

УДК 550.4

## О ПРИЧИНЕ ИЗБЫТКА КАЛЬЦИЯ И НЕДОСТАТКА НАТРИЯ В ОСАДОЧНОЙ ОБОЛОЧКЕ ЗЕМЛИ

Э. М. ГАЛИМОВ

*Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР,  
Москва*

Показано, что известные отклонения в содержании основных породообразующих элементов в осадочной оболочке Земли от среднего содержания их в земной коре могут быть объяснены фракционированием в системе платформа — геосинклиналь. Существенно, что при этом и случаи дефицита (Si, Al, Fe<sup>2+</sup>, Na) и случаи избытка (Fe<sup>3+</sup>, Mg, Ca) элементов находят объяснение на единой основе без привлечения каких-либо гипотез о специфических геологических или физико-химических процессах.

Осадочные породы образуются в результате выветривания и перемещения материала выведенных на поверхность изверженных метаморфических и других осадочных пород. Следовательно, распространенность химических элементов в осадочной оболочке Земли должна соответствовать их средней распространенности в континентальной земной коре. Такое соответствие действительно имеется. Однако оно не абсолютно. Содержание ряда элементов в осадочной оболочке заметно отличается от содержания их в земной коре в среднем. Это прежде всего касается элементов летучих (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и др.), которыми осадочная оболочка обогащена. А. П. Виноградов [1, 2] показал, что избыточные количества этих элементов поступают в поверхностные оболочки в результате процесса дегазации мантии. Менее понятным кажется расхождение в содержании других элементов. В особенности обращает на себя внимание заметный избыток в осадочной оболочке кальция и дефицит натрия.

А. Б. Ронов и А. А. Ярошевский [3] в своей известной работе, посвященной расчету состава и обсуждению химического строения земной коры, так формулируют эту проблему: «Другой важной особенностью состава осадочных пород (помимо избытка летучих, Э. Г.) является высокое содержание в них кальция, что представляет самую загадочную черту геохимии поверхностных оболочек. Весьма характерно также сдвинутое в пользу калия отношение натрия к калию, не компенсируемое избытком натрия в океане. Это приводит к некоторому дефициту натрия в стратиффере и гидросфере, вместе взятых, относительно «гранитной» оболочки. Эта особенность является также проблемой, требующей специального исследования».

В этой работе сделана попытка указать механизм, на основе которого упомянутые эксцессы в химическом составе осадочной оболочки, причем не только в отношении кальция и натрия, но и других элементов, как будто бы получают удовлетворительное истолкование. Мы хотели бы обратить внимание на любопытную особенность, проявляющуюся при сопоставлении среднего состава земной коры с составом осадочной оболочки, с одной стороны, и состава осадочного чехла платформы с составом осадочного выполнения геосинклиналей — с другой (табл. 1).

В качестве исходных для расчетов использованы данные А. Б. Ронова и А. А. Ярошевского [3]. В табл. 1 эти данные для соответствующих оболочек представлены в пересчете на состав без летучих. Кроме того, в состав осадочной оболочки включен солевой состав океана. Используются данные А. П. Виноградова [4] (г/кг): Na — 10,76, K — 0,39, Mg — 1,30, Ca — 0,41. Величины для платформ объединяют средневзвешенные значения химического состава пород континентальных платформенных областей (эпейрократонов) и океанических платформ (талассократонов). Они получены путем суммирования составов осадочной толщи

Таблица 1

Сопоставление химического состава осадочной оболочки с составом континентальной земной коры и состава осадочных отложений платформенных (включая пелагические океанические осадки) и геосинклинальных областей

Окислы	Земная кора (континентальная), $x_a$	Осадочная оболочка (включая солевой состав океана), $2,42 \cdot 10^{24}$ г, $x_b$	Геосинклиналы $0,94 \cdot 10^{24}$ г, $x_c$	Платформы (эпейрократоны и талассократоны), $0,54 \cdot 10^{24}$ г, $x_d$	Избыток, %	
					в осадочной оболочке относительно земной коры ( $\varphi-1$ ) 100%	в платформах относительно геосинклиналей ( $\psi-1$ ) 100%
SiO <sub>2</sub>	61,98	53,87	56,12 (56,00)*	55,60 (55,64)	-13	-1 (-1)
TiO <sub>2</sub>	0,75	0,75	0,73 (0,63)	0,77 (0,76)	-1	+5 (+20)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,62	14,34	15,36 (15,02)	13,26 (13,15)	-8	-14 (-12)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,55	4,17	3,34 (3,03)	4,26 (4,30)	+63	+28 (+42)
FeO	3,88	2,45	3,60 (3,26)	1,65 (1,50)	-37	-54 (-55)
MnO	0,14	0,23	0,15 (0,12)	0,19 (0,20)	+64	+27 (+66)
MgO	3,15	3,62	3,36 (3,04)	3,85 (3,78)	+15	+15 (+24)
CaO	5,67	15,74	12,81 (14,77)	16,69 (16,84)	+178	+30 (+14)
Na <sub>2</sub> O	3,06	2,23	2,05 (1,59)	1,05 (1,03)	-27	-49 (-35)
K <sub>2</sub> O	2,94	2,36	2,25 (2,32)	2,40 (2,52)	-20	+7 (+9)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,25	0,20	0,20 (0,16)	0,15 (0,14)	-20	-25 (-12)

\* В скобках приведены значения, рассчитанные после исключения эффузивов.

платформ и пелагических океанических осадков I сейсмического слоя, по А. Б. Ронову и А. А. Ярошевскому, с учетом их масс — соответственно  $0,35 \cdot 10^{24}$  и  $0,19 \cdot 10^{24}$  г. Величина избытка содержания данного элемента в осадочной оболочке относительно континентальной земной коры в целом представлена как  $(\varphi-1) 100\%$ , где  $\varphi = x_b/x_a$ , а величина избытка в платформах относительно геосинклиналей как  $(\psi-1) 100\%$ , где  $\psi = x_d/x_c$ . Смысл обозначений  $x_a$ ,  $x_b$ ,  $x_c$  и  $x_d$  ясен из табл. 1.

Из табл. 1 также видно, что в большинстве случаев, когда наблюдается избыток какого-либо элемента в осадочной оболочке по отношению к земной коре в среднем ( $\varphi > 1$ ), повышенной концентрацией этого элемента характеризуются также осадочные породы платформ по сравнению с породами геосинклиналей ( $\psi > 1,0$ ). Явное исключение составляет только K<sub>2</sub>O. Величины разного знака имеют место также для TiO<sub>2</sub>, но они не превышают  $\pm 5\%$ , что, по-видимому, находится в пределах ошибок определения содержания элемента в поверхностных оболочках.

Подмеченная особенность наводит на мысль, что причина определенного отклонения состава осадочной оболочки от среднего состава континентальной коры состоит в своеобразном механизме фракционирования элементов в системе платформа — геосинклиналь.

Распространенность различных пород, а отсюда и породообразующих элементов различна для платформенных и геосинклинальных областей. Если принять далее, что удаление вещества из объема осадочной оболочки осуществляется через геосинклиналы путем метаморфизации погружающихся осадочных пород, то разница в концентрации данного элемента в породах, покидающих осадочную оболочку (преимущественно

но через геосинклинали) и остающихся (преимущественно на платформах), принципиально должна привести к накоплению элемента в осадочной оболочке ( $\varphi > 1,0$ ) при  $\psi > 1,0$  и, наоборот, к дефициту его ( $\varphi < 1,0$ ) при  $\psi < 1,0$ . Это согласуется с тенденцией, выявляющейся из рассмотрения табл. 1.

Рассмотрим следующую модель процесса. В осадочную оболочку с общей массой пород  $m_0$  поступает в результате процессов выветривания и седиментации количество вещества  $dm$ , содержащее данный элемент в концентрации  $x_a$ , характерной для земной коры в среднем. Рассматриваем стационарный процесс, т. е. принимаем объем осадочной оболочки постоянным во времени. Уравнение, учитывающее изменение объема осадочной оболочки, например его увеличение, более сложно, но ни к каким качественно иным результатам не приводит. Из соображений сохранения баланса масса вещества, удаляющегося из осадочной оболочки в зону метаморфизма, также равна  $dm$ . Причем концентрация данного элемента в этом объеме составит величину  $x'_a$ , характерную для пород геосинклинальных областей в соответствующий момент геологического времени (отметим последнее обстоятельство знаком «штрих» в отличие от концентрации, наблюдающейся в породах современных геосинклинальных областей). Текущую концентрацию элемента в осадочной оболочке в целом обозначим  $x$ . Уравнение баланса при этом имеет вид:

$$m_0 dx = x_a dm - x'_a dm. \quad (1)$$

Отношение  $x/x'_a$ , учитывающее различие распространенности элемента в отложениях платформ и геосинклиналей, обозначим  $\psi'$ . Отсюда

$$m_0 dx = x_a dm - \frac{x}{\psi'} dm \quad (2)$$

Если соотношение между распространенностями данного элемента в породах платформ и геосинклиналей сохранялось в предшествующие эпохи таким же, каким оно является в настоящее время, то

$$\psi' = \psi \quad (3)$$

Разделяем переменные и интегрируем

$$\psi' \int_{x_a}^{x_b} \frac{dx}{\psi' x_a - x} = \int_0^M \frac{dm}{m_0}, \quad (4)$$

Пределы интегрирования для переменной  $x$ , очевидно, следует взять от  $x_a$  до  $x_b$ . Пределы интегрирования для переменной  $m$  следует взять от нуля, отмечающего начало процессов метаморфизма до величины  $M$ , характеризующей всю массу метаморфизованных осадочных пород «гранитной» оболочки. В результате получим

$$\varphi = \psi' - (\psi' - 1) \exp(-M/\psi' m_0) \quad (5)$$

Все величины, входящие в выражение (5), за исключением  $\psi'$ , известны. В соответствии с [3] масса континентальной осадочной оболочки  $M_0 = 2,4 \cdot 10^{24}$  г. Масса метаморфизованных пород «гранитной» оболочки  $M = 5,7 \cdot 10^{24}$  г. Следует отметить, что поскольку  $M > m_0$ , экспонента в правой части выражения (5) близка к нулю. Поэтому с хорошим приближением выражение (5) можно рассматривать просто как условие

$$\varphi \simeq \psi \quad (6)$$

Таким образом, оказывается, что осадочная оболочка в целом должна быть приблизительно во столько же раз обогащена или обеднена данным элементом относительно среднего состава земной коры, во

сколько раз обогащены или обеднены им осадочные породы платформ относительно геосинклиналей.

Если верно условие (3), то из (6) следует, что  $\varphi \approx \psi$  и можно непосредственно сравнить величины, приведенные в табл. 1. Для большинства элементов сопоставление показывает не только отмеченную выше качественную, но и удовлетворительную количественную сходимость, т. е. условие (3) является достаточно общим. В частности, это касается натрия, дефициту которого в осадочной оболочке (составляющему —27%) отвечает дефицит его в платформенных отложениях по сравнению с геосинклинальными, имеющий величину —49%. Еще лучше сходимость величин избытка магния (+15 и +15%), дефицита алюминия (—8 и —14%) и фосфора (—20 и —25%).

Избыток кальция, судя по современному соотношению его содержания в платформах и геосинклиналях ( $\psi = 1,30$ ), должен быть меньше, чем наблюдаемый в действительности ( $\varphi = 2,78$ ).

Причина этого скорее всего состоит в том, что в прошлые геологические эпохи степень обедненности геосинклиналей карбонатными осадками была выше той величины, которая следует из расчета составов современного осадочного выполнения платформенных и геосинклинальных областей (т. е. в данном случае  $\psi \neq \varphi'$ ). Это предположение поддерживается относительно небольшой распространенностью карбонатов в метаморфизованных отложениях докембрия.

Для того чтобы получить действительную величину избытка Са в осадочной оболочке, необходимо, чтобы величина  $\varphi'$  имела значение, близкое к 2,8. Следовательно, содержание СаО в геосинклинальных отложениях, усредненное за все время существования осадочно-метаморфического цикла, должно характеризоваться величиной около 6 вес.%. Учитывая, что в современном осадочном выполнении геосинклиналей содержание СаО выше указанного и составляет 12,8%, следует ожидать, что в метаморфизованных отложениях «гранитной» оболочки величина содержания СаО окажется меньше 6%. Это находится в согласии с выводами А. Б. Ронова и А. А. Ярошевского, принимающими величину 3,88% в качестве величины, характеризующей содержание СаО в «гранитной» оболочке.

Уменьшение содержания СаО, тесно связанное с распространенностью карбонатов, означает соответствующее увеличение содержания обломочных пород, т. е. прежде всего SiO<sub>2</sub>. Поэтому, уменьшив концентрацию СаО с 12,8 до 6,0% в усредненном за геологическое время составе геосинклинальных отложений, логично на столько же увеличить долю SiO<sub>2</sub>, т. е. с 56,2 до 63%. Это в свою очередь приведет к улучшению соответствия между величинами  $\varphi_{\text{SiO}_2}$  и  $\psi_{\text{SiO}_2}$ , которые оказываются теперь практически одинаковыми (соответственно 0,87 и 0,88). Вместо величин дефицита 13 и —1% (см. табл. 1) получим соответственно —13 и —12%.

Как отмечалось, выпадает из общей закономерности только K<sub>2</sub>O. Вообще говоря, дефицит его в осадочной оболочке не очень острый. Так что несоответствие величины  $\varphi_K$  и  $\psi_K$ , возможно, просто результат недостаточно точных сведений о распространенности калия в соответствующих геосферах. Возможно, что в предшествующие эпохи, в противоположность современному положению, соотношение распространенности калия в платформенных и геосинклинальных областях было сдвинуто в пользу последних. Это предположение поддерживается повышенным содержанием калия в метаморфических породах «гранитной» оболочки —3,2% [3]. Существование особого механизма обеднения осадочной оболочки калием кажется маловероятным. Такой механизм действовал бы только для калия, в то время как избыток или дефицит других элементов в осадочной оболочке удовлетворительно объясняется фракционированием их в системе платформа — геосинклиналь.

Следует подчеркнуть, что с точки зрения развиваемого здесь формализма безразлично, в силу каких именно причин возникает различие в составе платформенных и геосинклинальных отложений. Эти причины, очевидно, состоят прежде всего в различии условий осаждения в пределах платформенных и геосинклинальных областей, что приводит к различной распространенности пород и, следовательно, порообразующих элементов. Есть и другая возможность, на которую обратил наше внимание А. А. Ярошевский. Геосинклинальные толщи в отличие от платформенных включают значительный объем эффузивов, что может предопределить различие средних составов пород платформ и геосинклиналей независимо от седиментационной дифференциации. В табл. 1 приведены данные (в скобках), рассчитанные после исключения эффузивов. Корреляция коэффициентов  $\varphi$  и  $\psi$  при этом сохранилась практически на прежнем уровне. Следовательно, седиментационная дифференциация является причиной различия составов платформенных и геосинклинальных отложений. Для ряда элементов сходимость коэффициентов  $\varphi$  и  $\psi$  ухудшилась (Ti, Mg, Ca), в то время как для других она улучшилась (Al, Fe<sup>2+</sup>, Mn, Na) или осталась неизменной (Si, K, P, Fe<sup>3+</sup>). Вероятно, это имеет свой смысл, однако обсуждение его требует обращения к определенным физическим моделям геологических процессов, что увело бы нас от того формального подхода, которого мы здесь придерживаемся.

Придя к выводу, что обогащенность или обедненность осадочной оболочки теми или иными элементами объясняется в конечном счете преимущественным выносом из состава пород, обедненных или обогащенных этими элементами, следует вернуться вновь к методу получения коэффициента  $\psi$ . Очевидно, было бы правильно сравнивать не просто отложения геосинклинальных и платформенных областей, но включить в число первых осадки океанических впадин и желобов в области островных дуг, а в число вторых по существу всю совокупность осадочных отложений, за исключением первых. Однако практически это не удастся сделать. Данные о составе пород в разрезе осадочного выполнения океанических впадин отсутствуют и надежнее всего, рассматривая их как современные геосинклинали, принять состав пород их соответствующим составу пород континентальных геосинклинальных областей. Состав пород шельфа А. Б. Ронов и А. А. Ярошевский принимают аналогичным составу континентальной осадочной оболочки в целом (т. е. средневзвешенному составу платформенных и геосинклинальных отложений). Породы такого состава нельзя включить в расчет, поскольку, следуя логике нашего подхода, необходимо выделить отдельно осадки платформенного и геосинклинального типа. С другой стороны, и исключение их из расчета ничему не вредит, поскольку оба типа отложений исключаются в соответствующей пропорции. Осадки II сейсмического слоя океанической коры в работе [3] принимаются аналогичными составу I сейсмического слоя, но в балансе платформенных осадков мы считаем нецелесообразным учитывать осадки II сейсмического слоя по причине полного отсутствия фактических сведений о них, а также потому, что на их составе в значительной степени могло отразиться влияние коры океанического типа, в то время как мы производим сравнение состава осадочной оболочки с составом коры континентального типа. Однако, если все же вычислить коэффициент  $\psi$  путем сравнения состава геосинклиналей с составом осадочной оболочки в полном ее объеме (за вычетом только геосинклиналей), корреляция между  $\varphi$  и  $\psi$  не утрачивается, хотя и выражена, как и следовало ожидать, слабее (табл. 2, здесь  $x_0$  означает содержание в весовых процентах соответствующего окисла в породах шельфа, общая масса пород шельфа  $0,48 \cdot 10^{24}$  г;  $x_1$  — то же для океанических осадков, включая II сейсмический слой, общая масса —  $0,63 \cdot 10^{24}$  г, исходные данные из работы [3]).

Понятно, что, хотя солевой состав океана должен быть учтен при расчете среднего состава осадочной оболочки и коэффициента  $\phi$ , он не может быть включен в какую-либо из категорий пород при расчете коэффициента  $\psi$ . Это приводит к уменьшению цифр, характеризующих присутствие в осадочных породах тех элементов, которыми обогащен океан. Практически это скажется только на данных по содержанию  $\text{Na}_2\text{O}$ . Поскольку коэффициент  $\psi$ , определяющий тенденцию к обогащению или обеднению осадочной оболочки данным элементом, зависит от отношения концентраций его в породах платформенного и геосинклинального типа, общее уменьшение содержания элемента в породах

Таблица 2

Некоторые сопоставления, альтернативные приведенным в табл. 1

Оксиды	Осадочная оболочка, за исключением геосинклиналей, $1,46 \cdot 10^{24}$ г, $x_d + x_c + x_f$	Геосинклинали $0,94 \cdot 10^{24}$ г, $x_c$	Осадочная оболочка, за исключением геосинклиналей и океанических осадков, $0,83 \cdot 10^{24}$ г, $x_d + x_e$	Геосинклинали и океанические осадки, $1,57 \cdot 10^{24}$ г, $x_e + x_f$	Избыток, %			Усредненный за геологическое время состав геосинклинальных отложений $\frac{x_c}{x_c}$
					$(\phi - 1) \cdot 100\%$	$\left( \frac{x_d + x_e + x_f}{x_c} \right) \cdot 100$	$\left( \frac{x_d + x_e}{x_c + x_f} \right) \cdot 100$	
$\text{SiO}_2$	54,17	56,12	57,4	53,65	-13	-4	+7	63,98
$\text{TiO}_2$	0,78	0,78	0,78	0,78	-1	+6	0	0,78
$\text{Al}_2\text{O}_3$	13,95	15,36	14,0	14,79	-8	-9	-5	14,44
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4,32	3,34	3,31	4,25	+63	+30	-23	2,60
$\text{FeO}$	1,98	3,60	2,59	2,63	-37	-44	-1	2,61
$\text{MnO}$	0,20	0,15	0,10	0,22	+64	+100	-46	0,12
$\text{MgO}$	3,65	3,36	3,71	3,47	+15	+6	+6	3,35
$\text{CaO}$	16,67	12,81	13,78	15,82	+178	+31	-13	6,01
$\text{Na}_2\text{O}$	1,40	2,05	1,41	1,75	-27	-30	-22	1,44
$\text{K}_2\text{O}$	2,41	2,25	2,37	2,31	-20	+9	+3	2,89
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,24	0,20	0,18	0,25	-20	+25	-28	0,19

обоих типов в результате накопления его в океане не имеет значения. Но это обстоятельство следует иметь в виду, чтобы понять, почему происходит обеднение осадочной оболочки натрием, несмотря на то, что через геосинклинали происходит удаление отложений, содержащих в своем составе относительно меньше натрия (2,0 вес.%), чем исходные породы континентальной земной коры в целом (3,1 вес.%).

Следует отметить также следующее. Строго говоря, коэффициент  $\psi$  в уравнениях типа (2) формируется не как отношение  $x_d$  к  $x_c$ , а как отношение текущего значения  $x_b$  к  $x_c$ . Но при этом имеется в виду, что  $x_c$  постоянно. Поскольку химический состав пород геосинклиналей наверняка не был постоянным в течение геологического времени, мы определяли величину  $\psi$  как  $x_d/x_c$ , считая, по-видимому, справедливым, что в этом случае, будучи вычисленной для отложений, взятых приблизительно в одном возрастном срезе (не осадочная оболочка за все геологическое время против геосинклиналей, а современные платформы против современных геосинклиналей), она лучше передаст действительную величину коэффициента разделения элементов, описываемого уравнением (2). Но теперь, сделав соответствующие оговорки, мы можем совершить обратный переход и вычислить состав «усредненной по времени геосинклинали», т. е. тот состав  $x'_c$ , с которым мы должны были бы иметь дело в уравнении (1), если бы он был нам заранее известен. Соответствующие данные приведены в последнем столбце табл. 2. Сравнение их с данными, характеризующими состав осадочного выполнения современных геосинклиналей, позволяет указать некоторые тенденции в эволюции химического состава. Это уже упомянутое обеднение кремнием и обогащение кальцием молодых геосинклиналей по сравнению с древни-

ми (породы которых поглощены «гранитным» слоем), а также увеличение содержания железа как в окисной, так и в закисной форме, некоторое уменьшение содержания натрия и калия.

Наконец, в связи с предположением о растекании дна океанов от срединно-океанических хребтов и погружении океанической коры под океанические дуги следовало попробовать произвести сопоставления, аналогичные сопоставлениям, сделанным выше, выделив при этом океанические осадки из состава пассивных областей накопления (платформ) и включив их в состав массы осадков, удаляющихся из осадочной оболочки, т. е. объединив их с отложениями геосинклиналей. Эта процедура привела, однако (как видно из результатов соответствующих расчетов, представленных в табл. 2), к существенному ухудшению корреляций между коэффициентами  $\phi$  и  $\psi$ , из чего следует, что изложенный здесь механизм фракционирования элементов не согласуется с идеей поглощения в какой-либо форме океанических осадков современного пелагического типа.

Таким образом, предложенная здесь модель на формальной основе, без привлечения каких-либо гипотез о геологических или физико-химических процессах, позволяет объяснить известные эксцессы в содержании основных породообразующих элементов в осадочной оболочке Земли. Существенно при этом, что как случаи дефицита (Si, Fe<sup>2+</sup>, Al, Na), так и случаи избытка (Fe<sup>3+</sup>, Mg, Ca) находят объяснение на единой основе.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить признательность А. Б. Ронову, А. А. Мигдисову и А. А. Ярошевскому за обсуждение статьи и полезные замечания.

Поступила в редакцию  
11 мая 1973 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов А. П. Химическая эволюция Земли. Первое чтение им. В. И. Вернадского. Изд-во АН СССР, М., 1959.
2. Виноградов А. П. Газовый режим Земли.— В сб.: Химия земной коры, т. II. «Наука», М., 1964.
3. Ронов А. Б., Ярошевский А. А. Химическое строение земной коры.— Гохимия, № 11, 1967.
4. Виноградов А. П. Введение в геохимию океана. «Наука», М., 1967.

---

#### ON THE CAUSE OF CALCIUM EXCESS AND SODIUM DEFICIENCY IN THE SEDIMENTARY SHELL OF THE EARTH

E. M. GALIMOV

*V. I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry,  
USSR Academy of Sciences, Moscow*

It is shown that certain deviations in the content of the main rock-forming elements in the sedimentary shell of the Earth from their average content in the Earth's crust can be explained by fractionation in the system platform — geosyncline. It is of importance that both the cases of deficiency (Si, Al, Fe<sup>2+</sup>, Na) and the cases of excess (Fe<sup>3+</sup>, Mg, Ca) of elements find their explanation on a single basis without having recourse to some hypotheses about specific geological or physico-chemical processes.