

ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАССЛОЕННЫХ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВЫХ МАССИВОВ НИЖНЕДЕРБИНСКОГО КОМПЛЕКСА (СЗ ВОСТОЧНОГО САЯНА)

Описаны петрохимические особенности расслоенных мафит-ультрамафитовых массивов нижнедербинского комплекса (СЗ Восточного Саяна), которые по химическому составу разделяются на три группы: ультрамафитовую (дуниты, верлиты), субультрамафитовую (клинопироксениты, вебстериты) и мафитовую (габбронориты, габбро). На бинарных диаграммах показаны основные тренды эволюции пород.

Ключевые слова: мафит-ультрамафитовые расслоенные массивы; петрохимия; формационный анализ.

Объектом исследования являются потенциально рудоносные на Cu, Ni и Pt расслоенные мафит-ультрамафитовые массивы нижнедербинского комплекса. Они простираются в виде дугообразной прерывистой цепи протяженностью около 40 км в бассейне среднего течения р. Дербина в 100 км к югу от г. Красноярска (рис. 1). Наиболее крупными, пространственно сближенными массивами считаются Аштатский, Азертаский, Нижнедербинский, Бурлакский и Конжульский.

Вмещающими породами мафит-ультрамафитовых массивов являются нижнепротерозойские метаморфические образования дербинской свиты, которые представлены главным образом кристаллическими сланцами и мраморизованными известняками [1]. Породы интенсивно дислоцированы и часто дезинтегрированы на отдельные блоки. Они имеют преимущественно субмеридиональное простирание и довольно крутые углы падения как на запад, так и на восток, тем самым отражая наличие складчатых структур [1, 2].

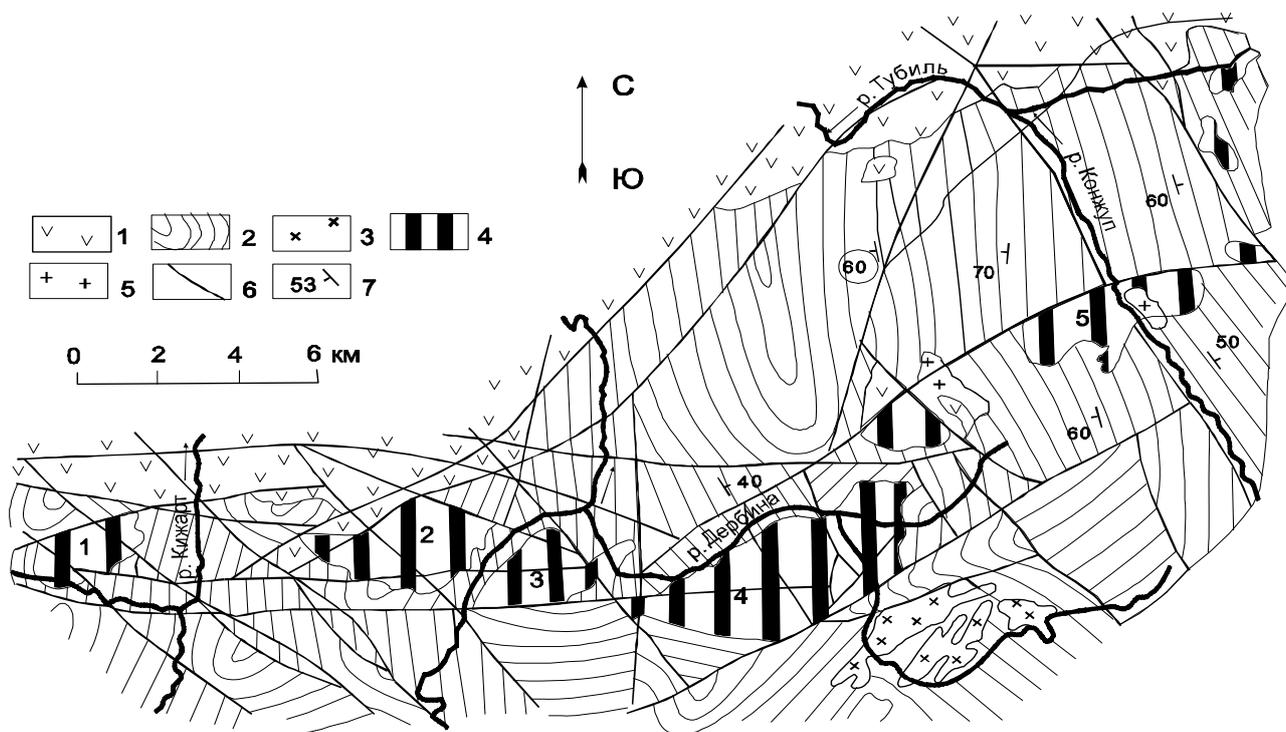


Рис. 1. Схема размещения расслоенных мафит-ультрамафитовых массивов нижнедербинского комплекса (составлена А.Г. Еханиным и др., 1991): 1, 2 – вмещающие породы: 1 – среднепалеозойские вулканогенно-осадочные (быскарская серия) Северо-Минусинской котловины, 2 – нижнепротерозойские карбонатно-сланцевые (дербинская свита) Дербинского антиклинория; 3 – среднепалеозойские гранитоиды; 4 – мафит-ультрамафитовые массивы (1 – Аштатский, 2 – Азертаский, 3 – Нижнедербинский, 4 – Бурлакский, 5 – Конжульский); 5 – позднепротерозойские гранитоиды; 6 – разрывные нарушения; 7 – элементы залегания слоистости

Основное внимание в процессе исследования уделялось породам Бурлакского и Нижнедербинского массивов, представляющих собой дискордантные тела линзовидной формы (см. рис. 1). Для этих массивов характерна первичная магматическая расслоенность [1, 2]. Бурлакский и Нижнедербинский массивы сложены преимущественно верлитами, пироксенитами и реже аподунитовыми и апогарцбургитовыми серпентинита-

ми с ритмичным переслаиванием. Между породами наблюдаются постепенные переходы. Эта ассоциация пород представляет собой нижнюю часть расслоенных интрузий. Габбронориты и габбро, характерные для Бурлакского массива, слагают верхнюю часть разреза. Внутреннее строение интрузий и их контакты с вмещающими породами осложнены многочисленными дизъюнктивными нарушениями. По особенностям

внутреннего строения исследуемые массивы обнаруживают сходство с аналогичными расслоенными интрузиями габбро-пироксенит-дунитового формационного типа Урала [3].

Оценка петрохимических особенностей пород нижне-дербинского комплекса (СЗ Восточного Саяна) базировалась на результатах 136 силикатных анализов. По химиче-

скому составу породы разделяются на три группы: ультрамафитовую (дуниты, верлиты), субультрамафитовую (клинопироксениты, вебстериты) и мафитовую (габбронориты, габбро). При статистической обработке имеющихся данных основное значение уделялось анализу средних содержаний и коэффициентам вариации петрогенных элементов для каждой группы пород (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Статистические параметры петрогенных компонентов в ультрамафитах и мафитах

Компонент	x		V		x		V		x		V	
	Ультрамафиты				Субультрамафиты				Мафиты			
	Дуниты		Верлиты		Вебстериты		Клинопироксениты		Габбронориты, габбро			
SiO ₂	42,15	0,02	45,72	0,08	49,68	0,06	51,30	0,02	50,63	0,05		
TiO ₂	0,12	0,91	0,14	0,40	0,40	0,39	0,29	0,40	0,53	0,97		
Al ₂ O ₃	1,43	0,37	2,05	0,29	5,00	0,23	3,92	0,25	16,86	0,16		
FeO	15,08	0,15	10,47	0,19	12,11	0,25	7,72	0,13	8,48	0,21		
MnO	0,18	0,14	0,18	0,13	0,25	0,32	0,17	0,12	0,15	0,20		
MgO	39,07	0,05	29,39	0,13	20,82	0,14	19,02	0,09	9,02	0,30		
CaO	1,62	0,86	10,18	0,43	11,09	0,25	17,11	0,07	11,30	0,19		
Na ₂ O	0,29	0,44	0,27	0,31	0,47	0,47	0,33	0,29	2,35	0,32		
K ₂ O	0,01	0,01	0,02	1,41	0,05	2,01	0,02	1,73	0,48	0,72		
P ₂ O ₅	0,03	0,44	0,03	0,86	0,03	0,92	0,03	0,63	0,04	1,23		
F*	27,85	0,13	26,27	0,08	36,77	0,17	28,87	0,12	48,46	0,13		

Примечание: x – средние содержания компонентов; V – коэффициент их вариации; F* – железистость пород ((F*= FeO/ (FeO+ MgO)×100%).

Для ультрамафитовой группы в ряду от дунитов к верлитам наблюдаются тенденции увеличения средних содержаний SiO₂, TiO₂, Al₂O₃ при уменьшении FeO, MgO и резком возрастании CaO (от 1,62 до 10,18). Коэффициенты вариации для этой группы характеризуются увеличением SiO₂, MgO, P₂O₅, резким возрастанием K₂O и уменьшением TiO₂, Al₂O₃, FeO, CaO, Na₂O.

В субультрамафитовой группе наблюдается дальнейший рост средних содержаний SiO₂ и CaO при постоянном снижении значений FeO и MgO (см. табл. 1). Оригинальная зависимость наблюдается для TiO₂, Al₂O₃, Na₂O и K₂O в ряду: дуниты – верлиты – вебстериты – клинопироксениты, которая выражается в увеличении средних содержаний указанных компонентов для верлитов и вебстеритов и в уменьшении их значений от вебстеритов к клинопироксенитам. Коэффициенты вариации для субультрамафитовой группы обусловлены ярко выраженным уменьшением значений CaO, Al₂O₃ и увеличением K₂O по сравнению с ультрамафитами. Для некоторых петрогенных компонентов, а именно MnO, FeO и Na₂O, наблюдается резкое возрастание коэффициента вариации для вебстеритов и понижение его значения для клинопироксенитов.

В группе мафитов отмечаются последовательное снижение значений FeO, MgO и увеличение содержания SiO₂ и TiO₂, а также резкое возрастание Al₂O₃, Na₂O по сравнению с ультрамафитовой и субультрамафитовой группами (см. табл. 1). Коэффициенты вариации, рассчитанные для габброидов, формируют тенденцию роста для TiO₂, MgO и P₂O₅.

Железистость трех породных групп изменяется в широких пределах (табл. 1). Для ультрамафитов характерна в целом низкая железистость (26–28%), тогда как для мафитовой группы пород устанавливаются более высокие ее значения (48%). С возрастанием железистости пород закономерно возрастает содержание титана, хотя разброс его содержаний довольно значительный. В целом для габброидов характерны невысокие его со-

держания, не превышающие 1%. В то же время отмечаются отдельные рудные габброиды с содержанием TiO₂ до 3%. Коэффициент вариации железистости выражается в постепенном увеличении его значений от ультрамафитов к субультрамафитам и снижением к мафитам.

Изучение характера корреляционных связей в различных группах пород обнаружило значимость зависимостей между отдельными элементами и их вариации (табл. 2). Для дунитов выявляются высокие значимые отрицательные коэффициенты корреляции для Na₂O-TiO₂, P₂O₅-TiO₂, FeO-SiO₂, MnO-SiO₂, а также высокий положительный для MnO-FeO. Парные коэффициенты корреляции для верлитов характеризуются пониженными значениями по сравнению с дунитами. При этом положительные корреляционные связи устанавливаются между FeO-MgO, SiO₂-CaO, SiO₂-Na₂O, FeO-MnO и появляются новые значимые отрицательные коэффициенты корреляции для MgO-CaO, SiO₂-MgO, TiO₂-MgO. Изменился знак значимости P₂O₅-TiO₂ с отрицательного для дунитов, на положительный – для верлитов.

В целом субультрамафитовая породная группа (табл. 3) характеризуется увеличением количества парных корреляционных связей. Для вебстеритов наиболее значимыми положительными корреляционными связями являются K₂O-P₂O₅, FeO-MnO, Al₂O₃-Na₂O, FeO-Na₂O, Na₂O-K₂O, для других элементов, таких как SiO₂-Al₂O₃, TiO₂-Na₂O, Al₂O₃-K₂O, FeO-K₂O, FeO-P₂O₅, значимость корреляционных связей менее выражена. Отрицательные парные коэффициенты корреляции становятся весомее для SiO₂-FeO и FeO-CaO. Изменился знак для Na₂O-K₂O с отрицательного в ультрамафитах на положительный в субультрамафитах. Отрицательные корреляционные связи для TiO₂-Na₂O, SiO₂-Al₂O₃, FeO-CaO и CaO-P₂O₅, SiO₂-Na₂O, характерные для ультрамафитов, становятся положительными для вебстеритов. В клинопироксенитах отрицательных высоко значимых коэффициентов корреляции не наблюдается (см. табл. 3), а отмечаются только положительные –

FeO-MnO, Al₂O₃-TiO₂. Для остальных оксидов парные коэффициенты слабо выражены. При этом возникают новые положительные корреляционные связи для TiO₂-FeO, Al₂O₃-FeO, Al₂O₃-MnO, TiO₂-MnO, а отрицатель-

ные – для SiO₂-TiO₂ и Al₂O₃-P₂O₅. При этом отрицательные связи для MgO-TiO₂, MgO-Al₂O₃, не характерные для верлитов, становятся значимыми для вебстеритов и клинопироксенитов.

Таблица 2

Парные коэффициенты корреляции для ультрамафитовой группы

Компонент	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅
SiO ₂	1,00	0,44	-0,37	-0,93	-0,89	0,55	0,20	-0,57	-0,56
TiO ₂		1,00	0,17	-0,42	-0,27	0,43	-0,31	-0,97	-0,96
Al ₂ O ₃			1,00	0,12	0,20	-0,55	0,41	0,02	0,04
FeO	<i>Дуниты (7)</i>			1,00	0,89	-0,55	-0,27	0,53	0,52
MnO					1,00	-0,35	-0,42	0,41	0,40
MgO						1,00	-0,63	-0,59	-0,61
CaO							1,00	0,36	0,39
Na ₂ O								1,00	0,29
P ₂ O ₅									1,00
SiO ₂	1,00	0,13	0,15	-0,57	0,09	-0,71	0,82	0,73	-0,56
TiO ₂		1,00	0,45	-0,37	-0,39	-0,62	0,51	-0,02	0,43
Al ₂ O ₃			1,00	-0,32	0,09	-0,43	0,19	-0,14	-0,31
FeO	<i>Верлиты (22)</i>			1,00	0,44	0,83	-0,81	-0,26	0,08
MnO					1,00	0,33	-0,34	0,13	-0,45
MgO						1,00	-0,95	-0,32	0,09
CaO							1,00	0,48	-0,50
Na ₂ O								1,00	-0,28
P ₂ O ₅									1,00

Примечание. Здесь и далее жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции, в скобках приведено количество использованных анализов.

Таблица 3

Парные коэффициенты корреляции для субультрамафитовой группы

Компонент	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
SiO ₂	1,00	-0,36	-0,55	-0,73	-0,52	-0,43	0,49	-0,56	-0,21	-0,21
TiO ₂		1,00	0,30	0,40	0,27	-0,10	-0,23	0,49	0,37	0,24
Al ₂ O ₃			1,00	0,42	0,29	-0,06	-0,37	0,79	0,47	0,39
FeO	<i>Вебстериты (20)</i>			1,00	0,81	0,05	-0,66	0,67	0,51	0,52
MnO					1,00	-0,10	-0,42	0,39	0,13	0,17
MgO						1,00	-0,55	-0,23	-0,14	-0,06
CaO							1,00	-0,41	-0,53	-0,57
Na ₂ O								1,00	0,74	0,65
K ₂ O									1,00	0,92
P ₂ O ₅										1,00
SiO ₂	1,00	-0,37	-0,32	-0,65	-0,48	-0,06	0,18	-0,21	-0,23	-0,20
TiO ₂		1,00	0,76	0,57	0,45	-0,55	-0,12	0,03	-0,14	-0,20
Al ₂ O ₃			1,00	0,42	0,36	-0,66	0,06	0,05	-0,07	-0,33
FeO	<i>Клинопироксениты (39)</i>			1,00	0,78	-0,25	-0,43	-0,03	0,20	0,22
MnO					1,00	-0,24	-0,29	0,02	-0,08	0,09
MgO						1,00	-0,51	0,05	0,26	0,09
CaO							1,00	-0,04	-0,44	-0,28
Na ₂ O								1,00	0,13	0,14
K ₂ O									1,00	0,39
P ₂ O ₅										1,00

Для мафитовой группы пород (табл. 4) отмечено наибольшее количество значимых коэффициентов корреляции. Возрастает значимость положительных корреляционных связей: FeO-MnO, Na₂O-SiO₂ и Na₂O-K₂O. Наиболее значимые коэффициенты корреляции с отрицательным знаком установлены для MgO-Na₂O, Al₂O₃-MnO, Al₂O₃-FeO, MgO-Al₂O₃, SiO₂-CaO, SiO₂-MgO. Изменилось направление корреляционной связи с положительной на отрицательную для Al₂O₃-MnO, Al₂O₃-FeO, Al₂O₃-TiO₂ и с отрицательной на положительную – для SiO₂-Al₂O₃, MgO-CaO, K₂O-SiO₂.

Дискретность петрохимической выборки пород из исследуемых массивов отчетливо проявляется на бинарных диаграммах в виде трех трендов (рис. 2). На бинарной диаграмме MgO-CaO (см. рис. 2, а) фигуративные точки пород образуют три тренда. Первый

ультрамафитовый тренд (I) обусловлен последовательным и значительным снижением MgO от 42% (в дунитах) до 25% (в верлитах). При этом для него характерно возрастание содержания CaO от 0 до 16%. Второй субультрамафитовый тренд (II) несущественно отличается от первого более резким возрастанием CaO от 5% (в вебстеритах) до 20% (в клинопироксенитах) при уменьшении MgO от 29 до 17%. Третий мафитовый тренд (III), нечетко проявленный, обусловлен значительным разбросом фигуративных точек составов габброидов. Он, вероятно, фиксирует слабо выраженную прямую зависимость MgO и CaO в процессе дифференциации мафитового расплава. Этот тренд характеризуется по сравнению с ультрамафитами и субультрамафитами низкими значениями MgO (17–6%).

Парные коэффициенты корреляции для мафитовой группы

Компонент	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	
SiO ₂	1,00	-0,47	0,45	-0,48	-0,15	-0,71	-0,76	0,68	0,40	0,12	
TiO ₂		1,00	-0,29	0,45	0,35	0,10	0,17	0,00	0,26	0,05	
Al ₂ O ₃			1,00	-0,76	-0,76	-0,75	-0,36	0,51	0,00	-0,19	
FeO		Мафиты (46)			1,00	0,81	0,47	0,07	-0,25	0,18	0,27
MnO					1,00	0,36	-0,10	-0,17	0,32	0,17	
MgO						1,00	0,61	-0,83	-0,51	-0,05	
CaO							1,00	-0,78	-0,61	-0,30	
Na ₂ O								1,00	0,66	0,21	
K ₂ O									1,00	0,46	
P ₂ O ₅										1,00	

На бинарной диаграмме Al₂O₃-FeO также устанавливаются три тренда, отражающих эволюцию выделенных породных групп (рис. 2, б). Первый ультрамафитовый тренд (I) характеризуется низкими значениями Al₂O₃ (0,2–3%) при существенном уменьшении FeO от 17% (в дунитах) до 7% (в верлитах). Второй субультрамафитовый тренд (II) отражает отчетливую прямую зависимость и фиксирует уменьшение Al₂O₃ от 8% (в вебстеритах) до 2% (в клинопироксенитах) при соответствующем уменьшении FeO от 22 до 5%. Третий мафитовый тренд (III), также четко проявленный, пока-

зывает обратную зависимость FeO и Al₂O₃, т.е. в процессе эволюции габброидов с увеличением Al₂O₃ (от 11 до 24%) происходит уменьшение FeO (от 13 до 5%).

Идентификация ведущих процессов фракционирования и дифференциации осуществлялась с использованием факторного анализа, результаты которого отражены в табл. 5. Факторный анализ проведен для двух выборок: первая включает ультрамафиты и субультрамафиты, а вторая – мафиты. Для каждой выборки нами были выделены по три главных фактора, составляющих в сумме более 80%.

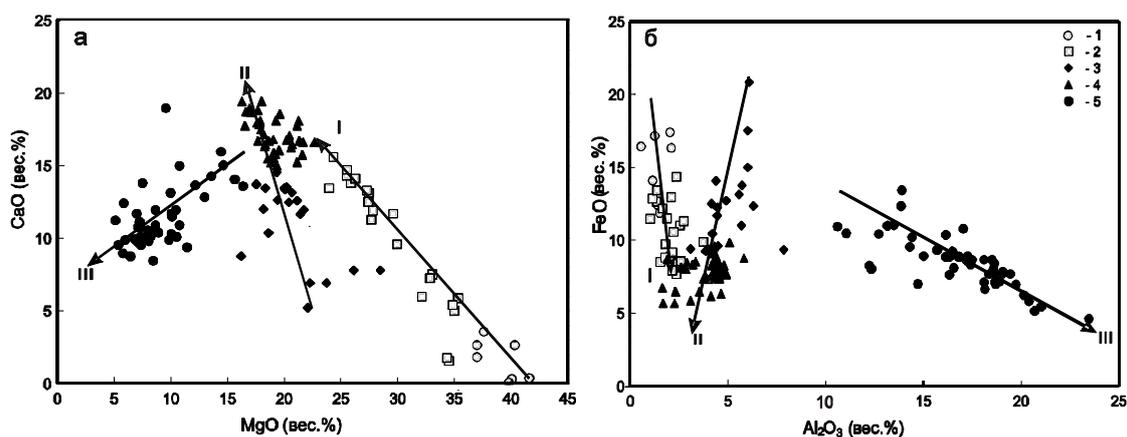


Рис. 2. Вариации вещественного состава пород на бинарных диаграммах MgO-CaO (а) и FeO-Al₂O₃ (б). Тренды изменения состава породных ассоциаций: I – ультрамафитовая; II – субультрамафитовая; III – мафитовая. Породы: 1 – дуниты; 2 – верлиты; 3 – вебстериты; 4 – клинопироксениты; 5 – габбронориты, габбро

Согласно полученным результатам вариации петрохимических параметров пород в пределах ультрамафитов и субультрамафитов определяются тремя главными компонентами с суммарным вкладом 85%. Первый фактор, имеющий максимальное влияние на вариативность пород массивов, характеризуется обратной тенденцией накопления элементов SiO₂, CaO и Al₂O₃ по отношению к MgO и FeO. Его можно интерпретировать как следствие магматической дифференциации исходного расплава, где ведущую роль играло фракционирование кристаллов оливина, выступающих в качестве наиболее ранней кумулятивной фазы. Структура второго фактора определяется поведением марганца, натрия и железа при наличии обратной корреляции с кальцием и кремнием. По-видимому, она характеризует процессы сегрегации кальциевых минералов, прежде всего клинопироксенов. Третий фактор, вероятно, фиксирует распределение рудных и аксессуарных минералов, т.к. характеризуется высокой отрицательной корреляционной связью с фос-

фором при весьма умеренной положительной корреляции с марганцем и железом. Для мафитовой группы петрохимическая неоднородность определяется тремя главными факторами, отражающими особенности минерального состава данных пород, которые в сумме дают 83% (табл. 5).

Основной вклад в суммарную дисперсию данной выборки (более 45%) вносит фактор, структура которого отражает антогонизм Al₂O₃, SiO₂, Na₂O по отношению к MgO и FeO, CaO. Наиболее вероятным процессом, обусловившим подобные связи, следует считать магматическую дифференциацию в группе мафитов. Второй фактор имеет гораздо меньшую нагрузку (24%) и определяется в основном противоположными тенденциями накопления марганца и железа по отношению к кальцию, алюминию и магнию. Ее структура предполагает фракционирование клинопироксенов и ортопироксенов. Третий фактор, оригинальный, определяется титаном, связан с обогащением им мафитов.

Факторный анализ для пород Бурлакского и Нижнедербинского массивов

Фактор	Вклад, %	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅
Ультрамафиты и субультрамафиты										
I	43	-0,89	-0,58	-0,71	0,65	0,03	0,97	-0,89	-0,28	0,13
II	30	-0,22	0,59	0,57	0,71	0,83	-0,08	-0,35	0,74	0,28
III	12	0,07	0,09	0,12	0,11	0,27	0,08	-0,10	-0,24	-0,92
Мафиты										
I	47	0,82	-0,42	0,85	-0,73	-0,58	-0,88	-0,66	0,77	0,01
II	24	-0,31	-0,31	0,34	-0,59	-0,68	0,21	0,65	-0,49	-0,60
III	12	-0,32	0,82	0,24	0,05	-0,11	-0,29	0,12	0,25	-0,22

Таким образом, в результате петрохимического изучения пород расслоенных мафит-ультрамафитовых интрузий нижнедербинского комплекса отчетливо выделяются три породные группы: ультрамафитовая, субультрамафитовая и мафитовая. При этом для первых двух групп обнаруживаются близкие тренды их вещественной последовательной эволюции, что нередко выражается в постепенных переходных разновидностях в ряду: дуниты – верлиты – вебстериты – клинопироксениты. При этом мафитовый тренд значительно отклоняется от эволюционного тренда ультрамафитов. Вероятно, разделение исходного основного расплава на производные – ультраосновной и основной – произошло на ранней стадии дифференциации. В дальнейшем

каждый из этих расплавов претерпел собственную эволюцию в промежуточных камерах в процессе дифференциации с образованием направленной серии пород. Внедрение ультраосновного и основного расплавов, очевидно, происходило одновременно в одни и те же участки литосферы. В результате сформировались интрузии со сложным внутренним строением, обусловленным наличием контрастных ультрамафитовых и мафитовых породных ассоциаций, не обнаруживающих между собой постепенных петрографических переходов. С учетом полученных данных по набору выделенных групп пород мафит-ультрамафитовые массивы нижнедербинского ареала относятся к перидотит-пироксенит-габбровому формационному типу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волохов И.В., Иванов В.М. Нижне-Дербинский габбро-пироксенит-перидотитовый интрузивный комплекс Восточного Саяна // Геология и геофизика. 1964. № 5. С. 52–67.
2. Еханин А.Г., Филитов Г.В., Анисеева А.Н. Особенности геологического строения и рудоносности Бурлакского ультрабазит-базитового массива (Восточный Саян) // Изв. вузов. Сер. «Геология и разведка». М., 1991. С. 72–78.
3. Маегов В.И. К проблеме петрогенезиса дунит-пироксенит-габбровой ассоциации Платитноносного пояса Урала (на примере Денежкиного массива, Северный Урал) // Матер. Всерос. науч. конф. «Петрология магматических и метаморфических комплексов». Томск, 2005. Т. 1. С. 111–115.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 7 мая 2009 г.