

© Д. чл. УАГН Н.А. Григорьев

**МАКСИМИНЕРАЛЫ КАК НОСИТЕЛИ ИТТЕРБИЯ И
ЛЮТЕЦИЯ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ
КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ**

*Институт геологии и геохимии Уральского Отделения РАН
620151 Екатеринбург, Почтовый переулок, 7 E-mail: root @ igg. e-burg. Su*

© Grigor'ev N.A.

**MAXIMINERALS AS CARRIERS OF YTTERBIUM AND
LUTECIUM IN THE UPPER CONTINENTAL CRUST'S**

*Institute of Geology and Geochemistry,
Urals Branch of Russian Academy of Sciences*

Автореферат

Роль максиминералов в качестве носителей Yb и Lu в верхней части континентальной коры определена по модели А.Б. Ронова и др. (1990). Расчет выполнен на основе больше чем 3416 количественных минералогических анализов важнейших горных пород, опубликованных преимущественно в СССР. Установлено, что в максиминералах сконцентрировано 6,47 % массы Yb. В том числе: в ортите – 5,74, в ксенотиме – 0,34, в иттриалите – 0,26, в эвксените – 0,06, в фергусоните – 0,05, в гадолините – 0,01, в блонстрандине – 0,01 %. В максиминералах сконцентрировано 6,87 % массы Lu. В том числе: в ортите – 6, в ксенотиме – 0,58, в иттриалите – 0,2, в фергусоните – 0,06, в эвксените 0,03 %. Эти цифры - минимально возможные.

Ключевые слова: максиминерал, носитель, иттербий, лютеций, верхняя часть континентальной коры.

Abstract

The role of maxminerals as carriers of Yb and Lu in the upper continental crust's was been calculation by the model of A. B. Ronov et al.(1990). Calculation has been made by the base more than 3416 quantitative mineralogical analyses of important rocks, published mainly in the USSR. It was established, that in the maxminerals concentration 6,47 % of masses Yb. In particular: in orthite – 5.74, in xenotime – 0.34, in yttrialite – 0.26, in euxenite – 0.06, in fergusonite – 0.05 in gadolinite – 0.01, in blomstrandite – 0.01 %. In the maxminerals concentration 6.87 % of masses Lu. In particular: in orthite – 6, in xenotime – 0.58, in yttrialite – 0.2, in fergusonite – 0.06, in euxenite – 0.03 %. These figures a minimal from possible.

Key words: maximineral, carrier, ytterbium, lutecium, upper continental crust.

Впервые определены средние доли масс Yb и Lu, сконцентрированные в максиминералах континентальных горных пород и верхней части континентальной коры в целом. Эта статья завершает серию, посвященную лантаноидам. Постановка вопроса, первоисточники материалов, методика расчетов, списки использованной литературы опубликованы в Уральском геологическом журнале раньше. Здесь приведены: только фактический материал, его обсуждение и дополнительный источник данных. Отметим, что приведенное раньше среднее содержание Lu в песках и песчаниках – $8,3 \cdot 10^{-5}$ % (Григорьев, 2003) здесь (табл.1) заменено на более вероятное – предполагаемое. Средние содержания Lu в осадочных породах, осадочном слое, в верхней части континентальной коры рассчитаны с учетом отмеченной предполагаемой величины и несколько отличаются от опубликованных раньше.

**Распределение масс Yb и Lu в совокупности
континентальных горных пород**

Среднее содержание Yb в совокупности континентальных осадочных пород – $2 \cdot 10^{-4}$ %, практически соответствует тому, которое могло быть унаследовано от гранитно-гнейсового слоя современного состава ($2,1 \cdot 10^{-4}$ %). Содержание Lu в континентальных осадочных породах – $3 \cdot 10^{-5}$ %, меньше того, которое могло быть унаследовано – $4,3 \cdot 10^{-5}$ %. Но эта разница вероятно обусловлена погрешностями определений содержаний Lu в горных породах. Главные концентраторы обоих элементов – сиениты (табл. 1). Но коэффициенты концентрации незначительные: Yb – 1,75, Lu – 2,5. Главные носители – метаморфические породы гранитно-гнейсового слоя (61,1 % массы Yb и 59,2 % массы Lu).

Доли масс Yb и Lu, сконцентрированные в максиминералах

Граничные для максиминералов содержания (Григорьев, 1999) соответственно: Yb – 0,06 и Lu – 0,01 мас. %. Роль максиминералов как носителей Yb и Lu существенна в гранитно-гнейсовом слое и верхней части континентальной коры в целом (табл. 2, 3). Причем роль ортита значительно больше суммарной роли остальных максиминералов. Из горных пород осадочного слоя изучены только пески, кислые и средние вулканиты. Роль максиминералов наиболее значительная в кислых вулканитах

Таблица 1

Распределение массы Yb и Lu в совокупности горных пород верхней части континентальной коры

Горные породы	Масса пород, отн. %	Среднее содержание, 10 ⁻⁴ %		Доли массы, отн. %	
		Yb	Lu	Yb	Lu
Пески и песчаники	5,11	1,8	0,3*	3,74	3,21*
Глины и глинистые сланцы	10,4	2,5	0,39	10,57	8,48
Карбонатные породы	3,85	0,9	0,11	1,41	0,89
Кремнистые породы	0,33	2	Н.опр.	0,27	Н.опр.
Эвапориты	0,26	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.
Кислые вулканыты	0,44	2,5	0,55	0,45	0,51
Средние вулканыты	1,13	2	0,32	0,92	0,76
Основные вулканыты	2,11	2,3	0,46	1,97	2,03
Граниты	8,21	4	0,9	13,35	15,46
Гранодиориты	3,38	3,6	1,1	4,95	7,78
Базиты	1,5	2	0,5	1,22	1,57
Сиениты	0,05	4,3	1,2	0,09	0,13
Ультрабазиты	0,05	0,48	0,07	0,01	0,01
Метапесчаники	2,92	1,6	0,26	1,9	1,59
Парагнейсы и парасланцы	30,56	2,5	0,54	31,06	34,52
Метаморфизованные карбонатные породы	1,13	0,7	0,1	0,32	0,24
Железистые породы	0,38	4,5	Н.опр.	0,7	Н.опр.
Гранито-гнейсы	23,21	2,2	0,38	20,76	18,45
Метариолиты	0,66	3,8	Н.опр.	1,02	Н.опр.
Метаандезиты	1,03	3,5	0,51	1,46	1,1
Метабазиты	3,29	2,9	0,48	3,88	3,3
Верхняя часть континентальной коры	100	2,46	0,478	100,05	100,03*
Осадочные породы	19,95	1,97	0,301*	15,99	12,58*
Вулканыты осадочного слоя	3,68	2,23	0,43	3,34	3,3
Осадочный слой	23,63	2,01	0,321	19,31	15,88*
Магматыты гранито-гнейсового слоя	13,19	3,66	0,904	19,62	24,95
Параметаморфические породы	34,99	2,39	0,497	33,98	36,35
Ортометаморфические породы	28,19	2,37	0,387	27,12	22,85
Гранито-гнейсовый слой	76,37	2,58	0,527	80,72	84,15

(табл. 4, 5). В гранито-гнейсовом слое роль максиминералов максимальная в сиенитах (табл. 6, 7). На втором месте – граниты. Среди метаморфических пород максимальной ролью максиминералов характеризуются гранито-гнейсы и парасланцы (табл. 8, 9).

Роль максиминералов как носителей Yb в верхней части континентальной коры

Минералы	Содержание Yb в минералах, мас. %	Осадочный слой.		Гранито-гнейсовый слой.		Верхняя часть континентальной коры.	
		Содержание минералов, мас. %	Доли массы Yb, отн. %	Содержание минералов, мас. %	Доли массы Yb, отн. %	Содержание минералов, мас. %	Доли массы Yb, отн. %
Ринколит	0,09	Н.опр.	Н.опр.	6,9 10 ⁻⁹	<0,01	5,3 10 ⁻⁹	<0,01
Ортит	0,3	6 10 ⁻⁵	0,9	0,0063	7,26	0,0048	5,74
Гадолинит	0,6	Н.опр.	Н.опр.	5,2 10 ⁻⁶	0,01	4 10 ⁻⁶	0,01
Чевкинит	0,67	Н.опр.	Н.опр.	5,5 10 ⁻⁷	<0,01	4,2 10 ⁻⁷	<0,01
Бломстрандин	2,2	Н.опр.	Н.опр.	1,2 10 ⁻⁶	0,01	9 10 ⁻⁷	0,01
Эвксенит	2,3	Н.опр.	Н.опр.	8,6 10 ⁻⁶	0,08	6,6 10 ⁻⁶	0,06
Ксенотим	2,3	1 10 ⁻⁵	0,12	4,6 10 ⁻⁵	0,41	3,7 10 ⁻⁵	0,34
Иттриалит	4,06	Н.опр.	Н.опр.	2,1 10 ⁻⁵	0,33	1,6 10 ⁻⁵	0,26
Фергусонит	5,2	Н.опр.	Н.опр.	3,1 10 ⁻⁶	0,06	2,4 10 ⁻⁶	0,05
Всего		7 10 ⁻⁵	0,21	0,0064	8,16	0,0049	6,47

Таблица 3

Роль максиминералов как носителей Lu в верхней части континентальной коры

Минералы	Среднее содержание Lu в минералах, мас. %	Осадочный слой.		Гранито-гнейсовый слой.		Верхняя часть континентальной коры.	
		Содержание минералов, мас. %	Доли массы Lu, отн. %	Содержание минералов, мас. %	Доли массы Lu, отн. %	Содержание минералов, мас. %	Доли массы Lu, отн. %
Ортит	0,06	6 10 ⁻⁵	0,11	0,0063	7,13	0,0048	6
Бломстрандин	0,25	Н.опр.	Н.опр.	1,2 10 ⁻⁶	0,01	9 10 ⁻⁷	<0,01
Эвксенит	0,2	Н.опр.	Н.опр.	8,6 10 ⁻⁶	0,03	6,6 10 ⁻⁶	0,03
Чевкинит	0,45	Н.опр.	Н.опр.	5,5 10 ⁻⁷	<0,01	4,2 10 ⁻⁷	<0,01
Иттриалит	0,61	Н.опр.	Н.опр.	2,1 10 ⁻⁵	0,24	1,6 10 ⁻⁵	0,2
Ксенотим	0,7	1 10 ⁻⁵	0,22	4,6 10 ⁻⁵	0,66	3,7 10 ⁻⁵	0,58
Фергусонит	1,2	Н.опр.	Н.опр.	3,1 10 ⁻⁶	0,07	2,4 10 ⁻⁶	0,06
Сумма		7 10 ⁻⁵	0,33	0,0064	8,15	0,0049	6,87

Таблица 4

Доли массы Yb (отн. %), сконцентрированные в максиминералах континентальных пород осадочного слоя

Минералы	Осадочные породы		Вулканогенные породы		
	Пески и песчаники	В целом	Кислые	Средние	В целом
Ортит	<0,01 (7·10 ⁻⁸)	<0,01 (1,8·10 ⁻⁸)	3,6 (0,003)	0,15 (1·10 ⁻⁴)	0,54 (4·10 ⁻⁴)
Ксенотим	0,51 (4·10 ⁻⁵)	0,12 (1·10 ⁻⁵)	0,28 (3·10 ⁻⁵)	Н.опр.	0,04 (3,6·10 ⁻⁶)
Всего	0,51 (4·10 ⁻⁴)	0,12 (1·10 ⁻⁵)	3,88 (0,003)	0,15 (1·10 ⁻⁴)	0,58 (4·10 ⁻⁴)

Примечание. Здесь и в последующих таблицах в скобках – содержание минералов, %).

Таблица 5

Доли массы Lu (отн. %), сконцентрированные в максиминералах континентальных пород осадочного слоя

Минералы	Осадочные породы		Вулканогенные породы		
	Пески и песчаники	В целом	Кислые	Средние	В целом
Ортит	<0,01 (7·10 ⁻⁸)	<0,01 (1,8·10 ⁻⁸)	3,27 (0,003)	0,19 (1·10 ⁻⁴)	0,56 (4·10 ⁻⁴)
Ксенотим	0,93(4·10 ⁻⁵)	0,23 (1·10 ⁻⁵)	0,38 (3·10 ⁻⁵)	Н.опр.	0,07 (3,6·10 ⁻⁶)
Всего	0,93(4·10 ⁻⁵)	0,23 (1·10 ⁻⁵)	3,65 (0,003)	0,19 (1·10 ⁻⁴)	0,63 (4·10 ⁻⁴)

Таблица 6

Доли массы Yb (отн. %), сконцентрированные в максиминералах магматических пород гранитно-гнейсового слоя

Минералы	Граниты	Гранодиориты	Сиениты	Магматические породы в целом
Ортит	6(0,008)	2,5(0,003)	16,05(0,023)	4,7(0,0058)
Гадолинит	0,08(5·10 ⁻⁵)	Н.опр.	<0,01(3·10 ⁻⁶)	0,05(3·10 ⁻⁵)
Эвксенит	0,46(8·10 ⁻⁵)	Н.опр.	<0,01(8·10 ⁻⁸)	0,31(5·10 ⁻⁵)
Бломстрандин	0,05(8,7·10 ⁻⁶)	Н.опр.	1,69(3,3·10 ⁻⁴)	0,04(6,7·10 ⁻⁶)
Иттриалит	2,03(2·10 ⁻⁴)	Н.опр.	Н.опр.	1,32(1,2·10 ⁻⁴)
Ксенотим	1,15(0,0002)	0,02(3·10 ⁻⁶)	0,01(2,7·10 ⁻⁶)	0,81(1,3·10 ⁻⁴)
Чевкинит	<0,01 (1,5·10 ⁻⁶)	Н.опр.	0,93(0,0006)	0,01(3,2·10 ⁻⁶)
Фергусонит	0,2(1,5·10 ⁻⁵)	0,46(3,2·10 ⁻⁵)	0,05(3,8·10 ⁻⁶)	0,25(1,8·10 ⁻⁵)
Всего	9,97(0,0085)	2,98(0,003)	18,73(0,024)	7,49(0,0064)

Таблица 7

Доли массы Lu (отн. %), сконцентрированные в максиминералах магматических пород гранитно-гнейсового слоя

Минералы	Граниты	Гранодиориты	Сиениты	Магматические породы в целом
Ортит	5,33(0,008)	1,64(0,003)	11,5(0,023)	3,87(0,0058)
Бломстрандин	0,02(8,7·10 ⁻⁶)	Н.опр.	0,69(3,3·10 ⁻⁴)	0,02(6,7·10 ⁻⁶)
Эвксенит	0,18(8·10 ⁻⁵)	Н.опр.	<0,01(8·10 ⁻⁸)	0,11(5·10 ⁻⁵)
Чевкинит	0,01(1,5·10 ⁻⁶)	Н.опр.	2,25(6·10 ⁻⁴)	0,02(3,2·10 ⁻⁶)
Иттриалит	1,36(2·10 ⁻⁴)	Н.опр.	Н.опр.	0,81(1,2·10 ⁻⁴)
Ксенотим	1,56(2·10 ⁻⁴)	0,02(3·10 ⁻⁶)	0,02(2,7·10 ⁻⁶)	0,78(1,3·10 ⁻⁴)
Фергусонит	0,2(1,5·10 ⁻⁵)	0,35(3,2·10 ⁻⁵)	0,04(3,8·10 ⁻⁶)	0,24(1,8·10 ⁻⁵)
Всего	8,66(0,013)	2,01(0,003)	14,5(0,024)	5,85(0,0061)

Таблица 8

Доли массы Yb (отн. %), сконцентрированные в максиминералах континентальных метаморфических пород

Минералы	Параметаморфические породы			Ортометаморфические породы		
	Метапесчаники	Парасланцы	В целом	Гранито-гнейсы	Метарюлиты	В целом
Ортит	2,25 (0,0012)	9,6 (0,008)	8,86 (0,0071)	8,99 (0,0066)	6,3 (0,008)	6,9 (0,0056)
Ксенотим	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.	0,78 (7,5·10 ⁻⁵)	Н.опр.	0,59 (6,2·10 ⁻⁵)
Всего	2,25 (0,0012)	9,6 (0,008)	8,86 (0,0071)	9,77 (0,0067)	6,3 (0,008)	7,49 (0,0057)

Таблица 9

Доли массы Lu (отн. %), сконцентрированные в максиминералах континентальных метаморфических пород

Минералы	Параметаморфические породы			Ортометаморфические породы	
	Метапесчаники	Парасланцы	В целом	Гранито-гнейсы	В целом
Ортит	2,77 (0,0012)	8,89 (0,008)	8,52 (0,0071)	10,4 (0,0066)	8,62 (0,0056)
Ксенотим	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.	1,47 (7,5·10 ⁻⁵)	1,08 (6,2·10 ⁻⁵)
Всего	2,77 (0,0012)	8,89 (0,008)	8,52 (0,0071)	11,87 (0,0079)	9,7 (0,0067)

Обсуждение полученных данных

Корректность исходных литературных данных о содержании в горных породах: Yb – удовлетворительная, Lu – оставляет желать лучшего. Поэтому «недостаточность» массы Lu в континентальных осадочных породах вероятно не реальная, а обусловленная погрешностями исходных данных. Средние содержания Yb и особенно Lu в континентальных породах по приведенным данным в целом несколько больше чем по литературным. Сравним средние содержания Yb и Lu в верхней части континентальной коры мас. %: $2,5 \cdot 10^{-4}$ и $4,8 \cdot 10^{-5}$ (Григорьев, 2003); $2,2 \cdot 10^{-4}$ и $3,2 \cdot 10^{-5}$ (Тейлор, Мак-Леннан, 1988); $1,5 \cdot 10^{-4}$ и $2,7 \cdot 10^{-5}$ (Wedepohl, 1995).

Возможности сопоставления приведенных данных о роли максиминералов с опубликованными результатами изучения конкретных горных пород минимальные. Литературных данных по Yb относительно много. Однако в большинстве случаев они неполны и недостаточно корректны. Главные максиминералы, как правило, не упоминаются. Суммы долей масс Yb в учтенных совокупностях минералов составляют 26–148 % от его масс, установленных в изученных горных породах. Данных по Lu мало.

Иттербий. Из горных пород осадочного слоя наиболее изучены: гиалориолит (С-39) из Забайкалья (Таусон и др., 1984) и шшонит (STR-56) с острова Стромболи (Francalanci, 1989). Содержание Yb здесь $8,2 \cdot 10^{-4}$ и $3,6 \cdot 10^{-4}$ %. Максиминералы не установлены. Главные носители: стекло и основная масса. Из гранитоидов подробно изучен только гранодиорит из батолита Восточный Пенинсуляр Ренджес (Gromet, Silver, 1983) содержание Yb $1,12 \cdot 10^{-4}$ %. Максиминералы не обнаружены. Больше половины массы Yb находится в титаните. Сумма минерального баланса 148 отн. %. Во включениях шпинелевых перидотитов из вулканических шлаков Западной части ФРГ (Stosch, Seck, 1980) содержание Yb $1,9 \cdot 10^{-5}$ %. Максиминералы не установлены. Минерал-концентратор – клинопироксен. В нем сконцентрировано 51 % массы Yb. Сумма учтенных долей масс Yb в минералах – 90 %. Удовлетворительно изучены три пробы парасланцев из Сибири. Диопсид-скаполит-плагиоклазовые сланцы: 211-п и 191-п содержат $3,4 \cdot 10^{-4}$ % и $4,4 \cdot 10^{-4}$ % Yb (Петрова, Смирнова, 1982). Максиминералы не обнаружены. Главный ми-

нерал-концентратор – титанит (39 и 46 % массы Yb). Суммы балансов – 95 %. Плагиогнейс АБ-162 содержит $4,8 \cdot 10^{-4}$ % Yb (Макрыгина, Смирнова, 1984). Максиминералы не установлены. Почти весь Yb сконцентрирован в минералах-концентраторах: гранате, апатите и ортите. Сумма учтенных долей массы Yb – 103 отн. %. Представляют интерес результаты изучения проб мигматитов из Сибири: АБ-456 и АБ-7 (Макрыгина, Смирнова, 1984). Содержание Yb здесь 0,0014 и 0,003 мас. %. Почти вся масса Yb сконцентрирована в максиминералах: титаните (74 и 70 % массы Yb), цирконе и ортите. Суммы балансов 108 и 88 отн. %. В сибирском ортоамфиболите АБ-244 содержание Yb – $2,2 \cdot 10^{-4}$ % (Макрыгина, Смирнова, 1984). Максиминералы не установлены. Почти вся масса Yb сконцентрирована в минералах-концентраторах: гастингсита, титаните, апатите. В гранулите из Северо-западной Шотландии, содержащем $3,3 \cdot 10^{-4}$ % Yb его максиминералы не установлены. 50 % массы Yb сконцентрировано в гранате, остальная часть – преимущественно в клинопироксенах (Budzinski, 1990).

Лютеций. Представляют интерес данные о шшоните (STR-56) с острова Стромболи (Francalanci, 1989) и о включениях шпинелевых перидотитов из вулканических шлаков Западной части ФРГ (Stosch, Seck, 1980). Содержание Lu здесь соответственно: $7,2 \cdot 10^{-5}$ и $3,4 \cdot 10^{-6}$ %. Максиминералы не установлены. Суммы учтенных долей масс Lu 93 и 85 отн. %. В гранулите из Северо-западной Шотландии, содержащем $6,7 \cdot 10^{-5}$ % Lu его максиминералы не установлены. 54 % массы Lu сконцентрировано в гранате, остальная часть – преимущественно в пироксенах (Budzinski, 1990).

Таким образом, наши данные свидетельствуют о более значительной (чем это следует из литературы) роли редкоземельных минералов как носителей Yb и Lu. Полученные данные – очередное приближение к пониманию истинной ситуации в верхней части континентальной коры. Они нуждаются в детализации, уточнении, но тем не менее необходимы. Без них теряется всякая ориентация.

Выводы

Установлено, что в максиминералах сконцентрировано 6,47 % массы Yb. В том числе: в ортите – 5,74, в ксенотиме – 0,34, в иттриалите – 0,26, в эвксените – 0,06, в фергусоните –

0,05, в гадолините – 0,01, в блонстрандине – 0,01 %. В максиминералах сконцентрировано 6,87 % массы Lu. В том числе: в ортите – 6, в ксенотиме - 0,58, в иттриалите – 0,2, в фергусоните – 0,06, в эвксените 0,03 %. Эти цифры - минимально возможные. Роль максиминералов максимальная в сиенитах и гранитах.

Литература

1. **Budzinski H/** Di Bilanzierung von REE-gesteinsdaten mafischer granulite// Zeitschrift für Geologische Wissenschaften. 1990/ B. 18. H. 3. S. 211-225.