

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК РАНГОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Сопоставление между собой значений содержания разных химических элементов в природных объектах является, как известно, предметом традиционного интереса в геохимии. При таком сопоставлении принято выстраивать указанные величины в ряд в порядке их уменьшения. Причем до настоящего времени их анализ этим исчерпывается. Однако здесь напрашивается использование так называемых «ранговых распределений». При введении подобных функций все члены данного сообщества («ценоза»), в рассматриваемом случае — химические элементы, также расставляются в порядке убывания их «численности» A , т. е. «по рангу», и каждому элементу присписывается ранговый номер r , начиная с первого. Далее исследуются соответствующие зависимости в координатах $A \sim r$. Подобный подход давно и плодотворно практикуется, например, при изучении биоценозов [1–3]. В работе [4] была представлена ранговая кривая, характеризующая содержание химических элементов в земной коре, с целью выявления связи между их распространенностью и количеством минералов, включающих соответствующий элемент. Найдена хорошая корреляция, имеющая вид степенного закона, между указанными величинами [5]. Ранговая кривая, отражающая распространённость химических элементов в земной коре, рассматривалась также в [6] на предмет установления вида уравнения, которому она соответствует. Однако использованные в [6] данные не позволили построить приемлемую по гладкости кривую и сделать какие-либо выводы. Представляет интерес рассмотреть имеющиеся новые данные и выяснить, что может дать использование ранговых зависимостей при анализе содержания химических элементов в природе.

Химический состав основных метеоритов. Ограничимся углистыми хондритами $C1$ [7, 8], принадлежащими к наиболее распространенным метеоритам [9]. Считается [7, 10], что они наиболее близки по составу к первичному веществу Солнечной системы, т. е. отвечают в наибольшей степени среднему составу Земли [11]. Содержание химических элементов в них изучается давно. Последней по времени здесь, по-видимому, была сводка [12]. Ее данные приведены на рис. 1. При построении этого графика в случае, когда два элемента имели одинаковое значение A , более низкая величина ранга присваивалась тому из них, который имеет меньший атомный номер.

Как видно на рис. 1, вся ранговая кривая состоит из ряда отдельных участков. Одни из них являются практически гладкими, другие, возможно, состоят из ветвей второго порядка. Например, не исключено, что ветвь *III* имеет изломы при $r = 18$ (Mn) и $r = 22$ (Co). Вероятно, что есть также излом в пределах ветви *VI* при $r = 50$ (Ce). В целом гладкий или почти гладкий характер большинства этих ветвей позволяет сделать важный вывод о том, что содержания химических элементов в указанных метеоритах установлены к настоящему времени с хорошей точностью. Наименее удовлетворительные данные найдены для элементов в пределах ветви *VII*, самой негладкой (см. рис. 1). Это естественно: чем меньше концентрации химических элементов, тем с более низкой точностью они определены.

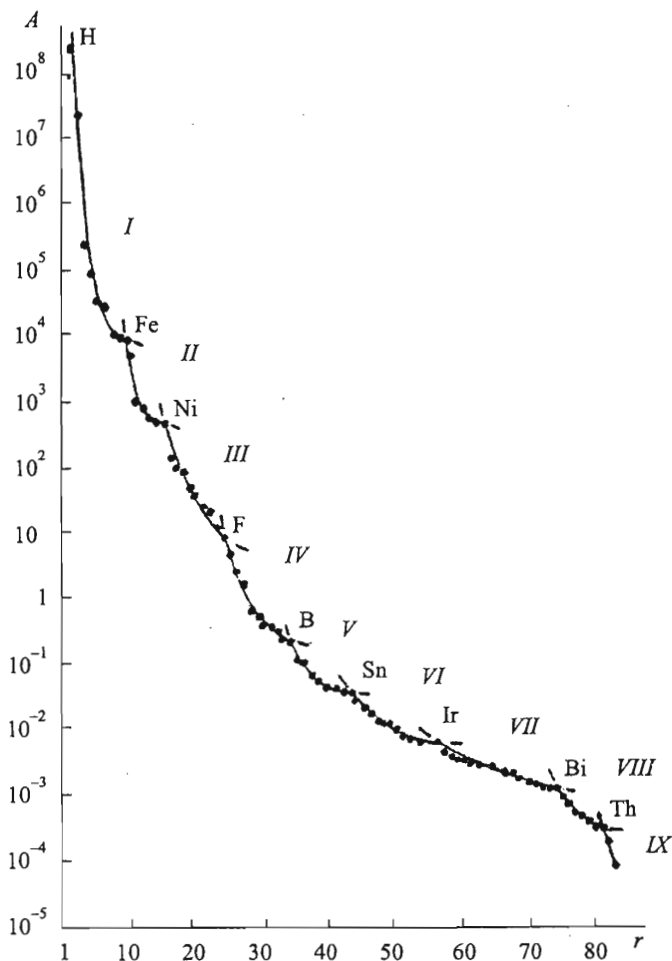


Рис. 1. Ранговая кривая для содержания химических элементов в углистых хондритах C1.

Величины выражены в числе атомов, приходящихся на 10^6 Si. Нумерация ветвей на рис. 1 и 3 соответствует приведенной в табл. 1.

Существование изломов является типичным для ранговых кривых биологической природы [13]. Установлено [13], что в биологическом мире величины A , характеризующие ранговую кривую в точках ее изломов, обычно составляют геометрическую прогрессию со знаменателем e^e (т. е. в направлении уменьшения r). В изучаемом случае правильная прогрессия с каким-либо определенным знаменателем не соблюдается. Можно лишь констатировать, что отношения значений A , приходящихся на соседние изломы (см. рис. 1), отличаются тенденцией к возрастанию по мере уменьшения ранга элементов. Иначе говоря, соседние изломы имеют тенденцию к удалению друг от друга по величине A при понижении ранга.

На общепринятой ломаной линии, отражающей распространенность химических элементов в зависимости от их атомного номера или массового числа [14], наблюдаются глубокий минимум, создаваемый фтором, и очень крупные максимумы для железа

и никеля. Для этих элементов фиксируются изломы и на рис. 1. Для остальных элементов, на которые приходится изломы на рис. 1, какие-либо особенности, кроме как с помощью этого графика, не выявлены. Наоборот, некоторые химические элементы, создающие экстремальные точки на упомянутой традиционной ломаной линии (например, Ве), на ранговой кривой рис. 1 никак себя не проявляют.

Линия на рис. 1 является, очевидно, отражением тех ядерных реакций, которые происходили при образовании химических элементов. Изломы на ней приходится на элементы, игравшие особую роль в ядерных процессах. Так, хорошо известно [9] ключевое положение железа при ядерном синтезе ввиду того, что он имеет максимум энергии ядерной связи, в результате чего механизм образования химических элементов, располагающихся за ним в периодической системе, становится принципиально иным. Ni имеет близкое к Fe значение этой энергии. В [15] отмечалась особая судьба бора как вещества, который появился на последней, третьей, стадии синтеза вещества Солнечной системы. Обращалось внимание на уникальный ядерный характер и ключевую роль олова в процессах образования ряда элементов [9]. Смена типа ядерных реакций связана также с висмутом [9]. Таким образом, положение указанных химических элементов в изломах кривой на рис. 1 является закономерным. Вместе с тем благодаря этому графику выявляется также особая роль Ir и Th, причины которой требуют выяснения.

Ранговые зависимости носят нередко экспоненциальный характер [1, 3]. Отсутствие линеаризации участков рассматриваемой кривой в координатах рис. 1 указывает на то, что в данном случае он не наблюдается. Однако наиболее типичным для ранговых кривых является распределение Ципфа—Мандельброта степенного типа [1–3, 16–18]:

$$A = \frac{a}{(r + b)^\alpha}, \quad (1)$$

где a , b , α — параметры, характеризующие конкретное распределение. Величина a определяет общий уровень значений A в совокупности членов данного сообщества. Параметр b можно выразить через a и α , используя уравнение (1) при условии, что при $r = 1$ величина A является максимальной (A_{\max}):

$$b = \left(\frac{a}{A_{\max}} \right)^{1/\alpha} - 1. \quad (2)$$

Таким образом, в качестве наиболее важного выступает параметр α , характеризующий наклон ранговой кривой. Этот наклон отражает, очевидно, различие в количестве отдельных элементов и в данном случае является следствием неодинаковости скоростей разных ядерных реакций: большие значения α (значительные отличия в количестве отдельных элементов) указывают на малые скорости их образования. Параметры b и a для индивидуальных отрезков кривой на рис. 1 представлены в табл. 1. При их вычислении ранги в пределах каждого отрезка перенумеровывались; первому из элементов на этом участке, находящемуся в изломе генеральной кривой, приписывался ранг $r = 1$. Для некоторых из ветвей кривой на рис. 1 соответствие значений A уравнению (1) при найденных параметрах b и α является прекрасным, для других обнаруживается разброс точек вокруг вычисленной линии. Различия в величинах α (см. табл. 1) должны отражать разнообразие реакций синтеза элементов [9, 15, 19, 20]. Такие значения α типичны для ранговых распределений [1–3] за исключением, возможно, ветви III метеоритной кривой.

Кривая Ципфа—Мандельброта не имеет статистико-вероятностного характера подобно, например, кривой нормального распределения. Ранговую линию не следует так-

Таблица 1. Параметры уравнения Ципфа—Мандельброта

<i>n</i>	<i>b</i>	α	<i>n</i>	<i>b</i>	α
Метеориты			Континентальная кора		
I	0	1,1	I	0	1,8
II	0	1,5	II	0	2,1
III	5,3	4,6	III	0	1,1
IV	0,5	2,0	IV	39	11
V	0	0,74	V	0	2,5
VI	13	2,9			
VII	7,8	1,4			
VIII	0	0,61			
IX	—	—			

Примечание. *n* — номер ветви на рис. 1 и 3.

же рассматривать как некий эволюционный ряд. Ее подчинение уравнению Ципфа—Мандельброта указывает на «целостность системы» [21], на взаимосвязанность и взаимообусловленность ее таксономических единиц. В данном случае такая связь заключается в том, что общую массу исходного вещества Солнечной системы (водорода) все химические элементы «поделили» между собой. Возрастание содержания одного из них вело к уменьшению количества другого (или других) элементов. Малые значения α свидетельствуют о «сильной конкуренции» между ними, большие — о «слабой». Сам факт соответствия величин *A* данному уравнению указывает на то, что рассматриваемое сообщество химических элементов («элементоценоз») является устоявшимся (стационарным) [1]. Уравнение Ципфа—Мандельброта выводится на основе либо «принципа максимизации информационной энтропии» [3, 16], либо «принципа минимума симметрии (максимума диссимметризации) системы» [17, 21]. В обоих случаях говорится об одном и том же, только по-разному [21].

Химический состав континентальной земной коры. По-видимому, последние по времени сведения в этой области содержатся в работах [22—24]. С. Р. Тейлор и С. М. Макленнан [22, с. 91] приводят данные по 64 элементам, А. Б. Ронов и др. [23] — по 16 наиболее распространенным элементам, К. Х. Ведеполь [24] — по 76.

Наиболее тщательные расчеты содержания химических элементов в земной коре принадлежат авторам [23]. Данные их работы дают идеальную ранговую кривую в пределах первых восьми элементов (рис. 2), что, несомненно, свидетельствует о высокой точности определения. Совокупность из остальных восьми элементов уже не приводит к такой хорошей ранговой кривой (рис. 2), и требуется, по нашему мнению, переопределение содержания в земной коре некоторых из них. К данным [23] более близкими являются величины, относящиеся к 1988 г. [22], чем те, что появились в 1995 г. [24] (см. рис. 2). В связи с этим результаты [22] представляются более надежными по сравнению с [24], и в дальнейшем при рассмотрении данных по тем химическим элементам, которые отсутствуют в работе [23], будем отдавать предпочтение сведениям [22]. Рис. 2 иллюстрирует также прогресс в точности определения содержания S, Cl и F по сравнению с 1964 г. [25].

При составлении общей сводки данные по 16 первым химическим элементам мы взяли согласно [23], для других элементов выбрали значения *A* согласно [22]. Для некоторых элементов (N, Br, Ru, Te, I, Os, Pt, Hg, благородные газы) соответствующие величины в основных работах [22, 23] отсутствуют. Поэтому сведения об указанных элементах взяты из других литератур-

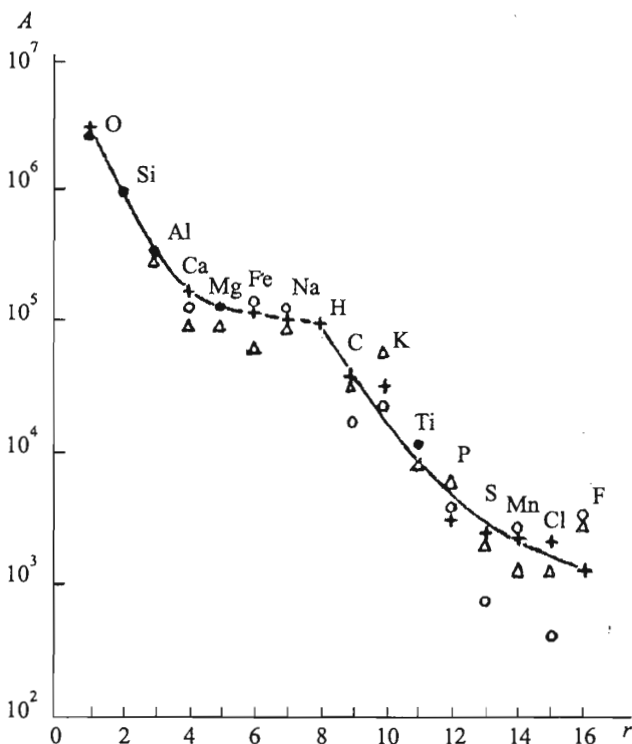


Рис. 2. Распространённость главнейших химических элементов в континентальной земной коре.

Крестики — данные [23], кружки — [22, 25], треугольники — [24]. Значки, обозначающие совпадающие значения из разных работ, зачернены. Кривые проведены по результатам работы [23].

ных источников. Особенно проблематичными являются значения A для благородных газов. Эти величины, относящиеся к земной коре, приводятся в [26, 27]. А. Е. Ферсман [27, с. 178] сообщает их в атомных единицах, авторы [26] — в кубических сантиметрах на 1 г породы. Пересчет значений из [26] на атомные величины был проведен нами по уравнению Клапейрона—Менделеева для давления в 1 физическую атмосферу и температуры 293 К. Получили, что взятые из [26, 27] для Не данные практически совпали. Для Ar они разнятся между собой на порядок. Для Не и Ar были взяты результаты из [26] как наиболее современные и тщательно рассчитанные, для трех других благородных газов, не рассматривавшихся в [26], — из [27].

Почти во всех работах величины содержаний представлены в массовых единицах. Рассчитанные количества A химических элементов, выраженные в атомных единицах, и их ранги приведены в табл. 2 в порядке возрастания атомного номера элемента. Отметим, что нет смысла сообщать для A больше двух значащих цифр, даже для самых распространенных элементов, хотя это нередко делается. Концентрации химических элементов в земной коре вычисляют, исходя из объемов горных пород разного состава, которые эти породы занимают в земной коре. Ясно, что такие объемы невозможно вычислить с точностью более 1%. Скорее всего, погрешность их определения даже еще больше. Потому обычное указание в литературе на содержание в земной коре даже главенствующих элементов с точностью до десятых и сотых долей процента можно оспаривать. В тех случаях, когда авторы использованных работ указывали найденные ими величины для отдельных элементов в пределах одного разряда числа, соответственно и мы приводим вычисленные нами значения A в пределах одного разря-

да. Не исключено, что в дальнейшем, по мере уточнения сведений о содержании химических элементов в земной коре, ранги некоторых элементов изменятся.

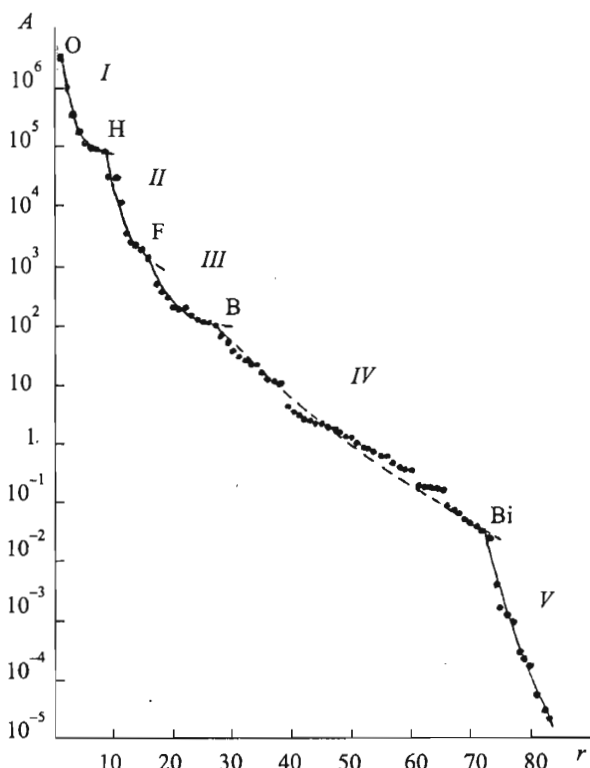


Рис. 3. Генеральная ранговая кривая для содержания химических элементов в континентальной земной коре (по данным табл. 2).

Генеральная ранговая кривая, отражающая все химические элементы, в том числе и те, что отражены на рис. 2, и построенная по данным табл. 2, приведена на рис. 3, который иллюстрирует в сравнении с рис. 1 эволюцию химического состава континентальной земной коры относительно среднего состава Земли. Видно, что эта кривая также имеет отчетливо выраженные изломы. Водород обозначил точку первого из них, «уступив» принадлежавшее ему первое место по рангу и заняв восьмое место по распространенности. Положение этого элемента в изломе отражает его выдающуюся роль в химической истории Земли [28]. Остальные элементы, находящиеся в четко выраженных изломах на рис. 3, фиксируют и изломы на кривой, представленной на рис. 1. Особая роль в химической истории земной коры принадлежит элементам, имеющим экстремальные значения атомных радиусов и электросродства [29]. К ним относятся элементы, находящиеся в остальных «главных» изломах кривой на рис. 3: F, B, Bi. Среди отрицательных ионов F^{-1} отличается уникальными атомными размерами и электросродством [29]. Ион B^{+3} имеет минимальный из всех трехвалентных катионов ионный радиус и обладает максимальной величиной электросродства, Bi^{+3} — максимальным (если не считать радиоактивных элементов) среди трехвалентных катионов ионным радиусом и одним из самых высоких значений электросродства [29]. Однако

экстремальными свойствами отличаются также некоторые другие химические элементы [29]. Неясно, почему из всех таких элементов особая роль в формировании ранговой кривой оказалась лишь у указанных трех элементов.

Таблица 2. Содержание химических элементов в континентальной земной коре, выраженное в количестве атомов, приходящихся на 10^6 атомов Si

Элемент	A	r	Литература	Элемент	A	r	Литература	Элемент	A	r	Литература
H	$9,4 \cdot 10^4$	8	[23]	Cu	$1,3 \cdot 10^2$	24	[22]	Ce	2,6 · 10	32	[22]
He	$1,7 \cdot 10^{-1}$	65	[25]	Zn	$1,3 \cdot 10^2$	25	[22]	Pr	3,0	41	[22]
Li	$2,1 \cdot 10^2$	20	[22]	Ga	2,8 · 10	31	[22]	Nd	1,2 · 10	38	[22]
Be	1,8 · 10	35	[22]	Ge	2,6 · 10	32	[22]	Sm	2,6	42	[22]
B	$1,0 \cdot 10^2$	27	[22]	As	1,5	48	[22]	Eu	$8,0 \cdot 10^{-1}$	54	[22]
C	$3,5 \cdot 10^4$	9	[23]	Se	$7 \cdot 10^{-2}$	68	[22]	Gd	2,3	44	[22]
N	$1,6 \cdot 10^2$	23	[25]	Br	3,4	40	[24]	Tb	$4,1 \cdot 10^{-1}$	60	[22]
O	$3,2 \cdot 10^6$	1	[23]	Kr	$2 \cdot 10^{-4}$	79	[26]	Dy	2,4 · 10	34	[22]
F	$1,4 \cdot 10^3$	16	[23]	Rb	4,1 · 10	30	[22]	Ho	$5,2 \cdot 10^{-1}$	57	[22]
Ne	$2 \cdot 10^{-2}$	73	[27]	Sr	$3,3 \cdot 10^2$	19	[22]	Er	1,4	49	[22]
Na	$9,7 \cdot 10^4$	7	[23]	Y	2,5 · 10	33	[22]	Tm	$2,1 \cdot 10^{-1}$	61	[22]
Mg	$1,3 \cdot 10^5$	5	[23]	Zr	$1,2 \cdot 10^2$	26	[22]	Yb	1,4	50	[22]
Al	$3,5 \cdot 10^5$	3	[23]	Nb	1,3 · 10	36	[22]	Lu	$1,9 \cdot 10^{-1}$	63	[22]
Si	1,0	2	[23]	Mo	1,1	51	[22]	Hf	1,8	46	[22]
P	$3,1 \cdot 10^3$	12	[23]	Ru	$6 \cdot 10^{-2}$	69	[27]	Ta	$6,1 \cdot 10^{-1}$	55	[22]
S	$2,5 \cdot 10^3$	13	[23]	Rh	$1 \cdot 10^{-3}$	76	[24]	W	$6,0 \cdot 10^{-1}$	56	[22]
Cl	$2,1 \cdot 10^3$	15	[23]	Pd	$1,0 \cdot 10^{-3}$	77	[22]	Re	$3 \cdot 10^{-4}$	78	[22]
Ar	$8,2 \cdot 10^{-1}$	53	[26]	Ag	$8,2 \cdot 10^{-2}$	67	[22]	Os	$2,9 \cdot 10^{-5}$	82	[24]
K	$3,1 \cdot 10^4$	10	[23]	Cd	$9,7 \cdot 10^{-2}$	66	[22]	Ir	$6 \cdot 10^{-5}$	81	[22]
Ca	$1,7 \cdot 10^5$	4	[23]	In	$4,8 \cdot 10^{-2}$	70	[22]	Pt	$2,3 \cdot 10^{-4}$	89	[24]
Sc	7,3 · 10	28	[22]	Sn	2,3	45	[22]	Au	$1,7 \cdot 10^{-3}$	75	[22]
Ti	$1,2 \cdot 10^4$	11	[23]	Sb	$2 \cdot 10^{-1}$	64	[22]	Hg	$4,4 \cdot 10^{-2}$	71	[25]
V	$5,0 \cdot 10^2$	17	[22]	Te	$4 \cdot 10^{-3}$	74	[24]	Tl	$1,9 \cdot 10^{-1}$	62	[22]
Cr	$3,9 \cdot 10^2$	18	[22]	I	$4,3 \cdot 10^{-1}$	58	[25]	Pb	4,2	39	[22]
Mn	$2,4 \cdot 10^3$	14	[23]	Xe	$2 \cdot 10^{-5}$	83	[27]	Bi	$3,2 \cdot 10^{-2}$	72	[22]
Fe	$1,2 \cdot 10^5$	6	[23]	Cs	$8,3 \cdot 10^{-1}$	52	[22]	Th	1,7	47	[22]
Co	5,4 · 10	29	[22]	Ba	$2,0 \cdot 10^2$	22	[22]	U	$4,2 \cdot 10^{-1}$	59	[22]
Ni	$2,0 \cdot 10^2$	21	[22]	La	1,0 · 10	37	[22]				

На ранговой кривой наблюдаются также слабо выраженные изломы, фиксирующие субветви (рис. 4). Их можно было бы считать за недостоверные, если бы они, за исключением He, не были устойчиво связаны с редкоземельными элементами.

В пределах каждой из ветвей на рис. 3 кривые согласуются с уравнением Ципфа—Мандельброта. Соответствующие величины α и b даны в табл. 1. При этом значения A для ветви IV (см. рис. 4) обнаруживают наибольший разброс относительно вычисленной кривой по сравнению со всеми другими сегментами генеральной кривой на рис. 3. Корреляция между величинами отношений A , характеризующими соседние изломы генеральной кривой, и значениями r не наблюдается.

Вопрос о том, приобрела ли земная кора окончательный состав, не считается решенным [23, 30, 31]. Соответствие всех частных ветвей на рис. 3 уравнению Ципфа—Мандельброта свидетельствует в пользу представлений о стационарном распределении химических элементов в коре.

Состав земной коры отражает состав мантии (может быть, верхней мантии?) Земли [29]. Причем если в процессе возникновения химических элементов происходила «конкуренция» между ними за вещество, то при образовании и развитии материала, пита-

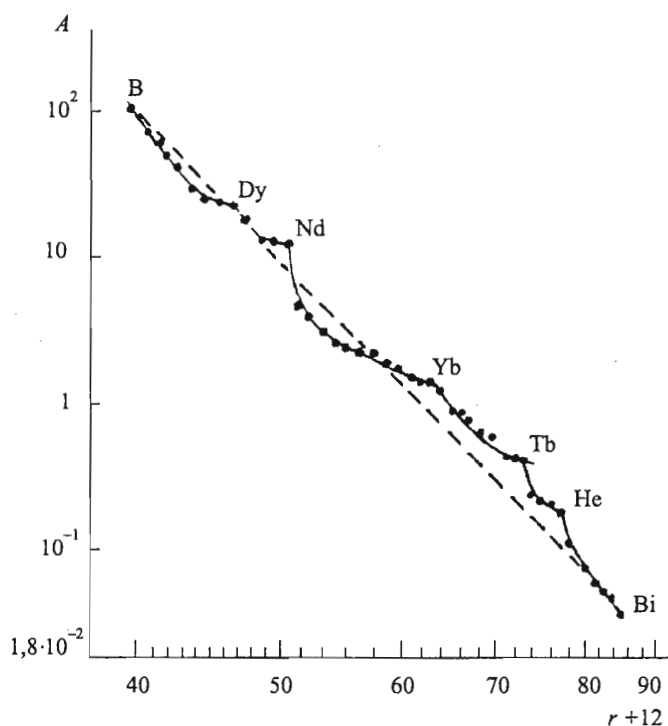


Рис. 4. Распространенность химических элементов в земной коре в пределах ветви IV на рис. 3 в параметрах линеаризации.

шего земную кору, «конкуренция» между ними должна была идти за объем. В частности, «малые» элементы вынуждены были «соперничать» за место в кристаллических решетках породообразующих минералов, слагающих породы мантии. Уникальная роль здесь должна была принадлежать элементам, имеющим, очевидно, особые свойства. Обращает на себя внимание очень большое значение α , относящееся к ветви IV ранговой кривой для земной коры (см. табл. 1), что должно отражать процессы сильной дифференциации вещества, являвшегося исходным для коры.

Отклонение точек от гладких «циффовских» кривых — не только следствие наличия субветвей. В существенной степени это и результат недостаточной точности определения A . Подтверждением сказанному является то, что в земной коре, как и в случае метеоритов, наблюдается тенденция к увеличению разброса точек для субветвей с большими номерами, т. е. чем меньше содержание химических элементов в горных породах, тем с большей погрешностью удастся найти величины A . Таким образом, имеется стимул для уточнения количества ряда химических элементов в земной коре.

В заключение приведем основные доводы, указывающие на полезность описанного выше подхода к анализу распространенности химических элементов в природе. Степень гладкости ранговых кривых может служить критерием для оценки качества численных данных. Неподчинение этих кривых экспоненциальному распределению или распределению Циффа—Мандельброта является признаком того, что связи в данном сообществе химических элементов еще не устоялись (не пришли к стационарному состоянию). Детали строения ранговых кривых позволяют установить такие особенности в формировании конкретного сообщества элементов, которые невозможно уловить дру-

гим путем, в частности выявить особую роль тех или иных членов этого сообщества. Использование ранговых распределений дает возможность «свернуть» информацию о распространенности химических элементов и свести ее к анализу и сопоставлению двух численных параметров.

Summary

Treivus E. B. The abundance of chemical elements as a rank distribution.

Its are depicted rank curves of chemical elements abundance in meteorites (carbonaceous chondrites) and continental Earth Crust. Its are revealed kinks and subbranches on these curves. Kinks corresponds of elements, which have the essential significance in the evolution of chemical elements community in the one and other case. These subbranches are in agreement with equation of Zipf—Mandelbrot. The conformity of experimental values with this equation is evidence that these communities reach the stationary state. The scatter of points near these curves it can be criteria for evaluation of quality of existing chemical data.

Литература

1. Левич А. П. Структура экологических сообществ. М., 1980.
2. Левич А. П. Феноменология, применение и происхождение ранговых распределений в биоценозах и экологии как источник идей для техноценозов и экономики // Математическое описание ценозов и закономерности технетики / Сост. Б. И. Кудрин. Абакан, 1996.
3. Пузаченко Ю. Г., Пузаченко А. Ю. Семантические аспекты биоразнообразия // Журн. общ. биологии. 1996. Т. 57, № 1.
4. Поваренных А. С. О распространенности химических элементов в земной коре и числе минеральных видов // Минер. сб. Львовск. ун-та. 1966. № 20, вып. 2.
5. Yaroshevsky A. A., Bulach A. G. The mineral composition of the Earth Crust, Mantle, Meteorites, and Planets // Advanced Mineralogy. Vol. 1 / Ed. A. S. Marfunin. Berlin e.a., 1994.
6. Трейвус Е. Б. Опыт построения ранговых кривых применительно к геолого-минералогическим объектам // Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. 7. 1985. № 28.
7. Хендерсон П. Неорганическая геохимия / Пер. с англ.; Под ред. В. А. Жарикова. М., 1985.
8. Strunz H. Die frühen Ergebnisse der Meteoritenforschung als eine Grundlage für die moderne Meteoriten-Klassifikation // Der Aufschluss. 1988. Bd 39. Hf. 1.
9. Тейлор Р. Дж. Происхождение химических элементов / Пер. с англ.; Под ред. Г. А. Лейкина. М., 1975.
10. Камерон А. Дж. У. Содержание химических элементов и пуклидов в Солнечной системе // Ядерная геофизика / Под ред. Ч. Барнса, Д. Клейтона, Д. Шрама; Пер. с англ.; Под ред. А. Г. Масевич. М., 1988.
11. Галимов Э. М. Проблема происхождения Луны // Основные направления геохимии / Отв. ред. Э. М. Галимов. М., 1995.
12. Anders E., Grevesse N. Abundance of elements: Meteoriten and Solar // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1989. Vol. 53, N 1.
13. Жирмунский А. В., Кузьмин В. И. Критические уровни в развитии природных систем. Л., 1990.
14. Войткевич Г. Н., Кожин А. В., Мирошников А. Е., Прохоров В. Г. Справочник по геохимии. М., 1990.
15. Лаврухина А. К. Нуклеосинтез и возраст химических элементов, метеоритов и Земли // Проблемы радиохимии и космохимии / Отв. ред. Ю. А. Шуколюков. М., 1992.
16. Левич А. П. Информатика как структура систем // Семиотика и информатика. 1978. Вып. 10.
17. Шрейдер Ю. А., Шаров А. А. Системы и модели. М., 1982.
18. Яблонский А. И. Математические модели в исследовании науки. М., 1986.
19. Крамаровский Я. М., Чечев В. П. Синтез элементов во Вселенной. М., 1987.
20. Лаврухина А. К. Ядерная эволюция вещества Солнечной системы // Основные направления геохимии / Отв. ред. Э. М. Галимов. М., 1995.
21. Арапов М. В., Шрейдер Ю. А. Классификация и ранговые распределения // Науч.-техн. информатика. Сер. 2. 1977. № 11.
22. Тейлор С. Р., Макленнан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция / Пер. с англ.; Под ред. Л. Т. Соболева. М., 1988.
23. Ронов А. Б., Ярошевский А. А., Мигдисов А. А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М., 1990.
24. Wedepohl K. H. The composition of the continental crust // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1995. Vol. 59, N 7.
25. Taylor S. R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1964. Vol. 28, N 8.
26. Azbel I. Ya., Tolstikhin I. N. Geodynamics, magmatism, and degassing of the Earth // Geochim. et

Cosmochim. Acta. 1990. Vol. 54, N 1. **27.** *Ферсман А. Е.* Избр. труды: В 3 т. М., 1955. Т. 3. **28.** *Маракушев А. А.* Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. М., 1992. **29.** *Маракушев А. А.* Периодическая система экстремальных состояний химических элементов. М., 1987. **30.** *Ярошевский А. А.* Модель динамики геохимического круговорота и эволюции континентальной коры Земли: Препринт Ин-та геохимии им. В. И. Вернадского. М., 1985. **31.** *Азбель И. Я., Толстихин И. Н.* Радиогенные изотопы и эволюция мантии Земли, коры и атмосферы. Апатиты, 1988.

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2003 г.