

УДК 552.321.6:553.493:553.061.12(282.247.42)

Прудников И.А. (ФГБУ «ВИМС»)

## ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ ДУНИТОВ АЛЬПИНО-ТИПНЫХ МАССИВОВ УРАЛА НА ОСНОВЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Изучено распределение содержаний редкоземельных элементов на представительной выборке дунитов из альпинотипных массивов Урала, относящихся к трем различным по составу типам океанической литосферы — лерцолитовому, гарцбургитовому и дунит-гарцбургитовому. Распределение редкоземельных элементов характеризует развитие в офиолитовых массивах девяти типов дунитов, сформированных в ходе совместно протекавших процессов деплетирования, рефертилизации (мантийного метасоматоза) и магматической дифференциации фильтрующихся расплавов. Показано, что дуниты различного генезиса уверенно дискриминируются на диаграмме  $LaN/YbN$  к  $\Sigma P3ЭN$ . **Ключевые слова:** офиолитовые массивы, Нурали, Рай-Из, Войкаро-Сыньинский массив, дуниты, гипербазиты, редкоземельные элементы, мантийный метасоматоз, рефертилизация, деплетирование, генезис ультрабазитов.*

Prudnikov I.A. (VIMS)

## GENETIC TYPIFICATION OF DUNITES OF ALPINOTYPE MASSIFS BASED ON THE NATURE OF THE DISTRIBUTION OF RARE EARTH ELEMENTS

*The distribution of rare-earth elements on a representative batch of samples from of dunites of alpinotype ophiolites of the Urals belonging to different types of oceanic lithosphere — lherzolite, harzburgite and dunite-harzburgite — is studied. The distribution of rare-earth elements characterizes the development in the ophiolite massifs of nine types of dunites formed during the processes of depletion, refertilization (mantle metasomatism) and magmatic differentiation of percolated melt. It is shown that dunites of various genesis are rather confidently discriminated on the diagram  $LaN/YbN$  to  $\Sigma REEN$ . **Keywords:** ophiolite massifs, Nurali, Rai-iz, Voikaro-Synynsky massif, dunites, ultrabasic rocks, rare earth elements, mantle metasomatism, refertilization, depletion, genesis of ultrabasites.*

### Введение

Анализ распределения редкоземельных элементов широко используется при изучении генетических особенностей магматических пород и реконструкции их геодинамических обстановок формирования [6, 10].

Основное внимание в этом вопросе уделяется изучению эффузивных и интрузивных пород и в меньшей степени пород мантии. Особый интерес вызывает изучение генетических особенностей формирования мантийных дунитов, так как с ними связаны промышленные скопления подиформных хромитов высокого качества.

На данный момент для дунитов предложены три основных механизма образования [28].

1. Остаточные (реститогенные) дуниты, образовавшиеся после частичного плавления мантийных перидотитов. Формирование реститогенных дунитов происходит при высоких степенях плавления (более 20 %) с полным истощением перидотитов пироксенами и образованием тугоплавкого оливинового или шпинель-оливинового остатка.

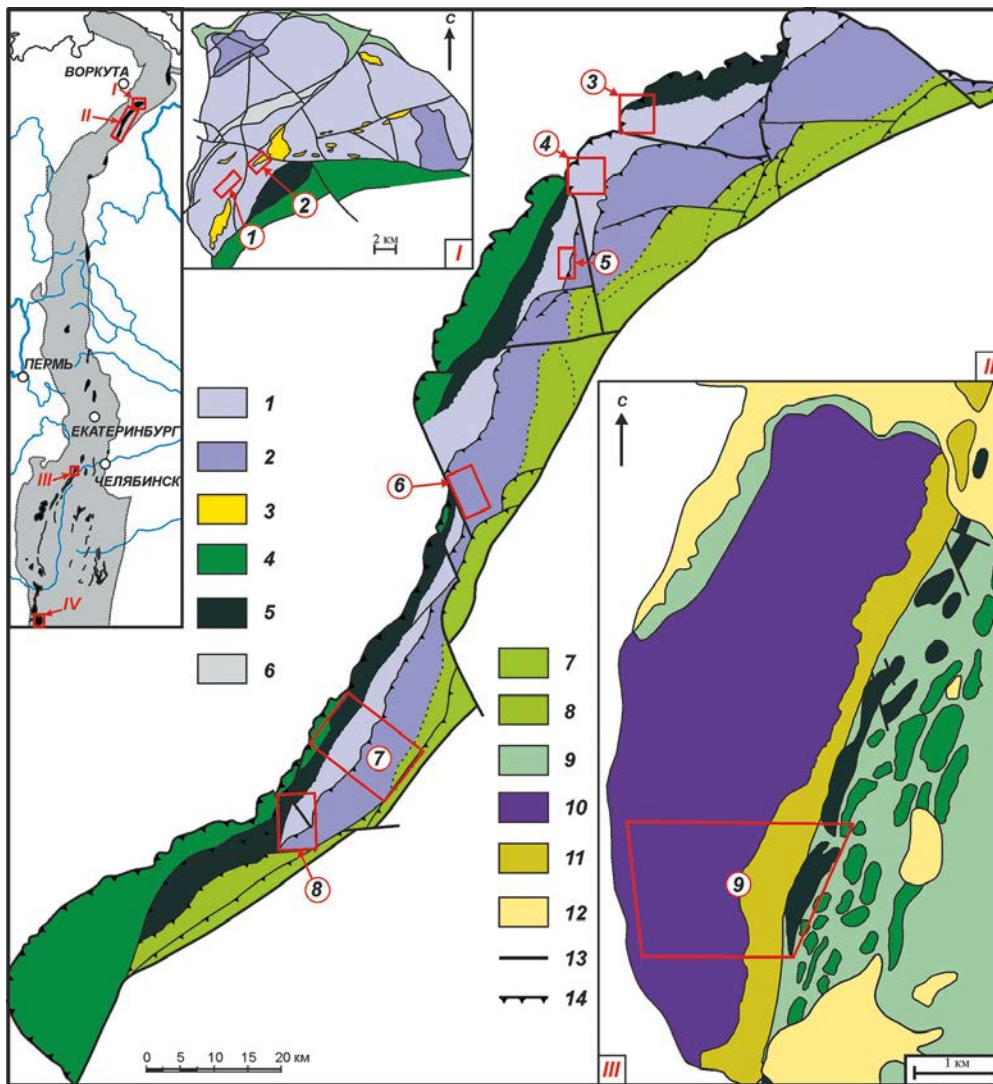
2. Кумулятивные (магматогенные) дуниты, образованные за счет фракционирования оливина из базитовых и базит-ультрабазитовых расплавов на ранних этапах кристаллизационной дифференциации.

3. Дуниты замещения (метасоматические), являющиеся продуктом реакции между пироксеносодержащим перидотитом и насыщенной оливином магмой. Образование метасоматических дунитов замещения происходит при реакционном взаимодействии фильтрующихся расплавов и вмещающей мантии, в ходе которого осуществляется инконгруэнтное плавление пироксенов с кристаллизацией дополнительного объема оливина. В конечном итоге подобный процесс приводит к образованию практически мономинеральных дунитов.

Предложенные генетические механизмы образования дунитов должны отражаться в распределении редкоземельных элементов, т.к. последние чутко реагируют на процессы плавления и эволюцию магматических расплавов.

Целью данного исследования является установление особенностей распределения редкоземельных элементов в дунитах мантии и разработка на этой основе их генетической типизации. Особое внимание уделяется восстановлению природных закономерностей этого распределения в сравнении с теоретическими представлениями.

Для решения данной задачи была исследована крупная выборка дунитов из различных офиолитовых массивов Полярного и Южного Урала. В выборке участвовали породы Кемпирсайского массива, массивов Нурали, Рай-Из и Войкаро-Сыньинского — наиболее крупных и типовых альпинотипных массивов Урала (рис. 1). Исследованные дуниты характеризуют различные структурно-вещественные комплексы (СВК), слагающие разрезы океанической литосферы. Среди опробованных СВК лерцолитовый, дунит-гарцбургитовый и гарцбургитовый, содержащие хромовые руды



**Рис. 1. Карты-схемы рассмотренных офиолитовых массивов Урала с указанием детальных участков исследования. Массивы: I — Рай-Из (геологическое строение по [14] с упрощениями), II — Войкаро-Сыньинский, III — Нуралинский (геологическое строение по [8]), IV — Кемпирсайский. Детальные участки (цифры в кружках): 1 — месторождение Центральное, 2 — месторождение Западное, 3 — Юньягинский, 4 — Хойлинский, 5 — Егартинский, 6 — Погурейский, 7 — Центрально-Лаптапайский, 8 — Южно-Лаптапайский, 9 — Южно-Нуралинский. Структурно-вещественные комплексы: 1 — дунит-гарцбургитовый, 2 — гарцбургитовый, 3 — дунитовые тела, 4 — габбровый, 5 — дунит-верлит-клинопироксенитовый, 6 — метаморфический (Центральная зона метаморфизма массива Рай-Из), 7 — габбровый восточного склона Войкаро-Сыньинского массива, 8 — дунит-верлит(?)—габбровый, 9 — серпентинитовый меланж, 10 — лерцолитовый, 11 — «краевых» дунитов, 12 — четвертичные образования, 13 — разломы, 14 — надвиги**

различного состава (глиноземистые, среднехромистые и высокохромистые) и масштабов оруденения, от мелких проявлений до крупных месторождений (Западное, Центральное (Рай-Из) и Восход (Кемпирсай)).

#### Методы исследования

Содержание редкоземельных элементов (РЗЭ, REE) было определено в 372 образцах дунитов из различных структурно-вещественных комплексов офиолитовых массивов Урала. Из них: 327 анализов авторские, 29 анализов заимствовано из работы [4], 6 — из [15] и 10 — из [21]. Заимствованные данные позволили более детально охарактеризовать массивы Рай-Из и Кемпирсай, содержащие крупные промышленные месторождения качественных высокохромистых руд.

Пробоотбор осуществлялся штупным способом из коренных обнажений и горных выработок. Проба составляла массой не менее 100 г, при этом особое внимание уделялось свежести пород. В дальнейшем пробы дробились, истирались и квартовались с формированием конечной навески в 50 г размерностью 300 меш.

Анализ содержания РЗЭ проводился в валовых пробах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе фирмы «Thermo Fisher Scientific» (США) модификации ICAP Qc. Анализы

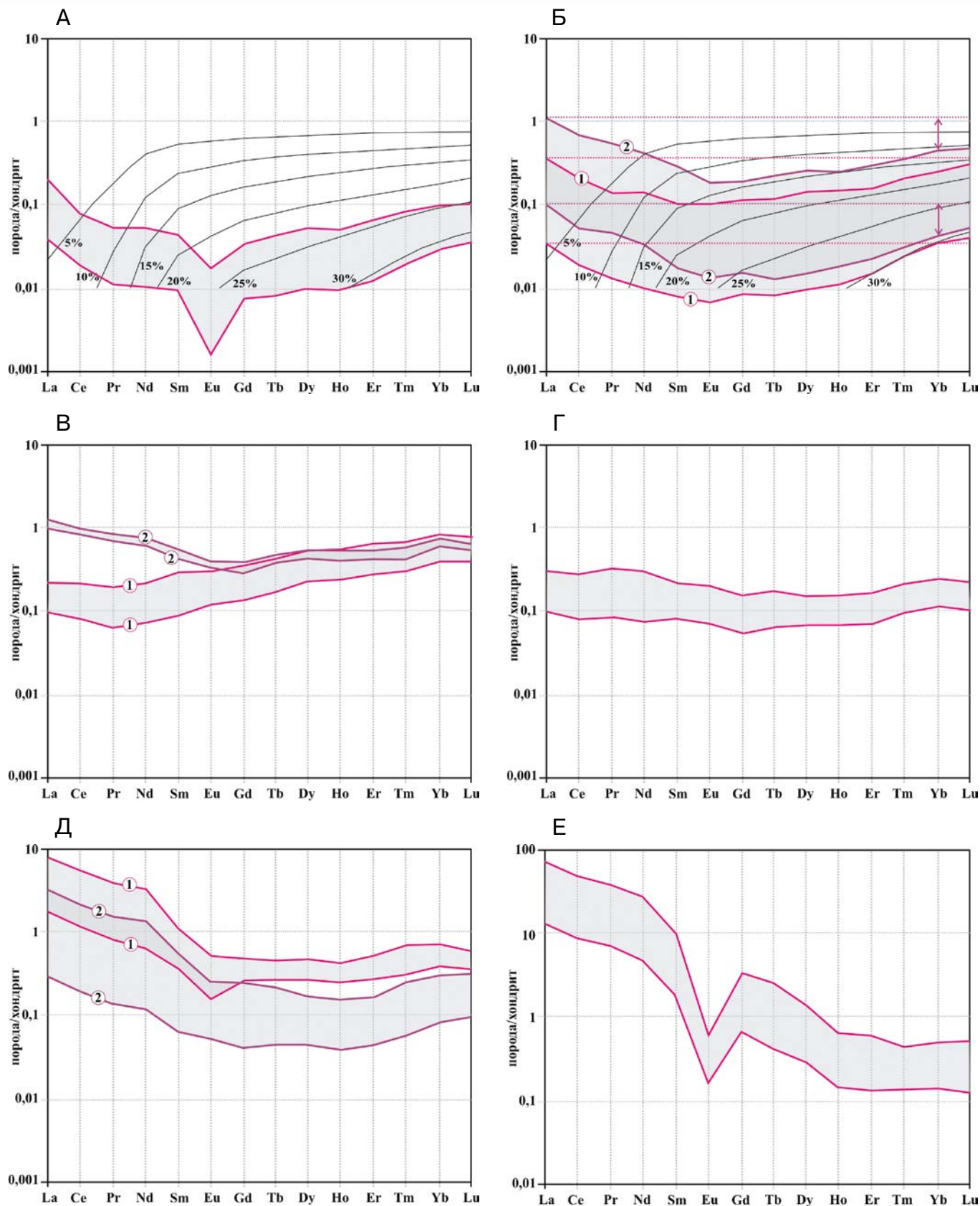
были проведены в аналитической лаборатории ФГБУ «ВИМС» согласно методике НСАМ № 499 АЭС/МС для анализов III категории точности. Пороговые значения определения содержания редкоземельных элементов оставляли 0,01 ppm.

**Обработка данных.** Полученные данные содержания редкоземельных элементов нормализовались относительно состава углистого хондрита (С1 хондрит) по [27].

#### Результаты анализа

Полученные данные позволили выделить по форме графиков, отражающих относительные вариации содержания РЗЭ, девять типов дунитов (рис. 2, табл. 1):

- 1) U(V, W)-образный (обедненный) (рис. 2 Б(1));
- 2) U(V, W)-образный (обогащенный) (рис. 2 Б(2));
- 3) U-образный с отрицательной Eu аномалией (рис. 2 А);
- 4) восходящий (рис. 2 В(1));
- 5) нисходящий (обогащенный) (рис. 2 Д(1));
- 6) нисходящий (обедненный) (рис. 2 Д(2));
- 7) нисходящий (умеренный) (рис. 2 В(2));
- 8) нисходящий с отрицательной Eu аномалией (ультраобогащенный) (рис. 2 Е);
- 9) субхондритовый (рис. 2 Г).



**Рис. 2. Основные формы кривых распределения РЗЭ в дунитах различных массивов Урала:** А — дуниты с U-образным распределением и отрицательной Eu аномалией; Б — дуниты с U-образным распределением обедненные (1) и обогащенные (2); В — дуниты с восходящим (1) и нисходящим умеренным (2) распределением; Г — дуниты с субхондритовым распределением; Д — дуниты с нисходящим распределением обогащенные (1) и обедненные (2); Е — дуниты ультраобогатенные с нисходящим распределением и отрицательной Eu аномалией. Серым цветом отмечены поля вариации содержаний РЗЭ. Кривые степеней частичного плавления лерцолита по [24]

Нормализованные на **С1** хондрит содержания **РЗЭ** в дунитах с различными формами кривых

Содержание	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	<b>нисходящий обедненный (n=36)</b>													
Среднее	1,313	0,819	0,632	0,504	0,224	0,126	0,125	0,110	0,102	0,090	0,102	0,156	0,177	0,161
Максимальное	3,200	2,046	1,449	1,336	0,557	0,250	0,252	0,211	0,241	0,159	0,214	0,317	0,416	0,310
Минимальное	0,273	0,119	0,122	0,062	0,060	0,048	0,028	0,031	0,032	0,020	0,038	0,030	0,050	0,052
<b>нисходящий обогащенный (n=13)</b>														
Среднее	3,754	2,699	1,959	1,646	0,633	0,300	0,321	0,302	0,338	0,284	0,339	0,469	0,547	0,426
Максимальное	7,281	5,060	3,811	3,112	1,057	0,479	0,472	0,450	0,464	0,418	0,495	0,741	0,777	0,594
Минимальное	1,717	1,074	0,792	0,626	0,371	0,162	0,197	0,126	0,279	0,152	0,270	0,273	0,359	0,226
<b>субхондритовый (n=6)</b>														
Среднее	0,191	0,149	0,160	0,154	0,138	0,119	0,099	0,114	0,115	0,101	0,120	0,149	0,177	0,150
Максимальное	0,299	0,276	0,322	0,301	0,220	0,195	0,149	0,171	0,147	0,153	0,163	0,204	0,246	0,206
Минимальное	0,097	0,066	0,088	0,066	0,091	0,072	0,052	0,067	0,068	0,067	0,076	0,096	0,117	0,105
<b>U-образный с Eu минимумом (n=8)</b>														
Среднее	0,079	0,037	0,026	0,023	0,019	0,005	0,015	0,016	0,024	0,019	0,029	0,048	0,066	0,059
Максимальное	0,181	0,073	0,049	0,051	0,042	0,017	0,033	0,039	0,055	0,039	0,062	0,077	0,092	0,094
Минимальное	0,037	0,018	0,011	0,010	0,009	0,002	0,008	0,007	0,010	0,006	0,011	0,029	0,043	0,028
<b>восходящий (n=6)</b>														
Среднее	0,142	0,136	0,144	0,156	0,192	0,204	0,227	0,280	0,368	0,365	0,456	0,470	0,617	0,570
Максимальное	0,227	0,226	0,192	0,226	0,295	0,297	0,344	0,429	0,558	0,575	0,681	0,667	0,882	0,742
Минимальное	0,103	0,078	0,060	0,073	0,092	0,126	0,142	0,178	0,245	0,246	0,282	0,303	0,416	0,390
<b>нисходящий ультраобогащенный с Eu минимумом (n=6)</b>														
Среднее	45,928	31,534	24,889	17,193	6,024	0,349	2,208	1,639	0,938	0,441	0,410	0,333	0,356	0,335
Максимальное	73,000	49,524	39,833	27,241	9,619	0,514	3,500	2,653	1,452	0,658	0,619	0,424	0,512	0,516
Минимальное	13,567	8,964	7,500	5,086	1,905	0,176	0,688	0,449	0,306	0,151	0,143	0,209	0,188	0,177
<b>U-образный обедненный (n=151)</b>														
Среднее	0,121	0,075	0,053	0,048	0,034	0,034	0,043	0,038	0,043	0,044	0,053	0,089	0,113	0,109
Максимальное	0,340	0,233	0,200	0,198	0,124	0,145	0,145	0,216	0,148	0,164	0,205	0,421	0,347	0,510
Минимальное	0,032	0,016	0,002	0,004	0,004	0,005	0,006	0,001	0,003	0,004	0,005	0,018	0,035	0,008
<b>U-образный обогащенный (n=136)</b>														
Среднее	0,330	0,192	0,140	0,117	0,065	0,057	0,074	0,066	0,074	0,075	0,085	0,133	0,149	0,148
Максимальное	1,106	0,612	0,483	0,384	0,252	0,203	0,242	0,204	0,232	0,219	0,271	0,317	0,424	0,387
Минимальное	0,050	0,020	0,017	0,013	0,004	0,004	0,003	0,006	0,005	0,007	0,008	0,015	0,021	0,023
<b>нисходящий умеренный (n=3)</b>														
Среднее	1,089	0,900	0,767	0,686	0,490	0,360	0,323	0,415	0,475	0,466	0,483	0,485	0,669	0,591
Максимальное	1,197	0,939	0,817	0,721	0,533	0,378	0,369	0,469	0,510	0,507	0,514	0,545	0,729	0,613
Минимальное	1,010	0,840	0,700	0,616	0,438	0,338	0,281	0,388	0,419	0,411	0,429	0,424	0,594	0,548

**1. Дуниты с U-образным (V-образным, W-образным) распределением РЗЭ** (рис. 2 Б). *Характер распределения РЗЭ.* Для U-образного графика распределения характерно относительное обеднение средними РЗЭ преимущественно в ряду Nd-Ho, формирующих прогиб при примерно равных повышенных содержаниях легких (La-Pr) и тяжелых (Er-Lu) лантаноидов, характеризующихся симметричным распределением. Обычно прогиб в кривой распределения плавный и охватывает

все средние лантаноиды, но в ряде случаев отмечается несколько больший дефицит одного из элементов в ряду Sm-Tb и тогда график приобретает характерную V-образную форму. Напротив, при повышенном содержании отдельных элементов в ряду Sm-Gd отмечается развитие W-образных графиков распределения.

Среди классических U-образных графиков можно выделить два типа. Первый характеризуется отношением нормализованных содержаний La к Yb ( $La_N/Yb_N$ )

менее 2 и низкой суммой нормализованных P3Э (P3Э<sub>N</sub>), среднее значение которой составляет 0,87. Его можно назвать обедненным (рис. 2 Б(1)). Второй тип характеризуется более высоким отношением La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> 2–8 (показан стрелками на рис. 2 Б) и повышенными общими содержаниями P3Э<sub>N</sub> в среднем 1,68, который можно назвать обогащенным (рис. 2 Б(2)).

**Распространенность.** Дуниты с U-образным графиком распределения P3Э характеризуются наибольшим распространением. Они отмечены среди всех изученных структурно-вещественных комплексов всех массивов и слагают тела различной формы, структуры и состава. В изученной выборке дунитов они составляют около 80 % (287 анализов). При этом доля обогащенного и обедненного типов примерно одинакова и составляет 38 и 42 % соответственно.

**Особенности состава и структуры.** Дуниты с подобным распределением P3Э формируют тела различных размеров, от гигантских, протяженностью в первые десятки километров и мощностью первые километры, до жилоподобных выделений мощностью в первые сантиметры и протяженностью в первые метры. При этом породы характеризуются разнообразной структурой — от мелкозернистой до гигантозернистой с размером кристаллов до 5–7 см. Минеральный состав дунитов также различен и колеблется в широких пределах, от собственно дунитов до амфибол-, клино- и ортопироксенсодержащих разновидностей. Дуниты характеризуются различной степенью серпентинизации, от 10 до 85 %.

**2. Дуниты с U-образным распределением P3Э с отрицательной Eu аномалией** (рис. 2 А). **Характер распределения P3Э.** Распределение характеризуется дефицитом средних лантаноидов в ряду (Nd-Er) при примерно равных значениях тяжелых и легких с развитием характерной U-образной формы. На этом фоне отмечается развитие негативной Eu аномалии. Отношение La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> колеблется от 0,5 до 2, отношение Sm<sub>N</sub>/Eu<sub>N</sub> от 2,5 до 8, сумма P3Э<sub>N</sub> 0,2–0,7.

**Распространенность.** Дуниты с подобным распределением отмечаются крайне редко и составляют около 2,2 % (8 анализов) от выборки. Развита данная дуниты только в разрезе дунит-гарцбургитового СВК. Распространены преимущественно в крупных дунитовых телах на границе с гарцбургитами, реже в центральных частях дунитовых тел и отдельных жилах дунитов, развитых в зонах дунитового штокверка и «теневых» гарцбургитов (описание структурно-вещественной зональности представлено в работе [8]).

**Особенности состава и структуры.** Дуниты представлены в основном беспироксеновыми крупно- и гигантозернистыми рекристаллизованными разновидностями с размером кристаллов до 3–4 см. Реже представлены среднезернистыми породами с мозаичной структурой. В отдельных случаях отмечается развитие структур перколяции (просачивания расплава), выполненных ортопироксеном, количество которого может достигать до 7–8 % или единичными зернами амфибола и оливина. Содержание хромшпинели

обычно мелко-среднезернистой может колебаться от 0,5 до 2 %. Степень серпентинизации преимущественно слабая и составляет не более 15 %, в отдельных случаях может достигать 85 %.

**3. Дуниты с восходящей формой кривых распределения P3Э** (рис. 2 В(1)). **Характер распределения P3Э.** Дуниты с подобным распределением характеризуются преобладанием тяжелых лантаноидов над легкими при промежуточном содержании средних. В распределении легких лантаноидов намечается некоторое выполаживание в ряду La-Pr. Отношение La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> составляет 0,1–0,3. Сумма P3Э<sub>N</sub> колеблется от 3 до 6. Развитие Eu аномалий не характерно.

**Распространенность.** Дуниты с подобным распределением крайне редки и составляют не более 1,7 % от изученной выборки (6 анализов). Однако для них характерна широкая распространенность среди различных СВК. Они отмечаются в лерцолитовом (уч. Южно-Нуралинский), гарцбургитовом (уч. Погурейский) и дунит-гарцбургитовом (месторождение Центральное (Рай-Из) и Восход (Кемпирсай), уч. Егартинский (Войкаро-Сынынский массив)) структурно-вещественных комплексах. Распространены преимущественно в пределах рудной зоны крупных дунитовых тел, за исключением лерцолитового комплекса, где они отмечены в виде небольшой клиновидной дайки среди бесплагиоклазовых лерцолитов.

**Особенности состава и структуры.** Дуниты характеризуются развитием различных структур от мелко- до гигантозернистых. Неотъемлемым их признаком является присутствие отдельных зерен мелкокристаллического орто- или клинопироксена и их небольших до 1–3 мм шликров, реже плагиоклаза. Особенности минерального состава дунитов зависят от вмещающего СВК.

**4. Дуниты с нисходящей формой распределения P3Э обогащенные** (рис. 2 Д(1)). **Характер распределения P3Э.** Характеризуются нисходящей формой распределения P3Э с преобладанием легких лантаноидов в ряду La-Sm при равных содержаниях средних и тяжелых лантаноидов. Дефицита средних лантаноидов в отличие от обедненного типа не отмечается. Характерна большая обогащенность средними и тяжелыми лантаноидами относительно обедненного типа (см. ниже). Отмечается слабый наклон графиков в ряду La-Nd и резкое падение содержаний в ряду Nd-Eu, образующих крутой перегиб кривой. Отношение La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> составляет порядка 5–13. Сумма P3Э<sub>N</sub> колеблется в пределах 8–24, при среднем 12–14. Для ряда проб характерны отрицательные Eu аномалии.

**Распространенность.** Дуниты с подобным распределением отмечались только в разрезе дунит-гарцбургитового СВК массивов Войкаро-Сынынский и Рай-Из. Распространены они среди крупных дунитовых тел (зоны дунитового ядра и рудная) и реже в виде отдельных маломощных жило- и линзообразных тел среди слабо истощенных гарцбургитов. Дуниты с подобным типом распределения довольно редки и составляют около 3,6 % (13 анализов) от изученной выборки.

*Особенности состава и структуры.* Дуниты представлены разностями с различной структурой от мелко-среднезернистой до гигантозернистой с размером кристаллов до 1–2 см. По составу — это обычные дуниты, редко амфиболсодержащие. Серпентинизация оценивается в среднем в 10–30 %. В ряде случаев породы представлены классическими аподунитовыми войкаритами с содержанием антигорита около 40–45 %.

**5. Дуниты с нисходящей формой распределения РЗЭ обедненные** (рис. 2 Д(2)). *Характер распределения РЗЭ.* Дуниты с подобным распределением характеризуются преобладанием легких лантаноидов в ряду La-Nd над средними и тяжелыми. При этом в ряду Nd-Eu отмечается слабый перегиб графика, приближая его тем самым к профилю дунитов с нисходящим обогащенным типом. Для средних лантаноидов отмечается некоторый дефицит в ряду Eu-Er с относительно повышенными содержаниями тяжелых (Tm-Lu). Этот дефицит образует пологий слабый прогиб в кривой, напоминающий аналогичный при U-образном распределении. Сумма РЗЭ<sub>N</sub> колеблется от 2 до 10 при среднем в 6–7. Отношение La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> от 3 до 26 при среднем в 8–10. Eu аномалии не характерны.

*Распространенность.* Дуниты с подобным распределением были отмечены среди дунит-гарцбургитового комплекса массивов Войкаро-Сыньинский и Кемпирсай. Распространены они преимущественно на периферии рудных зон крупных дунитовых тел или реже среди их ядер. Среди остальных типов дунитов данные составляют около 10 % (36 анализов) и являются вторыми по распространенности после U-образных.

*Особенности состава и структуры.* Дуниты представлены преимущественно гомеозернистыми мелко-среднезернистыми слабо серпентинизированными разностями с содержанием хромшпинели около 1–2 %. Реже отмечаются крупнозернистые гетерозернистые дуниты с размером кристаллов до 1 см, обычно амфиболсодержащие. В дунитах отмечаются структуры перколяции, выполненные шпинелью, амфиболом или оливином.

**6. Дуниты с нисходящей формой распределения РЗЭ умеренные** (рис. 2 В(2)). *Характер распределения РЗЭ.* Распределение РЗЭ характеризуется преобладанием легких и части средних лантаноидов в ряду La-Eu над тяжелыми. При этом отмечается некоторый рост содержания тяжелых лантаноидов в ряду Tb-Lu, так что образуется перегиб графика на месте Eu и Gd. Сумма РЗЭ<sub>N</sub> составляет около 7–9. Отношение La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> около 1,5–2. Eu аномалии не характерны.

*Распространенность.* Среди остальных типов дунитов породы данного типа встречаются крайне редко и составляют не более 0,8 % (3 анализа) от общей выборки. При этом они характеризуются также локальным распространением и обнаруживаются только в пределах проявления Енгайское (восточнее месторождения Центральное) дунит-гарцбургитового комплекса массива Рай-Из.

*Особенности состава и структуры.* Содержания РЗЭ данного типа дунитов были заимствованы из

работы [4], где представлена их структурно-вещественная характеристика. В общих чертах породы представляют собой гетерозернистые, до крупнозернистых дуниты, слабо серпентинизированные, не содержащие амфиболов и пироксенов.

**7. Ультраобогащенные дуниты с отрицательной Eu аномалией** (рис. 2 Е). *Характер распределения РЗЭ.* Породы характеризуются резко наклонным нисходящим графиком распределения РЗЭ с нормализованными содержаниями легких лантаноидов до 100, что является аномально высокими значениями для дунитов. Отношение La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> составляет порядка 100–200. Характерна ярко выраженная отрицательная аномалия Eu, отношение Sm<sub>N</sub>/Eu<sub>N</sub> около 10–20. При этом нормализованные содержания Eu сопоставимы с таковыми в других дунитах и составляют 0,2–0,5. Содержания тяжелых РЗЭ сопоставимы или даже несколько ниже, чем в дунитах с нисходящим обогащенным распределением.

*Распространенность.* Данные дуниты редки и составляют около 1,7 % от общей выборки (6 анализов). Развитие их крайне локально. Они были обнаружены только в пределах Хойлинского участка Войкаро-Сыньинского массива среди пород дунит-гарцбургитового СВК.

*Особенности состава и структуры.* Дуниты слагают маломощные, в первые десятки сантиметров жилообразные тела среднезернистой структуры, распространенные среди истощенных гарцбургитов. В минералогическом отношении они также своеобразны и представлены породами с устойчивым минеральным парагенезом хромшпинель+оливин+ортопироксен+амфибол (редко клинопироксен). Их суммарные содержания могут составлять от 7 до 10 % от породы. Некоторые разновидности данных дунитов содержат до 12 % ортопироксена, что формально относит их к сильно истощенным гарцбургитам. Парагенез ортопироксен+амфибол по структурно-текстурным взаимоотношениям является равновесным. Совместно с хромшпинелью и частью зерен оливина пироксены и амфибол формируют структуры перколяции расплава, располагаясь между агрегатами более крупных кристаллов оливина. Реже образуют самостоятельные скопления с развитием неравномернозернистых структур.

**8. Дуниты с субхондритовым распределением РЗЭ** (рис. 2 Г). *Характер распределения РЗЭ.* Дуниты характеризуются равномерным приблизительно равным содержанием всех лантаноидов с крайне незначительным дефицитом в ряду Gd-Er. Подобное распределение делает его близким к хондритовому, однако общее содержание РЗЭ заметно ниже, чем в хондрите. Отношение La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> близко к единице и колеблется в пределах 0,7–1,5. Аномалии Eu не характерны. Сумма РЗЭ<sub>N</sub> составляет от 1 до 3.

*Распространенность.* Дуниты с подобным распределением характеризуются локальным распространением и отмечены только среди пород дунит-гарцбургитового СВК Войкаро-Сыньинского массива на участках Хойлинский и Юнъягинский. Встречаются

они в пределах рудных зон высокохромистых хромитов крупных дунитовых тел или в зоне дунитового штокверка в непосредственной близости от рудных зон. Подобные дуниты крайне редки и составляют не более 1,7 % от общей выборки (6 анализов).

**Особенности состава и структуры.** По составу это обычные дуниты, в единичных случаях амфиболсодержащие. Степень серпентинизации различная и колеблется от 20 до 75 %. Состав серпентиновых минералов различный. Характер структуры чаще всего гомеозернистый мелко-, среднезернистый, реже гетерозернистый с отдельными крупными кристаллами оливина размером до 5 мм. Содержание хромшпинели колеблется от 1 до 5 %.

#### Обсуждение результатов

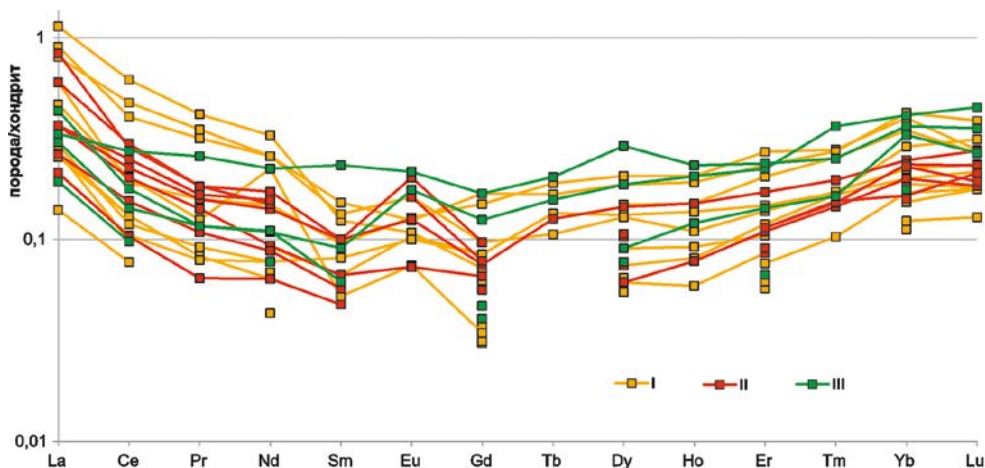
**Влияние степени метаморфизма на распределение РЗЭ.** Одним из основных вопросов при изучении распределения РЗЭ в гипербазитах является выявление степени влияния метаморфизма, так как практически все породы офиолитовых массивов интенсивно метаморфизованы вплоть до образования серпентинитов. В гипербазитах обычно выделяют две стадии метаморфизма — раннюю (регрессивную) и позднюю (прогрессивную) [7]. Для первой стадии характерно развитие лизардитовых серпентинитов с тальком, для второй — антигоритовых и хризотил-антигоритовых с тремолитом.

Относительно степени влияния метаморфизма на распределение РЗЭ существует две противоположные точки зрения. Согласно первой, метаморфизм оказывает интенсивное влияние на распределение РЗЭ и практически полностью уничтожает свидетельства ранних (мантийных) распределений. Подобной точки зрения придерживается ряд отечественных исследователей [1, 3, 4, 11, 12, 13 и др.]. При этом указывается, что интенсивное изменение содержаний и типа распределения РЗЭ происходит как в процессе регрессивной стадии метаморфизма при участии атмосферной и морской воды [11, 12, 13], так и на стадии прогрессивного метаморфизма [3, 4]. В последнем случае на характер распределения РЗЭ интенсивное влияние оказывает степень деформации пород [3]. Согласно второй точке зрения, метаморфизм по отношению к РЗЭ протекает как изохимический процесс, и либо вообще не сказывается на их распределении, либо оказывает незначительное влияние [15, 16]. Следовательно, наблюдаемые распределения РЗЭ несут в себе информацию о мантийных процессах, протекавших в ходе становления гипербазитов. Подобный подход широко используется зару-

бежными авторами для реконструкции генетических особенностей формирования офиолитовых массивов.

Для решения этого вопроса с территории Хойлинского участка (Войкаро-Сыннинский массив) были отобраны 32 образца дунита с различной степенью метаморфизма. В выборке участвовали образцы, содержащие ранние метаморфические парагенезы (тальк+амфибол→ хлорит→ α-лизардит (регрессивной стадии)) и наложенные (амфибол+тальк→ антигорит→ хлорит→ магнетит+ брусит+ β-лизардит (прогрессивной стадии)). Парагенезы прогрессивной стадии метаморфизма наиболее развиты и представляют собой антигоритовые метаморфиты. По количеству развитого антигорита и морфологическим особенностям оливина метаморфизованные породы были разделены на антигоритсодержащие (антигорита до 10 %), антигоритизированные (10–40 %), войкариты (40–70 %) и антигоритовые серпентиниты (более 70 %). Образцы с метаморфическими парагенезами регрессивной стадии характеризовались развитием лизардита на уровне 25–30 % и тальк+амфибол суммарно не более 10 %. Основной целью было выявление степени влияния наложенного прогрессивного метаморфизма (антигоритизации) на распределение РЗЭ.

Все дуниты выборки характеризовались U-образным распределением редкоземельных элементов. Их графики распределения РЗЭ представлены на рис. 3, где видно, что породы характеризуются однотипной формой и близкими нормализованными содержаниями с практически полным перекрытием друг друга. Совпадение значений содержаний и вида распределения РЗЭ свидетельствуют об отсутствии влияния степени прогрессивного метаморфизма на распределение РЗЭ в дунитах. В связи с этим прогрессивный метаморфизм можно признать изохимическим по отношению к распределению РЗЭ. Следовательно, для изучения закономерностей распределения редкоземельных и рассеянных элементов подходят породы с различной степенью антигоритизации, а полученные в них распределения будут характеризовать более ранние процессы.



**Рис. 3.** Представительные графики распределения РЗЭ в аподунитовых войкаритах (красный), антигоритсодержащих и антигоритизированных дунитах (оранжевый) и лизардитизированных безантигоритовых дунитов (зеленый) Хойлинского участка

Аналогичная картина наблюдается и при сравнении распределения РЗЭ в дунитах, обладающих различной (25–80 %) степенью лизардитовой серпентинизации регрессивной стадии метаморфизма. В связи с этим для интерпретации природы форм кривых распределения РЗЭ пригодны образцы пород с различной степенью и видом серпентинизации.

#### **Природа форм кривых распределения РЗЭ.**

**1. Дуниты с U(V-, W-)-образным распределением РЗЭ.** Появление специфичного U-образного графика интерпретируется большинством авторов как воздействие на реститы фильтрующихся расплавов [15, 23, 20]. Это взаимодействие обуславливает метасоматическую природу данного распределения. В зависимости от степени взаимодействия расплава с породами мантии, которая определяется количеством расплава и временем его воздействия, выделяют два типа метасоматоза — модальный и скрытый [25]. Модальный метасоматоз протекает при более интенсивном взаимодействии рестита с расплавом и приводит к формированию не свойственных дунитам минералов таких, как амфиболы, слюды, пироксены и полевые шпаты. Скрытый метасоматоз обусловлен изменением только геохимических параметров перидотитов и приводит к повторному обогащению рестита несовместимыми элементами (в частности, изменением распределения редкоземельных и редких элементов). Процесс переобогащения реститов несовместимыми элементами, в частности легкими лантаноидами, получил название рефертилизации [18]. Собственно сочетание повышенных содержаний тяжелых лантаноидов в реститах и повышенное содержание вновь привнесенных легких лантаноидов и формирует облик U-образного профиля распределения РЗЭ в дунитах. Стоит заметить, что к формированию U-образного распределения РЗЭ приводят оба типа метасоматоза.

Природа метасоматического воздействия расплавов на реститы довольно проста, и объясняется геохимической неравновесностью между обогащенным некогерентными элементами расплавом и истощенной этими элементами мантией. Магмы, сформированные в ходе частичного плавления в глубинных горизонтах, устремляясь вверх, взаимодействуют с окружающей мантией, которая является неравновесной как по составу, так и по термобарическим условиям относительно магмогенерирующей. Проходящий сквозь истощенную мантию расплав обогащает ее некогерентными элементами, стремясь образовать геохимическое равновесие. Взаимодействие мантии с фильтрующейся магмой происходит по принципу хроматографии. Как было показано рядом исследователей [23], метасоматическое воздействие расплава на вмещающую мантию вполне возможно при наличии их длительного взаимодействия и размеров зон фильтрации протяженностью в несколько километров, что в полной мере осуществимо в мантийных условиях. При движении расплав формирует неравновесный относительно окружающих пород фронт высокой концентрации некогерентных элементов. Последние за

счет механизма диффузии входят в структуру оливина, обогащая края зерен, контактирующих с расплавом. Механизм диффузии обуславливает вхождение некогерентных элементов в структуру оливина за счет ионообменных реакций. Последние, в свою очередь, обуславливают гетеровалентный изоморфизм в структуре оливина, при котором ионы  $Mg^{2+}$  и  $Fe^{2+}$  частично замещаются легкими и средними лантаноидами совместно с крупноионными и высокозарядными элементами такими, как U, Th, Pb, Sr, Ta, Nb, Zr, Hf и др.

Как показывают расчеты [19, 23] для образования ультрабазитов с U-образным графиком распределения РЗЭ оказывается достаточным прохождение через рестит небольшого, порядка 1–3 %, количества расплава от общего объема системы.

Формирование U-образного обогащенного типа распределения РЗЭ происходит за счет роста содержания легких и в меньшей степени средних лантаноидов, что подтверждается La-Yb, La-Gd, Yb-Gd отношениями и сравнением их усредненных графиков распределения (рис. 7, кривые 3, 4). Последовательное повышение содержания легких и средних лантаноидов с сохранением изначальной формы графика обеспечивается за счет особого типа изоморфизма, характерного для РЗЭ — эффекта «цепной эндокриптии» [5]. Эффект заключается в том, что близость свойств соседних лантаноидов приводит к последовательному вхождению в структуру кристаллов соседних по ряду элементов. Процесс реализуется таким образом, что чем больше накапливается его соседей по ряду и тем меньше более удаленных от него элементов. В противном случае формировались бы распределения РЗЭ с резким преобладанием какого-нибудь одного наиболее подвижного элемента, например, La. Образование обогащенного подтипа связано с более интенсивным взаимодействием (по времени и/или объему расплава) мантии с расплавом и, следовательно, более высокой степенью рефертилизации. Дуниты с подобным распределением обладают метасоматической природой (перекристаллизация зерен оливина с изменением химического состава — магnezиальности и содержания несовместимых элементов) и не могут использоваться для оценки степени плавления, в отличие от дунитов обедненного подтипа. Природа последних, в свою очередь, имеет реститогенно-метасоматический характер, обусловленный частичным плавлением с одной стороны и метасоматическим воздействием при фильтрации расплавов с другой.

Формирование W-образных графиков с преобладанием ряда средних лантаноидов в большинстве случаев обязано развитию в дунитах клинопироксена, являющегося основным концентратом средних лантаноидов. Однако в ряде случаев подобное распределение не находит выражения в минеральном составе пород и связано со спецификой поведения отдельных элементов в ходе рефертилизации, в частности Eu, способного находиться как в двух, так и в трехвалентном состоянии. Вероятно, схожим происхождением обязаны и кривые распределения РЗЭ V-образного типа.



Другое объяснение природы U-образного графика предложено И.С. Чашухиным с соавторами [11]. Ими предполагается, что такая форма распределения объясняется регрессивному метаморфизму и связанной с ним петельчатой лизардитовой серпентинизацией пород. Формирование подобного распределения обусловлено метасоматическим воздействием на гипербазиты, претерпевших стадию деплетирования и обладающих дефицитом легких элементов, океанической воды. Воздействие приводило к переобогащению легкими лантаноидами гипербазитов с образованием U-образного графика, подобного распределению РЗЭ в океанической воде. Однако с подобным выводом довольно трудно согласиться по ряду причин. Во-первых, как было показано выше, никакой из видов серпентинизации не приводит к значимому изменению содержания и виду распределения РЗЭ в ультрабазитах. Во-вторых, концентрация РЗЭ в океанической воде в  $10^5$ – $10^6$  раз ниже, чем в ультрабазитах [2], что предполагает участие при метаморфизме огромных масс воды. В-третьих, при подобном типе метаморфизма в гипербазитах должны формироваться негативные Се аномалии, характерные для океанической воды [2], которых, однако не наблюдается.

*2. Дуниты с U-образным распределением РЗЭ с отрицательной Eu аномалией.* Очевидно, что дуниты с данным типом распределения представляют собой разновидность U-образного типа. Их отличает резкая отрицательная аномалия Eu практически не характерная для дунитов с U-образным графиком как обедненных, так и обогащенных типов. Однако среди последних все же встречаются распределения с незначительной отрицательной Eu аномалией ( $Sm_N/Eu_N$  2–3), составляющие не более 5 % от их общего числа.

Причиной аномального поведения Eu является его присутствие в магматических системах в двух валентных формах  $Eu^{3+}$  и  $Eu^{2+}$ , в то время как для других РЗЭ преобладающей формой является трехвалентная [26]. Содержание Eu в породах зависит от [17, 26]: 1) окислительно-восстановительного состояния магм, 2) содержания флюидных компонентов ( $H_2O$ ,  $Cl^-$  и др.), 3) от давления, при котором происходит выделение флюидной фазы из расплава.

Основным носителем Eu в мантии в отсутствие плагиоклаза является преимущественно клинопироксен и в меньшей степени ортопироксен. В принципе, поведение Eu в гипербазитах контролируется степенью плавления и зависит от количества клинопироксена в породе. В силу этого развитие отрицательных Eu аномалий должно ожидать еще в гарцбургитах, в которых отсутствует клинопироксен и тем более в дунитах, где пироксенов нет вовсе. Однако фактическое распределение Eu контролируется не только содержанием клинопироксена, но и хромшпинели. В ходе процесса частичного плавления при отсутствии клинопироксена Eu начинает фракционироваться в хромшпинели. Это подтверждается рядом фактических данных: 1) положительной корреляцией Eu с Al и Cr в валовых анализах дунитов и гарцбургитов, 2) высокими (до 1,5 масс. %) содержаниями  $Eu_2O_3$  в хромшпинели-

лях по данным микрозондового анализа, 3) развитием положительных Eu аномалий в валовых анализах хромититов. Вхождение Eu в структуру хромшпинели обеспечивается за счет изоморфизма с двухвалентными элементами, что подтверждается отрицательной корреляцией  $Eu_2O_3$  с  $MgO$  и положительной с  $FeO$ , а общее содержание Eu положительно коррелирует с хромистостью шпинели. Фракционирование Eu в шпинели приводит к формированию сглаженных U-образных графиков в дунитах и гарцбургитах без негативных аномалий. Возникновение отрицательных аномалий Eu связано с дунитами, претерпевшими максимальные степени плавления (25–32 %), что подтверждается их сравнением с модельными кривыми (рис. 2А), низкими суммарными содержаниями редкоземельных элементов и незначительными содержаниями хромшпинели (менее 0,5 %  $Cr_2O_3$ ) в породе. Полученный вывод несколько не согласуется с представлениями В.Р. Шмелева [15], согласно которым формирование отрицательных Eu аномалий в гипербазитах связано с процессом рефертилизации мантии и не зависит от степени ее плавления.

Формирование подобных графиков распределения обусловлено с одной стороны метасоматическим воздействием расплава на породы мантии, обеспечивающим общую U-образную форму кривых, с другой — сильной степенью плавления, приводящей к образованию отрицательной Eu аномалии. Таким образом, природу дунитов с таким типом распределения РЗЭ можно признать как реститогенно-метасоматическую.

*3. Дуниты с восходящей формой кривых распределения РЗЭ.* Подобное распределение с дефицитом легких лантаноидов и последовательным ростом содержания в ряду средних и тяжелых весьма характерно для оливинов, обладающих кумулятивной природой. Распределение РЗЭ в оливине, как наиболее раннем минерале появляющемся в кумулусе, характеризуются преимущественным накоплением тяжелых лантаноидов в силу их меньшей магмофильности по сравнению с легкими. В подтверждение этому в рассматриваемых дунитах могли бы выступить особенности их структуры, которые должны иметь ярко выраженную кумулюсную природу. Однако развитие интенсивных процессов рекристаллизации оливина за счет вязко-пластичного течения мантии полностью стирают первичные структурные признаки пород. В связи с этим рассматриваемые дуниты по структуре не отличаются от остальных. Предполагается, что дуниты с подобным типом распределения обладают магматической кумулятивной природой и образованы из недифференцированных расплавов.

*4. Дуниты с нисходящей формой распределения РЗЭ (обогащенные).* Для них характерны высокие содержания легких лантаноидов относительно средних и тяжелых. Подобное отношение может достигаться только при кристаллизации из дифференцированных расплавов. Развитие у части дунитов отрицательной Eu аномалии наряду с высокими содержаниями легких лантаноидов свидетельствует о довольно глубокой дифференциации расплавов, из которых они сформированы.

ровались. В связи с этим можно предположить их магматогенную природу. Некоторая близость содержаний и вида распределения тяжелых элементов с нисходящими (умеренными) графиками могут свидетельствовать об их генетической связи и образовании в ходе дальнейшей дифференциации остаточных расплавов.

**5. Дуниты с нисходящей формой распределения РЗЭ (обедненные).** Для дунитов с подобным распределением характерно развитие относительно высоких содержаний легких лантаноидов при дефиците средних и тяжелых. При этом распределение последних напоминает таковое в U-образных графиках, а содержания легких РЗЭ несколько завышены. Подобное сочетание различного по характеру распределения можно объяснить тем, что дуниты сложены сочетанием зерен оливина различной природы. Часть из них представлена зернами реститогенной матрицы, претерпевшей рефертилизацию, а часть новообразованными зернами, сформированными из более богатого легкими лантаноидами расплава, находящегося на начальной степени кристаллизационной дифференциации. Новообразованные зерна, по-видимому, вносят вклад в распределение легких лантаноидов и в меньшей степени средних лантаноидов, увеличивая их содержания. В связи с этим центр прогиба в графике смещен в сторону Ho, в отличие от U-образных графиков с центром прогиба в Gd. Метасоматизированные реститогенные кристаллы вносят основной вклад в распределение тяжелых лантаноидов от Ho до Lu, формируя в этом ряду восходящий отрезок графика, схожий с U-образным распределением РЗЭ. Сочетание кристаллов различного генезиса формирует прогиб в графике в ряду Eu-Ho. Дуниты с нисходящей формой распределения РЗЭ (обедненные) обладают промежуточной формой кривых между обогащенным U-образным и обогащенным нисходящим типами кривых. Подобное положение графика, наряду с высказанными выше предположениями, может говорить о смешанной магмато-метасоматической природе данных дунитов.

**6. Дуниты с нисходящей формой распределения РЗЭ (умеренные).** Незначительное обогащение легкими лантаноидами при относительно низких содержаниях тяжелых характерно для магм, претерпевших незначительную степень кристаллизационной дифференциации. Схожие содержания тяжелых элементов с дунитами с восходящей формой графиков позволяют говорить об их возможной генетической связи. Вероятно, дуниты рассматриваемого типа являются дифференциатами от магм, претерпевших кристаллизационную дифференциацию.

**7. Ультраобогатенные дуниты с отрицательной Eu аномалией.** Ультраобогатенность наиболее некогерентными (легкими) лантаноидами можно трактовать двояко.

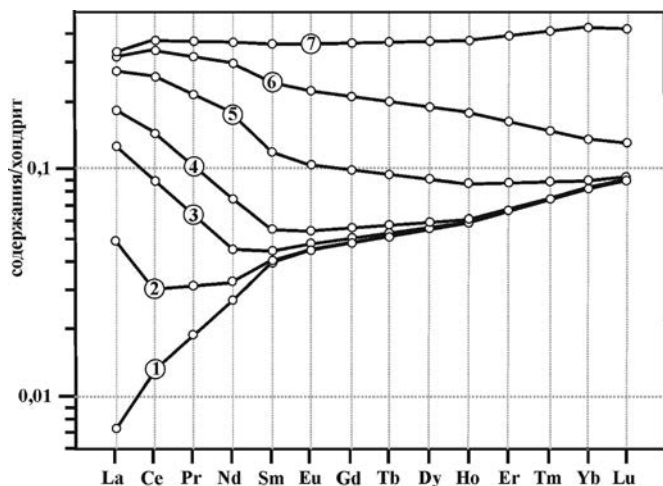
Во-первых, можно предположить, что родоначальные магмы представляли собой продукты малых степеней парциального плавления обогащенной глубинной мантии в условиях стабильности граната. Это, в свою очередь, объясняет высокие содержания легких лантаноидов (более магмофильных) и низкие содержания тяжелых лантаноидов (более магмофобных), концентраторами которых могут являться гранатовые реститы.

Однако данная модель не объясняет наличие резкой отрицательной аномалии Eu, которая должна отсутствовать при фракционном плавлении — Eu в отсутствие плагиоклаза должен распределяться аналогично другим средним лантаноидам и переходить в расплав.

Во-вторых, подобное распределение РЗЭ можно трактовать как результат кристаллизации остаточных расплавов, образованных в ходе интенсивного фракционирования (например, кристаллизационной дифференциации) более бедной первичной магмы. В связи с этим дуниты могут представлять посткумулусные дериваты глубокой дифференциации. Подобная модель хорошо объясняет резкое преобладание легких лантаноидов над тяжелыми, так как первые обладают большей магмофильностью, а также наличием резкой отрицательной аномалии Eu, который мог быть растрочен в ходе кристаллизационной дифференциации на ранних этапах. Фракционирование Eu, вероятно всего, происходило на этапе не позднее кристаллизации дунитов с обогащенным нисходящим графиком, что подтверждается развитием в последних, в некоторых случаях, неглубокой негативной Eu аномалии (рис. 2 В). Предполагается, что главным концентратором легких лантаноидов в дунитах является амфибол, который является признаком флюидонасыщенности, характерным для остаточных расплавов. Глубокая дифференцированность дунитов также подтверждается развитием незначительного дефицита тяжелых редких земель в ряду Ho-Lu относительно дунитов с восходящими формами графиков РЗЭ (рис. 7). Тяжелые лантаноиды могли быть исчерпаны из расплава на ранних этапах кристаллизации, например, при образовании дунитов с восходящей формой кривых распределения РЗЭ.

**8. Дуниты с субхондритовым распределением РЗЭ.** Природа подобного распределения довольно неоднозначна и может трактоваться, с одной стороны, как некоторое отклонение в процессе мантийного метасоматоза, приводящее к устранению дефицита средних лантаноидов. Это предположение могло быть верным, если бы дуниты по составу отвечали клинопироксен-содержащим разностям. Однако их состав беспироксеновый. С другой стороны, подобное распределение может быть объяснено гибридной природой пород, состоящих, как и в случае с нисходящими обедненными типом дунитов, из смеси кристаллов реститогенно-метасоматической и магматической природы. Тогда последние должны характеризоваться хондритовым типом распределения и быть более обогащенными РЗЭ. При этом, вероятно, их количество должно быть невелико, так как все же на графике отмечается крайне слабый дефицит РЗЭ в ряду Gd-Er. В таком случае возможна практически полная ликвидация дефицита средних лантаноидов.

**Закономерности распределения РЗЭ.** Теоретические и экспериментальные исследования по распределению РЗЭ в ходе парциального плавления довольно широко

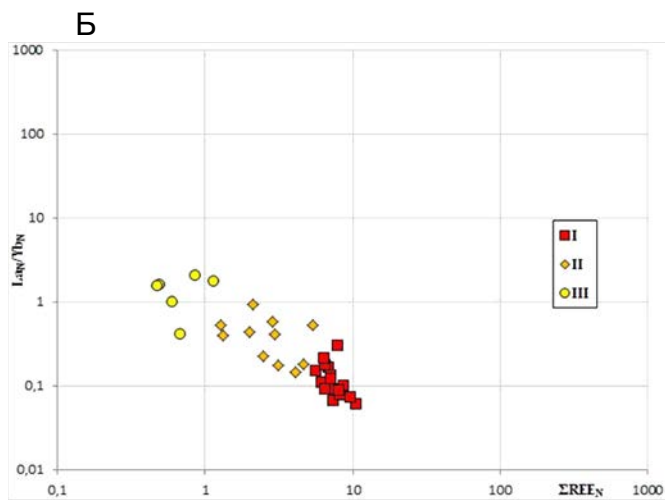
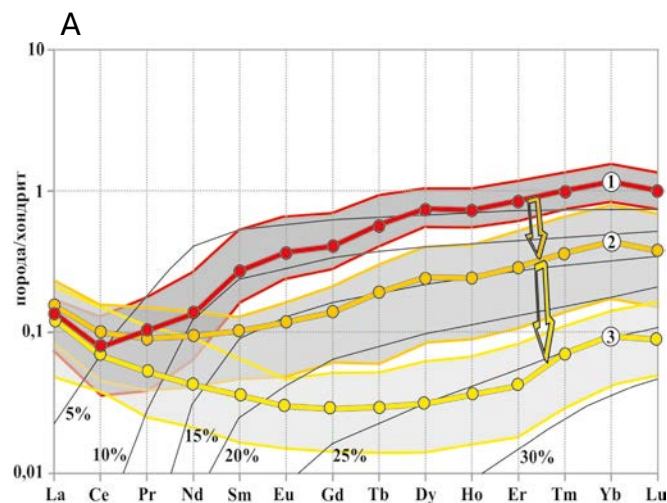


**Рис. 4. Модельная эволюция изменения содержаний РЗЭ при метасоматозе обедненной мантии фильтрующимся расплавом, обогащенным несовместимыми элементами, по [23]: 1 — стартовая кривая содержаний РЗЭ в рестите; 2–7 — кривые распределения РЗЭ, формирующиеся при возрастании объема фильтрующегося расплава**

известны [24]. В противоположность им исследования в области распределения РЗЭ при взаимодействии фильтрующихся расплавов с мантийными породами не так многочисленны [23]. Моделирование перколяции расплавов сквозь толщу мантии, проведенное О. Навоном и Э. Столпером [23] из Калифорнийского университета, подробно и убедительно описало метасоматическое взаимодействие между расплавом и мантией. Авторами были получены модельные кривые распределения РЗЭ, описывающие процессы обогащения (рефертилизации) деплетированной мантии в ходе ее взаимодействия с фильтрующимся расплавом (рис. 4). В результате этого взаимодействия реститы, сильно истощенные легкими

лантаноидами, обогащаются ими, формируя графики распределения РЗЭ U-образного типа. Затем происходит обогащение средними и тяжелыми лантаноидами с образованием близкого к хондритовому типу распределения. Авторами было показано, что эволюция форм кривых распределения зависит от нескольких факторов: времени взаимодействия расплав/мантия, объема расплава и его изначальной обогащенности некогерентными элементами. При незначительных объемах инфильтрующегося расплава и его относительно кратковременном взаимодействии с мантией формируются U-образные и близкие к нему графики. А при прохождении большого объема расплава будут формироваться преимущественно нисходящие и субхондритовые типы распределения.

Для оценки эволюции распределения РЗЭ в реальных условиях были выбраны гипербазиты Нуралинского массива, в мантийной части которого отмечается полный спектр пород от лерцолитов до дунитов [9], а геолого-минералогические данные свидетельствуют о протекании процессов частичного плавления, с одной стороны, и взаимодействия с фильтрующимися расплавами — с другой. Для лерцолитов данного массива характерно развитие кривых распределения с дефицитом легких лантаноидов с формированием графика распределения в виде профиля «ложки» (рис. 5 А). Лерцолиты характеризуются оценочной степенью плавления порядка 5 %. Для гарцбургитов характерен схожий график распределения, однако содержания тяжелых лантаноидов заметно ниже, что обуславливает оценочную степень их плавления в 15 %. Дуниты характеризуются развитием классического U-образного графика распределения с еще большим дефицитом тяжелых и средних лантаноидов. Оценочная степень плавления дунитов составляет около 22–23 %. Стоит заметить, что содержания легких РЗЭ

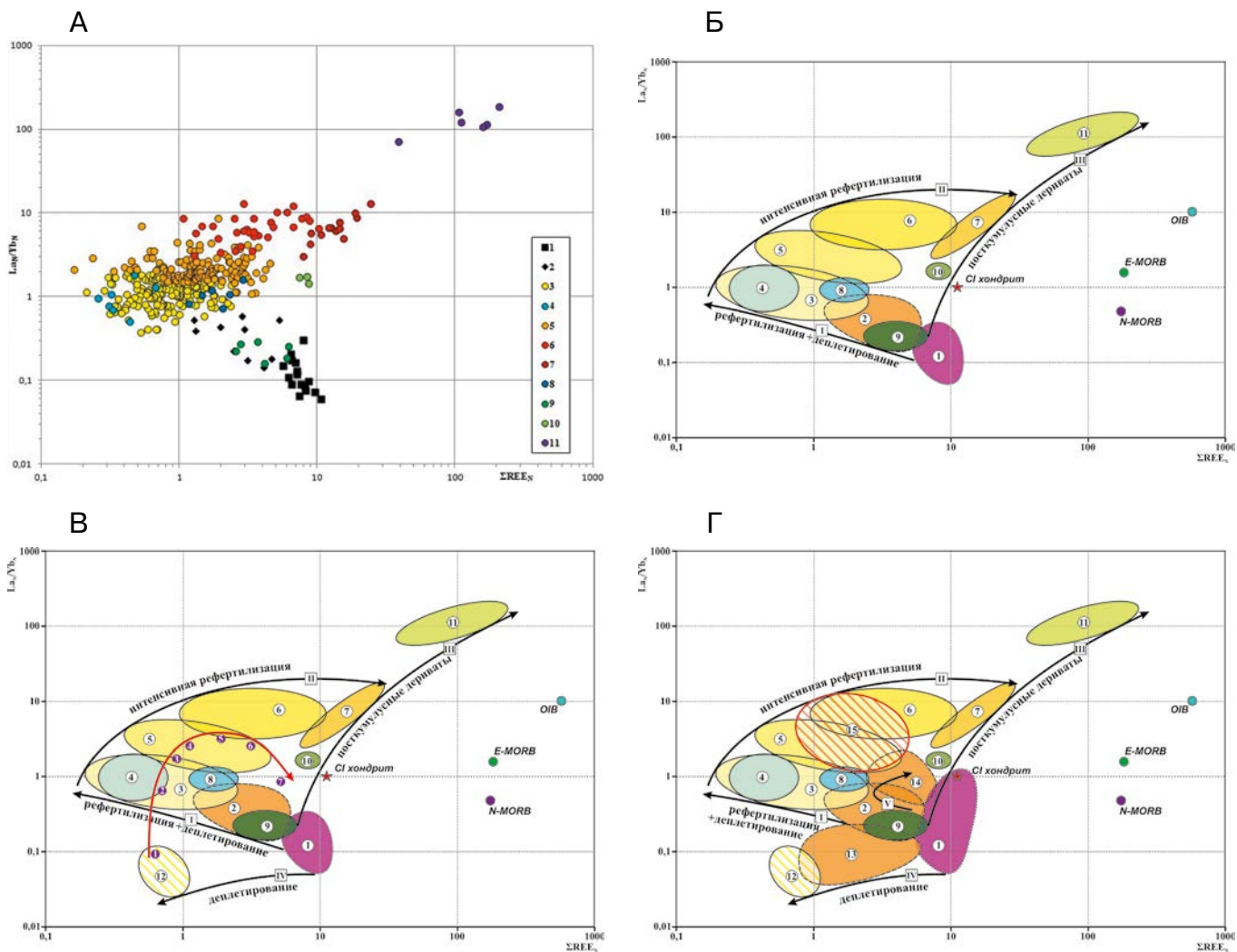


**Рис. 5. Характер распределения РЗЭ в гипербазитах Нуралинского массива: А — кривые распределения РЗЭ в породах мантийной части Нуралинского массива. Кривые получены усреднением содержаний редкоземельных элементов в каждой из пород (в скобках указано количество анализов): 1 — лерцолиты (n=23), 2 — гарцбургиты (n=14), 3 — дуниты (n=9). Серым цветом показаны вариации содержания РЗЭ в исследуемых группах пород. Стрелками показана эволюция формы кривых распределения при деплетировании в ряду лерцолит-гарцбургит-дунит. Б — диаграмма  $La_N/Yb_N$  к  $\Sigma REE_N$  изменение содержания редкоземельных элементов в гипербазитах Нуралинского массива: I — лерцолиты, II — гарцбургиты, III — дуниты**

в породах практически одинаковы, свидетельствуя о равновесии, достигнутом в ходе плавления. Обогащение легкими лантаноидами происходило с первых моментов плавления, обуславливаясь одновременностью процессов деплетирования и рефертилизации. Реализация этих процессов могла происходить в ходе частичного плавления, вызванного прохождением через мантию высокотемпературных расплавов. На диаграмме  $La_N/Yb_N$  к  $\Sigma REE_N$  (рис. 5 Б) породы мантийной части разреза Нуралинского массива в ряду лерцолит-дунит формируют протяженный тренд, ха-

рактеризующийся постепенным ростом отношения  $La_N/Yb_N$  при одновременном уменьшении общего содержания РЗЭ, характеризующимся сочетанием процессов частичного плавления и метасоматоза.

При нанесении на аналогичную диаграмму всех имеющихся анализов РЗЭ (рис. 6 А) дуниты формируют ряд самостоятельных частично перекрывающихся полей (рис. 6 Б), каждое из которых отвечает отдельному типу распределения РЗЭ. При этом отмечается, что дуниты формируют три основных тренда, которые можно интерпретировать как проявление основных



**Рис. 6. Диаграммы отношения  $La_N/Yb_N$  к  $\Sigma REE_N$  дунитов различных структурно-вещественных комплексов Урала: А — фигуративные точки содержаний и отношений редкоземельных элементов в дунитах различных офиолитовых массивов Урала; Б — поля составов дунитов с различным распределением РЗЭ (цифры в кружках соответствуют цифрам на диаграмме А); В — поля составов дунитов с учетом модельного распределения РЗЭ по [23] (красной стрелкой и цифрами вдоль нее (рис. 4) показана эволюция модельного распределения РЗЭ при различной степени рефертилизации начального рестита); Г — конечная диаграмма полей составов дунитов с различным распределением РЗЭ. Тренды распределения РЗЭ в гипербазитах: I — частичного плавления (деплетирования) совместно с мантийным метасоматозом (рефертилизацией) под воздействием фильтрующихся флюидизированных расплавов, II — интенсивного мантийного метасоматоза (рефертилизации) под воздействием фильтрующихся флюидизированных расплавов, III — остаточных расплавов после магматической дифференциации, IV — частичного плавления в «сухих» условиях, V — интенсивной рефертилизации в гарцбургитах. Поля пород (цифры в кружках): 1 — лерцолиты; 2 — гарцбургиты с U-образным обедненным графиком; 3–12 дуниты: 3 — U-образные обедненные, 4 — U-образные с отрицательной Eu аномалией, 5 — U-образные обогащенные, 6 — нисходящие обедненные, 7 — нисходящие обедненные, 8 — субхондритовые, 9 — восходящие, 10 — нисходящие умеренные, 11 — ультраобогащенные с отрицательной Eu аномалией, 12 — восходящие с дефицитом легких РЗЭ; 13 — гарцбургиты с восходящим графиком; 14 — гарцбургиты с U-образным обогащенным графиком, 15 — дуниты рудных зон. Составы E-MORB (обогащенные базальты COX), N-MORB (обедненные базальты COX), OIB (базальты океанических островов), CI (углистый хондрит) заимствованы из [27]**

мантийных процессов: деплетирования, метасоматоза и дифференциации расплавов. Так, в тренде совместного деплетирования и рефертилизации (I), выявленного по эволюции пород Нуралинского массива (поля 1–3), участвуют дуниты с U-образным обедненным (3) и U-образным с отрицательной Eu аномалией (4) типами графиков. Последние обладают наивысшими степенями плавления, что обуславливает низкие содержания РЗЭ и крайнее левое положение на диаграмме. Дуниты, расположенные в этом тренде, можно интерпретировать как образования реститогенно-метасоматической природы.

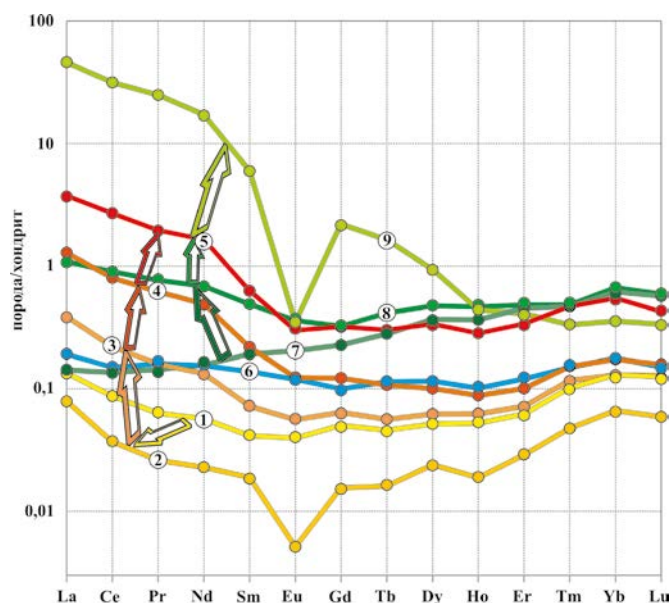
Другой тренд (II) представлен постепенным развитием дунитов от обедненных U-образных до обогащенных нисходящих типов (поля 3-5-6-7, рис. 6 Б) и, вероятно, связан с процессами интенсивной рефертилизации. В данном тренде отмечается постепенный рост как общего содержания РЗЭ, так и отношения  $La_N/Yb_N$  за счет метасоматического воздействия фильтрующихся расплавов. Рост общего содержания лантаноидов и, в частности легких, контролируется, вероятнее всего, объемом фильтрующегося расплава. При этом тренд образуют дуниты, генезис которых можно трактовать различно. Так, дуниты U-образного обогащенного подтипа, находящиеся в основании тренда, можно признать как чисто метасоматические образования, так как в них сильно искажаются геохимические признаки участия в частичном плавлении и резко превалируют свидетельства рефертилизации. В свою очередь, дуниты поля 6 можно интерпретировать как магматогенно-метасоматические образования. Распределение РЗЭ в них можно трактовать как сочетание признаков интенсивного магматического влияния, так и реликтов метасоматического. Дуниты поля 7 интерпретируются как магматические образования, претерпевшие умеренно высокие степени магматической дифференциации. Более наглядно закономерности распределения РЗЭ в дунитах различных эволюционных трендов представлены на рис. 7.

Дуниты, формирующие третий тренд (III), представляют собой постепенную последовательность дифференциации расплавов в мантийных условиях. Тренд сформирован последовательностью дунитов, имеющих кумулятивную природу и образованных из расплавов с различной степенью дифференциации, от не дифференцированных (поле 8), до высоко дифференцированных (поля 7, 11). Основной причиной формирования тренда, вероятно, является различная по продолжительности кристаллизационная дифференциация расплавов, приводящая к формированию ультраобогащенных РЗЭ дериватов. Развитие такой последовательности магматогенных дунитов свидетельствует о протекании в мантии интенсивных процессов дифференциации расплавов. В связи с этим магмы, попадающие в коровые условия, могут сильно отличаться от первичных. Подобное утверждение справедливо и для процесса рефертилизации, при реализации которой также изменяются геохимические характеристики расплавов. Однако крайне редкая

встречаемость дунитов магматического происхождения в мантии свидетельствует и об экзотичности данных процессов, что связано с проблемой свободного пространства в мантии, в пределах которого могут фракционировать расплавы. В связи с этим процессы взаимодействия с мантией могут интенсивно сказываться на составе расплавов.

Интересно отметить, что процессы мантийного метасоматоза не могут идти бесконечно и при прохождении больших объемов расплава геохимические характеристики дунитов становятся схожими с магматическими (поля 6–7). При этом не до конца понятно как формируются подобные графики распределения, либо за счет полного геохимического переуравновешивания оливина, либо за счет растворения/плавления первичного оливина и кристаллизации нового из расплава или по обоим причинам протекающим одновременно.

При сравнении природных эволюционных последовательностей с модельными [23] отмечаются как общие черты, так и различия. Нанесенные на диаграмму значения модельных кривых образуют протяженный тренд (рис. 6 Б), характеризующий сначала рост отношения  $La_N/Yb_N$ , сменяемый в дальнейшем ростом общего содержания РЗЭ с некоторым падением отношений  $La_N/Yb_N$ . При этом развитие последовательности начинается от сильно истощенных пород соответствующих истощенным гарцбургитам. Положение этих гарцбургитов находится в тренде деплетирования,



**Рис. 7. Основные кривые распределения РЗЭ в дунитах различных структурно-вещественных комплексов. Кривые получены по средним содержаниям редкоземельных элементов каждого из типов: 1 — U-образные обедненные; 2 — U-образные с отрицательной Eu аномалией; 3 — U-образный обогащенные; 4 — нисходящие обедненные; 5 — нисходящие обогащенные; 6 — субхондритовые; 7 — восходящие; 8 — нисходящие; 9 — ультраобогащенные с отрицательной Eu аномалией. Стрелками показана эволюция форм кривых распределения РЗЭ: оранжевыми — при деплетировании и рефертилизации (1–2) и интенсивной рефертилизации (2–3–4–5), зелеными — при магматическом фракционировании (7–8–5–9)**

вызванного декомпрессией пород (тренд IV). В подобном тренде теоретически должно располагаться и поле дунитов (12), формирование которых связано только с частичным плавлением. Однако, вероятно, в природных условиях подобный генетический тип дунитов не формируется, так как требует сильной степени плавления мантии, превышающей 40 %. Во всяком случае, подобные породы не отмечаются среди рассматриваемых офиолитовых массивов. Модельные кривые с 2 по 4 (рис. 4) неплохо согласуются с природными данными, отвечая U-образному распределению P3Э. Модельные кривые 5 и 6 отличаются от природных содержаниями P3Э, и по форме распределения близки к нисходящему обедненному типу. Модельная кривая 7 не соответствует природному распределению, так как процесс рефертилизации не заканчивается образованием субхондритового графика, а продолжается за счет накопления легких лантаноидов, в конечном итоге полностью уравниваясь с расплавом.

Окончательный вид диаграмма принимает при добавлении полей гарцбургитов, имеющих реститогенную (поле 13) и метасоматическую (поле 14) природу, и при расширении поля лерцолитов до теоретических хондритовых содержаний (рис. 6 Г). Стоит отметить, что теоретически закономерности распределения P3Э в гарцбургитах будут повторять тренды в дунитах, например, тренд рефертилизации (V). Полученная диаграмма может использоваться как дискриминационная при определении генетических типов дунитов.

**Применение распределения P3Э в поисковых целях.** В изученной выборке участвовали дуниты околорудного пространства и интравудные дуниты, расположенные среди тел хромитов (проявления Южно-Погурейское, Егартинское, Право-Юнъягинское, Хойлинское II (Войкаро-Сыннинский массив), месторождения Центральное, Западное (массив Рай-Из) и Восход (Кимперсайский массив)). Теснейшая ассоциация хромовых руд различных типов с дунитами свидетельствует об их совместном формировании в ходе одних и тех же процессов. Однако развитие хромовых руд в определенных участках дунитовых тел (обычно на границе с гарцбургитами), указывает на некоторую специфичность этого процесса, в связи с чем предполагается и некоторая специфичность состава околорудных дунитов. В принципе, идея использования в поисковых целях закономерностей распределения P3Э как в целом по породе, так и в отдельных минералах не нова, и предлагалась в ряде работ отечественных [4, 3] и зарубежных [22] исследователей. Работами Н.В. Вахрушевой с соавторами [4] в пределах массива Рай-Из была выявлена зональность в распределении редких и редкоземельных элементов. Так, в непосредственной близости от рудных тел развиты дуниты с повышенными содержаниями крупноионных элементов и легких (La-Sm) P3Э. Для дунитов, формирующих внешние части рудной зоны, характерно повышенное содержание тяжелых P3Э и максимумы Eu аномалий.

Собственные исследования, проведенные в пределах уч. Егартинский и Юнъягинский и основанные

на выборке из 150 проб, показали, что для дунитов рудных зон в целом характерны U-образные графики распределения P3Э, не отличающиеся от таковых в безрудных участках разреза. При этом характерных только для околорудного пространства типов распределения не выявлено. Однако для флангов и корневых частей рудных зон характерно развитие дунитов с нисходящим обедненным типом распределения P3Э и наиболее богатых разностей U-образного обогащенного типа (поле 15 на рис. Г). Совместно с ними часто отмечаются дуниты с нисходящим обогащенным типом распределения. В этой связи данные анализа валового распределения P3Э в дунитах способствуют оконтуриванию рудных зон как по простиранию, так и на глубину, что весьма актуально для объектов, расположенных в крупных (первые километры) дунитовых телах. При этом отмечается, что в непосредственной близости от рудных тел (первые метры, редко первые десятки метров) среди дунитов спорадически отмечаются разности, обладающие субхондритовым, восходящим и нисходящим умеренными типами распределения P3Э. Последние два прямо свидетельствуют о протекании процессов частичной дифференциации магматических расплавов при формировании подформных хромовых руд. В принципе, для околорудных дунитов характерно максимальное разнообразие форм кривых распределения P3Э в отличие от безрудных, в которых отмечается только U-образный тип распределения.

Стоит заметить, что использование в поисковых целях распределения P3Э является малопродуктивным в силу нескольких причин. Первая заключается в том, что в пределах рудной зоны дуниты со специфическим, относительно U-образным, распределением встречаются крайне редко, например, дискриминационное поле 15 (рис. 6 Г) построено всего по 27 фигуративным точкам, а дуниты с распределениями, образующими поля 8, 9, 10, редки сами по себе. Вторая причина заключается в методах определения P3Э, которые не являются экспрессными и относительно дорогостоящими, что затрудняет их массовое использование при поисковых работах.

#### **Заключение**

Рассмотренные закономерности распределения P3Э позволяют выделить несколько генетических типов дунитов, сформированных под влиянием трех основных процессов, происходящих в мантии — деплетирования, мантийного метасоматоза (рефертилизации) и дифференциации расплавов. Дуниты, образованные в ходе этих отдельных процессов и их сочетания, по происхождению можно отнести к реститогенно-метасоматическому, метасоматическому, магматогенно-метасоматическому и магматогенному генетическим типам. Различные генетические типы дунитов могут встречаться в пределах одного массива, одного разреза и даже одного тела дунитов, и при этом никак не отличаться по составу и структуре. Однако стоит заметить, что большинство выявленных типов дунитов представляют собой довольно экзотические

образования и встречаются крайне редко. Подавляющее же количество дунитов (около 80 %) характеризуется всего одним видом распределения — U-образным с обедненным и обогащенным типами, распространенными примерно поровну, и обладают реститогенно-метасоматической и метасоматической природой.

Выделенные генетические типы дунитов формируют три тренда развития, определяемых мантийным метасоматозом (метасоматические и магматогенно-метасоматические дуниты), магматической дифференциацией (магматогенные дуниты) и совместным протеканием процессов деплетирования и мантийного метасоматоза (реститогенно-метасоматические дуниты). Их развитие зависит от объема фильтрующихся расплавов и времени воздействия расплава и мантии. Интенсивное развитие мантийного метасоматоза, вызванного реакцией с расплавом в итоге приводит к формированию дунитов, геохимически равновесных по содержаниям и характеру распределения РЗЭ с фильтрующейся магмой.

Особенности распределения РЗЭ можно использовать при оконтуривании рудных зон как на флангах, так и на глубину. Оконтуривание проводится по развитию нисходящих обедненных и обогащенных U-образных типов распределения РЗЭ. Явными признаками развития рудных зон также обладают дуниты с субхондритовым, восходящим и нисходящим умеренным типами распределения, свидетельствуя о частичном протекании процессов дифференциации расплава при хромитообразовании.

**Благодарности.** Автор статьи выражает глубокую благодарность сотрудникам аналитического отдела ФГБУ «ВИМС» в лице заведующей аналитическим отделом Губановой Т.Ю. за своевременное и качественное проведение лабораторных анализов большого количества проб и их первичную обработку данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Агафонов, Л.В. Связь редкоземельных элементов с химизмом и серпентинизацией гипербазитов / Л.В. Агафонов, Ю.А. Еркушов // Редкие элементы в базитах и гипербазитах. — Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1985. — С. 76–89.
2. Балашов, Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов / Ю.А. Балашов. — М.: Наука, 1974. — 268 с.
3. Вахрушева, Н.В. О локальной изменчивости спектров редкоземельных элементов в хромитоносных массивах Полярного Урала / Н.В. Вахрушева, В.Ю. Алимов // Литосфера. — 2014. — № 1. — С. 41–57.
4. Вахрушева, Н.В. Петрология и хромитоносность ультраосновного массива Рай-Из (Полярный Урал) / Н.В. Вахрушева, П.Б. Ширяев, А.Е. Степанов, А.Р. Богданова. — Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. — 265 с.
5. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. Т. I. Геохимия редких элементов. — М.: Наука, 1964. — 688 с.
6. Короновский, Н.В. Магматизм как индикатор геодинамических обстановок / Н.В. Короновский, Л.И. Демина. — М.: КДУ, 2011. — 234 с.
7. Макеев, А.Б. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала / А.Б. Макеев, Н.И. Брянчанинова. — СПб.: Наука, 1999. — 252 с.
8. Прудников, И.А. Особенности геологического строения крупных дунитовых тел в составе дунит-гарцбургитового комплекса Войкаро-Сынского массива / И.А. Прудников, М.М. Гайкович, Е.В. Зублюк // Разведка и охрана недр. — 2020. — № 2. — С. 25–32.
9. Рудник, Г.Б. Петрогенезис ультраосновных пород Нуралинского массива / Г.Б. Рудник / Соотношение магматизма и метаморфизма в генезисе ультрабазитов. — М.: Наука, 1965. — С. 68–100.
10. Фролова, Т.И. Магматические формации современных геотектонических обстановок / Т.И. Фролова, И.А. Бурикова. — М.: МГУ, 1997. — 319 с.
11. Чашухин, И.С. О влиянии ранней серпентинизации на геохимию редкоземельных элементов в гарцбургитах Кемпирсайского массива / И.С. Чашухин, Ю.Л. Ронкин, О.П. Лепехина // Ежегодник-2002. — Тр. ИГГ УрО РАН. — Вып. 150, 2003. — С. 246–249.
12. Чашухин, И.С. О поведении редких элементов при ранней серпентинизации ультрамафитов / И.С. Чашухин, Н.В. Чередниченко, Н.Н. Адамович // Ежегодник-2011. — Тр. ИГГ УрО РАН. — Вып. 159, 2012. — С. 125–128.
13. Чашухин, И.С. Поведение редких элементов в ультрамафитах Урала: I — регрессивный досерпентинитовый метаморфизм / И.С. Чашухин, Н.В. Чередниченко, Н.Н. Адамович // Ежегодник-2012. — Тр. ИГГ УрО РАН. — Вып. 160, 2013. — С. 176–179.
14. Ширай, Е.П. Металлогения рядов геодинамических обстановок островных дуг / Е.П. Ширай, Е.И. Филатов, Г.С. Гусев, А.В. Гуцин, В.В. Зайков, В.В. Масленников, Н.В. Межеловский, Б.В. Перевозчиков. — М., 1999. — 436 с.
15. Шмелев, В.Р. Мантийные ультрабазиты офиолитовых комплексов Полярного Урала: петрогенезис и обстановка формирования / В.Р. Шмелев // Петрология. — 2011. — Т. 19. — № 6. — С. 649–672.
16. Deschamps, F. Geochemistry of subduction zone serpentinites: A review / F. Deschamps, M. Godard, S. Guillot, K. Hattori // Lithos. — 2013. — V. 178. — P. 96–127. -
17. Drake, M.J. The oxidation state of europium as an indicator of oxygen fugacity / M.J. Drake // Geochim. Cosmochim. Acta. — 1975. — V. 39. — P. 55–64.
18. Elthon, D. Chemical trends in abyssal peridotites: Refertilization of depleted suboceanic mantle / D. Elthon // Journal of Geophysical Research. — 1992. — V. 97. Issue B6. — P. 9015–9025.
19. Godard, M. Relationships between geochemistry and structure beneath a palaeo-spreading centre: a study of the mantle section in the Oman ophiolite / M. Godard, D. Jousset, J.L. Bodinier // Earth Planet. Sci. Lett. — 2000. — V. 180. — P. 133–148.
20. Ishimaru, S. Melting and Multi-stage Metasomatism in the Mantle Wedge beneath a Frontal Arc Inferred from Highly Depleted Peridotite Xenoliths from the Avacha Volcano, Southern Kamchatka / S. Ishimaru, S. Arai, Y. Ishida, M. Shirasaka, V. Okrugin // J. Petrol. — 2007. — V. 38. — P. 1047–1074.
21. Johnson, C. Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan / C. Johnson // Submitter in partial fulfillment of the requirements for the degree of Ph.D. Cardiff University, 2012. — 449 p.
22. Merlini, A. Probe and SIMS investigation of clinopyroxene inclusions in chromites from the Troodos chromitites (Cyprus): Implications for dunite-chromitite genesis / A. Merlini, G. Grieco, L. Ottolini, V. Diella // Ore Geology Reviews. — 2011. — V. 41. — P. 22–34.
23. Navon, O. Geochemical consequences of melt percolation: the upper mantle as a chromatographic column / O. Navon, E. Stolper // The Journal of Geology. — 1987. — V. 95. — № 3. — P. 285–307.
24. Niu, Y. Bull-rock major and trace element composition abyssal peridotites: implication for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean ridges / Y. Niu // J. Petrol. — 2004. — V. 45. — P. 2423–2458.
25. O'Reilly, S.Y. Mantle metasomatism / S.Y. O'Reilly, W.L. Griffin // Metasomatism and the chemical transformation of rock the role of fluids in terrestrial and extraterrestrial processes, 2013. — P. 471–533.
26. Philpotts, J.A. Redox estimation from a calculation of  $\text{Eu}^{2+}$  and  $\text{Eu}^{3+}$  concentration in natural phases / J.A. Philpotts // Earth Planet Sci. Lett. — 1970. — V. 9. — № 3. — P. 257–268.
27. Sun, S.S. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / S.S. Sun, W.F. McDonough // Magmatism in the Oceanic Basins: Geol. Soc. Spec. Publ. — 1989. — No 42. — P. 313–345.
28. Zhou, M.-F. REE and PGE geochemical constrains on the formation of Dunites in the Luobusa Ophiolite, Southern Tibet / M.-F. Zhou, P.T. Robinson, J. Malpas, S.J. Edwards, Qi L. // Journal of Petrology. — 2005. — V. 46. — P. 615–639.

© Прудников И.А., 2021

Прудников Илья Александрович // prydnukov@gmail.com