

## ИЗОТОПНЫЕ ОТНОШЕНИЯ РЬ В ГАББРО И ЖИЛЬНЫХ ТОНАЛИТАХ ИЗ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ РЕВДИНСКОГО МАССИВА (СРЕДНИЙ УРАЛ): РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ НА MS-ICP-MS NEPTUNE PLUS

© 2014 г. С. В. Берзин, М. В. Стрелецкая

Изотопные соотношения свинца были исследованы нами в пробе габбро из скринов в пакете параллельных долеритовых даек и в пробе жильного тоналита из обнажений в восточной части Ревдинского массива.

Ревдинский массив является самым южным в цепочке массивов Платиноносного пояса Урала. Он состоит из отдельных тектонических блоков оливинового габбро, габбро-норитов, троктолитов и клинопироксенитов, в промежутках между которыми прослеживаются амфиболизированные и сосюритизированные полосчатые габбро и роговики. Комплекс параллельных даек, пересекающих габбро, обнажается на вершинах высоток в восточной части Ревдинского массива. Изначально при геологосъемочных работах на этих обнажениях И.И. Зенковым и соавторами были выделены древняя серия диабазовых даек, имеющих субширотное простирание, и перпендикулярная ей молодая серия диабазовых даек [3, 9]. В дальнейшем И.В. Семеновым и соавторами было показано, что эти диабазовые дайки являются комплексом параллельных даек, образовавшимся в условиях растяжения [7]. Более подробное описание обнажений комплекса параллельных долеритовых даек, прорывающих габбро Ревдинского массива, приводится И.В. Семеновым в ряде последующих публикаций [5–8 и др.].

В изучаемых нами обнажениях комплекса параллельных даек в восточной части Ревдинского массива (горы Балабан, Груберских, 489.3 м, 442 м, Ельчевишная и др.) наблюдается пересечение габбро двумя генерациями параллельных даек под углом 40–60°, в промежутке между которыми происходило внедрение пород жильной диорит-тоналитовой серии [1, 2, 4]. Долеритовые дайки 1-й генерации сложены и мелко- и среднезернистыми долеритами. Они имеют мощность до 3–6 м, крутое или субвертикальное падение и северо-восточное простирание (30–45°). В них наблюдаются структуры типа “дайка в дайке” с односторонними зонами закалки. Долеритовые дайки 2-й генерации, как правило, имеют небольшую мощность от 12–20 см до 1–1.5 м, северное или северо-западное простирание (азимут простирания 320–350°) и крутое падение. Они сложены тонкозернистыми и мелкопор-

фировыми долеритами с вкрапленниками плагиоклаза и амфибола. Дайки образуют рои и структуры типа “дайка в дайке”. Долеритовые дайки первой генерации и габбро прорываются прожилками и дайками пород жильной диорит-тоналитовой серии, которые также играют роль цемента в магматических брекчиях, ранее описанных И.В. Семеновым как “габбро-гранитные брекчии” [6, 7 и др.].

Габбро и долериты параллельных даек подверглись регрессивному метаморфизму, пироксен в них повсеместно замещен амфиболом, преимущественно магнезиальной роговой обманкой, плагиоклаз полностью сосюритизирован. В единичных образцах с горы Груберских и горы 489.3 м в габбро и долеритах 1-й генерации встречаются реликтовые зерна клинопироксена, отвечающие по составу диопсиду. В лейкократовых диоритах и тоналитах жильной серии плагиоклаз тоже повсеместно альбитизирован и сосюритизирован, среди фемических минералов встречаются амфибол и шамозит.

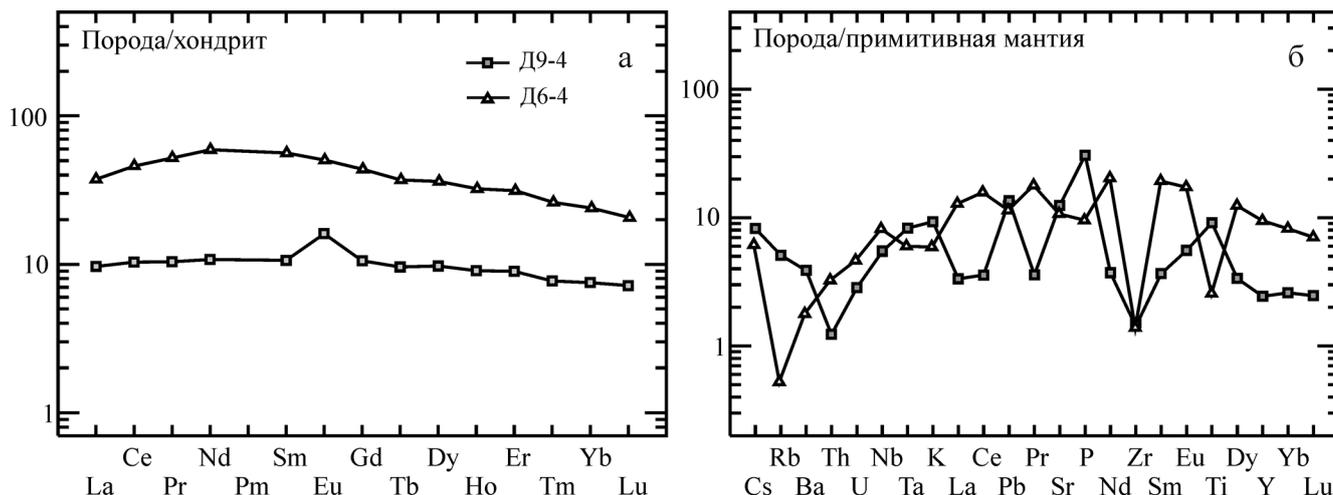
### ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Образец габбро Д9-4 был отобран из скрина между параллельными долеритовыми дайками 1-й генерации в нижней части скального обнажения на северном отроге горы 442 м в черте г. Дегтярска (рис. 1а). Образец представлен среднезернистым габбро с офитовой структурой. Зерна клинопироксена в нем полностью замещены тонкозернистым агрегатом амфибола, плагиоклаз сосюритизирован и местами полностью замещен клиноцоизитом. Как и прочие габброиды в исследуемых обнажениях, данный образец характеризуется пониженным содержанием  $K_2O$  – 0.28%, невысоким содержанием  $Na_2O$  – 3.00%, отношение  $Fe/(Fe+Mg)_{мол} = 0.52$  (табл. 1). Также стоит отметить повышенное содержание  $TiO_2$  – 5.85%, которое характерно и для некоторых образцов габбро из аналогичных обнажений восточной части Ревдинского массива. Содержание микроэлементов в пробе, по данным ICP-MS, приведено в табл. 2. Образец характеризуется пологим, близким к N-MORB спектром распределения РЗЭ ( $La_n/Yb_n = 1.24$ ) с положи-



**Рис. 1.** Обнажения комплекса параллельных даек двух генераций и жильных пород диорит-тоналитовой серии, прорывающих габбро в восточной части Ревдинского массива.

а – скальные обнажения на северном отроге горы 442 м в черте г. Дегтярск, б – обнажение в южной части горы 489.3 м в 2 км к юго-востоку от г. Дегтярск. Стрелками показано направление смещения односторонней зоны закалки в пакете параллельных даек 1-й генерации вдоль трещин, по которым внедрялись породы жильной диорит-тоналитовой серии, а затем долериты 2-й генерации. Оранжевыми точками отмечены места отбора образцов.



**Рис. 2.** Спайдер-диаграмма РЗЭ (а) и мультиэлементная диаграмма (б) для габбро (Д9-4) и тоналита жильной серии (Д6-4) из восточной части Ревдинского массива.

Состав CI хондрита и примитивной мантии – по [19].

тельной европиевой аномалией ( $Eu_n/Eu_n^* = 1.51$ ) (рис. 2а). На мультиэлементной диаграмме наблюдаются минимумы Th, Zr и максимумы Cs, Rb, P, Ti (см. рис. 2б).

Образец тоналита Д6-4 отобран из тонкого прожилка, пересекающего пакет параллельных долеритовых даек 1-й генерации, на южном отроге вершины горы 489.3 м (см. рис. 1б). Образец представлен мелкозернистым массивным тоналитом, состоящим из зонального сосюритизированного плагиоклаза, ксеноморфного по отношению к нему кварца и содержащего 5–8% амфибола. Среди

аксессуарных минералов отмечены титанит и апатит. Между зернами кварца имеются взаимопроникающие стилолитовые границы. Образец тоналита, как и аналогичные образцы диоритов и тоналитов жильной серии, характеризуется низким содержанием  $K_2O - 0.18\%$ ,  $Na_2O+K_2O = 5.62\%$ ,  $Fe/(Fe+Mg)_{mol} = 0.62$  (см. табл. 1). В пробе наблюдается наклонный спектр распределения РЗЭ с незначительным обогащением в области легких лантаноидов ( $La_n/Yb_n = 1.51$ ) (см. рис. 2а). На мультиэлементной диаграмме наблюдаются минимумы Rb, Zr и Ti (см. рис. 2б).

**Таблица 1.** Химический состав проб габбро и тоналита из восточной части Ревдинского массива

Компонент	Д9-4 (габбро)	Д6-4 (тоналит)
SiO <sub>2</sub>	44.57	62.70
TiO <sub>2</sub>	5.85	0.82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.04	15.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.54	4.44
FeO	7.10	0.50
MnO	0.201	0.082
MgO	6.29	1.52
CaO	11.19	7.44
Na <sub>2</sub> O	3.00	5.44
K <sub>2</sub> O	0.28	0.18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.67	0.21
П.п.п.	2.10	1.20
Сумма	99.83	100.13

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории ФХМИ ИГГ УрО РАН, аналитики: Л.А. Татарина, Т.М. Ятлук, В.П. Власов, Н.П. Горбунова, Г.С. Неупокоева.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы подвергались кислотному вскрытию (HF+HNO<sub>3</sub>), HCl при нагревании (200 °С) в посуде PFA Savillex. Хроматографическое выделение свинца проводилось на анионообменной смоле Bio Rad AG 1x8 по стандартной HBr-HCl-схеме [14].

Измерение изотопного состава свинца осуществлялось с помощью многоколлекторного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Neptune Plus, методом Tl<sub>N</sub> MC ICP-MS, предусматривающим нормирование результатов всех текущих измерений изотопных отношений РЬ по эталонному значению отношения <sup>205</sup>Tl/<sup>203</sup>Tl (таллийсодержащая метка добавлялась к образцу непосредственно перед измерением) и с учетом интерференций изотопа ртути 204. Параметры измерения на приборе приведены в табл. 3 и 4.

Коррекция интерференций применялась к изотопным отношениям свинца 204/206, 204/207, 204/208 по отношению Hg<sup>202/204</sup> = 4.35037.

Нормирование проводилось по экспоненциальному закону с использованием отношения Tl<sup>205/203</sup> = 0.418922.

Правильность и воспроизводимость измерений изотопного состава свинца контролировались повторными измерениями стандарта NIST 981: <sup>204</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb = 0.059061 ± 2, <sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb = 2.16799 ± 3, <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb = 914514 ± 9 (2σ<sub>ед</sub> по 21 измерению).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отношение радиогенных изотопов <sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb и <sup>208</sup>Pb к нерадиогенному <sup>204</sup>Pb в исследуемых пробах приведено в табл. 5.

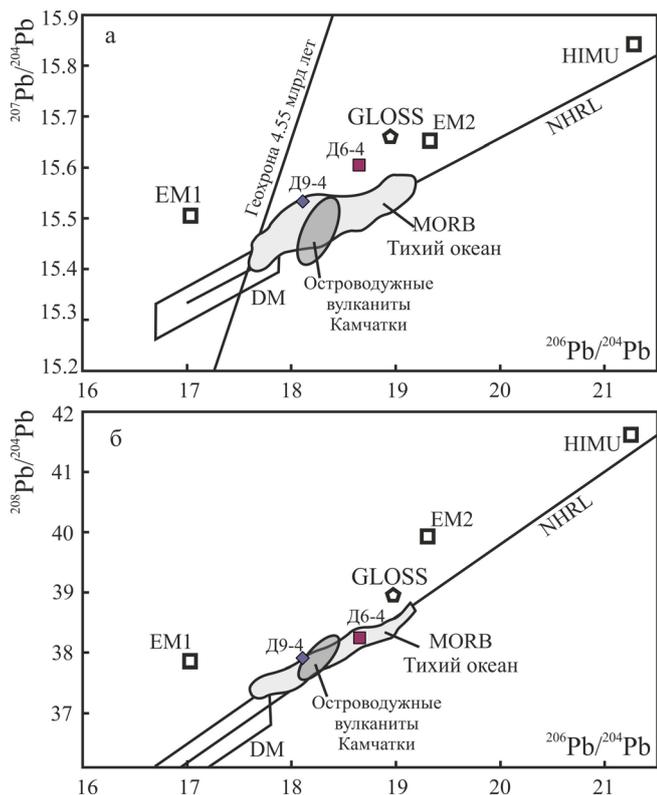
При вынесении данных на диаграмму <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb – <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb (рис. 3а) фигуративная точ-

**Таблица 2.** Содержание микроэлементов (г/т) по данным ICP-MS, в пробах габбро и тоналита из восточной части Ревдинского массива

Элемент	Д9-4 (габбро)	Д6-4 (тоналит)
Li	1.5776	0.8217
Be	0.5006	0.3803
Sc	33.880	16.732
Ti	11846	3373.4
V	300.54	29.402
Cr	0.6980	2.2165
Mn	892.24	286.55
Co	50.738	48.172
Ni	12.258	9.3954
Cu	74.888	38.455
Zn	39.887	19.197
Ga	12.121	18.288
Ge	1.1840	1.2546
Rb	3.2355	0.3400
Sr	263.07	228.53
Y	11.071	43.505
Zr	15.921	15.780
Nb	3.8760	5.8852
Mo	0.2378	0.1811
Ag	0.4594	0.1377
Cd	0.0791	0.0549
Sn	1.2548	1.0773
Sb	0.0629	0.1971
Te	0.0005	0.0000
Cs	0.0651	0.0491
Ba	27.057	12.607
La	2.2904	8.9105
Ce	6.3299	28.2485
Pr	0.9878	4.9758
Nd	5.0322	27.772
Sm	1.6264	8.6492
Eu	0.9326	2.9340
Gd	2.1665	9.0202
Tb	0.3585	1.3921
Dy	2.4715	9.2361
Ho	0.5117	1.8341
Er	1.4835	5.2143
Tm	0.1967	0.6696
Yb	1.2774	4.0899
Lu	0.1823	0.5265
Hf	0.8247	0.5134
Ta	0.3373	0.2463
W	119.62	248.39
Tl	1.6074	0.1624
Pb	0.9610	0.8197
Bi	0.0139	0.0000
Th	0.1044	0.2801
U	0.0597	0.0986

Примечание. Анализы выполнены на квадрупольном масс-спектрометре ELAN 9000 в лаборатории ФХМИ ИГГ УрО РАН, аналитики: Н.Н. Адамович и Д.В. Киселева.

ка габбро (Д9-4) ложится правее геохроны, в поле составов базальтов тихоокеанских срединно-океанических хребтов (СОХ), по [17], вблизи гра-



**Рис. 3.** Диаграммы  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (а) и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (б) для проб габбро (Д9-4) и тоналита (Д6-4) из восточной части Ревдинского массива.

DM, EM1, EM2, HIMU – по [22]; NHRL – Northern hemisphere reference line; MORB Тихого океана – по [17]; GLOSS – global subducted sediments (средний состав субдуцируемых осадков) – по [20]; островодужные вулканы Камчатки – по [18]. Погрешность определения изотопных отношений меньше, чем размер значков.

**Таблица 3.** Операционные условия работы масс-спектрометра Neptune Plus

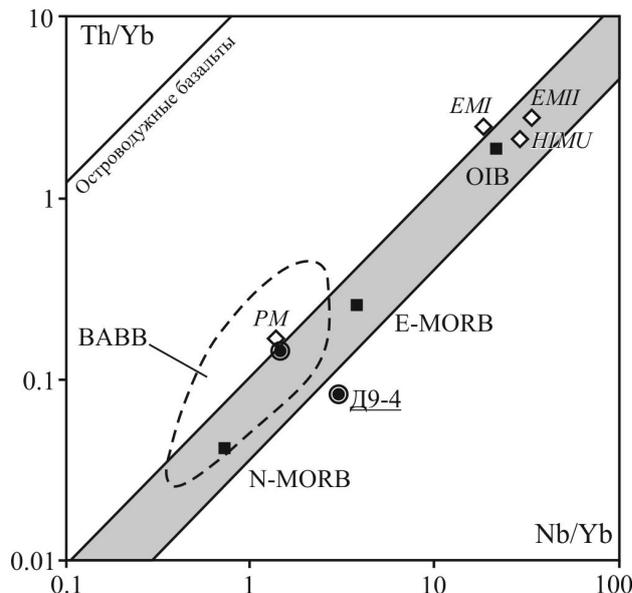
Система ввода образца	
Охлаждающий газ, л/мин	15.0
Вспомогательный газ, л/мин	0.9
Плазмообразующий газ, л/мин	1.0
Мощность радиочастотного генератора, Вт	930

**Таблица 4.** Расстановка коллекторов Фарадея [13]

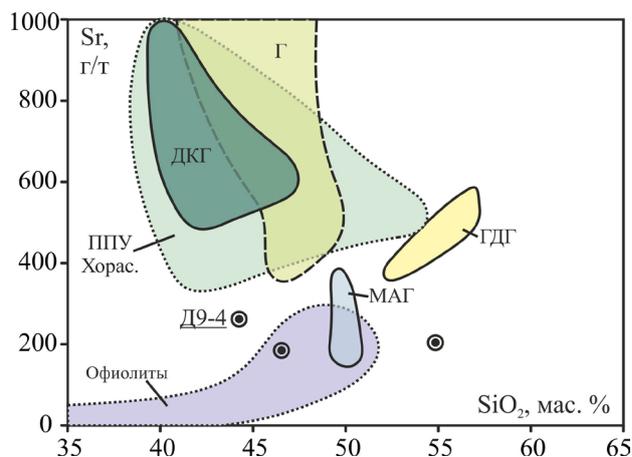
L3-F	L2-F	L1-F	C-F	H1-F	H2-F	H3-F
$^{202}\text{Hg}$	$^{203}\text{Tl}$	$^{204}\text{Pb}$	$^{205}\text{Tl}$	$^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}$

**Таблица 5.** Отношения изотопов Pb в пробах габбро и тоналита

Образец	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Std.Err.	Std.Err.(%)	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Std.Err.	Std.Err.(%)	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Std. Err.	Std. Err.(%)
Д9-4 (габбро)	18.1024	0.0006	0.003	15.5338	0.0005	0.003	37.9022	0.0012	0.003
Д6-4 (тоналит)	18.6547	0.0007	0.004	15.6026	0.0006	0.004	38.2415	0.0014	0.004



**Рис. 4.** Диаграмма Nb/Yb – Th/Yb [15] для габбро из скринов между параллельными долеритовыми дайками в восточной части Ревдинского массива. BABB – задугово-спрединговые базальты Марианского троя [16].



**Рис. 5.** Диаграмма SiO<sub>2</sub> – Sr для габбро из скринов в пакетах параллельных даек в восточной части Ревдинского массива.

Поля состава массивов Платиноносного пояса Урала: ДКГ (дунит-клинопироксенит-габбровой серии), Г (габбровой серии), ГДГ (габбро-диорит-гранитоидной серии) и МАГ (мелкозернистых амфиболовых габбро) – по данным [10]. Поля состава “ППУ Хорас.” (породы Хорасюрского массива Платиноносного пояса Урала) и “офиолиты” (породы офиолитовой ассоциации Приполярье Урала) – по данным [12].

ницы с перекрывающим его полем составов вулканитов п-ва Камчатка [18]. Проба тоналита (Д6-4) по сравнению с габбро характеризуется повышенным значением отношений  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . За счет этого на диаграмме (см. рис. 3а) проба занимает промежуточное положение между базальтами СОХ (и в частности фигуративной точкой Д9-4) и средним составом субдущируемых морских осадков [21].

На диаграмме  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (см. рис. 3б) проба габбро также попадает на границу поля составов базальтов тихоокеанских СОХ, по [17], и перекрывающего его поля вулканитов Камчатки [18]. Проба тоналита по сравнению с габбро обогащена  $^{208}\text{Pb}$ . Она также попадает в поле составов базальтов тихоокеанских СОХ, причем, как и на диаграмме  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , занимает промежуточное положение между пробой габбро и субдущируемыми осадками (GLOSS), что указывает на возможную островодужную природу тоналита.

Исследования изотопного состава свинца в пробе Д9-4 затрагивает проблему генезиса габбро, прорываемого параллельными долеритовыми дайками. С одной стороны, рассматриваемые габброиды расположены в пределах Ревдинского массива Платиноносного пояса Урала (ППУ), ограниченного тектоническими разломами, с другой, они отличаются по геохимическим признакам от классических габбро концентрически зональных массивов такого типа и, скорее, сопоставимы с офитовыми габбро офиолитовой ассоциации. На диаграмме  $\text{Nb}/\text{Yb} - \text{Th}/\text{Yb}$  (рис. 4) точки габбро тяготеют к составам океанических базальтов, промежуточных между N-MORB и E-MORB а также попадают в перекрывающее их поле базальтов зоны задугового спрединга Марианского трога, по [16]. На диаграмме  $\text{SiO}_2 - \text{Sr}$  (рис. 5) точки составов габбро из скринов между долеритовыми дайками тяготеют к области составов офиолитов Приполярного Урала, по данным [12], отклоняясь от полей составов дунит-клинопироксенит-габбровой и габбровой серии ППУ, по данным [10], и пород Хорасюрского массива ППУ, по [12], за счет пониженного содержания Sr (185–263 г/т). На вероятную принадлежность исследуемых габброидов к офиолитовой ассоциации указывает и близость изотопных соотношений свинца к базальтам СОХ (см. рис. 3). Ранее Г.Б. Ферштатером указывалось на присутствие в пределах массивов Платиноносного пояса пород офиолитовой ассоциации в виде МАГ-серии (мелкозернистые амфиболовые габбро) [11, 12]. Как правило, породы этой серии представлены метаморфизованными, полосчатыми и часто жильными разностями. Возможно, габброиды и прорывающие их параллельные долеритовые дайки в восточной части Ревдинского массива являются наиболее хорошо сохранившимися фрагментами офиолитов, послуживших исходным субстратом для пород МАГ-серии.

Таким образом, данные по исследованию изотопных соотношений свинца в пробе габбро и тоналита хорошо соотносятся с данными по их химическому и микроэлементному составу. Габбро из скринов между параллельными долеритовыми дайками соответствуют габброидам офиолитового разреза. Формирование тоналитов жильной серии, вероятнее всего, происходило в надсубдукционной обстановке.

*Исследования проводятся при финансовой поддержке проекта 12-П-5-1017 “Структурно-вещественная эволюция и металлогения базит-ультрабазитовых комплексов при формировании земной коры складчатых систем (на примере Урало-Монгольского пояса)” Программы 27 Президиума РАН.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берзин С.В. Взаимодействия комплекса параллельных долеритовых даек и габбро в восточном обрамлении Ревдинского массива (Средний Урал) // Геодинамика, рудные месторождения и глубинное строение литосферы (XV чтения памяти академика А.Н. Заварицкого). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2012. С 18–21 с.
2. Берзин С.В. Породы офиолитовых комплексов в обрамлении и в структуре Ревдинского массива Платиноносного пояса Урала // XI Международная школа наук о Земле имени Л.Л. Перчука. Одесса, 2013. С. 17–22.
3. Зенков И.И., Шилов В.А. и др. Геологическая карта Урала масштаба 1:50 000 Листы О-40–120-Б (восточная половина), О-40–120-Г (восточная половина), О-40–132-Б (восточная половина), О-40–132-Г (восточная половина), О-41–109-В, О-41–121-А, О-41–121-В, О-41–133-А (северо-западная четверть) (Отчет Ревдинского отряда по геологической съемке и доизучению, проведенных в 1968–1973 гг.). Свердловск, 1973.
4. Иванов К.С., Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Смирнов В.Н. Офиолитовые комплексы Среднего Урала. Путеводитель геологической экскурсии Всероссийской научной конференции с международным участием “Геодинамика, рудные месторождения и глубинное строение литосферы” (XV чтения памяти академика А.Н. Заварицкого). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2012. 39 с.
5. Коротеев В.А., Семенов И.В. Влияние конвекционно-спрединговых и мантийно-плюмовых процессов в формировании химического состава базальтов и плутонических пород рифта палеоуральского океана // Литосфера. 2008. № 5. С. 54–83.
6. Семенов И.В. Палеоокеанический спрединговый вулканизм Урала и реконструкция параметров Уральского палеозойского океана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 362 с.
7. Семенов И.В., Шилов В.А., Верховский А.М. О структурных и возрастных соотношениях рифтогенного комплекса параллельных базальтовых даек с габбро-гипербазитовыми массивами Платиноносного пояса Урала // Докл. АН СССР. 1978. Т. 243, № 1. С. 187–190.

8. Семенов И.В., Шилов В.А., Ронкин Ю.Л. Структурные и относительно-возрастные соотношения комплекса параллельных долеритовых даек с породами Ревдинского габбрового массива (Средний Урал) // Ежегодник-1998. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1999. С. 132–139.
9. Фоминых В.Г., Латыш И.К., Шилов В.А. Ревдинский массив и его титаномагнетитовые руды // Минералогия и геохимия железорудных месторождений Урала. Свердловск, 1974. С. 43–80.
10. Феритатер Г.Б. Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 368 с.
11. Феритатер Г.Б., Краснобаев А.А., Беа Ф., Монтеро П., Бородина Н.С. Интрузивный магматизм ранних стадий развития Уральского эпикоеанического орогена: U-Pb геохронология (LA-ICPMS, NORDSIM, SHRIMP-II), геохимия, закономерности эволюции // Геохимия. 2009. № 2. С. 150–170.
12. Шмелев В.Р. Магматические комплексы зоны Главного уральского глубинного разлома (Приполярный сектор) в свете новых геохимических данных // Литосфера. 2005. № 2. С. 41–59.
13. Collerson K. D., Kamber B. S., Schoenberg R. Applications of accurate, high-precision Pb isotope ratio measurement by multi-collector ICP-MS // Chem. Geol. 2002. V. 188. P. 65–83.
14. Kamber B. S., Gladu A. H. Comparison of Pb purification by anion-exchange resin methods and assessment of long-term reproducibility of Th/U/Pb ratio measurements by quadrupole ICP-MS // Geostan. Geoanal. Res. 2009. V. 33. P. 169–181.
15. Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // Lithos. 2008. V. 100. P. 14–48.
16. Pearce J.A., Stern R.J., Bloomer S.H., Fryer P. Geochemical mapping of the Mariana Arc-Basin System: implications for the nature and distribution of subduction components // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2005. V. 6. Iss. 7. Q07006.
17. Plank T., Langmuir C.H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle // Chem. Geol. 1998. V. 145. P. 325–394.
18. Saha A., Basua A.R., Jacobsen S.B., Poreda R.J., Yin Q.-Z., Yogodzinski G.M. Slab devolatilization and Os and Pb mobility in the mantle wedge of the Kamchatka arc // Earth Planet. Sci. Lett. 2005. V. 236. P. 182–194.
19. Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society. L., 1989. V. 42. P. 313–345.
20. White W.M., Hofmann A.W., Puchelt H. Isotope geochemistry of Pacific mid-ocean ridge basalt // J. Geophys. Res., B: Solid Earth Planets. 1987. V. 92. P. 4881–4893.
21. Wilson B.M. Igneous petrogenesis a global tectonic approach. L., 1989. 466 p.
22. Zindler A., Hart S. Chemical geodynamics // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1986. V. 14. P. 493–571.