммах на 1 см³).

что свидетельствует об отсутствии сколько-нибудь значительных поступлений Al и Mg в осадочную оболочку непосредственно с глубинными растворами. На этих предпосылках основано построение рассматриваемой модели.

Не приводя за краткостью статьи результатов произведенных расчетов, следует отметить, что гипотезы о базальтовом или нацело андезитовом (типа островных дуг) составе континентальной протокры Земли должны быть отвергнуты, как не удовлетворяющие условиям геохимического баланса вещества.

Исходя из предпосылки об отсутствии привноса или выноса Al, объем протокры в этих случаях можно легко вычислить на основе известного количества Al в современной литосфере. Предположение о базальтовой протокоре не подтверждается, поскольку огромные количества Fe ($0,81 \cdot 10^{24}$ г) и Mg ($0,41 \cdot 10^{24}$ г), освобождающиеся в процессе ее преобразования в современную литосферу, не находят себе места в пределах последней. В случае андезитовой протокры, наоборот, имеет место нехватка Fe ($0,105 \cdot 10^{24}$ г) и Mg ($0,070 \cdot 10^{24}$ г). Таким образом, приходится или допустить маловероятный привнос больших количеств названных элементов мантийными растворами в андезитовую протокору, или отбросить и это предположение.

При оценке третьего, геологически наиболее реального, предположения о базальт-андезитовом составе протокры воспользуемся уравнениями материального баланса, вытекающими из принятых предпосылок о неизменности количеств Al и Mg в литосфере Земли на стадиях, следующих за выплавлением базальтов и андезитов из мантии:

$$\begin{aligned} aAl_a + bAl_b &= mAl_n; \\ aMg_a + bMg_b &= mMg_n, \end{aligned}$$

где a и b — объемы андезитового и базальтового слоев континентальной протокры (см³), Al_a и Al_b — количества алюминия в андезитовом и базальтовом слоях протокры (г/см³), приведенные в табл. 1, Mg_a и Mg_b — то же для магния; $mAl_{\text{л}}$ и $mMg_{\text{л}}$ — масса Al и Mg в современной литосфере (г) (табл. 2). Решая систему уравнений для a и b , находим, что объем андезитового слоя протокры может быть оценен как $6,191 \cdot 10^{24}$ см³, а базальтового слоя — как $1,073 \cdot 10^{24}$ см³.

Результаты оценки состава континентальной базальт-андезитовой протокры Земли приведены в табл. 2. На ее основе породообразующие эле-

Таблица 2

	Протокры *		Литосфера, без осад. оболочки	Принос в протокры	Избыток (вы- нос на по- верхность)	Протокры в целом
	а	б				
Объем, 10^{24} см ³	6,191	1,073	8,079**			7,264
Плотность, г/см ³	2,84	3,00	2,80			2,86
Масса, 10^{24} г	17,582	3,219	22,621**	1,820		20,801
Содержание поро- дообразующих элементов, 10^{21} г						
O	8,141	1,442	10,542	0,959		46,1%
Si	4,783	0,734	6,266	0,749	—	26,5
Al	1,565	0,267	1,832	—	—	8,8
Fe	1,012	0,283	1,289	—	0,006	6,2
Mg	0,404	0,139	0,543	—	—	2,6
Ca	0,837	0,229	0,973	—	0,093	5,1
Na	0,453	0,060	0,520	0,001	—	2,5
K	0,236	0,022	0,430	0,172	—	1,2
Ti	0,095	0,026	0,135	(0,015)	—	0,6
Σ	17,532	3,202	22,531	1,896	—0,099	99,6%
Прочие	0,050	0,017	0,090	0,023	—	0,4
В целом	17,582	3,219	22,621	+1,820	—0,099	100,0%

* а — андезитовый слой, б — базальтовый.

** С учетом $2,04 \cdot 10^{24}$ г эродированных кристаллических пород.

менты, слагающие литосферу, по своему происхождению и поведению могут быть разделены на три группы; 1) химические элементы, которые после выплавки вещества континентальной литосферы из мантии не привносятся мантийными растворами и не выносятся остаточными растворами на поверхность земной коры (Al, Mg); 2) химические элементы, привносимые в литосферу мантийными растворами (Si, K, O, в очень незначительной степени Na)*; 3) химические элементы протокры, освобожденные в процессах гранитизации и в заметном количестве выносившиеся остаточными растворами на поверхность литосферы непосредственно в ее осадочную оболочку (Ca, в меньшей степени Fe).

Соотношение количеств K, Si и O, предположительно вынесенных мантийными растворами (см. табл. 2), позволяет судить, что в растворах присутствовали гидросиликаты калия. Как известно по результатам экспериментов Г. Мори и К. Феннера, растворимость ряда гидросиликатов калия резко увеличивается при температурах выше 420°С (¹⁰). Последнее определяет возможность совместного выноса K и SiO₂ перегретыми водными растворами в процессах дегидратации верхней мантии. Обращает на себя внимание резко отличное поведение Na, все количество которого в

* Полученный при пересчете незначительный недостаток Ti в протокры можно объяснить его пониженным содержанием в среднем амфиболите, принятом в качестве основы для пересчета по сравнению с глубинными океаническими базальтами.

протоколе практически связано с выплавлением из мантии андезитовых и, в меньшей степени, базальтовых магм. К числу элементов континентальной протокры, освобождающихся при гранитизации, для которых вероятен вынос остаточными растворами на поверхность, в первую очередь относится Са. Известно, что этот элемент в осадочной оболочке литосферы присутствует в значительном избытке. В этой связи сбалансировать количество Са, заключенное в осадочных породах, с его количеством, вынесенным из эродированной части гранитного слоя литосферы, оказалось затруднительным (⁷, ⁹). Вынос Са глубинными растворами на поверхность в процессе эволюционного преобразования континентальной протокры является вероятным объяснением его избытка в осадочной оболочке, подтверждающимся расчетом геохимического баланса (см. табл. 2)*. Из расчета вытекает также уже отмечавшаяся ранее (⁶) возможность частичного выноса Fe ювенильными растворами на докембрийскую поверхность литосферы, сопровождавшегося формированием вулканогенно-осадочных образований, позднее интенсивно метаморфизованных и превращенных в типичные для докембрия железистые кварциты.

Как видно из табл. 2, гипотеза о базальт-андезитовом составе континентальной протокры Земли вполне удовлетворительно согласуется с геологическими и геохимическими предпосылками. При этом выделяется два главных этапа формирования современной литосферы: I — выплавление андезитовых и базальтовых магм из мантии; II — преобразование протопород континентальной коры под воздействием растворов, выносивших SiO₂ и К из верхней мантии. Обращает на себя внимание удивительное сходство среднего состава протокры со средним составом диоритов. Таким образом, альтернативой двуслойной базальт-андезитовой континентальной протокры Земли является протокора, сложенная более основным андезитом, отвечающим по составу диоритам литосферы.

Всесоюзный заочный
политехнический институт
Москва

Поступило
23 X 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Д. Х. Грин, А. Е. Рингвуд, В кн.: Петрология верхней мантии, М., «Мир», 1968, стр. 119. ² Д. Х. Грин, В кн.: Петрология изверженных и метаморфических пород дна океана, М., «Мир», 1973, стр. 242. ³ Г. С. Йодер, К. Э. Тилли, Происхождение базальтовых магм, М., «Мир», 1965. ⁴ Г. Фор, Дж. Пауэлл, Изотопы стронция в геологии, М., «Мир», 1974. ⁵ А. А. Беус, Геохимия литосферы, М., «Недра», 1972. ⁶ А. А. Беус, Изв. высш. учебн. завед., Геология и разведка, № 7, 85 (1973). ⁷ М. К. Хорн, A Computer Method for the Geochemical Balance of the Elements, Huston, Texas 1964. ⁸ М. К. Хорн, J. A. S. Adams, Geochim. et cosmochim. acta, v. 30, 279 (1966). ⁹ А. Б. Ронов, А. А. Ярошевский, Геохимия, № 11, 1285 (1967). ¹⁰ В. Эйгаль, Физическая химия силикатов, М., ИЛ, 1962, стр. 618.

* Избыток Са, полученный Хорном (⁷) при пересчетах, колеблется от 0,0195 до 0,0226·10²⁴ г. В работе (⁸) его, по данным Хорна, удалось устранить лишь арифметическими манипуляциями.