

© Д. чл. УАГН Н.А. Григорьев

## **МАКСИМИНЕРАЛЫ КАК НОСИТЕЛИ ЦЕРИЯ И ПРАЗЕОДИМА В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ**

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

© N.A. Grigor'ev

## **MAXIMINERALS AS CARRIERS OF CERIUM AND PRASEODYMIUM IN THE UPPER CONTINENTAL CRUST'S**

Автореферат

Роль максиминералов в качестве носителей Ce и Pr 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 11,96 % массы Ce. В том числе: в ортите – 5,64, в монаците – 5,06, в бастнезите – 1,26 %. В максиминералах сконцентрировано 12,06 % массы Pr. В том числе: в монаците – 5,98, в ортите – 4,86, в бастнезите – 1,21, в гадолините – 0,01%. Эти цифры - минимально возможные.

**Ключевые слова:** максиминерал, носитель, церий, празеодим, верхняя часть континентальной коры.

Abstract

The role of maxminerals as carriers of Ce and Pr in the upper continental crust's has been defined 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 11.96 % of masses Ce. In particular: in orthite – 5.64, in monazite – 5.06, in bastnasite – 1.26 %. In the maxminerals concentration 12.06 % of masses Pr. In particular: in monazite – 5.98, in orthite – 4.86, in bastnasite – 1.21 %, in gadolinite – 0.01%. These figures a minimal from possible

**Key words:** maxmineral, carrier, cerium, praseodymium, upper continental crust.

## **Введение**

Впервые определены доли масс Ce и Pr сконцентрированные в максиминералах континентальных горных пород и верхней части континентальной коры в целом.

Ce и Pr максимально концентрируются в цериевых минералах. Но высокое их содержание характерно также для минералов: иттриевых, ниобиевых, танталовых, циркониевых, титановых, урановых, ториевых, некоторых кальциевых. Повышенное содержание Ce и Pr часто встречается в гидроксилсодержащих цепочечных и листовых силикатах Fe и Mg. Граничные для цериевых и празеодимовых максиминералов содержания соответственно: Ce – 0,5 и Pr -0,06 мас. % (Григорьев, 1999). В данной работе учтены только обычные цериевые и празеодимовые максиминералы. Для определения их роли использованы опубликованные результаты количественных минералогических анализов континентальных пород. Первоисточники материалов, методика расчетов, списки использованной литературы опубликованы в этом же журнале в статьях посвященных Nb и Ta, Y и La.

## **Распределение масс Ce и Pr в совокупности континентальных горных пород**

Распределение Ce и Pr в верхней части континентальной коры почти соответствует требованиям геохимического баланса Их среднее содержание в совокупности континентальных осадочных пород (Ce – 0,0052 и Pr – 0,00068 %) несколько меньше того, которое могло быть унаследовано от гранитно-гнейсового слоя современного состава (Ce – 0,0055 и Pr – 0,00077, расчет изоалюминиевым методом). Но разница соизмерима с возможными погрешностями определений. Главные концентраторы: Ce и Pr – сиениты, а также граниты, гранодиориты, глины и глинистые сланцы (табл. 1). Главные носители - метаморфические породы гранитно-гнейсового слоя (66,3 % массы Ce и 71,7 % массы Pr).

## **Доли масс Ce и Pr, сконцентрированные в максиминералах**

Согласно полученным данным роль максиминералов как носителей Ce и Pr существенна в гранитно-гнейсовом слое и верхней части континентальной коры в целом (табл. 2, 3). Из горных пород осадочного слоя изучены только пески, кислые и 20

Таблица 1

Распределение массы Се и Рг в совокупности горных пород верхней части континентальной коры

Горные породы	Масса пород, отн. %	Среднее содержание, 10 <sup>-4</sup> %		Доли массы, отн. %	
		Се	Рг	Се	Рг
Пески и песчаники	5,11	39	4,3	3,2	2,5
Глины и глинистые сланцы	10,4	75	10	12,4	12
Карбонатные породы	3,85	12	2,6	0,7	1,2
Кремнистые породы	0,33	15	Н.опр.	0,1	Н.опр.
Эвапориты	0,26	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.
Кислые вулканиты	0,44	58	10	0,4	0,5
Средние вулканиты	1,13	50	4	0,9	0,5
Основные вулканиты	2,11	43	4,7	1,4	1,1
Граниты	8,21	72	7,4	9,4	7
Гранодиориты	3,38	75	6,4	4	2,5
Базиты	1,5	48	5	1,1	0,9
Сиениты	0,05	95	10	0,1	0,1
Ультрабазиты	0,05	8,6	1,4	<0,1	<0,1
Метапесчаники	2,92	37	5,2	1,7	1,7
Парагнейсы и парасланцы	30,56	76	11	36,8	38,6
Метаморфизованные карбонатные породы	1,13	51	4,6	0,9	0,6
Железистые породы	0,38	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.
Гранито-гнейсы	23,21	65	11	23,9	29,4
Метариолиты	0,66	43	3,1	0,5	0,2
Метаандезиты	1,03	69	Н.опр.	1,1	Н.опр.
Метабазиты	3,29	26	3,2	1,4	1,2
<b>Верхняя часть континентальной коры</b>	<b>100</b>	<b>63,07</b>	<b>8,7</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
Осадочные породы	19,95	51,65	6,82	16,4	15,7
Вулканиты осадочного слоя	3,68	47	5,12	2,7	2,1
Осадочный слой	23,23	50,92	6,55	19,1	17,8
Магматиты гранитно-гнейсового слоя	13,19	69,9	6,86	14,6	10,5
Параметаморфические породы	34,99	71,11	10,19	39,4	40,9
Ортометаморфические породы	28,19	60,07	9,5	26,9	30,8
Гранитно-гнейсовый слой	76,37	66,83	9,36	80,9	82,2

Таблица 2

Роль максиминералов как носителей Се в верхней части континентальной коры

Минералы	Среднее содержание Се в минералах, мас. %	Осадочный слой.		Гранитно-гнейсовый слой.		Верхняя часть континентальной коры.	
		Содержание минералов, мас. %	Доли массы Се, отн. %	Содержание минералов, мас. %	Доли массы Се, отн. %	Содержание минералов, мас. %	Доли массы Се, отн. %
Уранинит	0,8	9,3 10 <sup>-7</sup>	<0,01	8,6 10 <sup>-6</sup>	<0,01	6,6 10 <sup>-6</sup>	<0,01
Бломстрандин	1,2	Н.опр.	Н.опр.	1,2 10 <sup>-6</sup>	<0,01	9 10 <sup>-7</sup>	<0,01
Пироклор	1,4	Н.опр.	Н.опр.	1,3 10 <sup>-6</sup>	<0,01	1 10 <sup>-6</sup>	<0,01
Иттриалит	1,8	Н.опр.	Н.опр.	2,1 10 <sup>-5</sup>	0,01	1,6 10 <sup>-5</sup>	<0,01
Эвдиалит	2,7	Н.опр.	Н.опр.	1,5 10 <sup>-5</sup>	0,01	1,1 10 <sup>-5</sup>	<0,01
Фергусонит	3,8	Н.опр.	Н.опр.	3,1 10 <sup>-6</sup>	<0,01	2,4 10 <sup>-6</sup>	<0,01
Гадолинит	4,5	Н.опр.	Н.опр.	5,2 10 <sup>-6</sup>	<0,01	4 10 <sup>-7</sup>	<0,01
Ринколит	6,7	Н.опр.	Н.опр.	6,9 10 <sup>-9</sup>	<0,01	5,3 10 <sup>-9</sup>	<0,01
Ортит	7,4	6 10 <sup>-5</sup>	0,09	0,0063	6,96	0,0048	5,64
Лопарит	14	Н.опр.	Н.опр.	1,3 10 <sup>-6</sup>	<0,01	1 10 <sup>-6</sup>	<0,01
Чевкинит	18,1	Н.опр.	Н.опр.	5,5 10 <sup>-7</sup>	<0,01	4,2 10 <sup>-7</sup>	<0,01
Монацит	24,5	4,6 10 <sup>-5</sup>	0,22	0,0016	5,85	0,0013	5,06
Бастнезит	24,9	Н.опр.	Н.опр.	4,2 10 <sup>-4</sup>	1,56	3,2 10 <sup>-4</sup>	1,26
Рабдофан	27,6	Н.опр.	Н.опр.	4,3 10 <sup>-7</sup>	<0,01	3,3 10 <sup>-7</sup>	<0,01
Вейншенкит	28,1	Н.опр.	Н.опр.	4,8 10 <sup>-8</sup>	<0,01	3,7 10 <sup>-8</sup>	<0,01
Всего		1 10 <sup>-4</sup>	0,31	0,0084	14,39	0,0065	11,96

средние вулканиты. Роль максиминералов значительная только в кислых вулканитах (табл. 4, 5). В гранитно-гнейсовом слое роль максиминералов максимальная в сиенитах и гранитах (табл. 6, 7). Среди метаморфических пород максимальной ролью максиминералов характеризуются гранито-гнейсы и метариолиты (табл. 8, 9). В дополнение к данным таблиц 8 и 9 отметим, что в метабазитах установлен монацит (среднее содержание 4 10<sup>-8</sup> %). Но сконцентрированные в нем доли масс Се и Рг <0,01%.

#### Обсуждение полученных данных

Литературные данные о вариациях содержаний Се и Рг в горных породах относятся к числу наиболее надежных. Данные автора о среднем содержании Се и Рг в континентальных породах (Григорьев, 2003) подробнее имевшихся раньше. Но в целом они близки к литературным. Сравним средние содержания Се и Рг в верхней части континентальной коры мас. %:

0,0026 и 0,0032 (Григорьев, 2003); 0,0022 и 0,003 (Тейлор, Мак-Леннан, 1988); 0,0021 и 0,0032 (Wedepohl, 1995). Поэтому вывод о некоторой недостаточности этих элементов в континентальных осадочных породах вероятно корректен.

Таблица 3  
Роль максиминералов как носителей Рг в верхней части континентальной коры

Минералы	Среднее содержание Рг в минералах, мас. %	Осадочный слой		Гранитно-гнейсовый слой		Верхняя часть континентальной коры	
		Содержание минералов, мас. %	Доли массы Рг, отн. %	Содержание минералов, мас. %	Доли массы Рг, отн. %	Содержание минералов, мас. %	Доли массы Рг, отн. %
Бломстрандин	0,07	Н.опр.	Н.опр.	$1,2 \cdot 10^{-6}$	<0,01	$9 \cdot 10^{-7}$	<0,01
Иттриалит	0,23	Н.опр.	Н.опр.	$2,1 \cdot 10^{-5}$	0,01	$1,6 \cdot 10^{-5}$	<0,01
Ортит	0,88	$6 \cdot 10^{-5}$	0,08	0,0063	5,9	0,0048	4,86
Фергусонит	1,1	Н.опр.	Н.опр.	$3,1 \cdot 10^{-6}$	<0,01	$2,4 \cdot 10^{-6}$	<0,01
Чевкинит	1,68	Н.опр.	Н.опр.	$5,5 \cdot 10^{-7}$	<0,01	$4,2 \cdot 10^{-7}$	<0,01
Гадолинит	2,3	Н.опр.	Н.опр.	$5,2 \cdot 10^{-6}$	0,01	$4 \cdot 10^{-6}$	0,01
Бастнезит	3,3	Н.опр.	Н.опр.	$4,2 \cdot 10^{-4}$	1,47	$3,2 \cdot 10^{-4}$	1,21
Монацит	4	$4,6 \cdot 10^{-5}$	0,28	0,0016	6,81	0,0013	5,98
Всего		$1,06 \cdot 10^{-4}$	0,36	0,0084	14,2	0,0065	12,06

Таблица 4

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

Минералы	Осадочные породы		Вулканогенные породы		
	Пески и песчаники	В целом	Кислые	Средние	В целом
Уранинит	Н.опр.	Н.опр.	$0,01(5 \cdot 10^{-5})$	Н.опр.	< $0,01(6 \cdot 10^{-6})$
Ортит	< $0,01(7 \cdot 10^{-8})$	< $0,01(1,8 \cdot 10^{-8})$	3,83(0,003)	$0,15(1 \cdot 10^{-4})$	$0,63(4 \cdot 10^{-4})$
Монацит	$0,82(1,3 \cdot 10^{-4})$	$0,16(3,3 \cdot 10^{-5})$	4,22(0,001)	Н.опр.	$0,63(1,2 \cdot 10^{-4})$
Всего	$0,82(1,3 \cdot 10^{-4})$	$0,16(3,3 \cdot 10^{-5})$	8,06(0,0041)	$0,15(1 \cdot 10^{-4})$	$1,26(5 \cdot 10^{-4})$

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

Таблица 5  
Доли массы Рг (отн. %), сконцентрированные в максиминералах континентальных пород осадочного слоя

Минералы	Осадочные породы		Вулканогенные породы		
	Пески и песчаники	В целом	Кислые	Средние	В целом
Уранинит	Н.опр.	Н.опр.	< $0,01(5 \cdot 10^{-5})$	Н.опр.	< $0,01(6 \cdot 10^{-6})$
Ортит	< $0,01(7 \cdot 10^{-8})$	< $0,01(1,8 \cdot 10^{-8})$	2,64(0,003)	$0,22(1 \cdot 10^{-4})$	$0,69(4 \cdot 10^{-4})$
Монацит	$1,21(1,3 \cdot 10^{-4})$	$0,19(3,3 \cdot 10^{-5})$	4(0,001)	Н.опр.	$0,94(1,2 \cdot 10^{-4})$
Всего	$1,21(1,3 \cdot 10^{-4})$	$0,19(3,3 \cdot 10^{-5})$	6,64(0,004)	$0,22(1 \cdot 10^{-4})$	$1,63(1,6 \cdot 10^{-4})$

Таблица 6

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

Минералы	Граниты	Гранодиориты	Сиениты	Магматические породы в целом
Уранинит	$0,01(7,8 \cdot 10^{-5})$	Н.опр.	Н.опр.	$0,01(4,9 \cdot 10^{-5})$
Бломстрандин	< $0,01(8,7 \cdot 10^{-6})$	Н.опр.	$0,04(3,3 \cdot 10^{-4})$	< $0,01(6,7 \cdot 10^{-6})$
Пироклор	< $0,01(5 \cdot 10^{-6})$	< $0,01(2 \cdot 10^{-6})$	$0,01(1 \cdot 10^{-4})$	< $0,01(4 \cdot 10^{-6})$
Иттриалит	$0,05(2 \cdot 10^{-4})$	Н.опр.	Н.опр.	$0,03(1,2 \cdot 10^{-4})$
Эвдиалит	Н.опр.	Н.опр.	6,54(0,023)	$0,03(8,7 \cdot 10^{-5})$
Фергусонит	$0,01(1,5 \cdot 10^{-5})$	$0,02(3,2 \cdot 10^{-5})$	< $0,01(3,8 \cdot 10^{-6})$	$0,01(1,8 \cdot 10^{-5})$
Гадолинит	$0,03(5 \cdot 10^{-5})$	Н.опр.	< $0,01(3 \cdot 10^{-6})$	$0,02(3 \cdot 10^{-5})$
Ринколит	< $0,01(7 \cdot 10^{-8})$	Н.опр.	Н.опр.	< $0,01(4 \cdot 10^{-8})$
Ортит	8,22(0,008)	2,96(0,003)	17,92(0,023)	6,13(0,0058)
Лопарит	< $0,01(1,8 \cdot 10^{-6})$	< $0,01(6 \cdot 10^{-7})$	2,51(0,0017)	$0,02(7,7 \cdot 10^{-6})$
Чевкинит	< $0,01(1,5 \cdot 10^{-6})$	Н.опр.	$1,14(6 \cdot 10^{-4})$	$0,01(3,2 \cdot 10^{-6})$
Монацит	$14,63(0,0043)$	$1,31(4 \cdot 10^{-4})$	6,19(0,0024)	9,8(0,0028)
Бастнезит	$1,63(4,7 \cdot 10^{-4})$	Н.опр.	Н.опр.	$1,03(2,9 \cdot 10^{-4})$
Рабдофан	$0,02(4 \cdot 10^{-6})$	Н.опр.	Н.опр.	$0,01(2,5 \cdot 10^{-6})$
Вейншенкит	< $0,01(4,5 \cdot 10^{-7})$	Н.опр.	Н.опр.	< $0,01(2,8 \cdot 10^{-7})$
Всего	24,6(0,0131)	4,29(0,0034)	34,35(0,052)	17,1(0,009)

Исходные данные о вариациях содержаний аксессуарных минералов в горных породах, как отмечалось в предшествующих статьях, преуменьшены. Поэтому приведенные здесь оценки роли максиминералов как носителей Се и Рг следует считать минимально возможными.

Возможности сопоставления полученных данных с результатами изучения распределения Се и Рг по минералам горных пород – минимальные. В большинстве случаев или данных не достаточно для расчета минеральных балансов, или велики погрешности определения содержаний Се и Рг в минералах. Автором учтено всего 9 минеральных балансов (Се – 7 и Рг – 2). Это балансы, где суммы долей масс Се и Рг, сконцентрированных в минералах не выходят за пределы 90 – 110 % от масс этих элементов, установленных при анализах горных пород.

**Церий.** В юрском латите из Забайкалья (Геохимия., 1984) содержание Се 0,009%, максиминералы не обнаружены. В двух пробах шошонотов с острова Стромболи, содержащих 0,012 и 0,0102 % Се, его максиминералы не обнаружены. В кварцево-диопсидовом и диопсид-скаполитовом плаггиосланцах из Алданской флогопитоносной провинции (Петрова, Смирнова, 1982) содержание Се 0,0072 и 0,01%, максиминералы не уста-

новлены. В мигматите и плагиогнейсе из Северного Прибайкалья (Макрыгина, Смирнова, 1984) содержание Се 0,018 и 0,011 %, максиминералы: ортит (главный) и апатит (второстепенный). В максиминералах сконцентрировано соответственно 78 и 57 % масс Се.

Таблица 7

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

Минералы	Граниты	Гранодиориты	Сиениты	Магматические породы в целом
Бломстрандин	<0,01(8,7 10 <sup>-6</sup> )	Н.опр.	0,02(3,3 10 <sup>-4</sup> )	<0,01(6,7 10 <sup>-6</sup> )
Иттриалит	0,06(2 10 <sup>-4</sup> )	Н.опр.	Н.опр.	0,04(1,2 10 <sup>-4</sup> )
Ортит	9,51(0,008)	4,13(0,003)	20,2(0,023)	7,4(0,0058)
Фергусонит	0,02(1,5 10 <sup>-5</sup> )	0,06(3,2 10 <sup>-5</sup> )	<0,01(3,8 10 <sup>-6</sup> )	0,03(1,8 10 <sup>-5</sup> )
Чевкинит	<0,01(1,5 10 <sup>-6</sup> )	Н.опр.	1,01(6 10 <sup>-4</sup> )	0,01(3,2 10 <sup>-6</sup> )
Гадолинит	0,16(5 10 <sup>-5</sup> )	Н.опр.	0,01(3 10 <sup>-6</sup> )	0,1(3 10 <sup>-5</sup> )
Бастнезит	2,1(4,7 10 <sup>-4</sup> )	Н.опр.	Н.опр.	1,39(2,9 10 <sup>-4</sup> )
Монацит	23,24(0,0043)	2,5(4 10 <sup>-4</sup> )	9,6(0,0024)	16,2(0,0028)
Всего	35,1(0,013)	6,68(0,0033)	30,9(0,0263)	25,2(0,009)

Таблица 8

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

Минералы	Параметаморфические породы			Ортометаморфические породы		
	Метапесчаники	Парасланцы	В целом	Гранитогнейсы	Метариолиты	В целом
Уранинит	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.	<0,01(6 10 <sup>-7</sup> )	Н.опр.	<0,01(5 10 <sup>-7</sup> )
Пироклор	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.	<0,01(2 10 <sup>-6</sup> )	Н.опр.	<0,01(2 10 <sup>-6</sup> )
Ортит	2,4(0,0012)	7,79(0,008)	7,4(0,0071)	7,51(0,0066)	13,77(0,008)	6,91(0,0056)
Монацит	1,99(3 10 <sup>-4</sup> )	2,9(9 10 <sup>-4</sup> )	2,76(8 10 <sup>-4</sup> )	10,18(0,0027)	0,01(2 10 <sup>-6</sup> )	8,98(0,0022)
Бастнезит	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.	4,6(0,0012)	Н.опр.	4,15(0,001)
Всего	4,39(0,0015)	10,69(0,0089)	10,16(0,0079)	22,29(0,0098)	13,78(0,008)	20,04(0,0088)

**Празеодим.** В.А. Макрыгина и В.В. Смирнова (1984) изучили две пробы мигматитов из Северного Прибайкалья с содержанием Рг 0,003-0,0044 %. В обоих максиминерал – ортит. В нем сконцентрировано 71 и 40 % массы Се.

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

Минералы	Параметаморфические породы			Ортометаморфические породы		
	Метапесчаники	Парасланцы	В целом	Гранитогнейсы	Метариолиты	В целом
Ортит	2,03(0,0012)	6,4(0,008)	6,25(0,0071)	5,28(0,0066)	22,7(0,008)	5,19(0,0056)
Бастнезит	Н.опр.	Н.опр.	Н.опр.	3,6(0,0012)	Н.опр.	3,47(0,001)
Монацит	2,31(3 10 <sup>-4</sup> )	3,27(9 10 <sup>-4</sup> )	3,2(8 10 <sup>-4</sup> )	9,82(0,0027)	0,03(2 10 <sup>-6</sup> )	9,26(0,0022)
Всего	4,34(0,0015)	9,67(0,0089)	9,45(0,0079)	18,7(0,0105)	22,73(0,008)	17,92(0,0088)

Сопоставление минеральных балансов Се и Рг позволяет предполагать, что значительная роль максиминералов характерна для горных пород, характеризующихся с повышенным содержанием Се и Рг. В целом же очевидно, что немногочисленные минеральные балансы отражают в основном индивидуальные особенности изученных горных пород.

### Выводы

Установлено, что в верхней части континентальной коры в максиминералах сконцентрировано 11,96 % массы Се. В том числе: в ортите – 5,64, в монаците – 5,06, в бастнезите – 1,26 %. В максиминералах сконцентрировано 12,06 % массы Рг. В том числе: в монаците – 5,98, в ортите – 4,86, в бастнезите – 1,21. Эти цифры - минимально возможные. Роль максиминералов как носителей Се и Рг максимальная в гранитах, сиенитах и гранитогнейсах. Она значительна также в парасланцах и в кислых вулканитах. Новые данные нуждаются в уточнении. Пока же приведенные цифры следует рассматривать как минимально возможные.

### Литература

1. **Francalanci L.** Trace element partition coefficients for minerals in shoshonitic and calc-alkaline rocks from Stromboli Island (Aeolian Arc) // Neues Jahrbuch für Mineralogie. Stuttgart, 1989/ В. 160. Н. 3. S. 229-247.