УДК 552.11/12+551.24

СИНПЛУТОНИЧЕСКИЕ ДАЙКИ В ГРАНИТОИДАХ ВЕРХИСЕТСКОГО МАССИВА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

Е.А. Зинькова, Г.Б. Ферштатер
Институт геологии и геохимии УрО РАН
620151, г. Екатеринбург, Почтовый пер., 7
E-mail: zinkova@yandex.ru, gerfer@online.ural.ru
Поступила в редакцию 28 февраля 2006 г.

Гранитоиды Верхисетского массива насыщены синплутоническими дайками и их включениями, варьирующими по составу от габбро до гранодиоритов. Дайки сопряжены с ранними существенно гранодиоритовыми сериями массива, верхний возрастной рубеж которых 320 млн. лет, и отсутствуют в гранитах центральных тел массива, датированных возрастом 275-290 млн. лет. Структурно-текстурные особенности даек и их тесная сопряженность с надсубдукционными образованиями свидетельствуют о внедрении их при общем конвергентном режиме, а сходство по химическому составу с породами адакитовых серий – высокие содержания Sr (> 400 г/т) и Al (> 15 вес. %), отсутствие европиевой аномалии, низкие содержания Yb (< 1,5 г/т) и Y (< 15 г/т), низкие содержания Nb и Ta; высокие Sr/Y (> 40) и La/Yb (> 20) отношения, повышенное содержание натрия (4-5,2 вес. %) – позволяет предположить наличие во время общего режима конвергенции локальных эпизодов рифтогенной обстановки.

Ключевые слова: *синплутонические дайки, субдукция, адакитовая химия, базитовый магматизм, батолитовые интрузии.*

SYNPLUTONIC DYKES IN VERKHISETSK GRANITOID MASSIF (MIDDLE URAL)

E.A. Zin'kova, G.B. Fershtater
Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

Granitoids of Verkhisetsk massif are filled by synplutonic dykes and their inclusions, which composition varies from gabbro to granodiorite. Dykes are connected with old mainly granodiorite massif series, which upper age limit 320 Ma and they are absent in the central granite bodies of massif dated as 275-290 Ma. Structural-textural features of dykes and their close conjugation with subduction-related rocks evidence of their intrusion during total convergent regime. Their adakite-like chemistry – high Sr (> 400 ppm) and Al (> 15 w. %) content, the absence of Eu-anomaly, low Yb (< 1,5 ppm), Y (< 15 ppm) and HFSE (Nb, Ta) content, high Sr/Y (> 40) and La/Yb (> 20) ratio, increased natrium (4-5,2 w. %) content – let us to suppose the presence during total convergent regime the local episodes of rift-tectonic setting.

Key words: *synplutonic dykes, subduction, adakite chemistry, basic magmatism, batholith intrusions.*

Введение

Базитовый магматизм, продукты которого эволюционируют до гранодиоритового, часто сопровождает становление гранитоидных батолитовых интрузий активных континентальных окраин андийского типа и подробно рассмотрен в геологической литературе [Hyndman, Foster, 1988; Barbarin et al, 1989; Barbarin, 1991; Tepper, 1996]. Классическими примероми батолитовых интрузий такого типа являются батолиты западного побережья Северной и Южной Америки – это батолиты Каскадных гор, Сьерра-Невады, Прибрежные батолиты Южной Америки. Повсеместно они сопровождаются небольшими базитовыми интрузиями, синплутоническими мафитовыми дайками и меланократовыми включениями, составляющими до 20 % об-

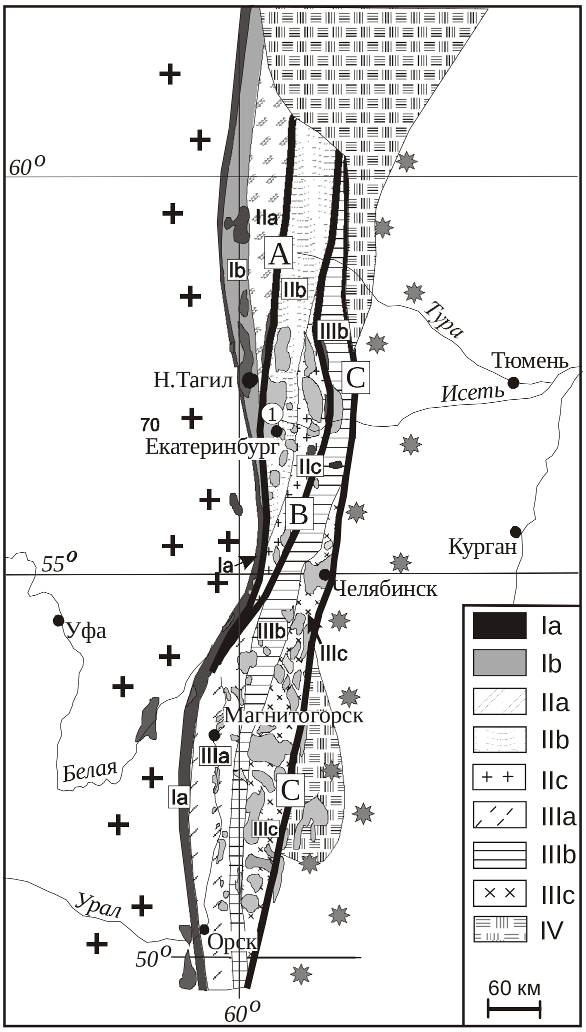


Рис. 1. Схема тектоно-магматического районирования Среднего и Южного Урала [Ферштатер, 1992].

I-III – мегаблоки: I – общеуральский шовный с фрагментами коры океанического типа, включающий зоны Главного Уральского глубинного разлома (Ia) и Платиноносного пояса (Ib); II и III – северо-западный (II) и юго-восточный (III) островодужно-континентальные, состоящие из трех однотипных зон: островодужной (IIa, IIIa), окраинно-континентальной (IIb, IIIb) и континентальной (IIc, IIIc). Крупными крестами обозначен палеоконтинентальный сектор, пассивная палеоокраина; звездочками – Зауралье, зона перехода к казахстанидам. IV – Зауральские террейны.

Жирные линии – тектонические швы, разделяющие крупные структуры Урала: Серовско-Маукский (А), Алапаевский (В), Челябинский (С). Цифрой 1 в кружке обозначен Верхисетский массив.

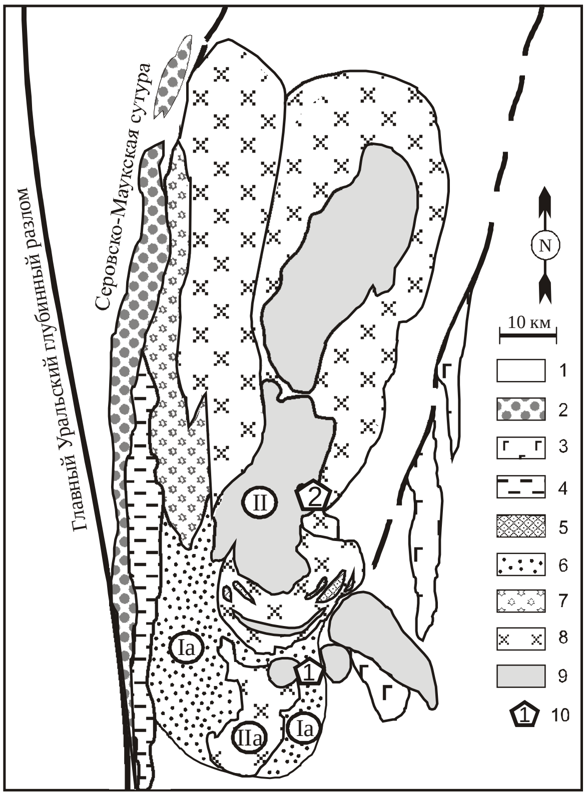
щего объема гранитоидов и имеющими важное значение для решения вопросов их генезиса.

Сходен с ними и Верхисетский массив, расположенный вблизи г. Екатеринбурга, – крупнейшее на Урале батолитообразное тело в пределах палеоокраинно-континентальной области (рис. 1). Его общая площадь достигает 1800 км^2. Массив залегает среди вулканогенных, вулканогенно-осадочных и интрузивных пород силурийско(?)-девонского возраста. Результаты проведенных изотопных исследований позволили выделить в истории формирования массива два крупных этапа. На протяжении первого, верхний возрастной рубеж которого 320 млн. лет, сформировались существенно гранодиоритовые серии; второй этап, в течение которого образовались массивные граниты центральных тел массива, относится к ранней перми [Bea et al., 1997; Смирнов и др., 1998].

Дайки и их включения пространственно и генетически связаны с ранними существенно гранодиоритовыми сериями массива и отсутствуют в гранитах центральных тел. Морфология даек, их текстурно-структурные особенности и сходство химического состава с вмещающими гранитоидами позволяют отнести их к разряду синплутонических. К признакам, позволяющим определить дайки как синплутонические, относятся: (1) наличие в дайках ксенолитов вмещающих их гранитоидов пластично деформированной формы (рис. 2В); (2) наличие в гранодиоритах многочисленных включений, по химическому и минеральному составу идентичных составам даек; (3) неправильная форма, наличие неправильных инъекционных контактов даек, обусловленные их внедрением в вязкую среду не полностью закристаллизованных гранитоидов (рис. 2 А,Б); (4) единый план пластических деформаций даек и вмещающих гранитоидов; (5) специфическая петрографическая структура даек, образованная как за счет их автометаморфизма, так и под влиянием еще не остывших гранитоидных масс, вмещающих эти дайки. Вышеперечисленные особенности даек и их включений часто упоминаются также в литературных источниках [Hyndman, Foster, 1988; Pitcher, 1991] и не оставляют сомнений в их синплутонической природе. В данной статье приводится подробное описание геологии, минерального состава, петро- и геохимических характеристик таких даек с целью определения их петрогенезиса и роли в образовании гранитоидов массива.

Рис. 2. Синплутонические дайки Верхисетского массива. Исетский карьер на западном берегу Исетского озера.

А – общий вид дайки, Б – сложная дайка с сопутствующими ей лейкократовыми породами, В – ксенолит вмещающих гранодиоритов в дайке, Г – две генерации даек.



Геология даек

Верхисетский батолит имеет сложное внутреннее строение. В его пределах выделено шесть соприкасающихся и частично наложенных друг на друга разновозрастных структур изометричной и эллипсовидной формы (рис. 3). Были изучены дайки и их включения в Чусовской и Сагринской структурах, наиболее глубоко эродированных и вскрытых карьерами, что позволило в деталях изучить их строение. Дайки обычно образуют густые рои во вмещающих гранитоидах. Их мощность достигает 1,5-2 м, состав варьирует от габбро до гранодиоритов (табл. 1).

По морфологическим особенностям дайки делятся на два типа. Первый – это сложные дайки с сопутствующими им лейкократовыми породами, образующими либо жилы, либо цепочки будиноподобных тел внутри даек (рис. 2Б). Жилы, как правило, занимают эндоконтактовые части даек, а будиноподобные цепочки – их центральную часть. Второй тип даек имеет однородное строение (рис. 2Г).

В Чусовской структуре, сложенной преимущественно роговообманковыми габбро и диоритами, развиты дайки основного и кислого состава, а также сложные дайки, где лейкократовые порции расплава выполняют струи в меланократовых частях даек, захватывая небольшие их порции (карьер на горе Хрустальной). В отдельных фрагментах сложных даек вещество основного состава находится в виде каплевидных включений в лейкократовой части дайки, напоминая картину минглинга, что указывает на синхронность внедрения основных и кислых расплавов. Контакты даек с вмещающими диоритами резкие, но порой параллельные гнейсовидности последних, что свидетельствует о внедрении даек в неполностью закристаллизованные породы и является одним из признаков их синплутоничности.

В Исетском карьере, расположенном на западном берегу Исетского озера, гранодиориты насыщены не только многочисленными дайками, но и включениями идентичных им пород. Минеральный и химический состав тех и других варьирует от кварцевых диоритов до гранодиоритов и при одной и той же кремнекислотности одинаков. Сходство химического и минерального состава даек и включений не оставляет сомнений в единстве происхождения тех и других. В литературных источниках [Hyndman, Foster, 1988; Barbarin et al., 1989; Pitcher, 1991] также часто указывается, что фрагментация вещества даек является веским аргументом в пользу их синплутонической природы. В Исетском карьере включения часто имеют форму будин, где гнейсовидность вмещающих их гранодиоритов обтекает эти будины, что указывает на общий режим сжатия в процессе внедрения даек в еще пластичные гранодиориты. Дайки имеют резкие контакты с вмещающими гранодиоритами (рис. 2А,Б), иногда волнистой, иногда инъекционной формы, и рассекаются более поздними порциями вмещающих их гранодиоритов, а также аплитами, что указывает на их внедрение до окончания кристаллизации гранодиоритового расплава. Иногда дайки содержат в себе ксенолиты вмещающих их гранодиоритов (рис. 2В). Гнейсовидность в дайках параллельна их контактам, а также гнейсовидности вмещающих гранодиоритов.

Петрография и химический состав даек

Как уже говорилось, состав даек и их фрагментов варьирует от габбро до гранодиоритов (табл. 1). По своему облику это более мелкозернистые породы, чем вмещающие их гранитоиды, с гнейсовидной текстурой и порфировидной структурой (рис. 4А) как за счет порфировидных выделений зонального плагиоклаза размером до 2-3 мм, так и за счет порфировидных выделений меланократовых минералов: биотита, роговой обманки и иногда клинопироксена. Структура основной массы полнокристаллическая, аллотриоморфнозернистая. Базис состоит из мелких табличек и ксеноморфных зерен плагиоклаза, призмочек роговой обманки, мелких чешуек и табличек биотита в срастании с эпидотом, редких ксеноморфных зерен калиевого полевого шпата, представленного микроклином. Ядра плагиоклаза иногда соссюритизированы, иногда по ним развивается карбонат, мусковит. Зерна плагиоклаза часто содержат округлые каплевидные включения кварца, что очень характерно для даек. По всей видимости, специфичность петрографических структур даек была образована как за счет их автометаморфизма, так и под влиянием еще не остывших гранодиоритовых масс, в которые внедрялись дайки. В некоторых литературных источниках [Hyndman, Foster, 1988; Pitcher, 1991]

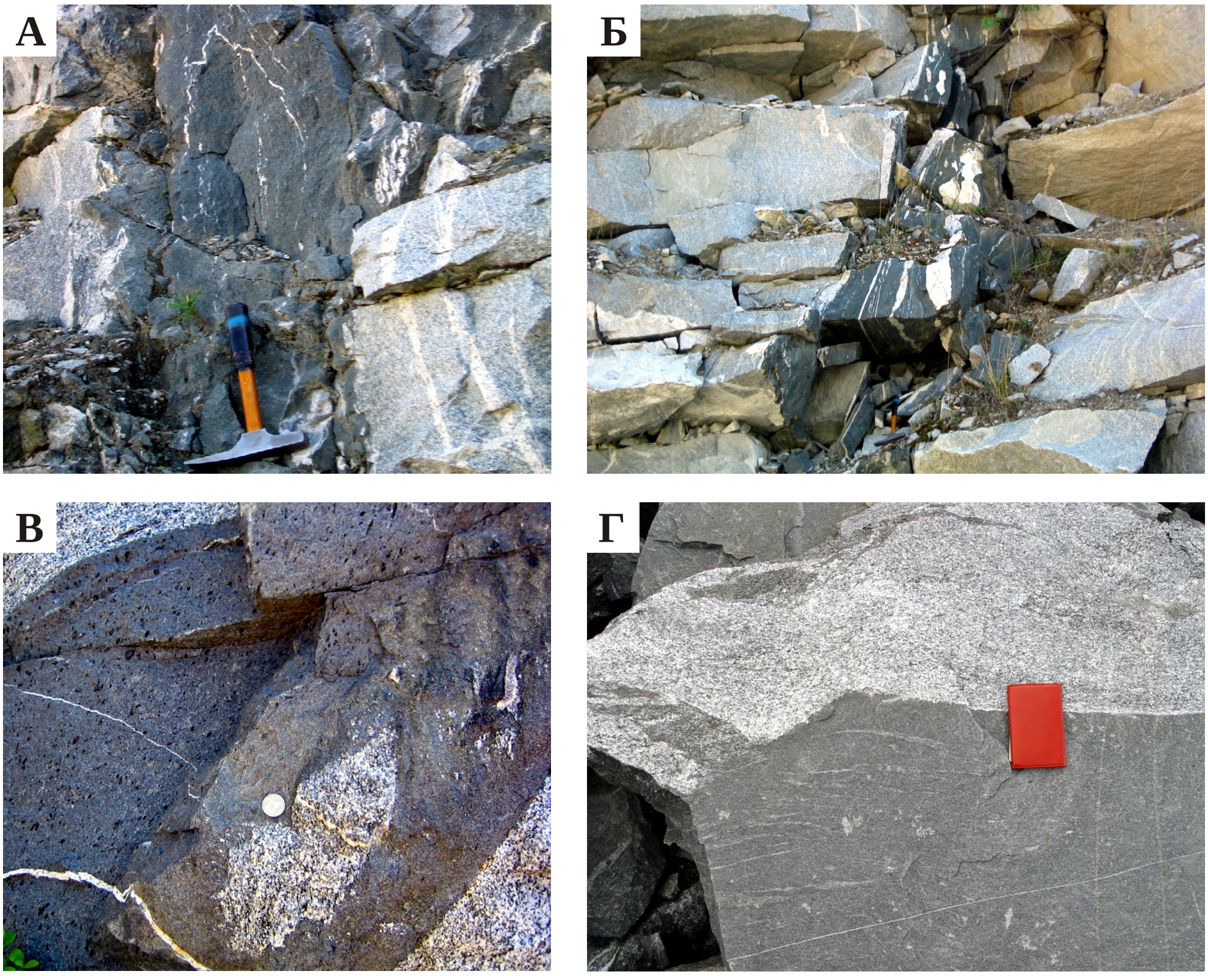


Рис. 3. Схематическая геологическая карта Верхисетского батолита (составлена по материалам Д.А. Двоеглазова, Г.Н. Кузовкова, Д.С. Вагшаля, 1972-1979 гг., и авторов).

1-4 – породы рамы Верхисетского батолита: 1 – вулканогенные и вулканогенно-осадочные толщи силурийского и раннедевонского возрастов, 2 – ультрамафиты, 3 – габбро, 4 – плагиогранитоиды; 5-9 – породы Верхисетского батолита: 5 – ксенолиты габброидов Северского плутона, 6 – габбро-диоритовая серия, 7 – тоналит-трондьемитовая серия, 8 – тоналит-гранодиоритовая серия, 9 – адамеллит-гранитная серия, 10 – места распространения роев синплутонических даек: 1 – карьер на г. Хрустальной, 2 – Исетский карьер. Римские цифры в кружках – плутоны Верхисетского батолита, где обнаружены рои синплутонических даек: Ia – Чусовской, IIa – Московский, составляющие Чусовскую структуру; II –Сагринский.

Таблица 1

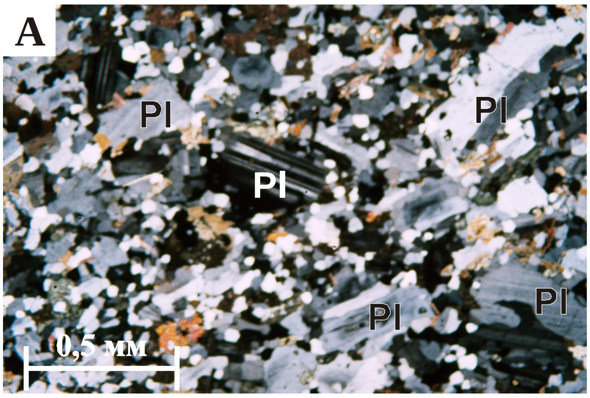
Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в синплутонических дайках и включениях в гранитоидах Верхисетского массива

	1	2	3	4	5	6	7
Компонент	Ви-635	Ви-638	Ви-578	Ви-577	Ви-579	Ви-660	Ви-639
SiO_2	52,29	53,54	57,26	60,81	63,31	71,19	72,54
TiO_2	1,32	0,85	0,72	0,75	0,58	0,178	0,141
Al_2O_3	15,22	17,39	15,63	16,08	16,65	15,73	15,79
Fe_2O_3	4,77	3,52	4,26	3,62	1,99	0,97	0,37
FeO	4,43	4,48	2,33	2,33	2,33	0,40	0,71
MnO	0,140	0,144	0,12	0,12	0,08	0,034	0,024
MgO	5,07	3,73	5,43	3,35	2,94	0,78	0,63
CaO	6,79	6,37	6,23	5,41	4,72	2,56	2,00
Na_2O	3,83	4,61	4,72	4,57	4,54	4,47	3,39
K_2O	2,57	2,14	1,85	1,71	1,84	2,24	4,59
P_2O_5	0,56	0,54	0,25	0,24	0,18	0,05	0,06
ппп	1,23	1,06	1,12	1,05	0,87	0,12	0,35
сумма	98,22	98,36	99,93	100,04	100,03	98,71	100,58
Li	37,18	33,72	33,72	38,64	29,67	8,23	5,75
Rb	70	58	55	51	52	38	60
Cs	3,81	3,36	5,81	2,34	1,83	1,30	0,94
Be	2,18	2,86	1,84	1,65	1,43	3,65	1,61
Sr	796	1002	695	599	543	616	654
Ba	394	558	312	386	439	1272	1337
Sc	18	14	16	13	9	3	1
V	183	158	119	107	73	17	15
Cr	55	16	163	36	52	8	9
Co	26	20	20	14	9	3	2
Ni	57	11	93	19	26	4	1
Cu	262	174	28	25	19	97	78
Zn	96	80	66	65	46	20	14
Ga	24	23	18	18	17	17	15
Y	20	20	13	16	10	7	3
Nb	14,6	11,6	7,5	8,2	5,6	4,9	2,1
Ta	0,78	0,51	0,38	0,63	0,31	0,83	0,05
Zr	102	120	79	97	79	83	53
Hf	2,78	3,03	1,88	2,48	2,10	2,48	1,56
Mo	0,55	0,42	0,05	0,07	0,00	0,25	0,21
Sn	4,31	3,94	2,07	0,95	2,28	2,78	2,76
Pb	11	12	10	11	14	15	21
U	4,57	4,63	1,98	3,05	2,76	1,65	1,11
Th	4,63	7,77	3,89	4,61	3,83	7,82	2,57
La	22,32	49,74	24,61	22,48	15,47	22,86	8,55
Ce	56,31	99,58	47,21	46,08	30,78	43,36	17,31
Pr	7,57	11,27	5,59	5,53	3,64	4,49	1,77
Nd	33,30	42,60	20,77	22,31	14,05	15,00	6,39
Sm	6,90	7,07	3,78	4,41	2,64	2,45	1,26
Eu	1,80	1,95	1,17	1,24	0,85	0,68	0,42
Gd	5,52	5,48	3,21	3,60	2,28	1,73	0,93
Tb	0,77	0,75	0,47	0,54	0,35	0,26	0,13
Dy	4,13	3,75	2,59	3,09	1,94	1,35	0,65
Ho	0,77	0,71	0,50	0,60	0,38	0,26	0,11
Er	1,93	1,88	1,29	1,54	1,00	0,68	0,28
Tm	0,28	0,28	0,19	0,23	0,15	0,11	0,04
Yb	1,60	1,76	1,22	1,46	0,96	0,66	0,23
Lu	0,24	0,27	0,19	0,23	0,15	0,10	0,04

Окончание таблицы 1

	8	9	10	11	12	13	14
Компонент	Ви-610	Ви-608	Ви-630	Ви-631	Ви-622	Ви-488	Ви-486
SiO_2	47,02	48,43	52,49	62,68	65,82	63,41	64,09
TiO_2	1,08	1,00	1,118	0,580	0,367	0,66	0,64
Al_2O_3	15,76	17,31	16,24	17,09	17,52	16,03	17,03
Fe_2O_3	5,89	8,83	7,39	3,85	2,50	4,56	2,38
FeO	6,46	3,03	1,55	1,11	0,66	0,72	2,51
MnO	0,22	0,21	0,136	0,073	0,077	0,10	0,11
MgO	5,02	4,35	5,45	2,98	1,61	2,79	1,97
CaO	9,59	9,73	7,25	4,03	3,07	4,72	3,95
Na_2O	4,31	3,86	3,90	4,11	4,81	4,48	5,04
K_2O	1,55	1,44	1,63	2,17	2,44	2,00	1,67
P_2O_5	0,26	0,28	0,36	0,23	0,17	0,26	0,31
ппп	2,11	1,29	1,55	1,11	0,66	0,66	0,77
сумма	99,27	99,75	99,04	100,02	99,72	100,39	100,76
Li	18,22	18,15	н. опр.	н. опр.	н. опр.	15,20	11,52
Rb	36	30	25	65	55	41	14
Cs	2,21	0,94	0,98	3,27	2,05	1,19	1,15
Be	1,09	1,20	1,46	1,52	1,58	1,15	1,18
Sr	897	973	593	715	834	650	581
Ba	308	456	282	543	631	637	432
Sc	32	27	23	9	4	10	4
V	364	316	179	93	50	83	56
Cr	8	6	119	17	12	30	8
Co	36	29	26	11	5	10	5
Ni	12	5	87	24	9	29	6
Cu	351	334	19	12	4	14	17
Zn	95	101	73	54	39	65	0
Ga	21	22	18	19	17	16	17
Y	19	20	23	11	8	11	13
Nb	4,1	4,0	7,8	9,2	6,0	7,2	7,4
Ta	0,27	0,25	0,50	0,51	0,38	0,44	0,43
Zr	32	34	129	144	131	12	71
Hf	1,15	1,18	2,65	3,15	2,84	0,74	2,28
Mo	0,81	0,38	0,31	0,16	0,10	0,66	0,20
Sn	0,00	0,61	н. опр.	н. опр.	н. опр.	1,00	1,52
Pb	8	8	7	12	14	10	1
U	1,09	0,73	0,82	2,30	1,69	2,01	1,07
Th	3,05	2,75	2,04	6,64	4,72	4,89	2,85
La	25,90	23,86	21,88	17,71	10,86	21,28	19,19
Ce	53,79	53,51	39,51	35,96	20,16	43,18	38,10
Pr	7,06	7,13	5,03	4,00	2,20	4,85	4,74
Nd	29,75	30,56	21,54	14,75	8,37	17,36	17,77
Sm	6,20	6,27	4,56	2,95	1,63	3,24	3,59
Eu	1,79	1,82	1,26	0,88	0,56	0,93	0,97
Gd	4,91	5,01	3,77	2,47	1,21	2,74	2,80
Tb	0,70	0,71	0,64	0,37	0,20	0,36	0,42
Dy	3,69	3,67	3,68	1,78	1,19	1,99	2,41
Ho	0,72	0,72	0,87	0,41	0,27	0,40	0,49
Er	1,85	1,88	2,04	1,09	0,63	1,05	1,25
Tm	0,28	0,30	0,29	0,14	0,09	0,15	0,19
Yb	1,76	1,79	2,07	0,97	0,68	1,01	1,20
Lu	0,27	0,26	0,25	0,14	0.09	0,16	0,18

Примечание. 1-7 – синплутонические дайки (1, 2, 5), включения (3, 4) и лейкократовые жилы (6, 7) в них, Исетский карьер на западном берегу Исетского озера; 8-12 – дайки Чусовской структуры: 8-9– Новомосковский тракт, 10-12 – карьер «Гора Хрустальная»; 13-14 – синплутонические дайки, 78-й км. Новотагильского тракта.



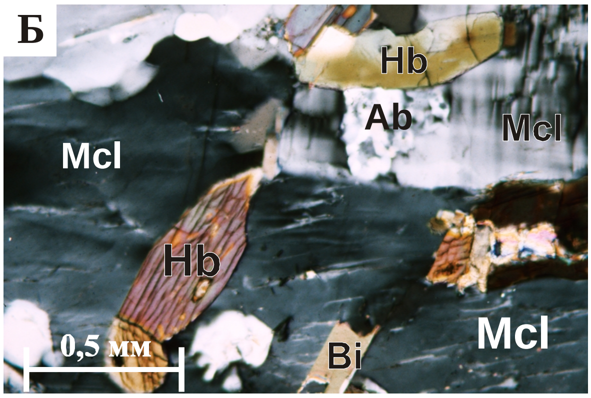


Рис. 4. Фото шлифа синплутонических даек Верхисетского массива.

А – общий вид порфировидной структуры, выраженной «порфировидными выделениями» плагиоклаза (Pl); Б – фрагмент лейкократового «глазка» в дайке, выполненного микроклином (Mcl) с включениями зерен роговой обманки (Hb), биотита (Bi) и мирмекита (Ab). Ник. +.

такие структуры даек рассматриваются в качестве доказательства их синплутоничности. Редко встречающиеся порфировидные зерна клинопироксена по краям замещаются роговой обманкой. Для роговой обманки характерна ситовидная структура; включения, обычно сконцентрированные в центральной части зерна, представлены кварцем округлой формы. Вероятно, насыщенность роговой обманки включениями кварца можно отнести за счет реакции замещения зерен клинопироксена роговой обманкой, при которой может освобождаться кремнекислота в виде кварца. Акцессорные минералы представлены эпидотом, сфеном, апатитом, реже цирконом и ортитом, магнетитом и единичными зернами рутила. В дайках с однородным строением, где отсутствуют лейкократовые жилы, встречаются каплевидные лейкократовые включения размером от первых миллиметров до сантиметра, состоящие из микроклина, идиоморфных зерен роговой обманки, биотита и мирмекита (рис. 4Б).

В целом, все породы включений и даек массива, как и гранитоиды, вмещающие их, относятся к породам известково-щелочной серии. На классификационной диаграмме (K_2O + Na_2O–SiO_2) часть синплутонических даек и их включений попадает в поле субщелочных пород, а более кислые их разности практически совпадают с трендом распределения гранитоидов исетской тонали-гранодиоритовой серии массива (рис. 5А), указывая на единый генезис пород. Как правило, признаки повышенной щелочности проявляют более основные разности даек, находящиеся на классификационной диаграмме (K_2O–SiO_2) в поле высококалиевых пород (рис. 5Б). Для даек диоритового и гранодиоритового составов характерно умеренное содержание калия и повышенное содержание натрия, что также является химической особенностью гранитоидов исетской серии массива (рис. 5В) и характерно для пород с «адакитовой химией» в целом [Defant, Drummond, 1990, 1993; Defant et al., 1991; Sajona et al., 1996]. На петрохимических вариационных диаграммах (рис. 5Г,Д,Е) тренды распределения синплутонических даек массива и их включений продолжаются трендами распределения гранитоидов массива, подтверждая единый генезис пород.

На диаграмме Sr/Y–Y (рис. 6) большинство синплутонических даек и их фрагментов в Верхисетском массиве, а также лейкократовая жила из сложной дайки и гранитоиды исетской тоналит-гранодиоритовой серии находятся в поле архейских высокоглиноземистых трондьемит-тоналит-дацитовых серий, совпадающем с адакитами массива Кордильера Бланка и современными адакитами Филиппинской островной дуги, указывая таким образом на сходные условия образования всех вышеперечисленных пород.

На графике распределения РЗЭ (рис. 7А) составы синплутонических даек и их включений практически совпадают с областью составов пород исетской тоналит-гранодиоритовой серии, а также перекрываются полем составов адакитов массива Кордильера Бланка и современных адакитов Филиппинской островной дуги. Для всех вышеперечисленных пород характерно отсутствие европиевой аномалии.

На спайдер-диаграмме (рис. 7Б) все синплутонические дайки и включения, лейкократовая жила в сложной дайке, а также гранитоиды исетской тоналит-гранодиоритовой серии Верхисетского массива проявляют отрицательные ниобиевые и титановые аномалии, характерные практически для всех надсубдукционных образований. Для всех даек и включений характерна положительная стронциевая аномалия, что также является геохимической особен-

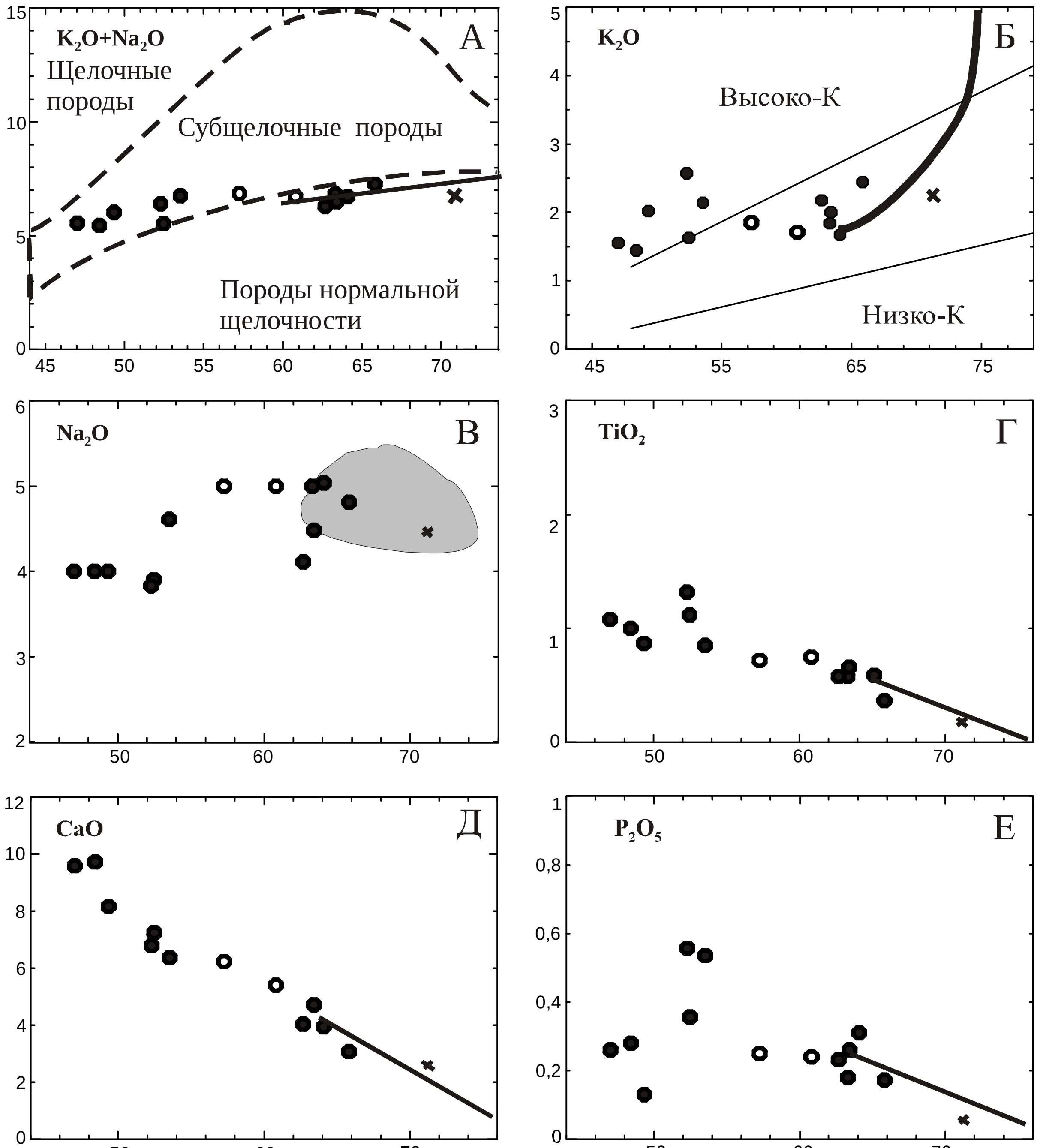


Рис. 5. Классификационные (А, Б) и вариационные (В, Г, Д, Е) диаграммы для синплутонических даек (1) и включений (2) в гранитоидах Верхисетского массива; 3 – лейкократовая жила в сложной дайке.

Затемненным полем и жирными линиями (тренды) обозначены составы исетской тоналит-гранодиоритовой серии, наиболее распространенной в Верхисетском массиве. Пунктирной линией обозначена область распространения субщелочных магматических пород [Классификация…, 1981]. Классификационные поля на диаграмме K_2O-SiO_2 вынесены по [Le Maitre, 1989].

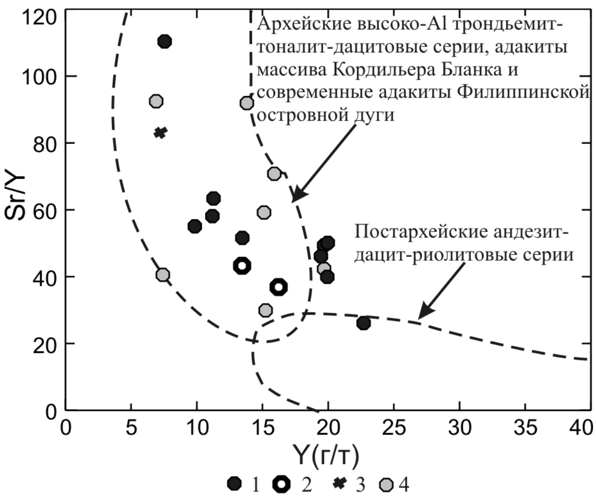


Рис. 6. Диаграмма Sr/Y–Y для синплутонических даек (1) и включений (2) в гранитоидах Верхисетского массива; 3 – лейкократовая жила в сложной дайке; 4 – породы исетской тоналит-гранодиоритовой серии.

Пунктирной линией показано поле архейских высокоглиноземистых трондьемит-тоналит-дацитовых серий [Petford, Atherton, 1996], с которыми совпадают адакиты массива Кордильера Бланка и современные адакиты Филиппинской островной дуги [Sajona et al., 1996] и поле постархейских андезит-дацит-риолитовых серий.

ностью адакитов массива Кордильера Бланка и адакитов Филиппинской островной дуги.

Заключение

Суммируя все приведенные выше петро- и геохимические особенности синплутонических даек Верхисетского массива, мы пришли к выводу, что они образуют единую серию с тоналитами и гранодиоритами массива, а также проявляют сходство с породами адакитовых серий по следующим химическим характеристикам:

1 – высокие содержания Sr (> 400 г/т) и Al (> 15 вес. %);

2 – отсутствие европиевой аномалии;

3 – низкие содержания Yb (< 1,5 г/т) и Y (< 15 г/т);

4 – низкие содержания Nb, Ta;

5 – высокие Sr/Y (> 40) и La/Yb (> 20) отношения;

6 – повышенное содержание натрия (4-5,2 вес. %);

Первые две химические особенности пород объясняются неустойчивостью плагиоклаза в области их магмогенерации. Низкие содержания Yb, Y, Nb, Ta, по всей видимости, являются следствием устойчивости амфибола и сфена [Зинькова, Ферштатер, 2000; Зинькова, 2002]. Геологическим подтверждением устойчивости этих минералов является их постоянное присутствие в реститах мигматизированных серий массива. Повышенное содержание натрия согласуется с данными экспериментальных изучений по плавлению амфиболитов, проведенных в связи с проблемами генезиса тоналит-

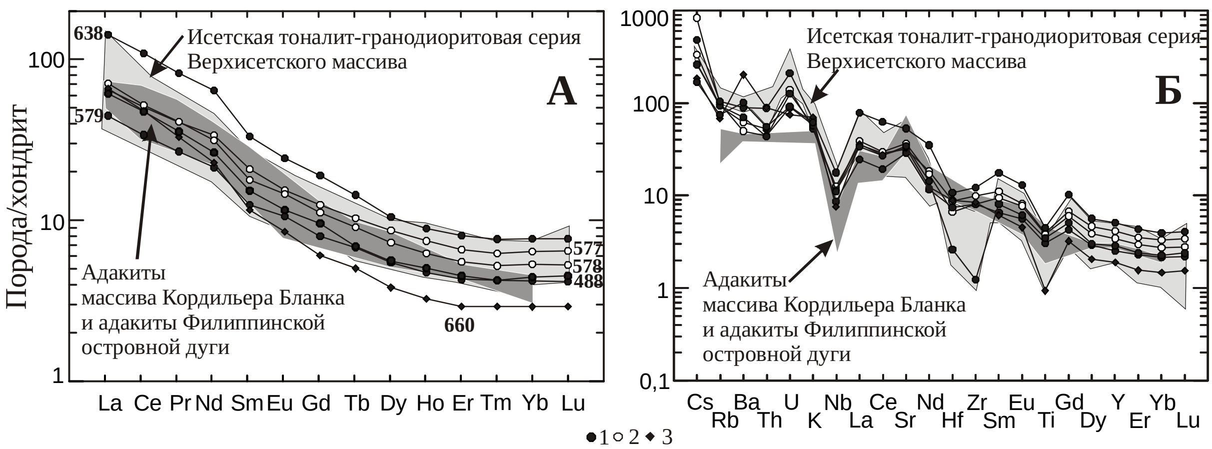


Рис. 7. Распределение РЗЭ (А) и нормированные к примитивной мантии (Б) составы в типичных образцах синплутонических даек (1) и включений (2) в гранитоидах Верхисетского массива; 3 – лейкократовая жила в сложной дайке.

Светло-серым тоном показаны области составов пород исетской тоналит-гранодиоритовой серии Верхисетского массива. Темно-серым тоном показаны поля составов адакитов массива Кордильера Бланка и современных адакитов Филиппинской островной дуги (А) и адакитов Филиппинской островной дуги (Б). Цифрами обозначены номера образцов, приведенные в таблице.

трондьемитовых магматических серий [Ходоревская, Жариков, 1998], когда более натриевый тренд выплавок получается при относительно низких давлениях (5-14 кбар) и сменяется калиевым при более высоких давлениях. Согласно другим экспериментальным данным [Patino, Harris, 1998], смещение расплава в сторону трондьемита происходит при водном анатексисе, когда остаются устойчивыми гидроксилсодержащие минералы, а вода поступает извне. В нашем случае, по результатам роговообманково-плагиоклазовой барометрии [Зинькова, Ферштатер, 2001] дайки основного состава уравновешены при давлении около 6 кбар, а дайки среднего состава – при 3-4 кбар, что хорошо совпадает с вышеуказанным интервалом давлений, при котором выплавки становятся более натриевыми. Более подробно петрологические критерии водного типа анатексиса для пород Верхисетского массива приведены в ряде работ [Ферштатер и др., 2002, 2004]. Таким образом, синплутонические дайки Верхисетского массива могли образоваться в одной из выше перечисленных обстановок, характеризующихся устойчивостью гидроксилсодержащих минералов и плавлением плагиоклаза. Наиболее реальной нам представляется обстановка субдукции – этому соответствует и синхронность даек с надсубдукционными тоналит-гранодиоритовыми сериями массива [Bea et al., 1997], и общее палеогеографическое положение массива в палеоокраинно-континентальной зоне Урала. Адакитовая химия даек указывает на присутствие во время субдукции локальных эпизодов растяжения (зон активного спрединга), то есть наличие «окон в плите», через которые поступали дополнительные тепловые потоки, способствующие аномальным условиям плавления окружающих пород. Лейкократовые жилы в дайках имеют ярко выраженные адакитовые характеристики и отличаются по химическому составу от вмещающих их гранитоидов, что позволяет предположить образование этих жил посредством стадийного плавления вещества самих даек [Ферштатер и др., 2004].

Список литературы

Зинькова Е.А. Сходство ранних серий Верхисетского батолита с высокоглиноземистыми трондьемит-тоналит-дацитовыми и современными адакитовыми сериями // Ежегодник-2001. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2002. С. 105-109.

Зинькова Е.А., Ферштатер Г.Б. Мигматиты габбро-диоритовой серии Верхисетского массива – ключ к пониманию происхождения его тоналит-трондьемитовой серии // Ежегодник-1999. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2000. С. 127-134.

Зинькова Е.А., Ферштатер Г.Б. Два типа базитового магматизма, связанного с гранитоидами Верхисетского батолита // Ежегодник-2000. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. С. 70-72.

Классификация и номенклатура магматических горных пород. М.: Недра, 1981. 160 с.

Смирнов В.Н., Беа Ф., Монтеро М.П. и др. Результаты Rb-Sr-датирования и изучения изотопного состава Nd в гранитоидах Верхисетского массива (Средний Урал) // Докл. РАН. 1998. Т. 363. № 4. С. 389-391.

Ферштатер Г.Б. Структурно-формационная зональность Урала и магматизм // Геотектоника. 1992. № 6. С. 3-17.

Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Бородина Н.С. и др. Надсубдукционные анатектические гранитоиды Урала // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 1. С. 42-56.

Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Монтеро М.П. и др. Роговообманковые габбро Урала: типизация, геохимические особенности и петрогенезис // Геохимия. 2004. № 7. С. 707-728.

Ходаревская Л.И., Жариков В.А. Экспериментальное изучение плавления амфиболитов в связи с проблемами генезиса тоналит-трондьемитовых магматических серий // Экспериментальное и теоретическое моделирование процессов минералообразования. М.: Наука, 1998. С. 11-31.

Barbarin B. Enclaves of the Mesozoic calc-alkaline granitoids of the Sierra Nevada Batholith, California // Enclaves and Granite Petrology / J. Didier, B. Barbarin (ed.). Development in Petrology. 13. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 1991. P. 135-153.

Barbarin B., Dodge F.C.W., Kistler R.W., Bateman P.C. Mafic inclusions, aggregates, and dikes in granitoid rocks, Central Sierra Nevada Batholith, California. Analytic data // U.S. Geol. Surv. Bull., 1989. P. 1-28.

Bea F., Fershtater G.B., MonteroM.P. et al. Generation and evolution of subduction-related batholiths from the Central Urals: Constraints on the P-T history of the Uralian Orogen // Tectonophysics. 1997. V. 276. № 1-4. P. 103-116.

Defant M.J., Clark L.F., Stewart R.H. et al. Andesite and dacite genesis via contrasting processes: the geology and geochemistry of EL Valle Volcano. Panama // Contrib. Miner. Petrol. 1991. V. 106. P. 309-324.

Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // Nature. 1990. № 347. P. 662-665.

Defant M.J., Drummond M.S. Mount St. Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc // Geology. 1993. V. 21. P. 547-550.

Hyndman D.W., Foster D.A. The role of tonalites and mafic dikes in the generation of the Idaho batholith // J. Geol. 1988. V. 96. P. 31-46.

Le Maitre R.W. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford, 1989. 193 p.

Patino Douce A.E., Harris N. Experimental constraints on Himalayan anatexis // J. Petrology. 1998. V. 38. № 4. P. 689-710.

Petford N., Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca batholith, Peru // J. Petrology. 1996. V. 37. № 6. P. 1491-1521.

Pitcher W.S. Synplutonic dykes and mafic enclaves // Enclaves and Granite Petrology / J. Didier, B. Barbarin (ed.). Development in Petrology. 13. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 1991. P. 389-391.

Sajona F.G., Maury R.C., Bellon H. et al. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zamboanga peninsula, Western Mindanao (Philippines) // J. Petrology. 1996. V. 37. № 3. P. 693-726.

Tepper J.H. Petrology of mafic plutons associated with calc-alkaline granitoids, Chillwack batholith, North Cascades, Washington // J. Petrology. 1996. V. 37. P. 1409-1436.

Рецензент кандидат геол.-мин. наук В.Н. Смирнов