

НЕВ-АДАКИТОВЫЙ ВУЛКАНИЗМ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАМЧАТСКОЙ ДЕПРЕССИИ

А.Б. Перепелов¹, С.А. Татарников¹, Л.А. Павлова¹, С.С. Цыпукова¹, Е.И. Демонтерова²

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

² Институт земной коры СО РАН, e-mail: dem@crust.irk.ru

Адакиты и ассоциирующие с ними магнезиальные андезиты (Mg-андезиты) и базальтоиды NEB типа (Niobium-Enriched Basalts) в современных обстановках конвергенции литосферных плит обычно рассматриваются как петролого-геохимические индикаторы реализации процессов плавления молодой (< 25 млн. лет) или подвергшейся деструкции и влиянию астеносферной мантии субдуцируемой океанической коры [Defant и Drummond, 1990; Yagodzinski et al., 2001]. Структурная и временная позиция NEB-адакитового вулканизма могут служить детализации и ревизии существующих моделей геодинамического развития зон перехода «океан-континент». В настоящей работе приводятся первые геологические и минералого-геохимические сведения по развитию раннечетвертичного NEB-адакитового вулканизма в южной части Центральной Камчатской Депрессии (ЦКД). Обнаружение здесь NEB-адакитовых комплексов, помимо собственно петрологического значения, актуально для установления причин и условий геодинамического и магматического развития этой крупнейшей тектонической структуры.

Геологическое строение и структурная позиция. Вулканический массив, в строении которого обнаружены и исследованы породы NEB-адакитовой ассоциации, локализован в южной части Центральной Камчатской депрессии в междуречье рек Озерная Камчатка и Правая Камчатка (рис. 1). Массив представляет собой эродированный щитовой вулкан размером ~ 4 на 6 км. В основании вулканической постройки установлено до 8 протяженных лавовых покровов базальтоидов мощностью от 5 до 15-20 м. Гипсометрически выше базальтоидного лавового разреза вулкана находятся развалы экструзий и коротких и мощных лавовых потоков андезитов. В структурном плане вулканический массив находится в районе сужения бортов долины ЦКД и может быть отнесен к ареалу базальтоидного вулка-

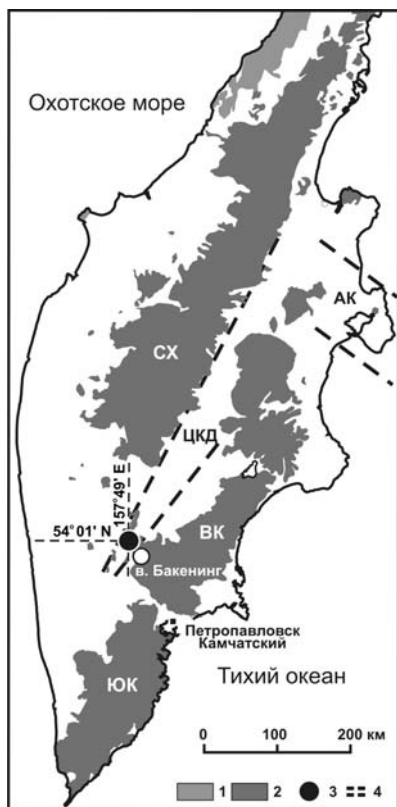


Рис. 1. Район NEB-адакитового вулканизма южной части ЦКД. 1 – E₁-E₂² вулканический пояс Западной Камчатки, 2 – E₃-N₁ и N₂-Q вулканические пояса Камчатки (СХ, ЮК, ВК), 3 – район локализации NEB-адакитового вулканизма ЦКД, 4 – условные границы ЦКД и структуры Алеутско-Камчатского сочленения (АК).

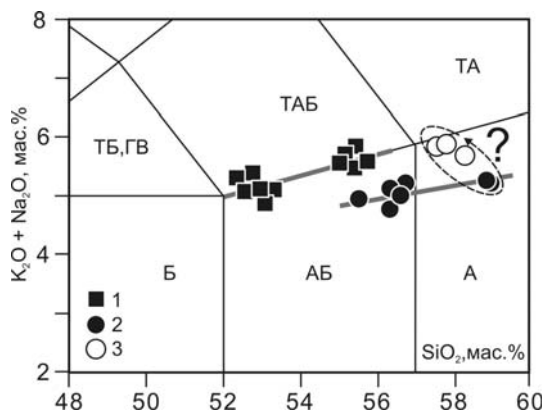


Рис. 2. Классификационная диаграмма для пород NEB-адакитовой ассоциации ЦКД по [LeBas et al., 1986]. Точки составов: 1 – андезито-базальтов NEB типа, 2 – Mg-андезито-базальтов и андезитов, 3 – адакитов. Линиями соединены эволюционные ряды пород. Пунктиром околнурены точки составов Mg-андезитов и адакитов в предположении их генетической (?) связи. Поля составов: Б – базальты; АБ – андезито-базальты; А – андезиты, ТБ, ГВ – трахибазальты, гавайиты; ТАБ – трахиандезито-базальты; ТА – трахиандезиты.

низма, проявленному в виде обширных лавовых плато вблизи разломной зоны северо-восточного простираения вдоль западного ограничения депрессии. Возраст массива рассматривается как раннечетвертичный на основании стратиграфического анализа и палеомагнитных датировок плато-базальтов территории (~1 млн. лет) по данным геологосъемочных работ. Участок исследований НЕВ-адакитового комплекса ограничен координатами 54°00'38" – 54°01'57" N и 157°48'38" – 157°50'44" E.

Классификация пород и методы аналитических исследований. Среди пород НЕВ-адакитовой ассоциации района исследований выделяются три группы составов (рис. 2, табл. 1). Первая из них представлена андезито-базальтами повышенной щелочности. На диаграмме (Na₂O+K₂O)-SiO₂ (рис. 2) составы пород этой группы располагаются вдоль границы раздела субщелочной серии и серии нормальной щелочности. Их объединяет нахождение в единых лавовых разрезах основания щитового вулкана и направленное изменение составов. В связи со своей относительной обогащенностью HFSE (Nb, Ta, Ti) они классифицируются как породы НЕВ типа. Другая группа представлена более кремнекислыми разностями пород - андезито-базальтами и андезитами. Составы пород этой группы находятся в поле серии нормальной щелочности, а их высокая магнезиальность (Mg# 68.2-69.4) позволяет относить их к Mg-андезито-базальтам и Mg-андезитам. Породы этой группы зафиксированы на верхних горизонтах лавовых разрезов и в субвулканических фациях. Третья группа пород представлена адакитами, обнаруженными в ассоциации с Mg-андезитами среди пород разрушенных экструзий. Они классифицированы в качестве адакитов согласно нормам предложенным [Defant и Drummond, 1990]. Содержания микроэлементов в породах НЕВ-адакитовой ассоциации определены методом ICP-MS на масс-спектрометре Element 2 (контроль по стандартам BHVO-1, JB-2, AGV-1, JA-1), изотопный состав Sr и Nd на масс-спектрометре Finnegan MAT 262, а составы минералов установлены на микроанализаторе Jeol XA-8200 (Байкальский центр коллективного пользования ИНЦ СО РАН).

Петрография и минералогия. Андезито-базальты НЕВ типа представляют собой мелкопорфировые породы с вкрапленниками и субфенокристаллами Ol размером до 1-1.5 мм, редких Crx (до 1 мм) и Pl (до 0.5 мм). Структура их основной массы интерсерральная и пилотокситовая. В основной массе пород развиты микролиты Pl, Crx, Орх, TiMgt, Ilm и крайне редко Kfs. Контрастные по кремнекислотности группы андезито-базальтов НЕВ типа (рис. 2) различаются по минеральному составу. В наиболее основных по составу андезито-базальтах пироксены среди вкрапленников отсутствуют, а среди микролитов развит исключительно Crx. Для группы андезито-базальтов более кремнекислого состава характерно развитие Crx-Орх минерального парагенезиса.

Вкрапленники Ol в андезито-базальтах НЕВ типа в центральных и промежуточных зонах кристаллов имеют наиболее магнезиальные составы Fo₈₅₋₇₇, а также низкие содержания CaO (0.12-0.18 мас.%). С переходом к краевым зонам вкрапленников и к субфенокристаллам составы Ol сменяются на более железистые Fo₅₃₋₅₈, концентрации CaO в них возрастают (0.29-0.44 мас.%). Вкрапленники и микролиты Crx из этих пород имеют авгитовые составы (Wo_{42.4-44.7} Fs_{10.4-12.1} и Wo_{37.2-43.9} Fs_{12.6-15.4}, соответственно). Микролиты Орх в андезито-базальтах НЕВ типа представлены бронзитами (Wo_{3.5-4.1} Fs_{23.6-26.7}). Вкрапленники и субфенокристаллы полевых шпатов в андезито-базальтах НЕВ типа отвечают составам лабрадоров (An_{57.3-68.6} Or_{0.9-1.7}), а микролиты - андезинов (An_{30.9-49.4} Or_{1.8-6.7}). Микролиты TiMgt в андезито-базальтах с ростом кремнекислотности пород обнаруживают рост содержания TiO₂ (1.9-11.3 мас. %). Во вкрапленниках Ol шпинелиды представлены хромпикотитами (Cr₂O₃ 34.0-36.3, Al₂O₃ 15.4-18.1, MgO 8.6-8.9 мас.%) и Cr-TiMgt (Cr₂O₃ 16.2-17.7, Al₂O₃ 4.3-4.6, MgO 2.5-3.7 мас.%).

Магнезиальные андезито-базальты и андезиты представляют собой мелко- и редкопорфировые породы с присутствием в виде вкрапленников и редких субфенокристаллов исключительно Орх размером до 1-1.5 мм. Среди микролитов в них развиты Pl, Орх, TiMgt, Ilm и редко Crx, Kfs и анортклазы. Основная масса пород интерсерральная, сериально-порфировая. Во вкрапленниках Орх в Mg-андезитах встречены мельчайшие включения кислого стекла. В центральных и промежуточных зонах вкрапленников Орх представлен бронзитами (Wo_{1.5-2.7} En_{80.1-86.8} и Wo_{1.7-2.6} En_{71.31-78.1}, соответственно), которые в краевых частях вкрапленников и в субфенкористаллах, а также в микролитах сменяются гиперстенами (Wo_{3.0-4.3} En_{63.2-69.1}). Редкие микролиты Crx из Mg-андезитов представлены авгитами (Wo_{41.2-44.9} En_{45.1-46.2}). Среди микролитов полевых шпатов из Mg-андезитов преобладают лабрадоры и андезины в диапазоне составов An_{42.4-62.4} Or_{1.0-7.1}. Особенностью минерального состава Mg-андезитов

является отсутствие в основной массе микролитов TiMgt. Эти минералы обнаруживаются только в виде включений во вкрапленниках и субфенокристаллах Орх. Среди микролитов рудных минералов и в сростаниях с субфенокристаллами и микролитами Орх в Mg-андезитах развит исключительно Птм, обладающий умеренно титанистыми составами (TiO_2 40.3-43.1). Включения кремнекислого стекла (SiO_2 73.5-75.2 мас.%) во вкрапленниках бронзита из Mg-андезитов представлены двумя контрастными группами составов. Одни из них имеют «трондьемитовый» химизм с высокими содержаниями Al_2O_3 (17.2-19.0 мас.%) и Na спецификой (Na_2O/K_2O 2.0-4.3, Na_2O 3.71-4.22), другие обладают более низкой глиноземистостью (Al_2O_3 14.3-15.0 мас.%) и калиевым составом (Na_2O/K_2O 0.60-0.64, K_2O 3.92-4.41 мас.%).

Адакиты представляют собой плагиопорфировые породы, среди вкрапленников которых широко развиты Pl размером до 1-3 мм и реже Crx. В основной массе адакитов, имеющих сериально-порфировую структуру, обнаруживаются микролиты Pl, Crx, Орх, TiMgt, Птм и редко Kfs. Вкрапленники и микролиты Crx в адакитах представлены авгитами ($Wo_{40.5-44.1}Fs_{10.3-13.6}$). Микролиты Орх в адакитах имеют бронзитовые составы ($Wo_{3.3-4.9}En_{72.0-79.0}Fs_{17.4-23.1}$). Особенностью эволюции Pl из адакитов является обратная по составу зональность вкрапленников и более основные в сравнении с ними составы микролитов. Вкрапленники в своих центральных и промежуточных зонах отвечают по составам андезинов ($An_{42.1-44.5}Or_{2.3-2.6}$) и сменяются в краевых частях лабрадорами ($An_{56.2}Or_{1.5}$). Среди микролитов Pl основной объем кристаллов имеет лабрадорные составы ($An_{50.1-58.7}Or_{1.3-2.0}$). Рудные минералы в адакитах представлены в основном на уровне микролитов. Это умеренно титанистые TiMgt достаточно широкого ряда составов (TiO_2 0.9-11.6 мас.%) и Птм с высокими содержаниями TiO_2 (50.5).

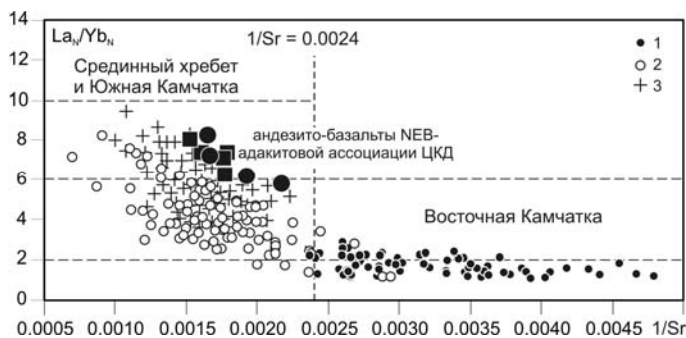


Рис. 3. Диаграмма $La/Yb-1/Sr$ для NEB и Mg андезито-базальтов ЦКД. Точки составов: 1 – низкокалиевые и умереннокалиевые базальты Восточной Камчатки, 2 – умеренно-калиевые и высококалиевые базальты Срединного хребта и Южной Камчатки, 3 – высокотитанистые базальты Срединного хребта. La и Yb нормированы на Sr. Другие обозначения см. на рис. 2.

Петрохимия, редкоземельный и изотопный состав. Наиболее основные по составу андезито-базальты NEB типа (табл. 1) характеризуются повышенными содержаниями TiO_2 (1.34-1.44 мас.%), высокой натровостью (Na_2O 3.61-3.97 мас.%, Na_2O/K_2O 2.8-3.2), а также существенно более высокими концентрациями Nb (9-13 ppm), Ta (0.55-0.87 ppm) и LREE (La/Yb 9.2-11.8) в сравнении с IAB Камчатки (рис. 3). Магнезиальные андезито-базальты и андезиты отличаются от близких по кремнекислотности пород ряда андезито-базальтов NEB типа заметно более низкой калиевой щелочностью (Na_2O/K_2O 3.1-3.5) и более низкими концентрациями TiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , Y, Nb, Ta, Hf, REE, Th и U. При этом для них характерны сравнительно более высокие содержания элементов группы железа (Cr, Ni) и Sr. Адакиты образуют обособленную группу составов и отличаются от Mg-андезитов более высокими содержаниями TiO_2 , CaO, Na_2O , P_2O_5 , Sr, Zr, Nb, Ba, LREE, Hf, Pb и Th. Индикаторные величины содержаний SiO_2 (57.6-58.3 мас.%), Al_2O_3 (16.2-17.0), Na_2O (4.27-4.41 мас.%), Y (13.2-14.5 ppm), Yb (1.12-1.23), Sr (918-977 ppm) и редкоземельных отношений Sr/Y (67-70) и La/Yb (19.7-20.1) подтверждают правомерность классификации этой группы пород в составе исследуемого вулканогенного комплекса как адакитов. На диаграммах распределения магматофильных элементов для пород исследуемой ассоциации (рис. 4) наблюдаются как признаки принадлежности их составов к IAB геохимическому типу, так и отличительные особенности. С IAB типами базальтоидов Камчатки их сближает наличие на графиках минимумов по Th, Nb, Ta, Zr, Hf и Y, а также небольших максимумов по Ba, K, Pb и Sr. При этом для исследуемых пород наблюдаются более высокие содержания HFSE (Nb, Ta), Th, U и LREE в сравнении с IAB. Основные по составу породы NEB типа и Mg андезито-базальты и андезиты NEB-адакитовой ассоциации имеют низкие величины индикаторных отношений CaO/Al_2O_3 (0,38-0,52) и Ni/MgO (23-30). Изотопные метки пород NEB-адакитовой ассоциации южной части ЦКД соответствуют резервуару N-MORB и полю составов IAB Камчатки: $^{87}Sr/^{86}Sr=0.70318-0.70335$, $^{143}Nd/^{144}Nd=0.513098-0.513123$ ($\epsilon Nd=9.46-8.97$).

Таблица. Содержание петрогенных (мас. %) и редких элементов (г/т) в породах NEB-адакитовой ассоциации Центральной Камчатской Депрессии.

№ обр.	3112	3111	3110	3115	3113	3121	2629	2630	2628	3116
	NEB					Mg-андезиты			Адакиты	
SiO ₂	52.57	52.78	53.09	55.41	55.47	56.61	58.89	58.97	57.59	58.32
TiO ₂	1.35	1.38	1.43	1.14	1.12	0.95	0.78	0.79	1.08	1.09
Al ₂ O ₃	15.57	15.81	15.68	16.47	16.92	15.73	16.32	16.19	17.01	16.24
Fe ₂ O ₃	6.31	5.75	5.94	5.21	4.92	2.73	2.53	2.57	5.94	5.18
FeO	3.01	3.19	3.55	2.66	2.83	4.45	3.59	3.59	1.08	1.40
MnO	0.12	0.10	0.12	0.14	0.11	0.11	0.11	0.11	0.09	0.10
MgO	6.53	6.02	6.30	5.16	4.84	6.41	5.71	5.81	3.77	4.00
CaO	8.11	7.79	7.54	7.21	6.92	6.95	6.27	6.27	6.56	6.71
Na ₂ O	3.85	3.97	3.61	4.04	4.28	3.85	3.96	3.91	4.27	4.33
K ₂ O	1.21	1.40	1.24	1.43	1.54	1.15	1.29	1.31	1.55	1.34
P ₂ O ₅	0.43	0.39	0.32	0.32	0.34	0.22	0.21	0.21	0.46	0.48
LOI	1.02	1.31	1.27	0.84	0.60	0.90	0.45	0.36	0.61	0.84
Сумма	100.06	99.89	100.09	100.03	99.88	100.07	100.09	100.08	100.02	100.04
Mg#	63.6	62.5	62.2	61.9	60.8	68.3	69.2	69.4	57.7	60.5
Rb	15.0	17.6	15.7	22.7	23.8	17.8	23.0	22.2	24.8	19.2
Cs	0.22	0.26	0.25	0.40	0.30	0.30	0.29	0.27	0.34	0.25
Ba	381	386	377	353	331	327	344	344	599	576
Sr	656	620	562	563	552	518	602	605	977	928
Sc	21	22	23	21	20	20		18	16	15
Co	32	33	30	28	23	30	29	29	25	23
Ni	162	184	152	119	115	147	158	156	66	52
Cr	267	286	229	201	159	246	310	299	127	136
V	176	171	189	163	154	137	142	146	136	123
Pb	2.9	2.9	3.2	2.8	2.5	3.4	3.2	3.4	5.5	4.6
Ta	0.55	0.87	0.66	0.65	0.70	0.41	0.41	0.37	0.43	0.43
Nb	9.1	13.6	10.2	10.1	11.0	6.1	6.5	6.0	7.1	7.3
Zr	128	142	129	140	131	113	124	120	149	139
Hf	3.36	3.50	3.47	3.64	3.41	3.04	3.12	3.00	3.65	3.70
Th	1.40	1.67	1.42	1.47	1.51	1.26	1.35	1.28	1.69	1.93
U	0.67	0.74	0.68	0.76	0.83	0.70	0.67	0.67	0.72	0.74
La	18.39	17.95	15.97	18.04	17.32	12.75	12.84	12.94	24.19	22.99
Ce	40.47	41.17	35.34	38.82	37.69	28.37	28.29	28.48	52.46	49.79
Pr	5.28	5.41	4.69	4.95	4.77	3.60	3.70	3.66	6.56	6.31
Nd	22.63	22.81	20.30	20.54	19.48	15.11	14.80	14.34	25.49	24.55
Sm	4.98	5.09	4.58	4.47	4.24	3.25	3.26	3.27	5.01	4.68
Eu	1.53	1.57	1.41	1.37	1.32	1.01	1.01	0.98	1.46	1.41
Gd	4.40	4.60	4.10	3.96	3.72	3.01	2.85	2.85	3.72	3.97
Tb	0.64	0.68	0.61	0.59	0.56	0.46	0.42	0.39	0.53	0.54
Dy	3.53	3.82	3.56	3.39	3.23	2.70	2.39	2.24	2.97	2.94
Ho	0.67	0.73	0.70	0.67	0.63	0.55	0.48	0.44	0.56	0.54
Er	1.78	1.93	1.88	1.84	1.72	1.49	1.30	1.17	1.44	1.35
Tm	0.25	0.27	0.28	0.27	0.25	0.22	0.19	0.17	0.20	0.19
Yb	1.56	1.65	1.74	1.72	1.59	1.40	1.22	1.05	1.23	1.17
Lu	0.23	0.24	0.26	0.26	0.24	0.21	0.19	0.16	0.18	0.17
Y	16.2	18.0	17.1	17.2	16.2	13.3	11.9	11.7	14.4	13.2

Примечание. Петрогенные оксиды определялись в Института геохимии СО РАН методом XRF, разделение железа - методом титрования (аналитики: Климова А.К., Коваль Л.П.). Содержания редких элементов определялись методом ICP-MS в Байкальском центре коллективного пользования ИЦ СО РАН на масс-спектрометре ELEMENT 2 (аналитики: Чувашова Л.А., Смирнова Е.В., Ложкин В.И.). Mg# = Mg/(Mg+Fe⁺²)*100 (мол.%) – коэффициент магнезиальности.

распределения магматофильных элементов для пород исследуемой ассоциации (рис. 4) наблюдаются как признаки принадлежности их составов к IAB геохимическому типу, так и отличительные особенности. С IAB типами базальтоидов Камчатки их сближает наличие на графиках минимумов по Th, Nb, Ta, Zr, Hf и Y, а также небольших максимумов по Ba, K, Pb и Sr. При этом для исследуемых пород наблюдаются более высокие содержания HFSE (Nb, Ta), Th, U и LREE в сравнении с IAB. Основные по составу породы NEB типа и Mg андезито-базальты и андезиты NEB-адакитовой ассоциации имеют низкие величины индикаторных отношений $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (0,38-0,52) и Ni/MgO (23-30). Изотопные метки пород NEB-адакитовой ассоциации южной части ЦКД соответствуют резервуару N-MORB и полю составов IAB Камчатки: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70318-0.70335$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.513098-0.513123$ ($\epsilon\text{Nd}=9.46-8.97$).

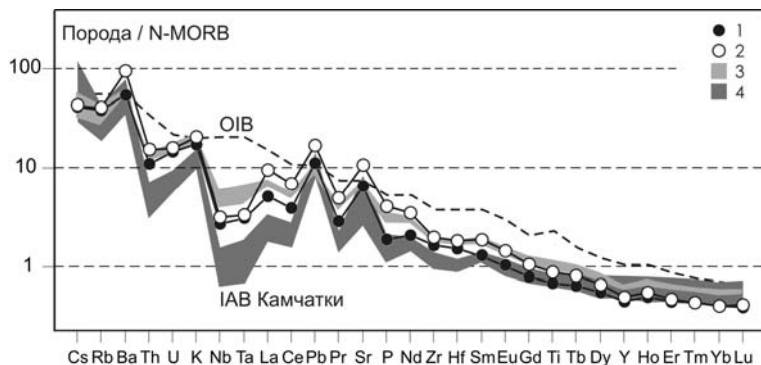


Рис. 4. Распределение магматофильных элементов для пород NEB-адакитовой ассоциации ЦКД. Средние составы: 1 – Mg андезито-базальты и андезиты, 2 – адакиты. Поля составов: 3 – андезито-базальты NEB типа, 4 – базальты вулкана Ключевской по [Churikova et al., 2001]. OIB и N-MORB по [Sun, McDonough, 1989].

Петрологические особенности и происхождение. Для наиболее основных по составу андезито-базальтов NEB типа и Mg-андезито-базальтов расчеты PT параметров кристаллизации расплавов проведены по геотермометру Ol-расплав и геотермобарометру Орх-расплав [Putirka, 2008]. Для достижения условий равновесной кристаллизации расплавов с образованием наиболее магнезиальных вкрапленников Fo_{85} и En_{87} ($\text{KD}_{\text{Fe}2+/\text{Mg}}^{\text{Ol}}=0.33$, $\text{KD}_{\text{Fe}2+/\text{Mg}}^{\text{Orx}}=0.29$) был применен метод «растворения» этих фаз в расплаве. Максимальные температуры равновесной кристаллизации составили: для Fo_{85} в расплаве NEB 1282-1312 °C, и для En_{87} в расплаве Mg-андезито-базальта 1251-1253 °C при давлениях 7.9-8.5 кбар. PT условия равновесной кристаллизации для первых ликвидусных фаз Crx ($\text{KD}_{\text{Fe}2+/\text{Mg}}^{\text{Crx}}=0.27$) в адакитовых расплавах получены по геотермобарометру [Putirka, 2008] и составляют 1185-1190 °C и 5.8-6.8 кбар. Расчеты давления формирования расплавов NEB проведены по эмпирическим формулам и показали 7.5-9.3 [Putirka, 2008]. Результаты расчетов PT условий равновесной кристаллизации демонстрируют, что все породы исследуемого NEB-адакитового комплекса являются продуктами дифференциации двух типов расплавов – собственно Nb-обогащенных базальтовых и Mg-андезито-базальтовых. В качестве рабочей гипотезы может быть выдвинуто предположение о формировании NEB и Mg андезитоидных магм в результате плавления фронтальной области субдуцируемой Тихоокеанской океанической литосферы в результате ее взаимодействия с астеносферным веществом. Наличие включений трондьемитового стекла во вкрапленниках Орх из Mg-андезитов не исключает возможности реализации модели их образования в результате взаимодействия кислых и более основных по составу расплавов. Формирование богатых Sr и бедных HREE адакитов связывается нами с процессами дифференциации Mg андезитоидных магм.

Исследования выполнены при финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 07-05-00959_a, 09-05-10000-к и Интеграционных проектов СО РАН №№ 13, 37.

Список литературы

- Churikova T., Dorendorf F., Worner G.** Sources and fluids in the mantle wedge below Kamchatka, evidence from across-arc geochemical variation // *J. Petrology*, 2001. V. 42. № 8. P. 1567-1593.
- 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.

Yogodzinski G.M., Lees J.M., Churikova T.G., Dorendorf F., Worner G., Volynets O.N. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges // *Nature*, 2001. V. 409. P. 500–504.

Putirka K. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems // *Minerals, Inclusions and Volcanic Processes. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Mineralogical Soc. Am.*, 2008. V. 69. P. 61-120.