

50 лет ИГХ СО РАН



**ПРОБЛЕМЫ
ГЕОХИМИИ ЭНДОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Материалы конференции

ТОМ 2

Иркутск
2007

Karpov I.K., Chudnenko K.V., Kulik D.A. Modeling chemical mass transfer in gheochemical processes: thermodynamic relations, conditions of equilibria, and numerical algorithms // Amer. J. Sci. 1997. v. 297. № 8. P. 767-806.

Pinneker E. V., Pissarsky B.I., Pavlova S.E. // Isotopes Envirom. Health Stud. 1995. V. 31. P. 97-106.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЭНИГМАТИТ-СОДЕРЖАЩИХ БАЗАЛЬТОИДОВ КОМПЛЕКСА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ДАЕК ЗАПАДНОЙ КАМЧАТКИ (МАГМАТИЗМ ВЕРХНЕПАЛЕОГЕНОВОГО ЗАДУГОВОГО СПРЕДИНГА)

Перепелов А.Б.¹, Пузанков М.Ю.², Иванов А.В.³,
Философова Т.М.², Карманов Н.С.⁴

¹ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, e-mail: region@igc.irk.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, e-mail: puzankov@kscnet.ru

³ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: aivanov@crust.irk.ru

⁴ Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, e-mail: krm@geo.buryatia.ru

Введение. В пределах Западно-Камчатской структурно-формационной зоны, тыловой для современной активной континентальной окраины Камчатки, исследованиями последних десятилетий среди палеоген-неогеновых терригенно-осадочных и вулканогенно-осадочных отложений, перекрывающих меловой метаморфизованный фундамент, установлено широкое распространение субвулканических тел субщелочных и щелочных базальтоидов. Эти магматические комплексы имеют не только дискретные геохимические характеристики, отвечающие моделям внутриплитного или постсубдукционного магмообразования, но и принадлежат по времени формирования к различным этапам геодинамического развития задуговой обстановки. Магматизм калиевого типа, развитие которого связывается для Западной Камчатки с постсубдукционными процессами магмообразования, представлен здесь калиевой щелочной серией пород (трахибазальты, шонкиниты, редко сиениты) E_2^3 - E_3^1 возраста и калиевой субщелочной серией N_1^3 - N_2^1 ? (абсарокиты, шошонитовые базальты, шошониты и редко латиты) [Волынец и др., 1990; Перепелов, 1990; Волынец, 1993; Volynets, 1994]. К-На щелочные магматические комплексы внутриплитного геохимического типа, обнаруженные в последнее время на Западной Камчатке, представлены дайками и штоками Ne-Lc содержащих базанитов (N_1^3 - N_2^1) и интерпретируются в своем происхождении как результат развития рифтогенных процессов [Перепелов и др., 2006]. В целом, формирование структуры Западной Камчатки и развитие здесь магматизма на протяжении всего кайнозоя сопоставляется рядом исследователей как с аккреционно-коллизийными процессами взаимодействия литосферных плит, так и с процессами разнонаправленной субдукции и рифтогенеза [Богданов, Чехович, 2002, 2004; Константиновская, 2003]. Пожалуй, единственный тип магматизма, до сих пор не отмеченный в истории развития структуры Западной Камчатки, но характерный для задуговых геодинамических обстановок, это магматизм режима задугового спрединга. Как известно, магматические процессы такого типа формируют подводные и реже наземные базальтоидные комплексы пород в виде дайковых серий или лавовых толщ с переходными между N-MORB, E-MORB и OIB геохимическими характеристиками. С позиций происхождения магм в результате процессов задугового спрединга далее будут рассмотрены первые данные по вещественному составу и минералогии базальтоидов комплекса параллельных даек одного из районов Западной Камчатки.

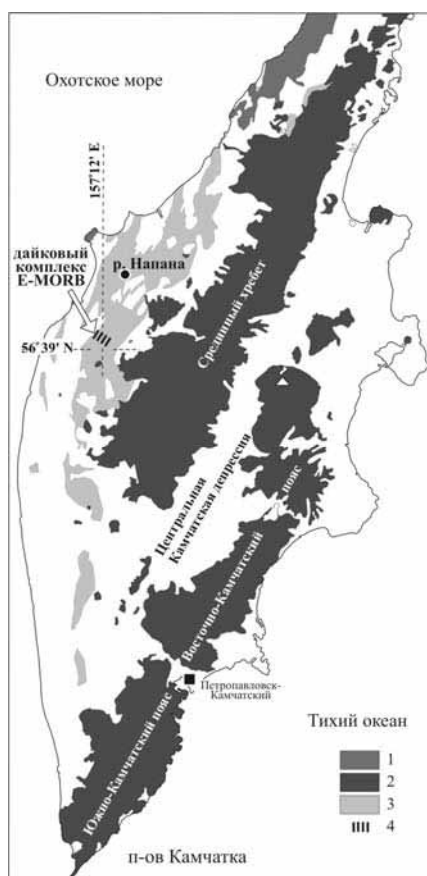


Рис. 1. Район локализации комплекса параллельных даек в задуговой области Западной Камчатки.

1 - палеоцен-среднеэоценовый вулканический пояс Западной Камчатки; 2 - олигоцен-миоценовые и плиоцен-четвертичные вулканические пояса Камчатки; 3 - палеогеновые осадочные толщи Западной Камчатки; 4 - комплекс параллельных даек р. Быстрой (Хайрюзовской), вне масштаба.

Геологическая позиция и возраст. По данным геолого-съёмочных работ, например [Коваль, Адамчук, 1986], на территории Западной Камчатки от р. Белоголовая на юге и до р. Напана на севере достаточно широко распространены серии даек и штоки кринанитов и эссексит-диабазов. Эти магматические комплексы залегают среди палеогеновых осадочных отложений и имеют с ними интрузивные контакты. Один из наиболее крупных дайковых комплексов исследован в нижнем течении р. Быстрой (Хайрюзовской), вблизи высоты 244 м (рис. 1). Серия даек эссексит-диабазов залегают на правом борту долины реки среди отложений *снатольской* свиты (E_2 - эоцен). В береговых обрывах насчитывается около 20 даек мощностью от 0,8 до 3 м. Дайки имеют северо-восточное простирание, вертикальное падение со слабыми ундуляциями и образуют комплекс параллельных тел с расстояниями между ними от 20 до 100 м. Характерными особенностями дайкового комплекса являются наличие взаимоотношений между отдельными телами по типу «дайка в дайке» с контактами в виде зеркал скольжения, а также «слепое» залегание даек в осадочной толще среди песчаников, аргиллитов и алевролитов. Именно эти наблюдения и позволили авторам рассматривать исследуемый субвулканический комплекс в качестве «комплекса параллельных даек». На экзоконтактах даек наблюдаются признаки ороговикования осадков в узких зонах до 0.2-0.5 м по мощности. Образование дайковыми телами тонких апофиз, раздувов и пластичная деформация осадков на контактах свидетельствуют о внедрении тел в слабо литифицированную осадочную толщу. Для даек характерна шаровая отдельность пород и присутствие субвертикальных прожилков кальцита (до 10 см по мощности). Возраст дайкового комплекса может быть оценен не только по характеру геологических взаимоотношений субвулканических тел с породами осадочной толщи, но также по сходной геологической позиции и аналогии составов базальтоидов с датированными кринанитами Западной Камчатки. Ранее О.Н. Волынец с соавторами в бассейне р. Напана (рис. 1) исследовали субвулканические тела кринанитов, залегающие среди палеогеновых осадочных отложений и типизированные в работе [Волынец и др., 1990] как K-Na шонкиниты и сиениты. Позднее, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом инструментального датирования возраст кринанитов р. Напана был определен О.Н. Волынецом в диапазоне 34-30 млн. лет (E_2^3 - E_3^1) [Перепелов и др., 2003].

Петрография и минералогия пород. Породы дайкового комплекса р. Быстрая характеризуются высокой степенью вторичного преобразования с развитием процессов карбонатизации, цеолитизации и хлоритизации. Сливные и в наименьшей степени измененные базальтоиды обнаружены в ядрах блоков пород с шаровой отдельностью. Базальтоиды даек характеризуются порфиroidным обликом с выделениями фенокристаллов практически нацело замещенного хлоритом оливина и диабазовой структурой основной массы. В основной массе пород на уровне размерности субфенокристаллов и микролитов (0.1-0.4 мм) развиты сростания Pl, Cpx, TiMgt и отмече-

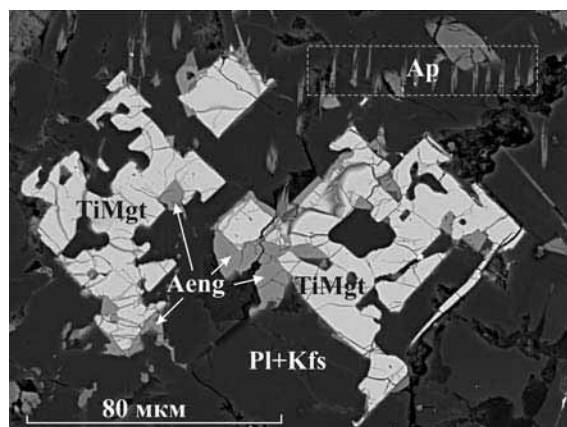


Рис. 2. Срастания энigmatита и TiMgt в базальтоидах комплекса параллельных даек.

Изображение в обратно-рассеянных электронах (сканирующий электронный микроскоп «LEO 1430VP», Геологический институт СО РАН, оператор Н.С. Карманов). Aeng - энigmatит, Ap - апатит, TiMgt - титаномагнетит, Pl - плагиоклаз, Kfs - K-Na полевой шпат.

Таблица 1. Составы Na и Ti содержащих минеральных фаз из базальтоидов комплекса параллельных даек Западной Камчатки.

Фазы	Sp	TiMgt	Aeg-Aug	Aeg-Aug	Aeg	Kfs	Anc	Aeng	(?)	(?)
n*	2	11	3	1	1	1	5	16	6	2
SiO ₂	0,00	0,00	47,90	47,89	51,65	66,34	46,46	40,77	48,82	50,03
TiO ₂	2,89	26,35	1,85	3,04	0,18	0,09	0,01	9,92	5,79	1,29
Al ₂ O ₃	24,63	1,47	0,90	0,57	0,38	19,83	26,26	0,42	0,68	0,37
Cr ₂ O ₃	27,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	13,20	15,15	6,79	19,52	33,88	0,00	0,00	4,70	0,00	0,00
FeO	24,45	52,60	18,95	10,68	0,00	0,62	1,44	35,49	31,17	33,24
MnO	0,36	2,16	0,53	0,39	0,16	0,00	0,00	0,43	0,39	0,41
MgO	9,42	0,00	3,52	1,55	0,00	0,00	0,51	0,79	1,09	2,01
CaO	0,04	0,09	18,28	8,10	0,87	0,70	0,61	0,30	3,39	1,24
Na ₂ O	0,00	0,00	2,00	7,34	14,28	7,71	12,46	7,90	7,79	9,41
K ₂ O	0,02	0,06	0,17	0,56	0,09	4,59	0,14	0,05	1,53	1,51
Сумма	102,82	97,88	100,88	99,64	101,49	99,88	87,89	100,76	100,64	99,49

Примечание. n* - количество анализов для подсчета среднего. Обозначения минеральных фаз: Sp - шпинель, TiMgt - титаномагнетит, Aeg-Aug - эгирин-авгит, Aeg - эгирин, Kfs - K-Na полевой шпат, Anc - анальцит, Aeng - энigmatит, (?) - не идентифицированные минеральные фазы группы энigmatита ?. Fe₂O₃/FeO рассчитано по стехиометрии.

ны редкие микролиты Aeg-Aug, Aeg и Plm. В интерстициях между лейстами Pl присутствует Kfs. Апатит (Ap) находится в основной массе пород в виде тонких игольчатых выделений. Базальтоиды даек содержат значительное количество изоморфных выделений анальцита и вторичных минералов – хлорита, цеолитов и карбонатов. Особенности составов минеральных парагенезисов исследованных базальтоидов отражены в высокой натровой щелочности алюмосиликатных и некоторых темноцветных минералов, а также в развитии высокотитанистых рудных и силикатных фаз (табл. 1).

Наличие в породах минералов субликвидусного этапа кристаллизации (оливинов и шпинелей) в связи с невозможностью надежного определения их составов может быть подтверждено только опосредованно. Например, в хлоритах, замещающих фенокристаллы оливина, обнаружены зерна хромпикотитовой шпинели (Al₂O₃ 24.6, Cr₂O₃ 27.8 и MgO 9.4 мас.%), а сами участки развития хлоритов сохраняют кристаллографические формы, свойственные оливинам. Полевые шпаты представлены в базальтоидах разно ориентированными лейстами (сбифенокристаллами) битовнитов и лабрадоров (An₇₃₋₅₇ Or_{0,8-1.5}) с переходом в краевых зонах кристаллов и в микролитах к составам андезинов (An₅₂₋₃₁ Or_{1,8-4,0}) и олигоклазов (An₂₂₋₁₂ Or₅₋₁₃). В интерстициях среди лейст плагиоклазов отмечены анортоклазы (An₆₋₂ Or₂₁₋₃₀) и редкие Na-санидины (Or₃₉). Клинопироксены образуют в породах широкий ряд составов и в процессе последовательной кристаллизации

эволюционируют по химизму от субфенокристаллов Na-содержащих титанистых авгитов ($TiO_2=2.16-3.72$ и $Na_2O=0.39-0.70$ мас.%,) к микролитам эгирин-авгитов и редких эгиринов. В этом направлении происходит снижение в Sr_x содержаний Al и Ti. Титаномагнетиты пород обладают устойчивым химизмом. Особенностью их составов являются предельные для магнетитов содержания TiO_2 (26.3-27.6 мас.%). Важной и уникальной особенностью базальтоидов комплекса параллельных даек является развитие в составе минеральных парагенезисов энigmatита и не идентифицированных минералов предположительно энigmatитовой группы в виде мельчайших зерен (5-40 мкм) в сростании с эгирин-авгитами и TiMgt (рис. 2). Как известно, энigmatит - это минерал характерный для салических щелочных пород K-Na ряда - фонолитов, трахитов, щелочных сиенитов, гранитов и ультращелочных пород и не встречается в породах основного состава. Причиной кристаллизации энigmatита в основной массе базальтоидов исследуемого комплекса является, вероятно, формирование специфического состава остаточного расплава после кристаллизации из базальтоидной магмы полевых шпатов и пироксенов. Растровым электронно-зондовым анализом участков основной массы базальтоидов, без захвата субфенокристаллов, состав остаточного «расплава» определен как щелочно-трахитовый с коэффициентом агапайности 1,05 (SiO_2 60,1, TiO_2 0,9, Al_2O_3 15,9, Na_2O 6,97, K_2O 4,89 мас.%). В целом, по данным петрографических и минералогических исследований установлен следующий порядок кристаллизации исследуемых базальтоидных пород. В качестве субликвидусных фаз на начальном этапе кристаллизации в расплаве формировались Sp и фенокристаллы Ol. На следующем этапе кристаллизации происходило массовое выделение субфенокристаллов Sr_x , Pl и TiMgt. В заключение процесса кристаллизации были сформированы микролиты Aeg-Aug, Aeg, Ap, Ptm и минералы группы энigmatита, а также произошло выделение интерстиционных фаз анортоклазов, Kfs и анальцимов. Причиной широкого развития в породах постмагматических вторичных изменений могли быть условия внедрения базальтоидных тел в не литифицированные и, возможно, обводненные морские осадки.

Классификация пород. Составы базальтоидов дайкового комплекса Западной Камчатки могут быть разделены на три группы (табл. 2). Базальты со слабой степенью вторичных изменений являются Ne-нормативными ($Ne_N=1.4-2.0$ %) и на диаграмме TAS располагаются в полях составов базальтов и гавайитов. Две другие группы составов базальтоидов отличаются увеличением содержаний CaO (до 16 и 20 мас.%) и соответственно относительным снижением концентраций SiO_2 , FeO*, MgO и в меньшей степени оксидов щелочных металлов. Эти особенности составов пород связаны с протеканием процессов карбонатизации и цеолитизации. Учитывая ярко выраженную Na щелочность и относительно повышенную титанистость составов наиболее представительной группы базальтоидов, а также в связи с присутствием в породах щелочных темноцветных минералов породы комплекса параллельных даек классифицируются нами как щелочные базальты (alkaline basalt).

Геохимические особенности. Щелочные базальтоиды даек имеют ряд вещественных особенностей, которые заметно отличают их от составов островодужных базальтов Камчатки (табл. 2). Для них характерны повышенные содержания HFSE (Ti, Ta, Nb) и умеренные содержания LILE (K, Rb, Ba, Th, U, LREE). Им свойственна также умеренная магнезиальность ($Mg\#=57-64$) и низкая степень фракционирования REE ($La_N/Yb_N=2,3-2,7$), которая несколько увеличивается для измененных разностей пород (2.8-3.2). Индикаторные редкоземельные отношения демонстрируют сходство базальтоидов с WPB и E-MORB типами магматических образований ($Ba/Nb=12-27$). На мультикомпонентной диаграмме (рис. 3) составы базальтоидов в сравнении с IAB не имеют Ta и Nb минимумов и располагаются в поле графиков E-MORB, отличаясь от них наличием положительных аномалий в распределении Ba, K, Pb и Sr, а также более высокой степенью фракционирования элементов. Таким образом, составы исследуемых

Таблица 2. Содержание петрогенных (мас.%) и редких элементов (г/т) в базальтоидах комплекса параллельных даек Западной Камчатки.

№ обр.	ПП-2284	ПП-2278	ПП-2281	ПП-2283	ПП-2280	№ обр.	ПП-2284	ПП-2278	ПП-2281	ПП-2283	ПП-2280
Порода	АВ	АВ	АВ	изм.*	изм.*	Порода	АВ	АВ	АВ	изм.*	изм.*
SiO ₂	45,49	45,85	46,19	38,09	35,21	Y	28	25	27	26	23
TiO ₂	1,42	1,32	1,32	1,36	1,22	Zr	119	97	116	111	104
Al ₂ O ₃	16,69	16,57	16,63	16,76	15,80	Nb	11,6	9,2	10,4	10,0	9,1
Fe ₂ O ₃	4,50	6,52	6,72	3,79	2,06	Cs	0,20	7,22	8,37	0,08	0,24
FeO	5,75	4,13	4,13	4,13	3,23	Ba	164	249	245	151	287
MnO	0,16	0,13	0,14	0,24	0,31	La	10,72	7,41	10,21	9,28	9,71
MgO	5,65	5,87	5,66	3,22	1,91	Ce	24,33	17,17	22,85	20,97	21,29
CaO	9,69	8,57	8,44	16,16	20,73	Pr	3,23	2,35	3,04	2,74	2,82
Na ₂ O	3,50	3,71	3,76	2,81	2,91	Nd	13,95	10,60	13,23	12,29	12,41
K ₂ O	0,51	0,64	0,62	0,52	0,93	Sm	3,78	3,05	3,58	3,26	3,20
P ₂ O ₅	0,21	0,18	0,18	0,21	0,21	Eu	1,30	1,09	1,27	1,15	1,09
LOI	6,18	6,54	6,21	12,63	15,31	Gd	4,30	3,60	4,11	3,76	3,52
Сумма	99,74	100,03	100,00	99,92	99,82	Tb	0,73	0,62	0,70	0,65	0,59
Ne _N	2,0	1,9	1,4			Dy	4,69	4,05	4,55	4,16	3,80
Sc	34	35	34	34	31	Ho	1,00	0,86	0,96	0,88	0,81
V	253	233	240	250	231	Er	2,83	2,37	2,73	2,46	2,25
Cr	162	165	164	139	138	Tm	0,42	0,35	0,40	0,36	0,33
Co	53	45	45	46	42	Yb	2,69	2,20	2,61	2,23	2,08
Ni	114	97	91	76	72	Lu	0,41	0,33	0,40	0,34	0,31
Cu	91	98	79	101	95	Hf	2,79	2,42	2,49	2,58	2,29
Zn	71	68	62	83	77	Ta	0,68	0,52	0,63	0,55	0,55
Ga	17	16	19	18	15	W	0,31	0,27	0,21	0,13	0,25
Ge	0,8	1,4	1,1	1,0	0,8	Pb	1,59	1,41	1,32	2,02	2,85
Rb	7	10	9	6	11	Th	0,94	0,70	0,86	0,78	0,74
Sr	340	351	407	374	480	U	0,36	0,23	0,29	0,30	0,27

Примечание. Наименование пород: АВ – щелочной базальт, изм.* – измененные, в различной степени карбонатизированные и цеолитизированные базальты. Анализы выполнены в Институте геохимии СО РАН: петрогенные компоненты – методом RFA (аналитик Климова А.К.), FeO – методом титрования (Коваль Л.П.), редкие элементы – методом ICP-MS (аналитики: Чувашова Л.А., Смирнова Е.В., Ложкин В.И.).

базальтоидов обладают конвергенцией геохимических признаков с вещественными особенностями, свойственными как E-MORB, так и IAB типам пород. Отметим, что вторичные изменения пород не привели к заметному перераспределению в них редких литофильных элементов, за исключением некоторого повышения содержаний Sr, Ba и Pb.

Модель происхождения базальтоидов. Обнаружение в задуговой обстановке Западной Камчатки магматических комплексов, имеющих вещественные характеристики пород, близкие к E-MORB, требуют уточнения модели геодинамического развития островодужной системы Камчатки в палеогене и разработки для базальтоидов дайкового комплекса оригинальной модели магмообразования. Предполагается, что вслед за завершением развития в эоценовое время Западно-Камчатского островодужного пояса в его тыловой области в пределах субконтинентального блока Западно-Камчатской микроплиты были реализованы процессы растяжения и начиналось формирование задугового бассейна. Формирование бассейна не было завершено, а магматические процессы, связанные с началом его заложения отражены в развитии серий даек базальтоидов, внедрявшихся в осадочные отложения территории. Магмообразование на этом этапе происходило на уровне переходной гранат-шпинелевой фации глубинности

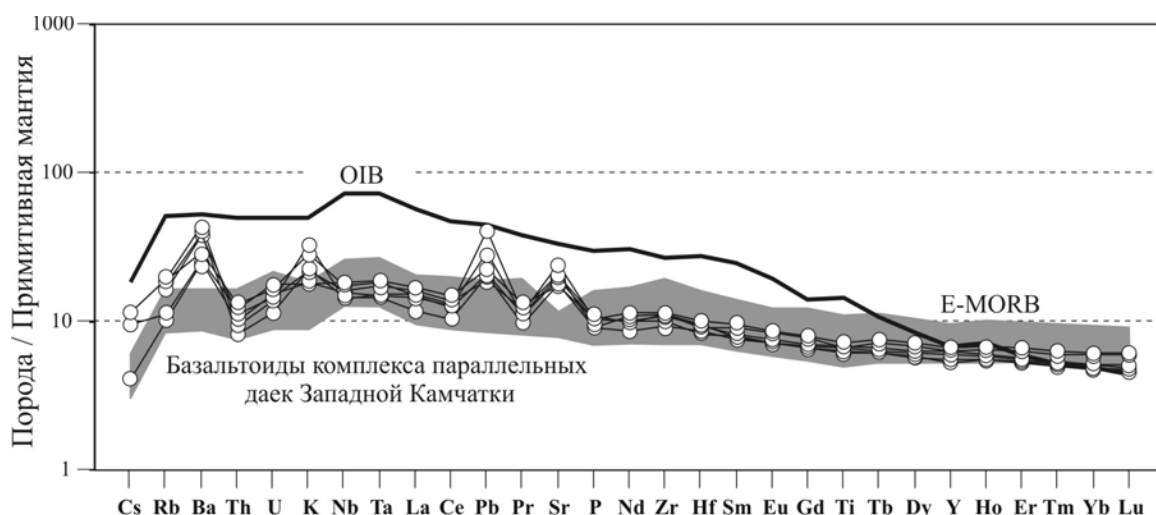


Рис. 3. Мультикомпонентные диаграммы распределения элементов для базальтоидов комплекса параллельных даек Западной Камчатки.

Составы примитивной мантии и OIB по [Sun, McDonough, 1989], E-MORB по данным [Sun, McDonough, 1989; Donnelly et al., 2004; Niu et al., 1999, 2002].

мантии в связи с утонением литосферы и в результате подъема к области магмогенерации астеносферного мантийного вещества. Предшествующие субдукционные процессы могли привести к метасоматическому преобразованию мантийного клина, что могло быть отражено в конвергенции геохимических характеристик исследуемых базальтоидов. Давления формирования базальтоидных магм определены по эмпирическим формулам [Scarrow, Cox, 1995; Демонтерова и др., 2007] и составили 22-19 кбар. РТ условия кристаллизации субликвидусных минеральных фаз не были установлены, а кристаллизация субфенокристаллов Sr_x и P_1 в базальтовом расплаве согласно геотермобарометрам [Putirka, 2003, 2005] происходила при $P=7,6-4,3$ кбар и $T^{\circ}C=1168-1145$ и при $P=7.6-5.4$ кбар и $T^{\circ}C=1190-1139$, соответственно. Важным условием при анализе геохимических особенностей базальтоидов комплекса параллельных даек является их внедрение в не литифицированные морские осадки. В результате процессов контаминации магм осадочным материалом, а наиболее вероятно морскими солями и рассолами, это также могло привести к появлению таких вещественных особенностей пород, как относительно повышенные содержания К, Ва, Рb и Sr.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 07-05-00959, 07-05-10057-э), гранта НШ-5439.2006.5 и Интеграционного проекта СО РАН № 6.9.

БИТУ-ДЖИДИНСКИЙ МАССИВ (ЮЖНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ): ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ РУДОНОСНОСТЬ МНОГОФАЗНОЙ ИНТРУЗИИ ГРАНИТОИДОВ Li-F ТИПА

Перепелов А.Б., Татарников С.А., Антипин В.С., Дриль С.И.

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, e-mail: region@igc.irk.ru

Редкометальное оруденение, связанное с поздними магматическими и постмагматическими процессами в формировании многофазных гранитоидных интрузивных массивов, характеризуется значительными запасами минерального сырья,