

## Научные статьи

УДК 552.11(551.24)

### ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ИСТОЧНИКИ ПОЗДНЕКЕМБРИЙСКИХ СИЛЛОВ И ДАЕК СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ХРЕБТА ДАРИБИ (ЗАПАДНАЯ МОНГОЛИЯ)

©2012 Д.В. Коваленко<sup>1</sup>, А.А. Монгуш<sup>2</sup>, О.А. Агеева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, 119017; e-mail: Dmitry@igem.ru

<sup>2</sup>Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, 667007

Получены новые изотопные и геохимические данные по позднекембрийским силлам и дайкам северной части хребта Дариби, который входит в структуру каледонид Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП). Магматические породы силлово-дайкового комплекса образовывались в результате смешения низкокальциевых пикритовых и тоналитовых расплавов. В результате плавления гранатовых лерцолитов мантийного клина формировались низкокальциевые пикритовые расплавы с  $\epsilon_{Nd}(T)=+6 - +8$ . Тоналитовые расплавы с  $\epsilon_{Nd}(T)=-2$ , по-видимому, образовывались при частичном плавлении океанических мафических пород основания дуги или субдуцируемого слэба. Массивы тоналитов и плагиогранитов кембрийского возраста, ассоциирующие с вулканогенными венд-кембрийскими толщами, распространены и в других районах Западной Монголии. По-видимому, формирование натровых кислых расплавов является одним из общих процессов венд-кембрийских надсубдукционных систем ЦАСП.

*Ключевые слова:* изотопный состав, магматический источник, смешение расплавов, тоналиты.

#### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что процессы субдукции широко проявлялись, как минимум, уже 3.5 млрд. лет назад (Kusky, Polat, 1999) и существуют поныне. Поэтому одной из актуальных проблем современной геологии является исследование процессов, протекающих в зонах субдукции на разных этапах истории Земли, и выяснение эволюции этих процессов. В данной статье приводятся новые данные по магматизму надсубдукционной системы хребта Дариби (западная Монголия) позднекембрийского возраста. Особенностью условий позднекембрийского надсубдукционного магматизма является то, что по различным оценкам скорости перемещения литосферных плит в это время составляли более 25 см/год и в несколько раз превышали таковые для более поздних периодов палеозоя (Kirschvink et al., 1997). Соответственно, во

многих надсубдукционных системах можно предполагать высокие скорости субдукции. В этой связи исследование надсубдукционных систем этого времени представляет большой интерес.

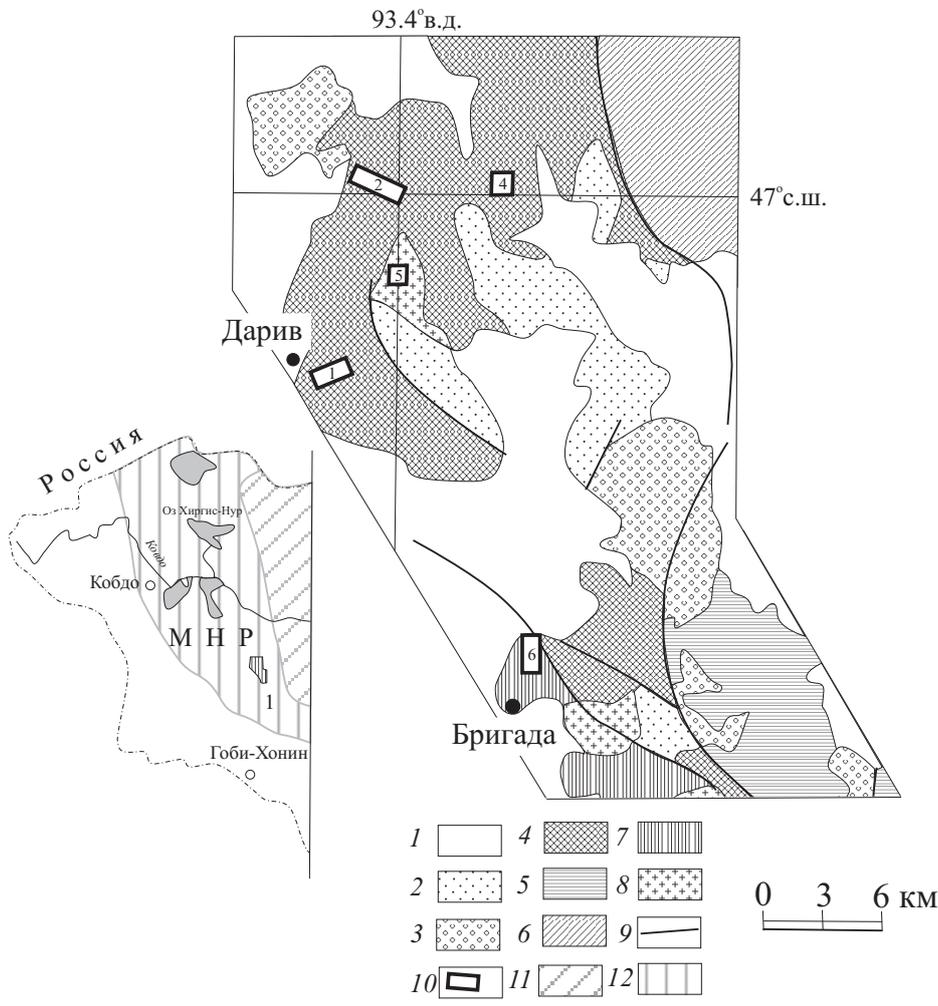
#### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ХРЕБТА ДАРИБИ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Хребет Дариби находится в юго-западной части западной Монголии и входит в структуру каледонид Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП). В современной структуре он расположен на стыке двух крупных структурно-формационных зон. К востоку от него, за широкой Шаргын-Нурской впадиной, находится Дзабханская зона, основание которой сложено метаморфическими толщами докембрия, перекрытыми чехлом карбонатно-терригенных отложений венда-кембрия. К западу расположена

Озерная зона ранних каледонид того же венд-кембрийского возраста.

В структуре северной части хребта Дариби выделяются: терригенно-кремнисто-туффовая, карбонатно-кремнисто-тефрогенная и вулканогенно-молассовая толщи (Хаин и др., 1995; Хераскова и др., 1985) (рис.1). Терригенно-кремнисто-туффовая и карбонатно-кремнисто-тефрогенная толщи насыщены субвулканическими телами – дайками, силлами и небольшими штоками, которые выделяются нами в силлово-дайковый субвулканический комплекс. Результаты исследований этого комплекса представлены в данной статье. В породах карбонатно-кремнисто-тефрогенной формации обнаружены спикеры губок и радиоларии, показывающие позднекембрийский-раннеордовикский возраст толщ (Хераскова и др., 1985). Карбонатно-кремнисто-тефрогенная и

терригенно-кремнисто-туффовая толщи образуют крутопадающие тектонические пластины субсеверного простирания (Дергунов, Лувсанданзан, 1984). Во многих местах они раздроблены субвертикальным кливажем северного простирания, а слои известняков в некоторых районах деформированы в складки с вертикальными шарнирами, осевые плоскости которых также характеризуются субсеверным простиранием. В ряде разрезов породы силлово-дайкового субвулканического комплекса кливажированы вместе с вмещающими породами. Возраст деформаций в хребте Дариби определен как раннеордовикский (Козаков и др., 2002). В этой связи возраст силлово-дайкового комплекса, участвовавшего в деформациях, ограничивается поздним кембрием. Вулканогенно-молассовая формация залегает на всех нижележащих толщах резко несогласно.



**Рис. 1.** Геологическая схема хребта Дариби (Хераскова и др., 1985): 1 – отложения мезозоя-кайнозоя; 2 – девонские осадочные толщи; 3 – ордовикские осадочные толщи; 4-7 – районы преимущественного распространения венд-ордовикских формаций: 4 – андезитовой и карбонатно-кремнисто-тефрогенной; 5 – офиолитовой и карбонатно-кремнисто-тефрогенной; 6 – терригенно-кремнисто-туффово-андезитовой, офиолитовой (спилиты) и карбонатно-кремнисто-тефрогенной; 7 – андезитовой, офиолитовой (спилиты) и карбонатно-кремнисто-тефрогенной; 8 – граниты; 9 – разломы; 10 – места отбора проб для изотопных и геохимических исследований. На врезке: 11 – Дзабханский микроконтинент; 12 – каледониды. Цифрой 1 обозначен хребет Дариби.

Образцы для изотопных и геохимических исследований отбирались из пород силлово-дайкового комплекса в районах со следующими координатами (рис. 1): 46°56'13.00"с.ш., 93°42'27.52"в.д.; 47°02'42.89"с.ш., 93°41'45.10"в.д.; 47°00'34.36"с.ш., 93°46'01.14"в.д.; 46°56'13.00"с.ш., 93°42'27.52"в.д.; 46°47'50.01"с.ш., 93°50'14.43"в.д.

### АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Определение породообразующих окислов выполнено рентгено-флюоресцентным методом (RFA) в ИГЕМ РАН (Москва). Концентрации элементов-примесей определялись методом ICP-MS в Институте геохимии и аналитической химии РАН им. В.И. Вернадского (Москва) с относительной погрешностью 5-10%. Измерения изотопного состава Nd и Sr проводили в Геологическом институте КНЦ РАН (Апатиты) по методикам, детально описанным в работе (Баянова, 2004).

### КРАТКАЯ ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

Пикритобазальты и базальты силлов и даек силлово-дайкового комплекса характеризуются порфировой структурой. Вкрапленники представлены клинопироксеном и плагиоклазом, либо плагиоклазом. Основная масса сложена микролитами плагиоклаза, реже клинопироксеном и рудным минералом. Породы зеленокаменно изменены, лишь в единичных телах можно определить номер плагиоклаза – андезин-лабрадор во вкрапленниках и андезин в основной массе. В телах андезибазальтов вкрапленники представлены андезином, редко – клинопироксеном, в дацитах – олигоклазом-андезином, кварцем и редкими зернами клинопироксена, в тоналитах – кварцем, олигоклазом-альбитом. Основная масса в разной степени раскристаллизована и в большинстве тел андезибазальтов представлена микролитами кислого плагиоклаза: олигоклаза, редко – андезина; в дацитах и тоналитах – олигоклазом-альбитом и кварцем. Стекло девитрифицировано и хлоритизировано. Небольшой шток кварцевого диорита сложен кварцем, андезином-олигоклазом, роговой обманкой, реже – авгитом, рудными минералами.

### ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКОГО И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ПОРОД, ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Позднекембрийские породы силлово-дайкового комплекса хребта Дариби по концентрациям SiO<sub>2</sub> и MgO представляют собой непре-

рывный ряд от пикритобазальтов до тоналитов (рис.2). На диаграмме (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)-SiO<sub>2</sub> (Kuno, 1966) составы пород попадают в основном в область пониженной щелочности. На диаграммах Миасиро (SiO<sub>2</sub>-FeO\*/MgO и FeO\*-FeO\*/MgO) (Miyashiro, 1974) и AFM (Kuno, 1968) тренды составов пород располагаются на границе толеитовой и известково-щелочной серий. На диаграмме K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> (Pecerillo, Taylor, 1976) составы попадают в поля низкокалиевых серий. Величины отношения Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O меняются от 3 до 61. На диаграмме An-Ab-Or (O'Connor, 1965) составы силлов и даек образуют непрерывный тренд от высокоанортитовых пород до области тоналитов (рис. 2).

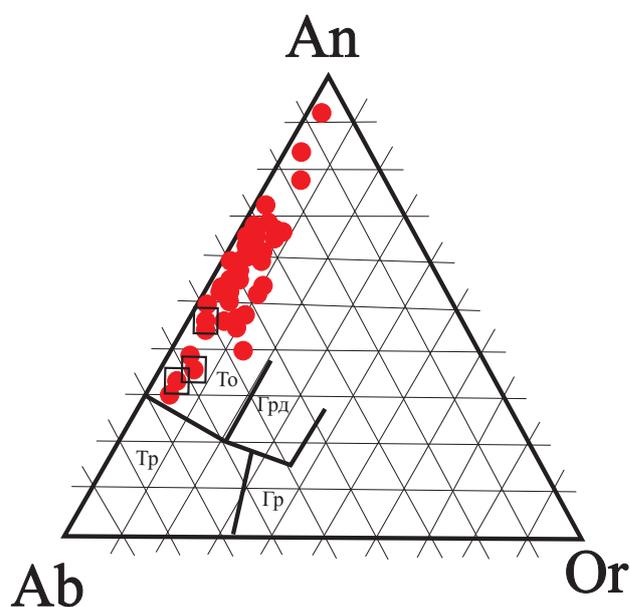


Рис. 2. Положение нормативных составов пород силлово-дайкового комплекса на диаграмме альбит-анортит-ортоклаз. Области: To – тоналиты; Tr – гранодиориты; Грд – гранодиориты; Gr – граниты. В квадратах обведены модальные тоналитовые составы.

На диаграммах Харкера (Harker, 1909) в силах и дайках с уменьшением магнезиальности пород сначала наблюдается рост концентраций TiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, по-видимому, за счет фракционирования клинопироксена, затем намечается тенденция к их уменьшению, вероятно, связанная с фракционированием плагиоклаза и титаномагнетита. Концентрации Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO уменьшаются с уменьшением магнезиальности пород, содержания Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O – увеличиваются. Магнезиальность пород колеблется от 29 до 69.

Содержания никеля и кобальта коррелируют с магнезиальностью пород и закономерно уменьшаются с уменьшением концентрации MgO. Концентрация ванадия увеличивается с уменьшением содержания MgO от 14 мас. % до

8 мас. %, затем – уменьшается. Концентрация легких литофильных элементов (LILE) в породах коррелирует с содержанием в них калия. Концентрации высоkozарядных элементов (HFSE: Nb, Zr, Hf), Th, U, легких редких земель (LREE) в силах и дайках – низкие и слабо увеличиваются при уменьшении концентрации MgO от 14 до 1 мас. %. Концентрации Sr увеличиваются при уменьшении концентрации MgO, а концентрации Eu, Y и Yb увеличиваются при уменьшении концентрации MgO от 14 до 3-4 мас. %, затем уменьшаются, возможно, в связи с фракционированием амфибола и клинопироксена.

На спайдер-диаграммах, нормализованных к примитивной мантии (Sun, McDonough, 1989) (рис. 3), породы силлов и даек демонстрируют особенности составов, типичные для надсубдукционных магм – они обогащены легкими литофильными элементами и легкими редкими землями относительно высоkozарядных элементов, средних (MREE) и тяжелых редких земель (HREE). Наиболее ярко выраженные минимумы Nb, Ta, Zr, Hf, Ti, значительно ниже уровня N-MORB характерны для высокомагнезиальных пород. В более кислых породах глубина минимумов уменьшается до уровня MORB и выше. На большинстве спайдер-диаграмм отмечаются стронциевые максимумы.

Изотопные составы Nd силлов и даек обра-

зуют зависимости от концентраций SiO<sub>2</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O и величин отношений Zr/Nb, Th/La (рис. 4). Так же наблюдается тренд в координатах  $\epsilon_{Nd}(T) - I_{Sr}(T)$  (рис. 4). Наиболее высокомагнезиальным породам соответствуют величины  $\epsilon_{Nd}(T) = +5 - +6$ ,  $I_{Sr}(T) = 0.7039 - 0.7048$ , высокие значения отношения Zr/Nb=22-33 и наиболее низкие величины Th/La=0.23-0.15. Наименее магнезиальные силы и дайки тоналитов характеризуются  $\epsilon_{Nd}(T) = -2$ ,  $I_{Sr}(T) = 0.708$ , Zr/Nb=5, Th/La=0.58. Изотопные составы располагаются вдоль линии смешения, рассчитанной из предположения, что крайними членами смешения являются пикритобазальты и тоналиты. Таким образом, по-видимому, магматические породы силлово-дайкового комплекса образовались в результате смешения двух расплавов – ультрамафического (пикритобазальтового или пикритового) и кислого (вероятно, тоналитового).

Как показало петрографическое изучение пикритобазальтов, вкрапленники и основная масса в них представлены клинопироксеном и плагиоклазом. Такая ассоциация минералов не могла образоваться при кристаллизации первичных мантийных магм и, по-видимому, является результатом фракционирования мантийных расплавов или незначительной степени их смешения с тоналитовыми расплавами. Вероятно, первичные мантийные магмы были

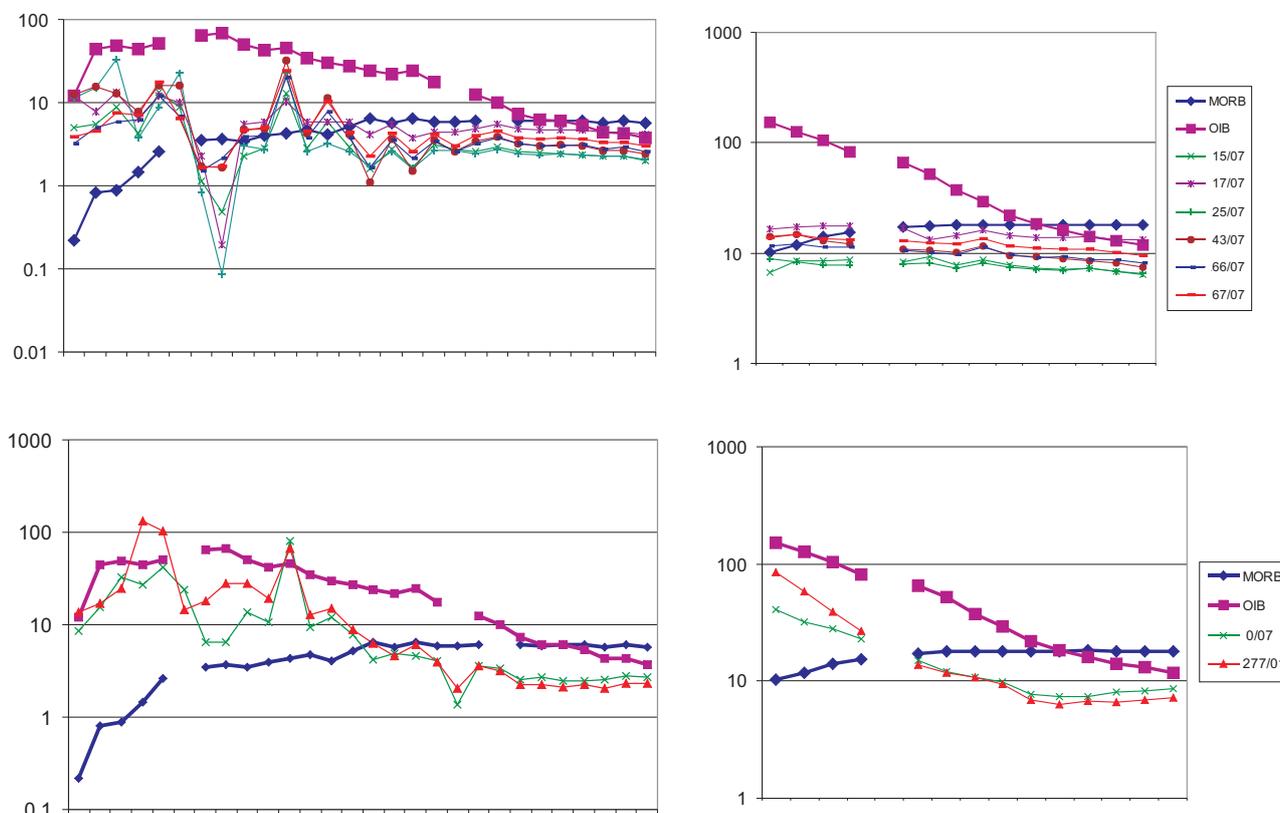
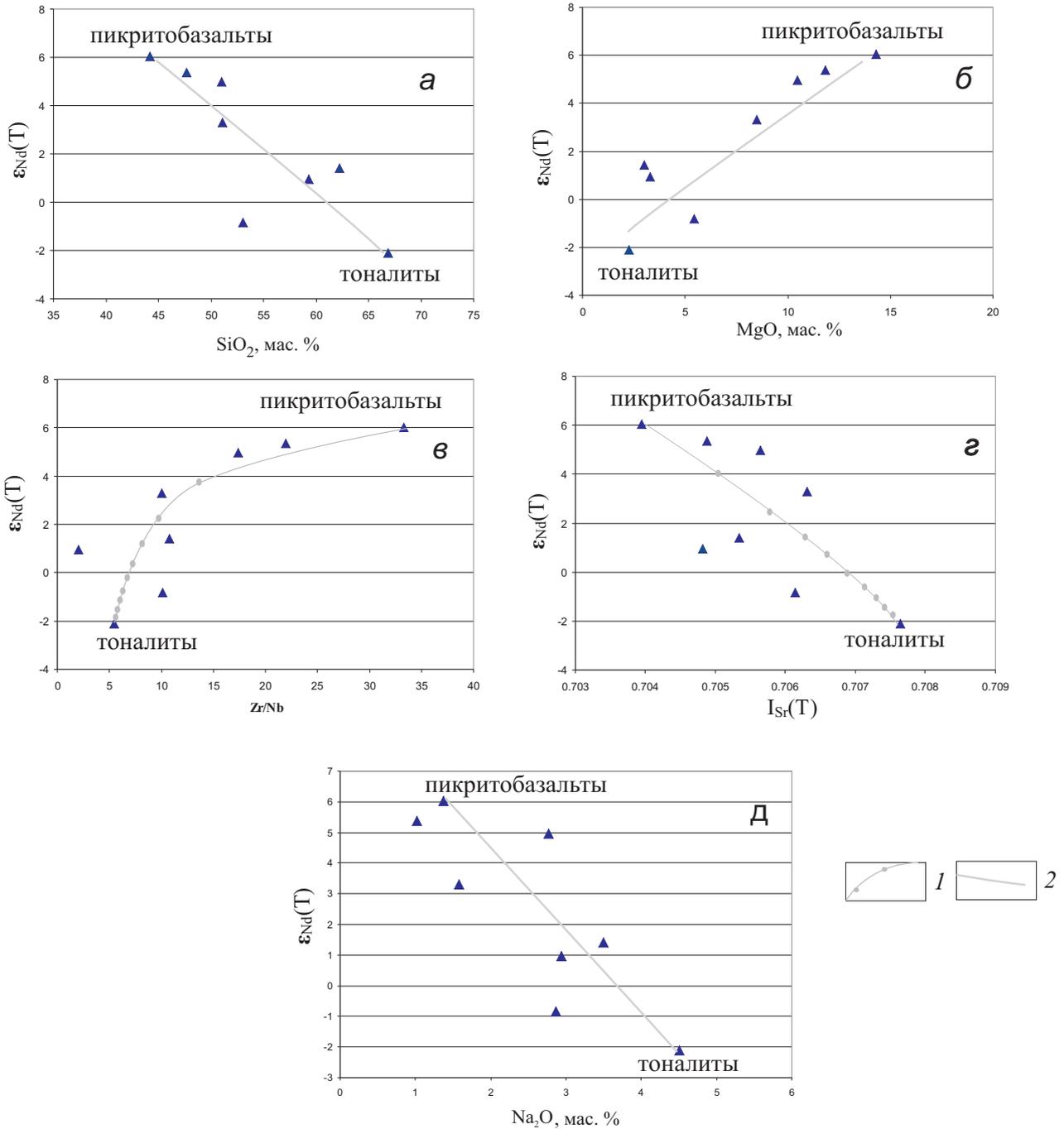


Рис. 3. Спайдер-диаграммы составов пород силлово-дайкового комплекса хребта Дариби. Породы: 15/07-67/07 – высокомагнезиальные базальты и пикритобазальты; 0/07-277/01 – тоналиты.



**Рис. 4.** Изотопные зависимости для пород силлово-дайкового комплекса: 1 – расчетные линии смешения; 2 – видимые тренды смешения. В расчетах смешения использованы: для тоналитов – Sr=330 ppm,  $I_{Sr}(T)=0.7076$ , Nd=12.5 ppm,  $\epsilon_{Nd}(T)=-2.1$ , Zr/Nb=5.4; для пикритобазальтов – Sr=71 ppm,  $I_{Sr}(T)=0.7039$ , Nd=3.6 ppm,  $\epsilon_{Nd}(T)=+6$ , Zr/Nb=33.

более ультраосновные, возможно, пикритовые. Они были выплавлены из деплетированных источников мантии с  $\epsilon_{Nd}(T)=+6$  или чуть больше. Высокомагнезиальные силлы и дайки характеризуются низкими концентрациями  $K_2O$ . Низкие концентрации  $Al_2O_3 < 16$  мас. % и горизонтальные спектры REE также характерны для низкокальциевых толеитовых пород (Gill, 1981). Отношения La/Yb от 1 до 7. На спайдер-диаграммах (рис. 3) присутствуют ярко выраженные Nb-Ta,

Zr, Hf, Ti минимумы. На диаграммах Nb-Zr-Y (De Paolo, Wasserburg, 1976) и Hf-Th-Ta (Wood, 1980) высокомагнезиальные вулканы попадают в поля базальтов островных дуг. Все эти данные свидетельствуют о том, что исследованные высокомагнезиальные породы силлово-дайкового комплекса формировались в надсубдукционных условиях, по-видимому, на начальной стадии магматической активности островной дуги. На диаграмме  $(La/Yb)_n - (La)_n$  показано, что

высокомагнезиальные расплавы были выплавлены из гранатовых лерцолитов верхней мантии (рис. 5). На диаграммах Ba/La-Th/La и Th/Yb - Sr/Nd (Kelemen, 1995) составы магнезиальных базальтовых силлов и даек образуют тренды вдоль осей Ba/La и Sr/Nd, что свидетельствует о влиянии флюидов при образовании надсубдукционных расплавов и незначительного влияния расплавов субдуцированных осадков (рис. 5). Максимальное значение отношения Ba/La силлов и даек – 110. Большинство значений этого соотношения колеблется около 40 и превышает величину этого отношения в N-MORB (4-10) и E-MORB (10-15).

В тоналитах вкрапленники и основная масса представлены кварцем, олигоклазом, альбитом и рудным минералом. Это высокоглиноземистые породы –  $Al_2O_3=16$  мас. %. Величины отношений  $Na_2O/K_2O$  варьируют от 6 до 10. Распределение элементов-примесей – надсубдукционное: на спайдер-диаграммах Nb-Ta минимум выражен слабо, но видны четкие минимумы Zr, Hf, Ti (рис. 3). Спектры REE отрицательные наклонные, La/Yb – 10-18. Концентрации M- и HREE значительно ниже уровня их концентраций в N-MORB и на спайдер-диаграмме образуют вогнутую в спектре MREE форму, свидетельствующую о присутствии в источнике граната и, вероятно, амфибола. Изотопный состав тоналитов характеризуется  $\epsilon_{Nd}(T)=-2$  и  $I_{Sr}(T)=0.7076$ .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные данные показывают, что породы силлово-дайкового комплекса северной части хребта Дариби были сформированы в период позднекембрийского этапа надсубдукционного магматизма. Высокомагнезиальные низкокальциевые расплавы выплавливались из деплетированных по изотопному составу гранатовых лерцолитов верхней мантии на глубине >70 км под воздействием субдукционных флюидов в условиях примитивной островной дуги. Одновременно с высокомагнезиальными расплавами в зоне субдукции формировались кислые натровые расплавы тоналитового состава. Присутствие пород тоналит-гранодит-плагиогранитной серии отмечается во многих районах каледонид западной Монголии (Коваленко и др., 1996; Руднев и др., 2009; Ярмолюк и др., 2011).

В работах (Castillo, 2006; Martin, 1994; Peacock et al., 1994; Rapp et al., 1991 и др.) показано, что высокоглиноземистые тоналиты могут формироваться либо в результате фракционирования мантийных известко-щелочных магм, либо при парциальном плавлении метаморфизованных основных пород – амфиболитов, гранулитов, эклогитов. Первый вариант происхождения

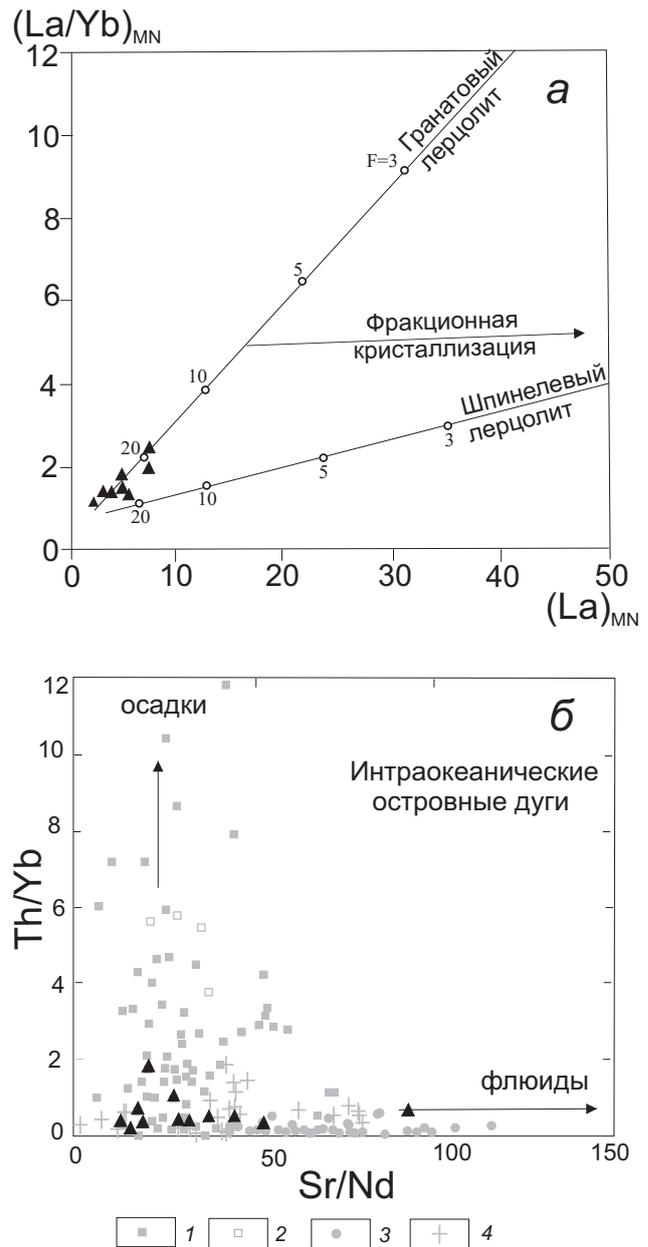


Рис. 5. Диаграммы  $(La/Yb)_{MN} - (La)_{MN}$  (a) и Th/Yb - Sr/Nd (б) для составов магнезиальных пород силлово-дайкового комплекса. а: величины La/Yb и La нормализованы к примитивной мантии. На диаграмме показаны линии batch парциального плавления гранатового лерцолита (оливин=0.59, ортопироксен=0.15, клинопироксен=0.20 и гранат=0.06) и шпинелевого лерцолита (оливин=0.6, ортопироксен=0.2, клинопироксен=0.145 и шпинель=0.055). Цифры на линиях плавления – процент парциального плавления (F). Фракционная кристаллизация увеличивает величину  $(La)_{MN}$  при слабом изменении значений  $(La/Yb)_{MN}$  (Sajona et al., 2000). б: 1-4 – составы пород: 1 – дуги Банда, 2 – Антильской дуги, 3 – дуг Новобританской, Тонга, 4 – дуг Кермадек, Южной Сэндвичевой, Марианская, Ново-Гебридская (Kelemen, 1995). Остальные обозначения см. на рис. 2 и 3.

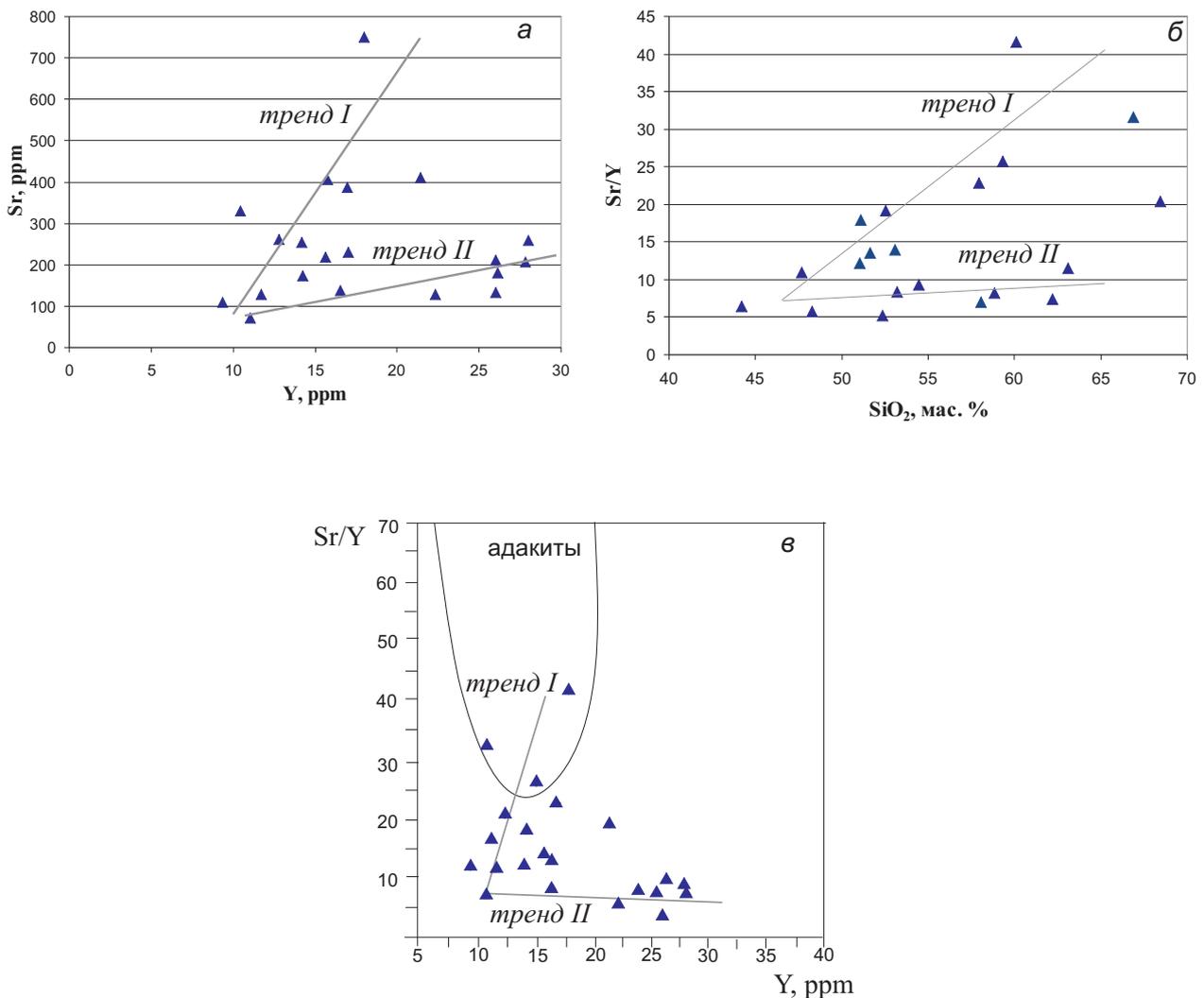
тоналитов силлово-дайкового комплекса хребта Дариби маловероятен, так как в структуре хребта Дариби не установлены породы более основные, чем тоналиты, с таким же, как у тоналитов изотопным составом. По нашему мнению, более вероятен второй вариант.

По концентрациям элементов-примесей породы силлово-дайкового комплекса хребта Дариби образуют два тренда – I и II (рис. 6). Тренд I характеризуется значительно более высокой скоростью роста концентраций Sr при увеличении концентраций Y и SiO<sub>2</sub>. Концентрации Y пород тренда I не превышают 20 ppm, концентрации Y пород тренда II достигают 29 ppm. Составы наиболее высокостронциевых пород тренда I попадают в поле адакитов (рис. 6). Эти породы имеют средний или кислый состав, обогащены глиноземом, характеризуется низкими концентрациями HREE, Y, высоким отношением La/Yb и умеренно высоким отношением Sr/Y.

Эксперименты по плавлению низкокальциевых амфиболитов (Martin, 1994; Peacock et al., 1994;

Rapp et al., 1991 и др.) показали, что при плавлении метаморфизованных основных пород при низких давлениях ( $\leq 8$  кбар) в рестите остаются плагиоклаз, амфибол, возможно ортопироксен и ильменит. Так как Sr совместим с полевыми шпатами, а тяжелые редкие земли и Y – с гранатом, то при низкобарическом плавлении расплавы должны быть обеднены Sr и обогащены HREE и Y. При высокобарическом плавлении ( $> 16$  кбар) в рестите остаются гранат, клинопироксен, возможно, рутил. В этом случае расплавы обогащены Sr и деплетированы HREE и Y.

Возможно, кислые расплавы тренда I образовались при высокобарическом плавлении, а тренда II – при низкобарическом. Вероятно, тренд I связан со смешением пикритовых мантийных магм с расплавами, образованными при плавлении метамафитов субдуцируемого слэба. Тренд II, по-видимому, связан со смешением пикритовых мантийных магм с расплавами, образованными при плавлении метамафитов основания островной дуги. Мощность при-



**Рис. 6.** Диаграммы Sr - Y (а), Sr/Y - SiO<sub>2</sub> (б) и Sr/Y - Y (в) для пород силлово-дайкового комплекса. Поля для адакитов взяты из работы (Defant, Drummond, 1990).

митивных островных дуг обычно не превышает 15 км. Поэтому в основании островных дуг могут быть содержащие плагиоклаз и не содержащие гранат породы, например амфиболиты, в дугах с мощной корой – гранулиты. При плавлении этих пород Y будет уходить в расплав, а Sr оставаться в плагиоклазе. Отношения Sr/Y будут низкими.

Подчеркнем еще раз, что составы силлов и даек, которые образуют изотопные зависимости  $\epsilon_{Nd}(T)$ -SiO<sub>2</sub>,  $\epsilon_{Nd}(T)$ -MgO,  $\epsilon_{Nd}(T)$ -Na<sub>2</sub>O,  $\epsilon_{Nd}(T)$ -Zr/Nb,  $\epsilon_{Nd}(T)$ -I<sub>Sr</sub>(T) (рис. 4), попадают как на тренд I, так и на тренд II. То есть, натровые кислые расплавы, с которыми шло смешение пикритовых магм как по тренду I, так и тренду II (рис. 6), обогащены по изотопному составу. Поэтому, возможно, что и основание дуги и субдуцирующей слэб являлись фрагментами одной литосферной плиты. В рамках современных геологических концепций обогащенная по изотопному составу океаническая литосфера образуется под действием плюмов (Hoffman et al., 1998).

Массивы тоналитов и плагиогранитов ранне- и позднекембрийского возраста, ассоциирующиеся с вулканогенными венд-кембрийскими толщами, распространены и в других районах Западной Монголии (Коваленко и др., 1996; Коваленко и др., 2004; Руднев и др., 2009; Ярмолюк и др., 2011). По-видимому, формирование натровых кислых расплавов является одним из общих процессов венд-кембрийских надсубдукционных систем Западной Монголии. В работе (Руднев и др., 2009) было показано, что эти кислые натровые расплавы также образовывались при плавлении эклогитов субдуцируемого слэба. Но в отличие от Дарибских тоналитов они характеризуются деплетированным изотопным составом  $\epsilon_{Nd}(T)=+6-+8$ . Из этого следует, что под островодужные сегменты, фрагменты которых находятся в структуре хребтов Дариби и более западных районов Монголии (хребты Сэйр, западная часть хребта Хан-Хухей) субдуцировала разная океаническая литосфера, с различным изотопным составом, то есть это были разные островодужные сегменты.

Таким образом геохимические данные показывают, что в структуре каледонид западной Монголии присутствуют фрагменты как минимум двух надсубдукционных систем. В обеих надсубдукционных системах в кембрии широко проявлялся кислый натровый адакитовый магматизм, вероятно, связанный с плавлением субдуцирующих слэбов. С чем это было связано? Известны разные модели условий плавления слэба и формирования адакитовых расплавов. В работах (Castillo, 2006; Defant, Drummond, 1990; Martin, 1994; Peacock et al., 1994 и др.) было показано, что

адакиты могут образовываться при субдукции молодой «горячей» океанической литосферы, при субдукции под «горячий» аккреционный клин, при прекращении субдукции, при высокой скорости субдукции. Маловероятно, что первые три процесса протекали одновременно в обеих надсубдукционных системах каледонид Монголии. Скорее всего, по нашему мнению, плавление слэбов здесь было связано с высокой скоростью субдукции, которая по данным (Kirschvink et al., 1997) в кембрии могла достигать 25 см/год.

## ВЫВОДЫ

Позднекембрийские надсубдукционные магмы в северной части хребта Дариби образовывались в результате смешения пикритовых и тоналитовых расплавов. В результате плавления гранатовых лерцолитов мантийного клина формировались высокотемпературные низкокальциевые толеитовые пикритовые расплавы с  $\epsilon_{Nd}(T)$  около +6. Тоналитовые расплавы с  $\epsilon_{Nd}(T)=-2$ , возможно, образовывались при частичном плавлении океанических пород основания дуги и субдуцируемого слэба.

Массивы тоналитов и плагиогранитов кембрийского возраста, ассоциирующиеся с вулканогенными венд-кембрийскими толщами, распространены и в других районах Западной Монголии (Коваленко и др., 2004; Руднев и др., 2009; Ярмолюк и др., 2011). По-видимому, формирование натровых расплавов является одним из общих процессов венд-кембрийских надсубдукционных систем ЦАСП.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты 09-05-00859а, 12-05-00386-а, 07-05-90100-Монг\_а и программы Президиума РАН N4.

## Список литературы

- Баянова Т.Б.* Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. Санкт-Петербург: Наука, 2004. 174 с.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Пухтель И.С. и др.* Магматические породы и источники магм офиолитов Озерной зоны (Монголия) // Петрология. 1996. Т. 4. № 5. С. 453-495.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б. и др.* Халдзан-Бурегтейский массив щелочных и редкометальных магматических пород: строение, геохронология и геодинамическое положение в каледонидах Западной Монголии // Петрология. 2004. Т. 12. № 5. С. 467-494.
- Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Хаин Е.В. и др.* Этапы и тектоническая обстановка формиро-

- вания кристаллических комплексов ранних каледонид Озерной зоны Монголии: результаты U-Pb и Sm-Nd изотопных исследований // Геотектоника. 2002. № 2. С. 80-92.
- Руднев С.Н., Изох А.Э., Ковач В.П. и др.* Возраст, состав, источники и геодинамические условия формирования гранитоидов северной части Озерной зоны западной Монголии: механизм роста палеозойской континентальной окраины // Петрология. 2009. Т. 17. № 5. С. 470-508.
- Хаин Е.В., Амелин Ю.В., Изох А.Э.* Sm-Nd – данные о возрасте ультрабазит-базитовых комплексов в зоне обдукции Западной Монголии // ДАН. 1995. Т. 341. № 6. С. 791-796.
- Хераскова Т.Н., Томуртогоо О., Хаин Е.В.* Офиолиты и верхнедокембрийско-нижнепалеозойские образования Озерной зоны хребта Дариби (Западная Монголия) // Известия АН СССР. Сер. Геол. 1985. № 6. С. 25-31.
- Ярмолюк В.В., Ковач В.П., Коваленко В.И. и др.* Состав, источники и механизмы формирования континентальной коры Озерной зоны каледонид Центральной Азии: 1. Геологические и геохронологические данные // Петрология. 2011. Т. 19. № 1. С. 56-79.
- Castillo P.R.* An overview of adakite petrogenesis // Chinese Sci. Bull. 2006. V. 51. № 3. P. 257-268.
- De Paolo D.J., Wasserburg G.J.* Inferences about magma sources and mantle structure from variations of  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  // Geophys. Res. Lett. 1976. V. 3. P. 743-746.
- Defant M.J., Drummond M.S.* Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // Nature. 1990. V. 347. P. 662-665.
- Gill J.B.* Orogenic andesites and plate tectonics. N.-Y.: Springer, 1981. 390 p.
- Harker A.* The natural history of igneous rocks. Methuen. London, 1909. 384 p.
- Hoffman P.F., Kaufman A.J., Halverson G.P. et al.* A Neoproterozoic snowball earth // Science. 1998. V. 281. P. 1342-1346.
- Kelemen P.B.* Genesis of high Mg# andesites and the continental crust // Contrib. Mineral. Petrol. 1995. V. 120. P. 1-19.
- Kirschvink J.L., Ripperdan R.L., Evans D.A.* Evidence for a large-scale reorganization of Early Cambrian continental landmasses by inertial interchange true polar wander // Science. 1997. V. 277. P. 541-545.
- Kusky T.M., Polat A.* Growth of granite-greenstone terranes at convergent margins, and stabilization of Archean cratons // Tectonophysics. 1999. V. 305. P. 43-73.
- Kuno H.* Differentiation of basalt magmas // Hess H.H., Poldervaart A. (eds.) Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic compositions. V. 2. Interscience, N.Y. 1968. P. 623-688.
- Kuno H.* Lateral variation of basalt magma types across continental margins and island arcs // Bull. Volcanology. 1966. V. 29. P. 195-222.
- Martin H.* Archean grey gneisses and the genesis of continental crust // Archean crustal evolution. 1994. P. 205-259.
- Miyashiro A.* Volcanic rock series in island arc and active continental margin // Amer. J. Sci. 1974. V. 274. № 3. P. 321-355.
- O'Connor, J.T.* A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios // U.S. Geol. Surv. Prof. pap. 1965. V. 525-B. P. 79-84
- Pecerillo A., Taylor S.R.* Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamuonu area, northern Turkey // Contrib. Mineral. Petrol. 1976. V. 58. P. 63-81.
- Peacock S.M., Rushmer T., Thompson A.B.* Partial melting of subducting oceanic crust // Earth and Planetary Science Letters. 1994. V. 121. P. 227-244.
- Rapp R.P., Watson E.B., Miller C.F.* Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites // Precambrian Res. 1991. V. 51. P. 1-25.
- Sajona F.G., Maury R.C., Pubellier M. et al.* Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines) // Lithos. 2000. V. 54. P. 173-206.
- Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts // Magmatism in ocean basin / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. Geol. Soc. Spec. Publ. London. 1989. V. 42. P. 313-345.
- Wood D.A.* The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province // Earth Planet. Sci. Lett. 1980. V. 50. P. 11-30.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ  
**GEODYNAMIC CONDITIONS OF FORMATION AND SOURCES  
OF LATE CAMBRIAN SILLS AND DYKES OF THE NORTHERN  
PART OF THE DARIBY RIDGE, WESTERN MONGOLIA**

**D.V. Kovalenko<sup>1</sup>, A.A. Mongush<sup>2</sup>, O.A. Ageyeva<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, 119017; e-mail: Dmitry@igem.ru*

*<sup>2</sup>Tuva Institute of Complex Development of Natural Resources SB RAS, 667007*

The authors collected new isotopic and geochemical data on sills and dykes of the Northern part of the Dabiry ridge which is a part of Caledonian complex of the Central Asian fold belt (CAFB). Magmatic rocks of the sill-dyke complex resulted from mixing of low potassium picritic and tholeiitic melts. A melting of garnet lherzolites of the mantle wedge resulted in formation of low potassium picritic melts with  $\epsilon_{Nd}(T)=+6 - +8$ . Tonalitic melts with  $\epsilon_{Nd}(T)=-2$  were possibly generated by partial melting of oceanic mafic rocks of an arc base or a subduction slab. Cambrian massifs of tonalites and plagiogranites associating with a Vendian-Cambrian sodium-rich volcanogenic series are widespread in other regions of the Western Mongolia as well. Apparently the formation of sodic melts is one of common processes of the Vendian-Cambrian per-subduction systems of CAFB.

*Keywords: isotopic composition, magmatic source, mixing of melts, tonalites.*