

УДК 551.24,552.3

## СРЕДНЕПАЛЕОЗОЙСКИЙ И СРЕДНЕТРИАСОВЫЙ ИМПУЛЬСЫ ТРАППОВОГО МАГМАТИЗМА НА ВОСТОКЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ: РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -ДАТИРОВОК ДОЛЕРИТОВЫХ СИЛЛОВ

© 2020 г. А. В. Прокопьев<sup>1,\*</sup>, О. П. Полянский<sup>2</sup>, О. В. Королева<sup>1</sup>, Д. А. Васильев<sup>1</sup>,  
М. Д. Томшин<sup>1</sup>, академик РАН В. В. Ревердатто<sup>2</sup>, С. А. Новикова<sup>2</sup>

Поступило 28.06.2019 г.

После доработки 01.07.2019 г.

Принято к публикации 25.07.2019 г.

Представлены результаты первых изотопных  $^{40}\text{Ar}$ – $^{39}\text{Ar}$ -датировок 11 силлов основного состава, вскрытых глубокими скважинами на востоке Сибирской платформы. Большинство датировок относятся к девонскому этапу магматизма (357–379 млн лет). В этот интервал попадают два установленных ранее импульса дайкового магматизма в Якутско-Вилуйской крупной изверженной провинции. Полученные датировки  $397.6 \pm 4.3$  и  $406.2 \pm 5.6$  млн лет позволяют предполагать отдельный импульс магматизма на рубеже эмс/эйфель. Химический состав долеритовых силлов соответствует производным гранатового перидотита. Оценка глубины очага плавления допускает его нахождение как внутри мантийной литосферы, так и на границе литосфера–астеносфера. Среднетриасовый возраст силла в Моркокинской скважине ( $232.6 \pm 7.4$  млн лет) свидетельствует о проявлении здесь второго импульса траппового магматизма, связанного с Сибирским плюмом.

*Ключевые слова:* силлы, долериты, Сибирская платформа, Якутско-Вилуйская крупная изверженная провинция

DOI: 10.31857/S2686739720010090

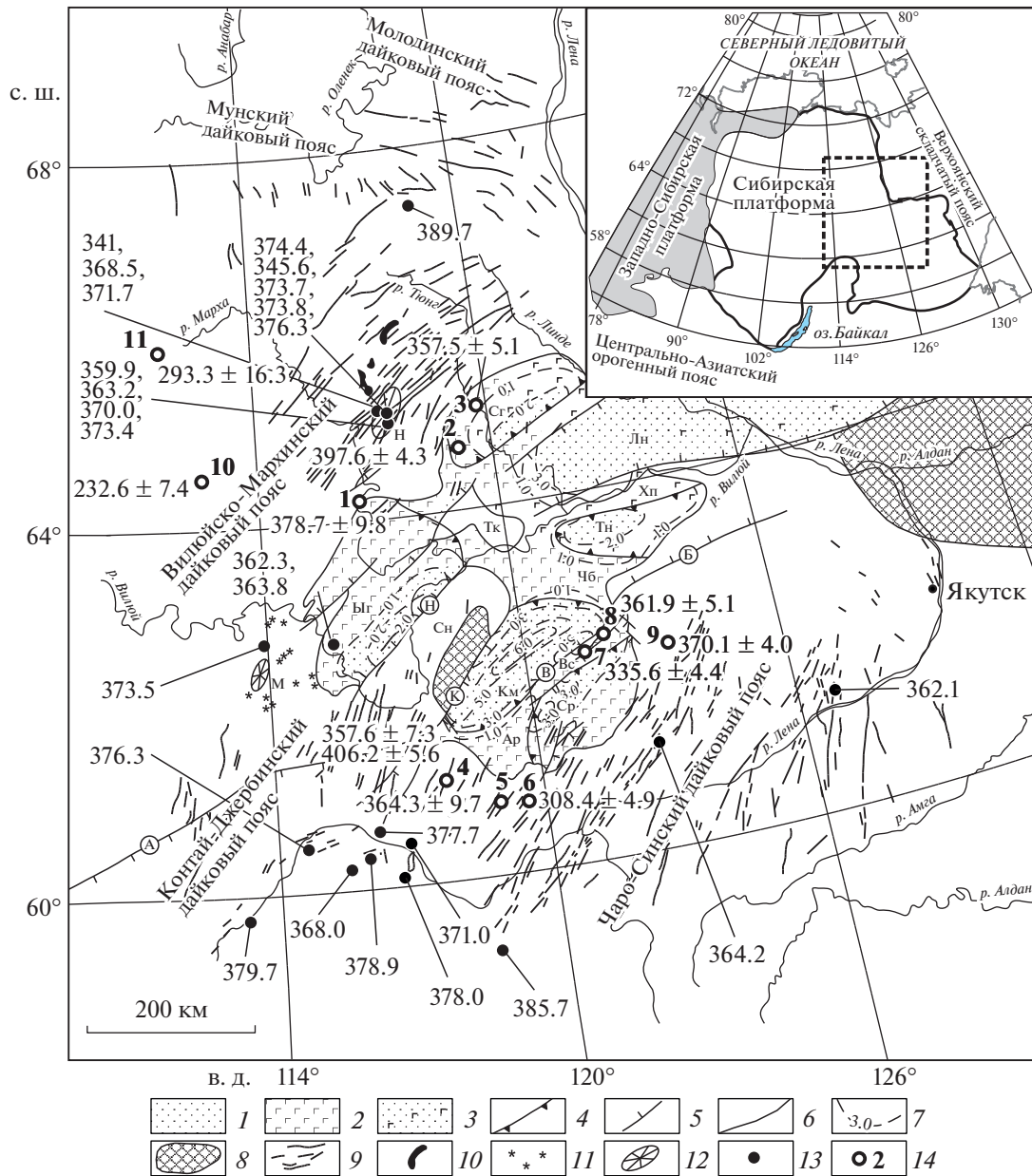
В палеозойских рифтовых бассейнах в обрамлении Сибирской платформы раскрытие за счет тектонических причин сопровождается сопутствующим внедрением даек и андерплейтингом базитов в основание коры [1]. Одним из масштабных примеров совместного проявления рифтинга и магматической активности является среднепалеозойский Вилуйский осадочный бассейн и сопряженная с ним Якутско-Вилуйская крупная изверженная провинция (ЯВП), охватывающая всю его территорию (рис. 1). Вилуйский рифт ограничен с севера-запада Вилуйско-Мархинским и с юго-востока Чаро-Синским дайковыми поясам среднепалеозойского возраста. Обзор современных представлений о происхождении среднепалеозойского Вилуйского бассейна и возрасте внедрения даек дан нами в работе [1].

Поля распространения силлов, установленные по данным средне- и крупномасштабных аэромагнитных и гравиметрических съемок и глубокого бурения, находятся в основном в центральной области бассейна (рис. 1). На основании редких определений К–Аг-методом по валовым пробам считается, что они имеют возраст излияния лав аппаинского (380–370 млн лет) и эмьяксинского горизонтов (370–360 млн лет) [3]. В данной работе представлены результаты впервые проведенного  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования силлов по керновому материалу глубоких скважин (ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск): трех скважин, пробуренных в пределах Вилуйско-Мархинского дайкового пояса, шести – Чаро-Синской зоны разломов и двух скважин, расположенных севернее Вилуйско-Мархинской зоны разломов в поле распространения пермо-триасовых траппов. Глубина отбора образцов более 1400 м. Номера образцов, координаты скважин, глубины отбора и мощность опробованных долеритовых силлов, возраст вмещающих пород и полученные по плагиоклазу  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возрасты приведены в табл. 1 и отражены на рис. 1.

<sup>1</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Якутск, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Новосибирск, Россия

\*E-mail: prokopiev@diamond.ysn.ru



**Рис. 1.** Структурная схема восточной части Сибирской платформы на среднепалеозойский структурный ярус по [1, 2]. 1 – фаменско-нижнекаменноугольный туфогенно-осадочный комплекс; 2 – франкийский эффузивный комплекс; 3 – районы предположительного развития базальтов по всему верхнедевонско-нижнекаменноугольному разрезу; 4 – границы структур, выделяемых по девонско-нижнекаменноугольным отложениям (поднятия: Ар – Арбайское, Вс – Верхнесинское, Лг – Логлорское, Сн – Сунтарское, Хп – Хапчагайское, Тк – Тюянкское, Чб – Чыбыдинское; впадины: Км – Кемпендяйская, Лн – Линденская, Сг – Сянгинская, Ср – Сарсанская, Тн – Тангнарнская, Ыг – Ыгыаттинская); 5 – разломы (А – Ангаро-Вилуийский, Б – Баппагайский, В – Верхнесинский, К – Кемпендяйский, Н – Нюрбинский); 6 – границы распространения девонско-нижнекаменноугольных пород; 7 – мощность (км) верхнедевонско-нижнекаменноугольных отложений; 8 – выходы кристаллического фундамента; 9 – среднепалеозойские дайки долеритов; 10 – девонские хонолиты габбро-долеритов; 11 – девонские базальтовые трубки взрыва; 12 – Малоботубинское (М) и Накынское (Н) кимберлитовые поля; 13 – имеющиеся  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ - и U-Pb-определения возраста (млн лет) среднепалеозойских даек, силлов и базальтов по [1]; 14 – скважины, в которых были изучены силлы базальтов и их  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст (млн лет). Название скважин и их номера соответствуют порядковым номерам в табл. 1.

Исследованные породы представлены долеритами толеитового состава нормальной до умеренной щелочности (мас. %):  $\text{SiO}_2 = 47.7\text{--}49.5$ ;  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2.85\text{--}5.05$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 0.47\text{--}2.18$ ;  $\text{TiO}_2 = 1.5\text{--}$

3.63. По соотношению HFSE (Zr, Ti, Nb, Y) породы соответствуют внутриплитным разностям и четко разделяются на два кластера в соответствии с геологическим и изотопным возрастами.

**Таблица 1.**  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возрасты долеритовых силлов востока Сибирской платформы, вскрытых глубокими скважинами

П/п	Номер образца	Координаты	Название скважины	Глубина отбора (м), мощность тела (м)	Возраст вмещающих пород	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст плато, млн лет
Вилуйско-Мархинский дайковый пояс						
1	12ДВ16	64°12'00" N 116°28'59" E	Средне-Мархинская 2250	1969–1979, 10	Ранний-средний кембрий	378.7 ± 9.8
2	12ДВ11	62°44' N 119°30' E	Тюкян-Тюнгская 1-П	1490–1500, 44	Девон	397.6 ± 4.3
3	12ДВ5	64°53'05" N 119°58'34" E	Хоргочумская 280	2657–2667, 22	Поздний девон	357.5 ± 5.1
Чаро-Синский дайковый пояс						
4	12ДВ14	61°08'22" N 117°45'25" E	Эргеджейская 236-0	2844–2848, 54	Ранний кембрий	357.6 ± 7.3 406.2 ± 5.6
5	12ДВ12	60°53'41" N 118°51'11" E	Ыстанахская 2180	1592–1605, 16	Ранний кембрий	364.3 ± 9.7
6	К-432	60°28'30" N 119°45'55" E	Кэдэргинская 432	3876–3878, 106	Поздний рифей	308.4 ± 4.9
7	В-492	62°54'03" N 121°47'42" E	Восточная 492	2430, 115	Ранний кембрий	335.6 ± 4.4
8	12ДВ8	62°13'26" N 122°10'12" E	Верхне-Синская 1	1489–1494, 77	Поздний девон	361.9 ± 5.1
9	216-0	62°20'59" N 123°41'07" E	Северо-Синская 2160	1400–1407, 35	Ранний кембрий	370.1 ± 4.0
Поле развития пермо-триасовых траппов						
10	12ДВ13	64°29'09" N 112°29'10" E	Моркокинская 707	2917–2919, 159	Венд-ранний кембрий	232.6 ± 7.4
11	12ДВ15	61°10'00" N 111°28'01" E	Сохсолохская	2182–2189, 84	Ранний-средний кембрий	293.3 ± 16.3??

На классификационных диаграммах долериты девонского возраста (образцы 12ДВ5, 8, 11, 12, 14, 16) соответствуют щелочным базальтам, а образцов 12ДВ13 (триас) и 12ДВ15 – андезитам/базальтам (рис. 2а). При этом породы девонских силлов идентичны породам девонских даек Вилуйского палеорифта ( $\text{Nb}/\text{Y} = 0.59\text{--}0.95$  и  $0.49\text{--}1.12$  [1], соответственно), а пермо-триасовые долериты по значению отношения  $\text{Nb}/\text{Y} = 0.15\text{--}0.18$  совпадают с траппами верховьев р. Моркока ( $\text{Nb}/\text{Y} = 0.16\text{--}0.19$  [5]). Эти различия отражены в распределении редких и REE-элементов (рис. 2б, в). Спектры распределения редких и REE для пород девонских силлов единообразны и близки к тренду базальтов океанических островов (OIB):  $(\text{La}/\text{Yb})_n = 6.85\text{--}9.94$ ;  $(\text{La}/\text{Sm})_n = 1.94\text{--}2.74$ ;  $(\text{Tb}/\text{Yb})_n = 1.53\text{--}1.91$ ;  $\text{Nb}/\text{U} = 30.11\text{--}46.42$ , и характеризуются положительной Ta–Nb-аномалией ( $\text{Nb}/\text{La} = 0.95\text{--}1.19$ ). Аналогичные характеристики отмечаются для среднепалеозойских базитов Вилуйского палеорифта всеми исследователями (например, [1, 3, 5] и ссылки там).

Спектр распределения микроэлементов для пород 12ДВ13 и 15 ближе к тренду E-MORB:  $(\text{La}/\text{Yb})_n = 2.74\text{--}2.78$ ;  $(\text{La}/\text{Sm})_n = 1.37\text{--}1.45$ ;  $(\text{Tb}/\text{Yb})_n = 1.29\text{--}1.33$ , и демонстрирует отчетливо выраженную отрицательную Ta–Nb-аномалию ( $\text{Nb}/\text{La} = 0.61\text{--}0.63$  и  $\text{Nb}/\text{U} = 9.34\text{--}13.46$ ) (рис. 2в), что является отличительным признаком пермо-триасовых траппов [7].

По соотношению  $\text{Sm}/\text{Yb}\text{--}\text{La}/\text{Yb}$  породы соответствуют производным плавления гранатовых перидотитов (рис. 2г); при этом девонские толеиты имеют более низкую степень плавления (15–20%), чем пермо-триасовые (~25%) и являются, вероятно, производными разных источников.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Впервые определен возраст внедрения силлов в осадочный чехол Вилуйского рифта. Большинство датировок относятся к девонскому этапу магматизма (357–379 млн лет). В этот интервал попадают и два импульса дайкового магматизма в ЯВП – 374 млн лет (фран/фамен) и 363 млн лет

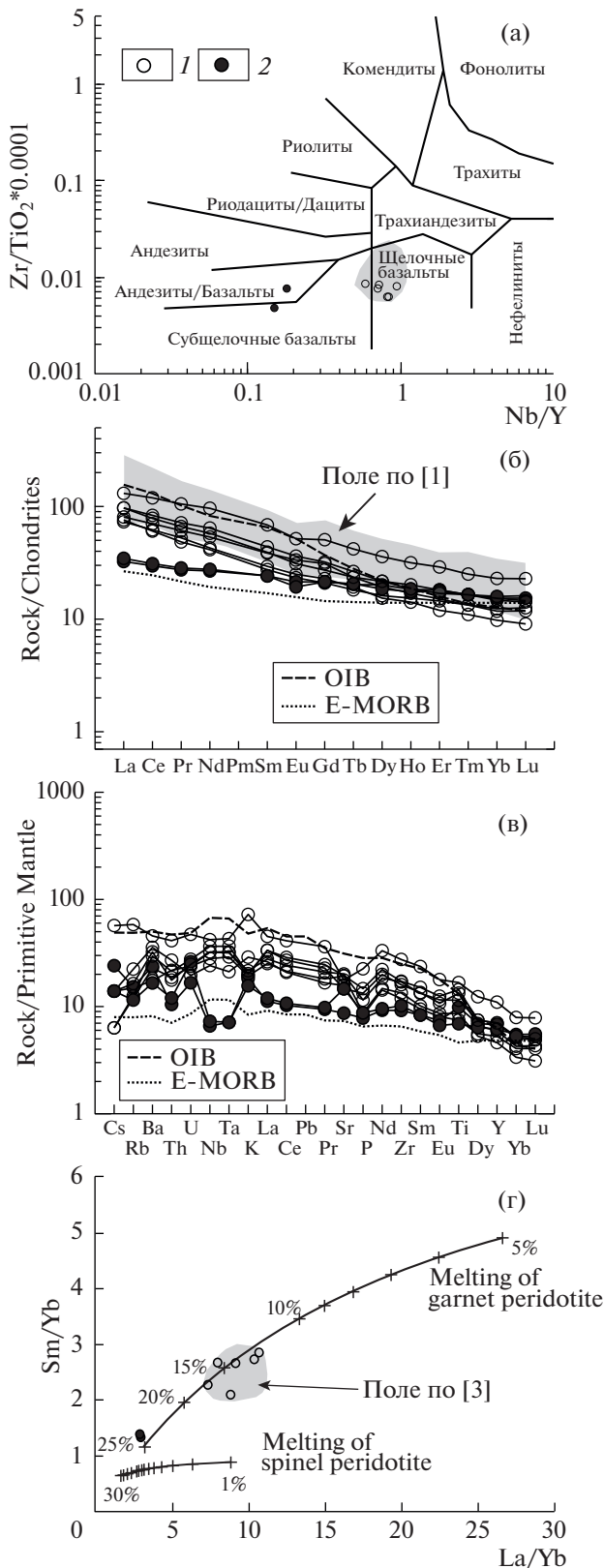


Рис. 2. Геохимические диаграммы для изученных долеритов. (а)  $Zr/TiO_2-Nb/Y$  [4]; (б) распределение редкоземельных элементов; (в) спайдерграммы изученных пород, нормализовано [6]: (б) по хондриту, (в) по примитивной мантии; (г)  $Sm/Yb-La/Yb$ . Образцы: 1–12ДВ5, -8, -11, -12, -14, -16; 2–12ДВ-13 и -15.

(поздний девон), установленных ранее по данным [1], или 380–370 и 365–360 млн лет по данным [3]. Полученные датировки  $397.6 \pm 4.3$  и  $406.2 \pm 5.6$  млн лет позволяют предполагать еще один магматическом импульсе на рубеже эмс/эйфель.

2. Соотношение породообразующих и редких элементов в долеритах силлов может свидетельствовать о единстве с долеритовыми дайками мантийном источнике магмы, производной от плавления гранатового перидотита. Глубина очага плавления составляла не менее 75–80 км при средней степени плавления в источнике около 15%. Оценка глубины допускает нахождение области плавления как внутри мантийной литосферы (ее мощность составляет 200–250 км вне ЯВП по данным [8] и 180 км в зоне рифта [9]), так и на границе литосфера–астеносфера. Известно, что состав кварцевых толеитов соответствует уровню их сегрегации от перидотитовой магмы при давлении не выше 10–15 кбар (35–50 км) [10]. Следовательно, генерация толеитовых базальтов могла происходить в промежуточной камере, куда перидотитовая магма поднималась из глубинного (плюмового) очага плавления. Такая камера могла сформироваться на контрастной плотностной границе кора/мантия и представлять собой базитовую линзу, подслаивая утоненную кору под рифтовой зоной. Наличие подобных линз под основанием коры отмечалось во многих структурах растяжения континентальной литосферы [11].

3. Среднетриасовый возраст силла в Моркокинской скважине ( $232.6 \pm 7.4$  млн лет) свидетельствует о проявлении на востоке Сибирской платформы второго импульса траппового магматизма, связанного с Сибирским плюмом, ранее установленного на северо-западе в Норильском районе и юго-западе в Ангара-Тасеевской синклинали Сибирской платформы [12]. Полученная раннепермская датировка ( $293.3 \pm 16.3$  млн лет) долерита из Сохолохской скважины требует проведения дополнительных исследований.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН и ИГАБМ СО РАН при частичной финансовой поддержке РФФИ (17–05–00848) и Президиума СО РАН (проект № 28).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polyansky O.P., Prokopiev A.V., Koroleva O.V., et al. // Lithos. 2017. V. 282/283. P. 45–64.
2. Гайдук В.В. Вилюйская среднепалеозойская рифтовая система. 1988. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 128 с.
3. Масайтус В.Л. // Региональная геология и металлогения. 2006. № 29. С. 27–49.

4. Winchester J.A., Floyd P.A. // Chem. Geol. 1977. V. 20. P. 325–343.
5. Копылова А.Г., Томшин М.Д. // Отечественная геология. 2011. № 5. С. 80–88.
6. Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. London Spec. Publ. 1989. V. 42. P. 313–345.
7. Томшин М.Д., Копылова А.Г. // Наука и образование. 2015. № 4. С. 23–28.
8. Тычков Н.С., Юдин Д.С., Николенко Е.И. и др. // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 10. С. 1564–1585.
9. Griffin W.L., Ryan C.G., Kaminsky F.V., et al. // Tectonophysics. 1999. V. 310. P. 1–35.
10. Kushiro I. // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2001. V. 29. P. 71–107.
11. Thybo H., Artemieva I.M. // Tectonophysics. 2013. V. 609. P. 605–619.
12. Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., et al. // Earth-Science Reviews. 2013. V. 122. P. 58–76.

## THE MID-PALEOZOIC AND MID-TRIASSIC PULSES OF TRAP MAGMATISM IN THE EAST OF THE SIBERIAN PLATFORM: EVIDENCE FROM THE FIRST $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ISOTOPE DATING OF DOLERITE SILLS

A. V. Prokopyev<sup>a,#</sup>, O. P. Polyansky<sup>b</sup>, O. V. Koroleva<sup>a</sup>, D. A. Vasiliev<sup>a</sup>, M. D. Tomshin<sup>a</sup>,  
Academician of the RAS V. V. Reverdatto<sup>b</sup>, and S. A. Novikova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: prokopyev@diamond.ysn.ru*

The paper presents the results from the first  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  isotope dating of eleven mafic sills recovered by deep boreholes in the eastern Siberian Platform. Most of the dates are assigned to the Devonian magmatic stage (357–379 Ma). The two previously established pulses of dike magmatism in the Yakutsk-Vilyui large igneous province also fall within this range. The ages of  $397.6 \pm 4.3$  and  $406.2 \pm 5.6$  Ma obtained in this study imply one more pulse of magmatism at the Emsian–Eifelian boundary. The chemical compositions of dolerites correspond to that of the derivatives of garnet peridotite. Estimates of the depth of the melting chamber suggest its location both inside the mantle lithosphere and at the lithosphere-asthenosphere boundary. The Mid-Triassic age ( $232.6 \pm 7.4$  Ma) of a sill recovered by the Morkoka borehole implies the manifestation here of the second pulse of trap magmatism related to the Siberian plume.

*Keywords:* sills, dolerites, Siberian platform, Yakutsk-Vilyui large igneous province