

Методика

ҚР ҰҒА-ның Хабарлары. Геология және техникалық ғылымдар сериясы.
Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. 2011. №4. С. 47–53

УДК (550.855:550.08)

С.И. ЗАЙЦЕВ¹

УПОРЯДОЧЕНИЕ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГРАНИТОИДАХ И ПАРАМЕТРЫ ИХ ОПРОБОВАНИЯ

Гранитоидтың қорытпадағы көнді немесе аз элементтердің (АЭ) таралуы үқсас кристалды торда тәртіпті немесе геометрленген сипатқа ие деген болжам негізделген. Жоғары дисперсиялар (вариация коэффициенті – V_c) АЭ таралуы бұл – элементарлық ұшықтағы олардың таралуынан (ӘҮТ) алынған геохимиялық сынамалар мөлшерінің сәйкесіздік салдары, бұл, автордың пікірінше, гранеторталықтанған түрге жатады.

Обосновывается гипотеза, что распределение рудных или малых элементов (РЭ) в гранитоидных расплавах носит упорядоченный или геометризованный характер, аналогично кристаллической решетке. Высокие дисперсии (коэффициенты вариации – V_c) распределения РЭ это следствие несоответствия размера отбираемых геохимических проб элементарной ячейке их распределения (ЭЯР), которая, по мнению автора, относится к гранецентрированному типу.

The hypothesis is proved, that distribution of ore or small elements (PЭ) in granitoid melts carries ordered or geometrical character, analogue a crystal lattice. High dispersions (factors of a variation) distributions PЭ this consequence(investigation) of discrepancy of the size geochemical tests to an elementary cell of their distribution which in opinion of the author, concerns to face-centered to type.

Для решения прикладных задач геохимии гранитоидов – прогноза и поиска месторождений, фундаментальное значение имеет достоверность данных по распределению рудных элементов в генетически связанный серии пород, из которой состоит магматическое тело (плутон). Общепринятая последовательность фаз формирующих магматическое тело одноактного заполнения: главная фаза (ГФ) → дополнительная (ДФ) → жильная (ЖФ) [10].

При исследовании геохимии магматических пород исследователь, как правило, сталкивается с такой ее отрицательной чертой, как плохой повторяемостью или воспроизводимостью результатов опробования. Эту проблему, на наш взгляд, можно решить введя понятие элементарной ячейки распределения РЭ в магматических горных породах, аналогично тому как мы это сделали для руды [7].

К формированию структур упорядочения способны системы имеющие достаточные внутренние запасы свободной энергии Гиббса, позволяющие им саморазвиваться. В нашем случае это магмы, пегматиты и рудные расплавы-флюиды, последние формируют кварцеворудные об-

разования и наряду с пегматитами сами являются продуктами упорядочения более высокого порядка.

Отличительной чертой становления магматических систем – длительность (сотни тысяч и миллионы лет) предоставляемых им на адаптацию к условиям, возникающим при перемещении от места зарождения к месту становления. Необходимо отметить, что такие системы имеются только в геологии, как предмет исследований петрологов и доступны непосредственному изучению. К сожалению, вопросы самоорганизации в них вещества, в частности рудных элементов, не ставились.

О методиках опробования магматических горных пород. Формирование каркаса или структуры силикатного расплава состоящего из кремнекислородных и алломокремнекислородных тетраэдров определяется, очевидно иными закономерностями нежели те которые регулируют распределение РЭ, это следует из значительной разницы коэффициентов вариации и характера их изменения в процессе дифференциации (табл. 1-5). Форма рассеяния РЭ в расплаве может носить структурный и неструктурный характер, осо-

¹ Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Казыбек би, 50. ТОО «Минералды Минерал».

бенности второго детально рассмотрены Л.В. Тасоном [19]. Важно подчеркнуть, что неструктурная форма рассеяния фиксирует уже произошедшее упорядочение.

Параметры отбираемых проб существенно отличаются размерами.

1. Пробы на силикатный анализ. Анализируются петрогенные элементы (ПЭ), которые являются главными составными частями магматических горных пород, в виде массовых содержаний оксидов: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O ; менее MnO , TiO_2 , P_2O_5 . Вес пробы составляет 0,2-0,5 кг, в среднем 0,3 кг. В зависимости от зернистости горной породы берут необходимое количество свежих осколков [6], размеры их не приводятся.

2. Пробы на геохимический анализ. Анализируются малые или рудогенные (рудные) элементы. Сюда же мы отнесли минерализаторы или летучие: H_2O , B , C , F , Cl , S , хотя H_2O и S традиционно относятся к петрогенным компонентам, причем метод определения первой – термобаро-геохимический [17]. Здесь при отборе у разных исследователей наблюдается существенные расхождения, при этом очевидно, что они носят эмпирический характер, так как теоретического обоснования авторы не приводят. В сущности их можно рассматривать, как рекомендации. Ниже приводятся три варианта геохимического опробования:

а) Каждая проба состоит из 20-25 кусков весом 100-150 г, собранных с площади 100 кв.м или площадки 10x10 м. Объем одного сколка равен 56,2 cm^3 , это куб с ребром 3,8 см весом 150 г. Вес пробы 2,5-3 кг. Опытом установлено, что для характеристики однофазного массива достаточно 12 проб [14].

б) Минимальное желательное количество проб приходящееся на одну разновидность пород комплекса (плутона) – 10. Вес пробы в среднем 0,7-1 кг [9]. Тип опробования – сколковый (точечный). Других характеристик опробования не приводится.

в) Пробы отбираются по сетке с интервалом опробования 5 м с площадки размером 30x30 м. Количество проб, необходимое для вычисления основных характеристик, описывающих структуру распределения содержаний элемента в породе (закон распределения, дисперсия, корреляция), в том числе и для вычисления статистически

достоверного среднего содержания, по мнению автора [13], должно составлять 25-50 штук.

При этом пробы, во всех вариантах, должны отбираться из участков гранитов, расположенных вдали от рудопроявлений, минимально трещиноватых, т.е. не затронутых процессами гидротермальных изменений постмагматического генезиса.

В первом приближении вопрос о параметрах геохимического опробования гранитоидов: форма, размер и вес единичной пробы, дающей достоверный результат, может быть решен через сравнение коэффициентов вариации петрогенных и рудогенных элементов.

Сравнительный анализ характера распределения петрогенных и рудогенных элементов. Сравнительным критерием был выбран коэффициент вариации, так как он является *относительной* мерой разброса концентраций элемента и его величина практически не зависит от среднего содержания РЭ в породе [20].

Сравнительный анализ был построен на двух типах выборок:

1. «Глобальные выборки», в которых статистические критерии вычислялись на большом количестве данных – несколько сотен или первые тысячи, на разновидность пород (табл. 1 и 2)

2. «Частные выборки» – несколько десятков и даже менее данных на разновидность пород (фаз) участвующих в строении комплекса или plutона (табл. 3, 4, 5).

Предварительные выводы, которые не противоречат сделанным ранее, другими исследователями:

1. Петрогенные элементы (ПЭ): Si, Al, Na, K характеризуются стабильной вариацией, в гранитоидном ритме дифференциации, т.е. значимых изменений (увеличение или уменьшение) V_c в процессе дифференциации не отмечается. Для этих элементов, при накоплении характерны близкие значения валовых коэффициентов распределения 0,9-0,95, несколько более низкий характеризует калий – 0,78.

2. Коэффициент вариации РЭ имеет явную тенденцию к возрастанию в ряду последовательных дифференциатов, от ранних к поздним, отчетливо это проявлено, также у «малых» петрогенных (табл. 1). Это хорошо объясняется увеличением количества летучих, которые благоприятствуют миграционным способностям РЭ, а

Таблица 1. Коэффициенты вариации петрогенных элементов по данным [15]

Компонент	Тип пород		
	Гранодио-риты, n=1832	Граниты, n=2681	Лейкогра-ниты, n=2152
SiO ₂	3,5	3,2	2,3
TiO ₂	41	53	88
Al ₂ O ₃	8,3	9,3	8,9
Fe ₂ O ₃	66	71	69
FeO	35	40	61
MnO	53	61	71
MgO	42	55	79
CaO	33	52	61
Na ₂ O	18	19	21
K ₂ O	28	19	16
P ₂ O ₅	61	94	121

Таблица 2. Коэффициенты вариации рудогенных элементов по данным [1]

№пп	Элемент	Количество проб	Коэффициент вариации
1	Li	847	23
2	Rb	887	10
3	Cs	295	42
4	Be	741	46
5	Nb	512	27
6	Ta	338	152
7	W	277	84
8	Sn	824	44
9	F	690	12
10	Ti	547	11
11	V	349	29
12	Sr	459	23
13	Ba	433	17

Примечание: значения V_c характеризуют следующий ряд петрографических типов пород: гранодиорит – гранит – лейкогранит;

Таблица 3. Коэффициенты вариации

Кукульбейский комплекс. Соктуйский массив по данным [12]

Элемент	1 n=11-15	2 n=27-64	3 n=11
Rb	30	52	66
Li	15	34	52
Be	20	35	37
Sn	33	36	49
Pb	27	34	48
Zn	19	45	23

Примечание: 1 – амфибол-биотитовые граниты; 2 – биотитовые граниты; 3 – порфировидные граниты

Таблица 4. Коэффициенты вариации в гранитоидах субщелочного ряда по данным [5]

Элемент	1	2	3	4	5
n	45	20	40	70	204
K	16	7	11	13	18
Na	19	13	14	12	27
F	67	57	41	37	69
Li	29	50	-	-	119
Rb	15	14	26	27	40
Cs	50	49	43	93	152
Sr	18	15	57	45	72
Ba	26	13	95	35	107
Ga	29	51	27	25	40
Ni	54	115	71	81	81
V	38	91	59	53	95
Sc	40	40	83	72	45
Zr	45	46	60	80	78
Nb	50	50	33	48	71
La	43	90	79	57	101
Y	26	39	82	120	68
Yb	43	42	103	112	113
Be	48	93	31	88	148
Sn	72	80	182	52	178
Mo	168	134	73	95	96
Pb	34	68	138	75	87
Bi	69	196	57	132	157
W	163	130	80	87	128
B	70	20	122	63	227

Примечание: 1 – биотитовые граниты ГФ; 2 – двуслюдянные и лейкократовые граниты ДФ; 3 – мелкопорфировидные ультрапредкометальные онгониты; эльваны: 4 – крупнопорфировидные ультрапредкометальные, 5 – мелкопорфировидные ультрапредкометальные.

Таблица 5. Коэффициенты вариации золота

Фаза	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1Ф	85	55,6	25,3	97,4	27,1	53	88	71	61
2Ф	105	39,1	47,5	52,8	73,8	43	81	66	70
3Ф	60	26,4	-	93,7	68,2	50	107	86	-

Примечание: таблица составлена по данным: 1 – Коробейников А.Ф. [11]; Анопин Г.Н. [2], массивы: Кольвановский-2, Суундукский-3, Верх-Исетский-4; 5 – Юсупов Р.Г. [21]; 6 – Воскресенская Н.Т. [4], интрузии Степнякского типа; Пчелинцева Н.Ф. [16], комплексы: Крыккудукский -7, Аラлаульский -8, Боровской -9; по ее данным V_c для серебра равен 41 %.

следовательно – упорядочению. Явный вынос, который характерен для заключительных (рудоотдающих) фаз, приводит к снижению величины V_c , а в литий-фтористых гранитах (онгонитах), характеризующихся повышенными концентрациями летучих он имеет повышенные значения (табл. 4). Валовые коэффициенты распределения РЭ колеблются в пределах 0,5-0,6.

Анализ абсолютных величин V_c путем построения ранжированного ряда показал следующее:

1. в класс 0-5 % попадает только Si, для него закрыты классы > 10 %;

2. в класс 5-10 % попадает основная масса значений AI, для которого закрыты классы > 15 %, крайне редко сюда попадают K, Rb.

3. Классы 10-20 % принадлежат Na, K для них закрыты классы > 30 %.

4. Петрогенные элементы: Ca, Mg, Fe, Ti, Mn, Р как по величине, так и по характеру изменения аналогичны РЭ. Ряд гранодиорит-гранит-лейкогранит характеризуется следующими значениями V_c : 48 – 62 – 77, соответственно.

5. Размах колебаний значений V_c для РЭ от 10 до 227, средние значения для ряда гранодиорит-

Таблица 6. Параметры элементарной ячейки рудных элементов

Характеристика	Группа элементов по величине коэффициента вариации		
	25 %	50 %	100 %
Величина k	2,5	5	10
Постоянная a , см	6,25	12,5	25
Объем, см ³	244	1953	15625
Вес, г	651	5209	41672

рит-гранит-лейкогранит-субщелочной лейкогранит (литий-фтористый гранит): 40 – 58 – 63 – 121. Большинству РЭ присущи значения V_c в пределах 25–50 %, для онгонитов среднее равно 120 %. Для Rb характерны пониженные значения (< 25 %), а для W, Ta и Au повышенные (> 50 %).

Элементарная ячейка распределения петрогенных и рудных в гранитоидах и параметры опробования. При расчете параметров элементарной ячейки распределения ПЭ принята величина $V_c = 10\%$. При этом за основу взят крупнозернистый гранит. Размер зерен основных породообразующих минералов – 10 мм. Для адамелита, гранита и гранита рапакиви состав выглядит следующим образом: кварц 35 %, калиевый полевой шпат 30 %, кислый плагиоклаз 30 %, остальная часть объема 5 % приходится на цветные и акцессорные минералы, к последним следует добавить расплав следующей генерации, те и другие размещаются в межкристаллическом пространстве первых трех минералов.

Постоянная ячейки петрогенных элементов, вычислена при следующих допущениях:

1. Тип решетки – гранецентрированный.

2. Объем «шара», на котором строится ЭЯР складывается из трех минералов: кварца, калиевого полевого шпата и кислого плагиоклаза, имеющих одинаковые объемы.

Количество шаров в решетке подобного типа равно 4. Объем ЭЯР вычисляется по формуле [18]:

$$V_{4\pi} = 4/6 \cdot \rho D^3 = 0,74 b^3,$$

где D – диаметр шара, b – постоянная ЭЯР

Коэффициент 0,74 показывает, что 74 % объема ЭЯР приходится на объем шаров. Объем элементарного шара рассчитываем по формуле:

$$V_{1\pi} = 3(4/3 \cdot \rho R^3),$$

где R – радиус шара

При принятых нами допущениях объем элементарного шара составит 1569 мм³, а диаметр 14,4 мм.

Постоянная ЭЯР главных ПЭ: Si, Al, K, Na вычислена по формуле:

$$b = \sqrt[3]{4/6 \cdot \rho D^3}, \text{ составит } 24,89 \approx 25 \text{ мм}$$

Таким образом объем пробы при котором можно получить достоверный результат о силикатном составе исследуемой породы составит 15,6 см³ (куб с ребром 25 мм) или 41,6 г. Это теоретические параметры единичной пробы («сколка») на силикатный анализ, крупнозернистого гранита.

Параметры ЭЯР для РЭ рассчитывались через соотношение коэффициентов вариации петрогенных и рудных компонентов. Предполагается, что РЭ, также как ПЭ упорядочиваются в шарообразную форму, при этом их концентрация распределяется подобно электронной плотности в атомах – максимум (ядро) в центре с уменьшением к периферии. Для одних РЭ центры таких «шаров» могут совпадать (накладываться) в пространстве, а для других нет. Рудные элементы, включая летучие, по величине коэффициента вариации были разделены на три группы: 1. $V = 25\%$, 2. $V = 50\%$ и 3. $V = 100\%$. Размеры ЭЯР РЭ вычислялись, посредством умножения постоянной для каркасобразующих, на коэффициент равный отношению коэффициентов вариации $k = V_{\text{РЭ}} / V_{\text{ПЭ}}$ где $V_{\text{РЭ}}$ коэффициент вариации рудных и тоже $V_{\text{ПЭ}}$ петрогенных элементов. Результаты расчетов приведены в таблице 6.

Из таблицы 6 видно, что рекомендуемой массы геохимических сколков, в приводимых выше методиках, явно недостаточно для получения достоверного результата на предмет концентрации РЭ в породе. Очевидно, что каждый из сколков характеризует только фрагмент ЭЯ. Здесь необходимо отметить, что вариант идеального опробования [3] или очень большого количества проб с приближением к закону больших чисел, в виду его не выполнимости, в качестве методики опробования гранитоидов рассматриваться не может.

Таблица 7. Диаметр «шара» для различных групп РЭ

Диаметр шара, см	25 %	50 %	100 %
	4,4	8,8	17,6

Таким образом параметры геохимического опробования, в зависимости от вариационной группы, существенно отличаются. Ребро куба, для единичной пробы колеблется от 6 до 25 см. К какой из них отнести изучаемый элемент исследователь решает самостоятельно, т.к. строгие рекомендации для каждого РЭ привести затруднительно.

Эмпирическая проверка выдвинутой гипотезы. Необходимо провести бороздовое опробование гранитоидов главной (крупнозернистой структуры) или дополнительной (среднезернистой структуры) фаз в горизонтальной плоскости (параллельно матрацвидной отдельности, рис.1).

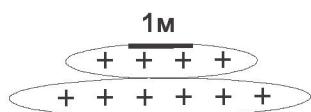


Рис. 1. Положение борозды по отношению к горизонтальной отдельности гранита

Длину борозды принять равной 1 м, сечением 1x1 см. Пробы брать сантиметровыми интервалами, просто распилив полученную призму на сто отрезков.

Если произойдет идеальное пересечение, результаты анализов совпадут с одним из вариантов, приведенных на рис. 2.

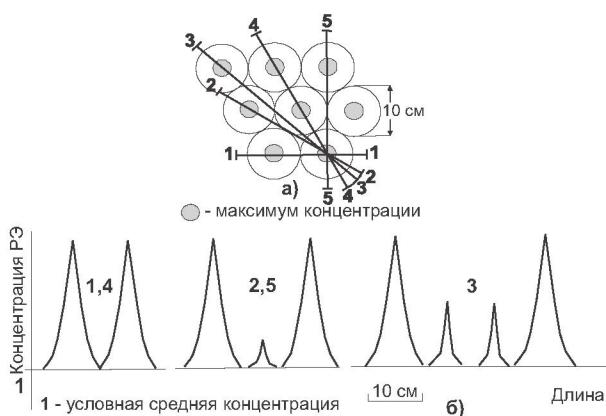


Рис. 2. Ожидаемые результаты: а) варианты идеального пересечения бороздой максимумов концентрации РЭ в «шарах»; б) характер периодичности распределения концентрации РЭ при различных вариантах пересечения

Следующим этапом могло бы стать построение объемной модели, путем распиловки куба включающего несколько ЭЯ на кубики меньшего размера.

Заключение. Упорядоченно или нет распределяются РЭ в гранитоидах может показать только опробование, если же предположение окажется верным, то количество проб на фазу или разновидность пород, предлагается принять равной 10, т.е. статистически малой выборки будет достаточно для полноценной характеристики распределения РЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров И.В. Геохимические факторы и парагенезисы элементов в гранитоидах. М.: Наука, 1989. – 184 с.
2. Аношин Г.Н. Золото в магматических горных породах. М.: Наука, 1977. 205 с.
3. Белов Б.И. О геохимическом смысле законов распределения концентраций вещества / Математические методы геохимических исследований. М.б Н. 1966. С.71-81.
4. Воскресенская Н.Т., Зверева Н.Ф. Некоторые вопросы геохимии золота в связи с рудоносностью магматических комплексов Северного Казахстана // Геохимия. – 1968. № 4.- С. 422-431.
5. Дергачев В.Б. Ассоциация редкометальных гранитоидов субшелочного ряда с онгонитами и эльванами // Геохимия, 1989.
6. Ефремова С.В., Стәфеев К.Г. Петрохимические методы исследований горных пород: Справочное пособие. – М.: Недра, 1985. – 511 с.
7. Зайцев С.И. Элементарная ячейка руды и параметры опробования // Геология и охрана недр. 2010. № 3(36). С. 99-104.
8. Зайцев С.И. Золотогенерирующая способность гранитоидов // Известия НАН. Сер. геол. Казахстан. 2007. – №2. – С.66-70.
9. Козлов В.Д. Геохимия и рудоносность гранитоидов редкометальных провинций. М.: Наука, 1985. – 293 с.
10. Концев-Дворников В.С. К вопросу о некоторых закономерностях формирования интрузивных комплексов гранитоидов. (На примере Центрального Казахстана) // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1952. № 4.
11. Коробейников А.Ф. Распределение золота в гранитоидах золоторудных полей центральной части Саяно-Алтайской складчатой области / Геохимия золота. Владивосток, 1978. – С.85-93.
12. Кузьмин М.Н., Антипин В.С. Геохимическая характеристика мезозойских гранитоидов Восточного Забайкалья.

- лья // Геохимия редких элементов в магматических комплексах Восточной Сибири. М.: Наука, 1972. С. 132-185.
13. *Ляхович В.В.* Влияние пограничностей оправления на величину средних содержаний редких и рудных элементов в гранитоидах // Редкие элементы в геологии. М.: Наука, 1982. – 258 с.
14. *Аминский Н.Н., Марич И.В., Козлов А.М.* и др. Методические рекомендации по минералого-geoхимическим исследованиям гранитоидных пород при геологическом картировании. СНИИГТИМС, Новосибирск, 1972. 50 с.
15. *Налетов Б.Ф.* Гранитоиды с оловянным, вольфрамовым и медно-молибденовым оруденением. – Новосибирск: Наука, 1981. 230 с.
16. *Пчелинцева Н.Ф.* Поведение золота при формировании гранитоидных интрузивов Северного Казахстана // Геохимия золота. Владивосток, 1978.- С. 76-84.
17. *Рейф Ф.Г., Бажеев Е.Д.* Магматический процесс и вольфрамовое оруденение. Новосибирск: Наука, 1982. – 156 с.
18. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики (термодинамика и молекулярная физика). Изд. 2-е, исправл. М.: Наука, 1979.551 с.
19. *Таусон Л.В.* Геохимические типы и потенциальнаярудоносность гранитоидов. М., Наука, 1977.
20. *Трошин Ю.П., Белов Б.И., Петрова З.И.* О генетическом смысле коэффициента вариации концентраций редких элементов в интрузивных породах в связи с проблемой металлогенической специализации интрузий /Математические методы geoхимических исследований. М.: Наука, 1966, с.22-31
21. *Юсупов Р.Г., Абдрахманов Г.А., Юсупова Л.Н.* Золото в герцинских интрузивных формациях Кураминских гор (УЗССР) // Геохимия. 1977. № 9. С. 1384-1395.