

УДК 552.313:551.72(571.53/.55)

## ГЕОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОЛЕРИТОВ КАК ИНДИКАТОР УДАЛЕННОСТИ ДАЙКОВОГО РОЯ ОТ ЦЕНТРА МАНТИЙНОГО ПЛЮМА (НА ПРИМЕРЕ ПРОТЕРОЗОЙСКИХ ДАЙКОВЫХ РОЕВ СИБИРСКОГО КРАТОНА)

© 2020 г. Член-корреспондент РАН Д. П. Гладкочуб<sup>1,\*,\*\*</sup>, Т. В. Донская<sup>1</sup>

Поступило 03.02.2020 г.

После доработки 12.02.2020 г.

Принято к публикации 15.02.2020 г.

На основании изучения протерозойских дайковых роев Сибирского кратона выявлена зависимость геохимических и изотопных характеристик долеритов дайковых роев крупных магматических провинций от удаленности района их локализации до центральной области воздействия мантийного плюма. Установлено, что вблизи от “головы” плюма родоначальные расплавы базитов отвечают составам ОИВ. На значительном удалении от плюма исходные для долеритов расплавы генерируются в субконтинентальной литосферной мантии, что обеспечивает появление широкого спектра их составов, которые отличаются от типичных ОИВ и не указывают на генетическую связь этих базитов с мантийным плюмом.

*Ключевые слова:* долерит, дайковый рой, мантийный плюм, крупная магматическая провинция, Сибирский кратон

**DOI:** 10.31857/S2686739720040052

Протяженные, имеющие широкое площадное распространение в пределах древних кратонов и складчатых поясов разновозрастные дайковые рои интерпретируются, в большинстве случаев, как крупные магматические провинции (КМП). Эти рои, образованные многочисленными дайками долеритов, отражают не только процессы масштабного внутриконтинентального растяжения, но иногда маркируют и начальные этапы распада суперконтинентов, как, например, КМП Франклин в случае с распадом Родинии. Столь значимые и широко проявленные события базитового магматизма традиционно связывают с воздействием мантийного плюма, что сопровождается привнесением в литосферу мантийного вещества, тепла и флюидов.

Однако, далеко не все долериты дайковых роев демонстрируют близкие к базальтам океанических островов (ОИВ) геохимические характеристики, которые могут быть расценены как индикатор их происхождения за счет вещества мантийного плюма. В то же время, генетическая

связь большинства дайковых роев с воздействием плюма, вытекающая из анализа геологической ситуации и данных геохронологии, не вызывает сомнений. Под геологическими данными понимается анализ пространственного распространения дайковых роев, в первую очередь, их радиальное расположение относительно единого центра. В этом случае ветви радиального дайкового роя могут находиться на значительном удалении как друг от друга, так и от центра роя. Кроме этого, о принадлежности к единому магматическому событию (внедрению плюма) подобных радиальных дайковых роев свидетельствует близкий возраст долеритов, слагающих ветви (или лучи) радиальных дайковых роев.

Отмеченная особенность, когда в целом ряде случаев по всему миру базиты дайковых роев, образованных в обстановках масштабного внутриконтинентального растяжения, инициированного внедрением мантийных плюмов, не демонстрируют отчетливо указывающих на генетическую связь с плюмами геохимических характеристик и стала мотивацией для проведения исследований, результаты которых представлены в данном сообщении.

В качестве объектов изучения были выбраны протерозойские дайковые рои Сибирского кратона, отвечающие четырем возрастным группам и,

<sup>1</sup> Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

\*E-mail: gladkochub@mail.ru

\*\*E-mail: dima@crust.irk.ru

соответственно, четырем импульсам магматизма, обусловленного активностью мантийных плюмов: позднепалеопротерозойские (~1750 млн лет), мезопротерозойские (~1500–1470 млн лет и ~1350 млн лет) и неопротерозойские (~725 млн лет).

Дайковые рои позднепалеопротерозойского возраста (~1750 млн лет) представлены в пределах Алданского щита тимптоно-алгамайским ( $1754 \pm 5$  и  $1759 \pm 4$  млн лет) и доросским (~1757 млн лет) комплексами, на Анабарском щите западно-анабарским (1771 млн лет) и восточно-анабарским ( $1754 \pm 27$  и  $1755 \pm 22$  млн лет) комплексами, и в Байкальском выступе фундамента кратона – чайским комплексом ( $1752 \pm 6$  и  $1752 \pm 3$  млн лет) ([1, 2], неопубликованные авторские данные) (рис. 1). По химическому составу долериты и габбро-долериты чайского комплекса Байкальского выступа фундамента соответствуют умеренно-щелочным базальтам, имеют хорошо выраженные отрицательные аномалии по Nb–Ta и Ti на мультиэлементных спектрах и отрицательные значения  $\epsilon_{Nd}(t) = -2.3 \dots -7.0$  [3]. Подобные характеристики свидетельствуют о формировании базитов данного этапа за счет плавления либо субконтинентальной литосферной мантии, либо мантийного источника, контаминированного континентальной корой в обстановке внутриконтинентального растяжения. Радиальный характер взаимного расположения рассматриваемых дайковых роев (рис. 1), близкие возрасты и определенные геохимические характеристики слагающих дайки базитов, позволяют рассматривать данные дайковые рои в составе единой Тимптонской (Виллюйской) КМП, образованной за счет влияния мантийного плюма на литосферу Сибирского кратона. При этом, расстояние от центра предполагаемого Тимптонского (Виллюйского) плюма [2] до районов размещения дайковых роев было существенным и составляло не менее 1000 км. Близкие по возрасту долеритам Тимптонской КМП дайки были зафиксированы на Северо-Американском кратоне (Лаврентии) и на Западно-Африканском кратоне [1, 4].

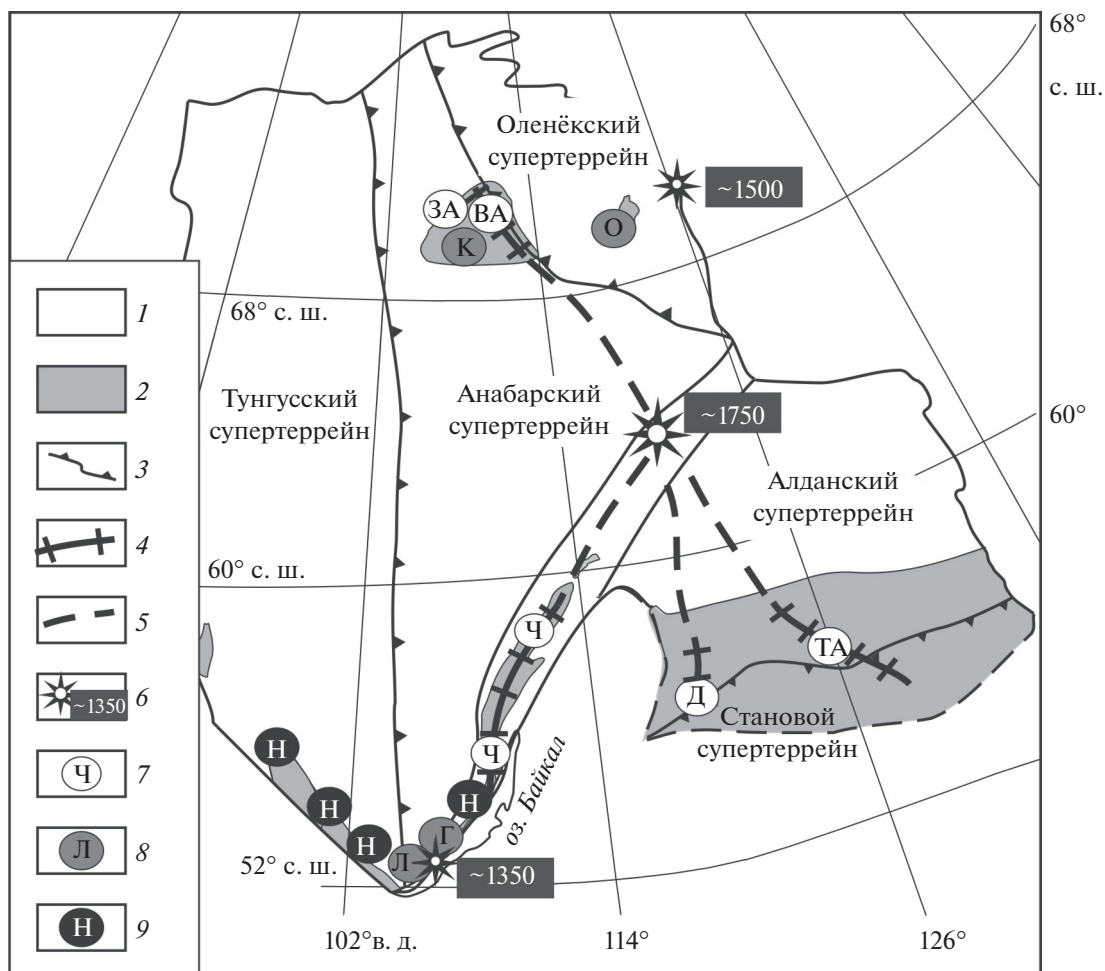
Дайковые рои мезопротерозоя с возрастом около 1500 млн лет представлены на севере Сибирского кратона в пределах Анабарского щита (куонамский комплекс,  $1501 \pm 3$  млн лет, [5, 6]) и Оленекского выступа (оленекский комплекс  $1473 \pm 24$  млн лет, [7]). Эти дайковые рои объединяются в Куонамскую КМП. Долериты этих комплексов по целому ряду геохимических критериев отвечают составам типичных ОИВ, в том числе для них характерны высокие концентрации  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ , положительные аномалии по Nb–Ta и Ti на мультиэлементных спектрах, что отражает участие в их генезисе вещества мантийного плюма [5, 8]. Родоначальные расплавы базитов оленекского комплекса были незначительно изменены

процессами коровой контаминации, о чем свидетельствуют данные по изотопному составу Nd ( $\epsilon_{Nd}(t)$  от  $-0.8$  до  $+0.6$ ), а также присутствие в долеритах захваченных цирконов, при том, что геохимические характеристики этих пород остались практически неизменными [8].

Анализ геологической ситуации в совокупности с геохимическими характеристиками долеритов мезопротерозойской Куонамской КМП свидетельствуют об их формировании в условиях внутриконтинентального растяжения на незначительном удалении от центра мантийного плюма, ответственного не только за формирование рассматриваемых дайковых роев на севере Сибирского кратона, но также близковозрастных дайковых комплексов на площади прилегающих к Сибири кратонов Конго, Сан-Франциско и Балтика, располагавшихся вблизи друг от друга в структуре транспротерозойского суперконтинента Нуна (или Колумбия) [8, 9].

Более молодая группа мезопротерозойских даек слагает две ветви (луча) дайкового роя, располагающегося в южной части Сибирского кратона, а именно в береговых обнажениях западного побережья оз. Байкал. Южная ветвь отмечается в районе пос. Листвянка (Шарыжалгайский выступ), а северная ветвь этого роя маркируется многочисленными дайками долеритов, прорывающих метаморфические образования Голоуэстского выступа фундамента кратона в 15 км к северу от пос. Большое Голоуэстное (рис. 1). Возрасты долеритов даек этих ветвей составляют  $1350 \pm 6$  млн лет [1] и  $1338 \pm 3$  млн лет [10] соответственно. По химическому составу долериты этих дайковых комплексов соответствуют базальтам нормальной щелочности толеитовой серии, имеют значения  $\epsilon_{Nd}(t)$  от  $-0.9$  до  $+1.5$ , хорошо выраженные положительные аномалии по Nb–Ta на мультиэлементных спектрах, а также ряд индикаторных геохимических отношений, типичных для ОИВ, что позволяет связывать их формирование с плюмовым источником [11]. Изученные дайки, по видимому, являются частью мезопротерозойской КМП [1], в которую, кроме дайковых роев Сибирского кратона, возможно входили близкие по составу и возрасту базитовые дайковые рои северной части Канадского щита: островов Виктория ( $1353 \pm 2$  млн лет) и Девон ( $1337 \pm 2$  млн лет), располагавшегося вблизи южного фланга Сибирского кратона на данном временном интервале [1].

Сотни даек долеритов неопротерозойского возраста (около 725 млн лет), относимые к нерсинскому комплексу, встречаются повсеместно в пределах краевых выступов фундамента на юге Сибирского кратона, слагая протяженный Саяно-Байкальский дайковый пояс, протягивающийся от бассейна р. Бирюса на западе до северного окончания оз. Байкал на востоке, или так называ-

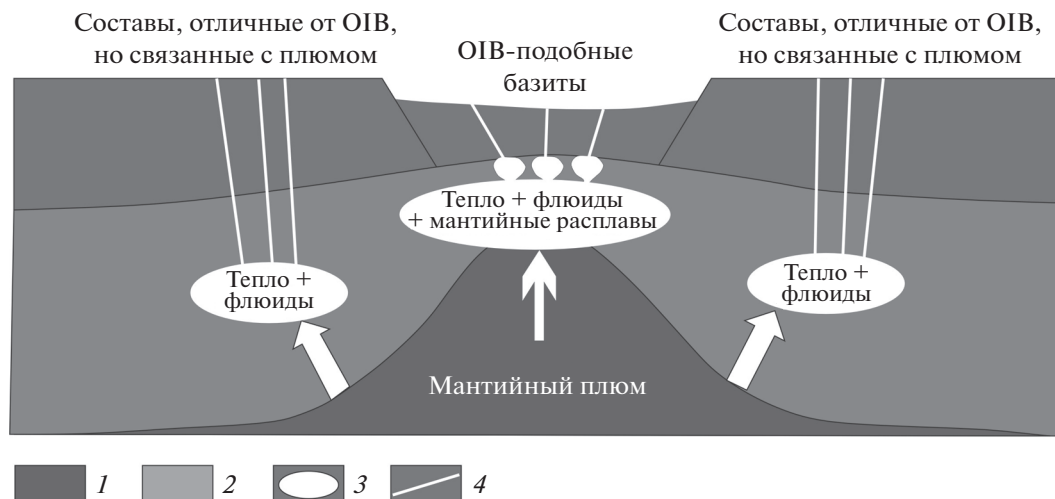


**Рис. 1.** Схема расположения протерозойских дайковых роев в пределах Сибирского кратона. 1 – фанерозойский осадочный чехол; 2 – выступы фундамента кратона; 3 – границы супертеррейнов, слагающих Сибирский кратон; 4 – протерозойские дайковые рои в пределах выступов фундамента; 5 – предполагаемое продолжение протерозойских дайковых роев под чехлом кратона; 6 – предполагаемые центры протерозойских мантийных плюмов и время их активности; 7 – дайковые рои позднего палеопротерозоя; 8 – дайковые рои мезопротерозоя; 9 – дайковые рои неопротерозоя. Буквенные обозначения дайковых роев: поздний палеопротерозой: ВА – восточно-анабарский; Д – дороский; ЗА – западно-анабарский; ТА – тимптоно-алгамайский; Ч – чайский; мезопротерозой: Г – голоустенский; К – куонамский; Л – листовянский; О – оленекский; неопротерозой: Н – нерсинский.

емую Иркутскую КМП [1, 12]. Неопротерозойские долериты соответствуют нормально-щелочным базальтам толеитовой серии, имеют  $\epsilon Nd(t)$  от  $-7.8$  до  $-20.9$ , в подавляющем большинстве случаев демонстрируют отрицательные аномалии Nb–Ta и Ti на мультиэлементных спектрах [12]. По своим геохимическим характеристикам неопротерозойские дайки Саяно-Байкальского дайкового пояса близки долеритам близковозрастного дайкового роя Франклин Северо-Американского кратона (Лаврентии). Совокупность геохимических характеристик долеритов юга Сибирского кратона и севера Лаврентии указывают на их происхождение за счет плавления субконтинентальной литосферной мантии, сопровождавшееся коровой контаминацией первичных расплавов. Внедрение рассматриваемых даек отвечает крупному

Франклинскому магматическому событию, которое маркирует начальные стадии растяжения, приведшего к распаду Родинии и отделению Сибирского кратона от этого суперконтинента. При этом центр суперплюма, инициировавшего распад Родинии, находился на значительном удалении как от места локализации рассматриваемых даек Саяно-Байкальского пояса, т.е. как от южного фланга Сибирского кратона, так и от района развития дайкового роя Франклин [1].

Полученные результаты позволили выявить явно выраженную зависимость геохимических и изотопных характеристик долеритов дайковых роев от удаленности района их локализации до центральной области воздействия мантийного плюма. Установлено, что непосредственно или вблизи от “головы” плюма родоначальные рас-



**Рис. 2.** Модель, демонстрирующая зависимость геохимических и изотопных характеристик долеритов дайковых роев от удаленности района их локализации до центральной области воздействия мантйного плюма (модифицировано после [15]). 1 – континентальная кора; 2 – субконтинентальная литосферная мантия; 3 – промежуточные магматические камеры; 4 – дайковые рои.

плавы для базитов отвечают составам типичных ОИВ (рис. 2). В этом случае плюм является поставщиком мантйного материала, тепла и флюидов. В случае, когда формирование дайковых роев происходит на значительном удалении от плюма, исходные для долеритов даек расплавы генерируются в субконтинентальной литосферной мантии, а плюм поставляет в этот источник главным образом тепло и флюиды (рис. 2). Последующая эволюция этих расплавов может развиваться как по механизму фракционной кристаллизации, так и по моделям AFC (ассимиляция + фракционная кристаллизация) [13] и REFC (привнос–вынос вещества + фракционная кристаллизация) [14], что и приводит к появлению широкого спектра составов долеритов, которые существенно отличаются от типичных ОИВ и напрямую не указывают на их генетическую связь с активностью мантйного плюма.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работы выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект 18–17–00101).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., Le Cheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Didenko A.N. // *Nature Geoscience*. 2016. V. 9. P. 464–469.
2. Гладкочуб Д.П., Писаревский С.А., Эрнст Р., Донская Т.В., Седрелунд У., Мазукабзов А.М., Хейнс Дж. // *ДАН*. 2010. Т. 430. № 5. С. 654–657.
3. Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Шоханова М.Н., Мазукабзов А.М. // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55. № 11. С. 1615–1634.
4. Youbi N., Kouyate D., Soderlund U., Ernst R.E., Sou-laimani A., Hafid A., Ikenne M., El Bahat A., Bertrand H., RkhaChaham K., Ben Abbou M., Mortaji A., El Ghorfi M., Zouhair M., El Janati M. // *Precambrian Research*. 2013. V. 236. P. 106–123.
5. Эрнст Р.Е., Округин А.В., Веселовский Р.В., Камо С.Л., Хамилтон М.А., Павлов В., Содерлунд У., Чемберлейн К.Р., Роджерс С. // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57. № 5. С. 833–855.
6. Веселовский Р.В., Петров П.Ю., Карпенко С.Ф., Костицын Ю.А., Павлов В.Э. // *ДАН*. 2006. Т. 410. № 6. С. 775–780.
7. Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Konstantinov K.M., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M. // *Precambrian Research*. 2009. V. 170. P. 256–266.
8. Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Мазукабзов А.М., Писаревский С.А., Эрнст Р.Е., Станевич А.М. // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57. № 5. С. 856–873.
9. Pisarevsky S.A., Elming S.-Å., Pesonen L.J., Li Z.X. // *Precambrian Research*. 2014. V. 244. P. 207–225.
10. Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Эрнст Р.Е., Гамилтон М.А., Мазукабзов А.М., Писаревский С.А., Камо С. // *ДАН*. 2019. Т. 486. № 3. С. 326–330.
11. Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Ernst R.E., Pisarevsky S.A., Mazukabzov A.M., Demonterova E.I. // *Minerals*. 2018. V. 8. № 12.
12. Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Мазукабзов А.М., Станевич А.М., Склярёв Е.В., Пономарчук В.А. // *Геология и геофизика*. 2007. Т. 48. № 1. С. 22–41.
13. Powell R. // *J. Geol. Soc. London*. 1984. V. 141. P. 447–452.
14. Lee C.-T.A., Lee T.C., Wu C.-T. // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2014. V. 143. P. 8–22.
15. Liu L., Yang X., Santosh M., Aulbach S., Zhou H., Geng J., Sun W. // *Precambrian Research*. 2015. V. 268. P. 97–114.

## **GEOCHEMICAL COMPOSITION OF DOLERITES AS AN INDICATOR OF THE DISTANCE OF THE DYKE SWARM FROM THE CENTER OF THE MANTLE PLUME (ON EXAMPLE OF PROTEROZOIC DYKE SWARMS OF THE SIBERIAN CRATON)**

**Corresponding-Member of the RAS D. P. Gladkochub<sup>a, #, ##</sup> and T. V. Donskaya<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Institute of Earth's crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: gladkochub@mail.ru*

<sup>##</sup> *E-mail: dima@crust.irk.ru*

As result of investigation of Proterozoic mafic dyke swarms of the Siberian craton, the dependence of geochemical and isotopic characteristics of dolerites of dyke swarms of Large Igneous Provinces on the remoteness of the area of their localization to the mantle plume head is discovered. It was found that near the mantle plume head, the dolerite parent melts correspond to compositions of OIB. At a significant distance from the plume, the initial melts for dolerites are generated in the subcontinental lithospheric mantle, which provides a wide range of their compositions, which differ from typical OIB and do not indicate directly on genetic relationship of these basites with the mantle plume.

*Keywords:* dolerite, dyke swarm, mantle plume, Large Igneous Province, Siberian craton