

УДК 551.243; 552.2; 550.4; 550.93

## ДАЙКОВЫЙ МАГМАТИЗМ В ЭВОЛЮЦИИ ТРАНСФОРМНОЙ АКТИВНОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА В ЭДИАКАРИИ

А. Е. Верниковская<sup>1,2,\*</sup>, академик РАН В. А. Верниковский<sup>1,2,\*</sup>,  
Н. Ю. Матушкин<sup>1,2</sup>, П. И. Кадильников<sup>1,2</sup>, Д. В. Метелкин<sup>1,2</sup>, Ч. С. Ли<sup>3</sup>,  
С. А. Уайлд<sup>3</sup>, И. В. Романова<sup>1,2</sup>, Е. А. Богданов<sup>1,2</sup>

Поступило 21.02.2019 г.

Впервые для орогена Енисейского кряжа выделен комплекс дайковых пород эдиакарского возраста. Эти породы, представленные основными, средними и кислыми разностями, формировались в обстановке трансформной активной континентальной окраины, на этапах её развития до и во время остановки субдукции и разрыва слэба: от внедрения даек пикродолерит—долерит-кварцевый диорит—лейкогранитной ассоциации, 626–623 млн лет назад, согласно новым изотопным U–Th–Pb-данным по цирконам (метод SHRIMP-II), до адакит-габбро-анортозитового магматизма в конце эдиакария.

*Ключевые слова:* дайковый магматизм, долериты, пикродолериты, кварцевые диориты, лейкограниты, изотопные U–Th–Pb-данные, эдиакарий, активная и трансформная континентальная окраины, Сибирский кратон, Енисейский кряж.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524893267-271>

Дайковый магматизм установлен в различных динамических обстановках, отражающих условия растяжения. Дайки присутствуют в офиолитовых комплексах, постколлизионных обстановках, активных континентальных окраинах или формируют “дайковые рои”, связанные с проявлениями горячих точек и плюмов. Для юго-западной части Сибирского кратона и его складчатого обрамления происхождение даек неопротерозойского возраста рассматривалось с разных позиций: в связи с распадом суперконтинента Родиния или эволюцией активной континентальной окраины [1–5].

Предыдущими работами авторов этого сообщения показана эволюция юго-западной (в современных координатах) активной окраины Сибирского кратона в позднем криогении (710–630 млн лет). Было установлено, что в этот период происходили синхронно аккреция островных дуг в Приенисейской зоне и образование магматических пород субщелочного и щелочного состава татарского комплекса в субпараллельной ей Татарско-Ишимбинской зоне [2, 6–9]. Авторы также показали, что на позднеэдиакарском этапе (576–546 млн лет) эта

активная континентальная окраина развивалась в условиях трансформного режима [5, 10], тогда как раннеэдиакарский этап её эволюции оставался до настоящего времени неизученным.

В сообщении представлены результаты геолого-структурных, петрографических, геохимических и геохронологических U–Pb-исследований раннеэдиакарских даек, развитых в зоне сочленения Приенисейской и Татарско-Ишимбинской сутур в Южно-Енисейском кряже (рис. 1). Исследовались дайки основных, средних и кислых пород в береговых обнажениях р. Енисей: долеритов, оливиновых долеритов и пикродолеритов мыса Савинский Бык (правый берег р. Енисей, 12–20 км выше устья р. Ангара), кварцевых диоритов (левый берег р. Енисей, в 2 км выше по течению от устья р. Абейка) и лейкогранитов (левый берег р. Енисей, в 2,5 км выше по течению от устья р. Ярлычиха).

Изучение минералогического состава пород проводилось с использованием электронного сканирующего микроскопа Tescan MIRA 3 LMU (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Определение содержаний главных и трейс-элементов в исследуемых дайках выполнено с помощью масс-спектрометров — квадрупольного Agilent7500ce (Япония) и высокого разрешения Element2 (США) в лабораториях ИГХ СО РАН (Иркутск). Изотопные U–Th–Pb-анализы цирконов, выделенных по стандартной методике с использованием тяжёлых жидкостей и магнитной

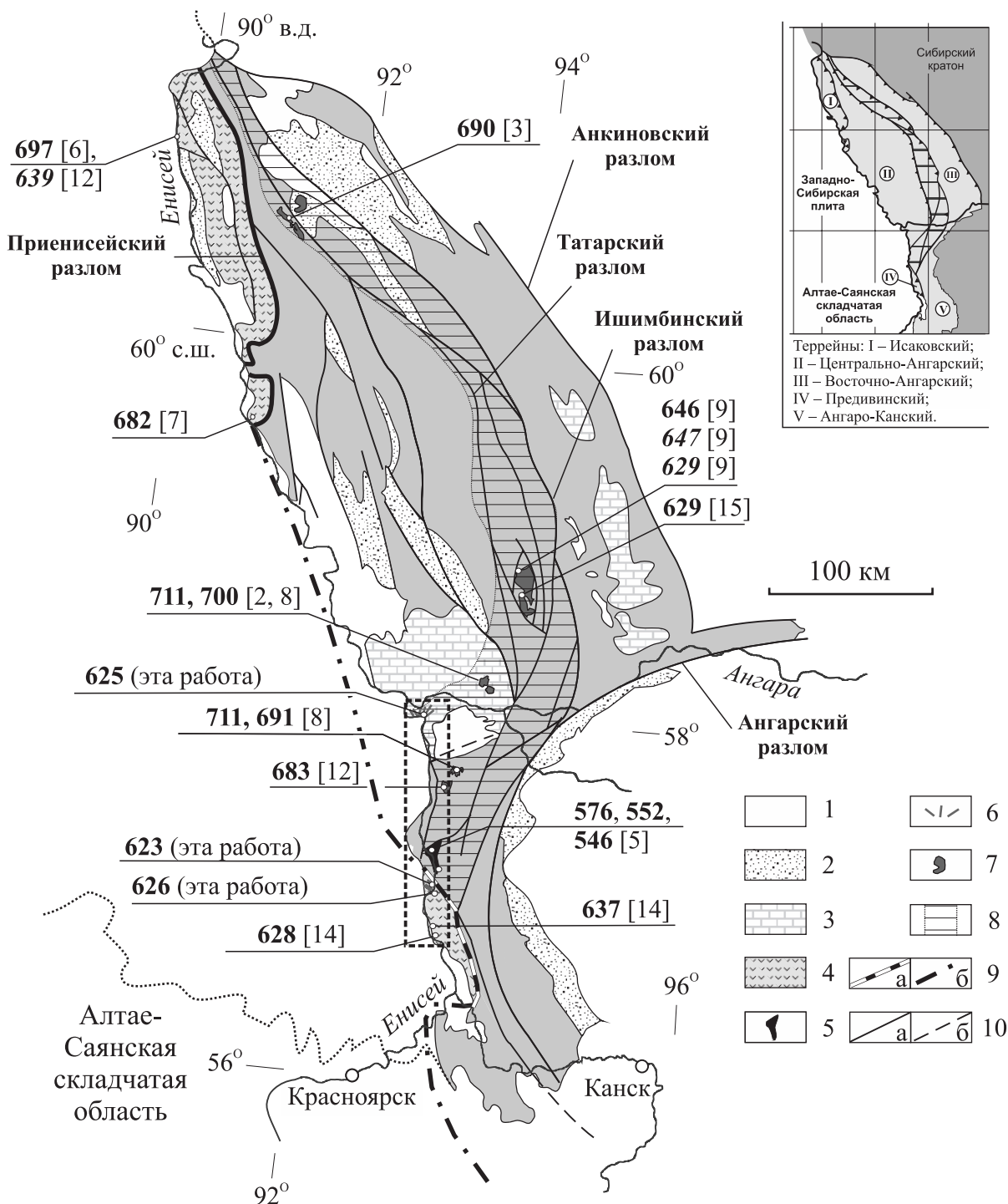
<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения

Российской Академии наук, Новосибирск

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет

<sup>3</sup> Curtin University, Perth, Western Australia, Australia

\*E-mail: VernikovskayaVA@ipgg.sbras.ru



**Рис. 1.** Схема тектонического строения Енисейского кряжа и неопротерозойские магматические породы, составленная с использованием [13, 14]. 1 — чехол, MZ–KZ; 2 — моласса, NP<sub>3</sub>; 3 — преимущественно карбонатные отложения, NP<sub>2-3</sub>; 4 — плагиограниты, вулканиты дифференцированной серии приенисейского островодужного комплекса, 697–628 млн лет; 5–7 — породы комплекса активной континентальной окраины: 5 — адакиты, габбро-анортозиты Зимовейнинского массива, 576–546 млн лет, 6 — дайки пикродолеритов, оливиновых долеритов, долеритов, кварцевых диоритов, лейкогранитов, 626–623 млн лет, 7 — нефелиновые и щелочные сиениты, ийолиты, карбонатиты, трахибазальты, сиениты, граниты А-типа татарского комплекса, 711–629 млн лет; 8 — Татарско-Ишимбинская сутура; 9 — Приенисейская сутура: достоверная (а), предполагаемая (б); 10 — террейны; 11 — границы террейнов; 12 — прочие разломы: достоверные (а), предполагаемые (б). Цифры — возраст пород в млн лет: прямым шрифтом — U–Pb-метод, курсивом — <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-метод. Рамкой показан район исследований.

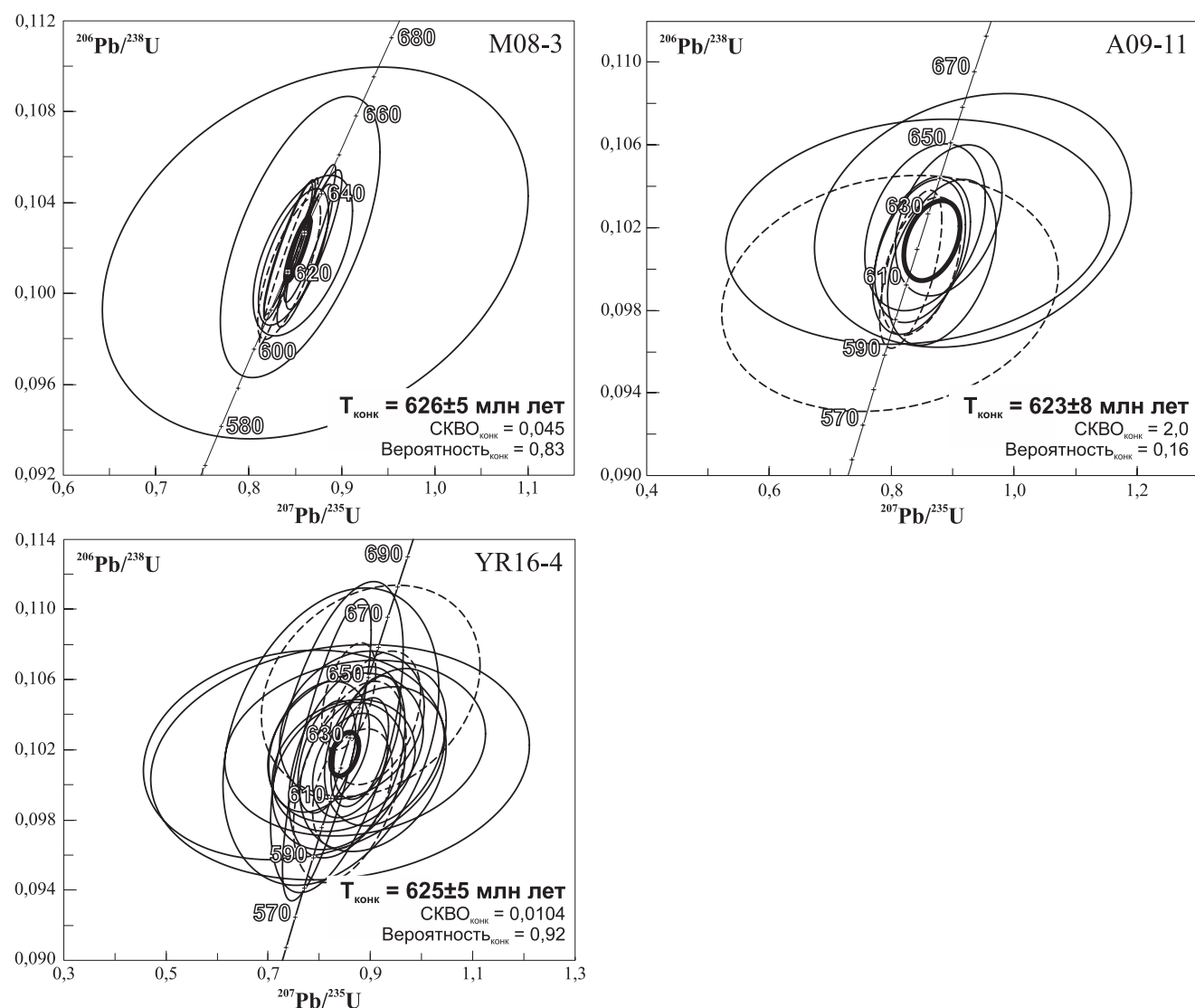
сепарации, были выполнены на приборе SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург, аналитик А.Н. Ларионов), следуя методикам, описанным в [11]. Морфология зёрен циркона оценивалась с использованием оптической микроскопии, внутренняя структура наблюдалась с помощью катодолюминесцентного (CL) детектора на SEM CamScan. Дайки долеритов мыса Савинский Бык образуют группу из 20 тел мощностью от первых десятков см до 2–3 м. Вмещающие породы представлены деформированными, преимущественно карбонатными отложениями горевской свиты (NP<sub>1–2</sub>), которые прорваны лейкогранитами Стрелковского массива (718 млн лет) [14]. Известняки смяты в линейные складки продольного изгиба, имеющие крутое падение осевых поверхностей ( $\angle 80^\circ$ ), в направлении запад—северо-запад (азимут  $285^\circ$ – $308^\circ$ ) и запад—юго-запад (азимут  $247^\circ$ – $260^\circ$ ). Исследуемые дайковые тела приурочены к осевым поверхностям этих складок. В западной части разреза в дайках и вмещающих их известняках выявлены наложенные хрупкие деформации — малоамплитудные (<1 м) взбросы и пологие надвиги с амплитудой смещения до 5 м, поверхности сместителей которых погружаются в западном и северо-восточном направлениях. Породы сложены преимущественно лабрадором (до 45 об.%), оливином (до 30 об.%), клинопироксеном (до 20 об.%) и биотитом (0–5 об.%). Вторичные минералы — тальк, кальцит, хлорит, а акцессорные — магнетит, апатит, монацит, ильменит, хромит и циркон. Исследуемые долериты, оливиновые долериты и пикродолериты (содержание SiO<sub>2</sub> меняется от 42,87 до 49,09 мас.%) относятся преимущественно к породам толеитовой серии. Они имеют промежуточный между OIB и E-MORB характер распределений трэйс-элементов. В одном образце пикродолерита значения отношений (La/Yb)<sub>n</sub> поднимаются до 9,53, демонстрируя наибольшее сходство с таковыми для OIB.

В цирконах из пикродолерита (проба № YR16-4) преобладают дипирамидально-короткопризматические идиоморфные и субидиоморфные, прозрачные с бледной окраской зёрна. Отдельные из них имеют округлую форму, что указывает на их ксеногенную природу. Включения (минеральные и расплавные) немногочисленны, на оптических фото в проходящем свете изредка видна концентрическая зональность роста. U–Pb SIMS-анализ 25 зёрен выявил вариацию <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U, соответствующую диапазону 613–646 млн лет. Конкордатный возраст составляет  $625 \pm 5$  млн лет ( $N = 20$ , СКВО = 0,01) (рис. 2). Эта оценка, вероятнее всего, отвечает времени кристаллизации исследуемого пикродолерита.

Дайки лейкогранитов (6 тел, мощность от 1 до 4 м) прорывают габброиды Ярлычихинского массива. Дайки имеют восточное (азимут  $40^\circ$ – $75^\circ$ ) и юго-западное (азимут  $215^\circ$ – $243^\circ$ ) падение ( $<47^\circ$ – $62^\circ$ ). Лейкограниты — среднезернистые породы, состоящие преимущественно из кварца, плагиоклаза, калиевого полевого шпата и биотита (до 5 об.%). Вторичные минералы — мусковит и эпидот. Акцессорные и рудные минералы — циркон, апатит, рутил, ильменит.

В лейкограните (проба № M08-3) преобладают субидиоморфные и идиоморфные дипирамидально-призматические зёрна циркона, бледно-окрашенные, прозрачные до просвечивающих. Из полученных четырнадцати результатов три показали более древние датировки (825, 752, 738 млн лет), интерпретируемые как возраст древних ядер цирконов, что подтверждается CL-изображениями (рис. 2). Исключая два результата с наиболее высокими концентрациями U и пониженными <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U, указывающими на потери Pb, конкордатный возраст по девяти результатам составляет  $626 \pm 5$  млн лет (СКВО = 0,045). Этот результат определяет время магматической кристаллизации лейкогранита.

Дайка кварцевых диоритов имеет мощность около 1,5 м, не деформирована, залегает согласно с вмещающими их рассланцованными терригенными породами существенно кварц-биотит-мусковитового состава, изменёнными в условиях эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма. Вмещающие породы образуют изоклинальные, опрокинутые с наклонными осевыми поверхностями, погружающиеся в 3–С–3 направлении (азимут  $275^\circ$ – $283^\circ$ ,  $<10^\circ$ – $80^\circ$ ) складки, осложнённые мелкими субгоризонтальными складками, осевые поверхности которых погружаются в ЮВ-направлении (азимут  $124^\circ$ – $147^\circ$ ,  $<73^\circ$ – $85^\circ$ ), а шарниры — в южном направлении (азимут  $173^\circ$ – $185^\circ$ ,  $<65^\circ$ – $37^\circ$ ). Кварцевые диориты — крупнозернистые породы, состоящие преимущественно из плагиоклаза и амфибола (до 30 об.%) и кварца (не более 15 об.%). Акцессорные минералы — циркон, апатит, сфен, магнетит, ильменит. Геохимические особенности отражены в сходном с основными породами наклоне распределений трэйс-элементов в средних и кислых породах, что позволяет рассматривать исследуемые дайки в составе одной ассоциации. Отличия выражены в более дифференцированном характере распределений для средних и кислых разностей магматических пород — наличии отрицательных аномалий Ti, P, La и Ce у первых и положительных аномалий K, Zr и Hf у вторых.



**Рис. 2.** Диаграммы с конкордией для зёрен цирконов из даек лейкогранитов (проба М08-3), кварцевых диоритов (проба А09-11) и пикродолеритов (проба YR16-4). Размер эллипсов погрешностей  $2\sigma$ . Пунктирные овалы — не использованные в расчётах.

Цирконы из кварцевого диорита (проба № А09-11) представлены субидiomорфными и идиоморфными дипирамидально-призматическими, иногда с гранями дитетрагональной дипирамиды зёрнами. Внутренняя структура, наблюдаемая на КЛ-изображениях, представляет сочетание тёмной центральной части, концентрическая зональность роста в которой часто не видна при применённых параметрах съёмки. Контуры центральных частей, как правило, округлены, видимо, из-за частичной резорбции. Центральные части окружены КЛ-светлой каймой с осцилляторной концентрической и секториальной зональностью роста. Структура и морфология цирконов указывают на их магматический генезис. Полученные  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -результаты имеют разброс, возможно вследствие потерь Pb. Конкор-

дантный возраст составляет  $623 \pm 8$  млн лет ( $N = 7$ , СКВО = 2). Эта оценка отвечает времени кристаллизации породы.

Таким образом, изученные дайки согласно новым U–Pb-исследованиям цирконов формировались в узком временном интервале от 626 до 623 млн лет назад в зоне сочленения Приенисейской и Татарско-Ишимбинской сутур Южно-Енисейского кряжа. Они имеют химические и минералогические составы, отвечающие промежуточным характеристикам магматических источников, между OIB и E-MORB. Исследуемые дайки преимущественно не деформированы, но прорывают в значительной степени деформированные, слабо метаморфизованные осадочные породы (метапесчаники и мраморизованные известняки) и магматические породы

(габброиды). Наличие деформаций в последних объясняется предшествующими тектоническими процессами — коллизией Центрально-Ангарского террейна с Сибирским кратоном и аккрецией к нему островодужных блоков [14]. Таким образом, формирование дайковых пород (пикродолериты, оливиновые долериты, долериты, кварцевые диориты, лейкограниты и адакиты) происходило на протяжении всего эдиакария в условиях трансформной окраины Сибири, заложение которой обусловлено косою субдукцией в позднем криогении [14].

**Источники финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18–05–00854, 18–05–00234, 18–35–00556), Министерства науки и высшего образования РФ (проекты 5.4786.2017/6.7 и 5.2324.2017/4.6).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gladkochub D.P., Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., et al. // Precamb. Res. 2006. V. 147. P. 260–278.
2. Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б. и др. // ДАН. 2008. Т. 419. № 1. С. 90–94.
3. Ножкин А.Д., Туркина О.М., Баянова Т.Б. и др. // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 7. С. 666–688.
4. Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Верниковская А.Е. и др. // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 1. С. 63–90.
5. Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю. и др. // ДАН. 2017. Т. 477. № 4. С. 448–454.
6. Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Черных А.И. и др. // ДАН. 2001. Т. 381. № 6. С. 806–810.
7. Кузьмичев А.Б., Падерин И.П., Антонов А.В. // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 12. С. 1175–1188.
8. Романова И.В., Верниковская А.Е., Верниковский В.А. и др. // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. С. 1530–1555.
9. Верниковская А.Е., Даценко В.М., Верниковский В.А. и др. // ДАН. 2013. Т. 448. № 5. С. 552–562.
10. Кадильников П.И., Верниковская А.Е., Михальцов Н.Э. и др. // ДАН. 2018. Т. 483. № 2. С. 175–179.
11. Larionov A.N., Andreichev V.A., Gee D.G. // Geol. Soc. London. Memoirs. 2004. V. 30. P. 69–74.
12. Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б. и др. // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 1. С. 5–21.
13. Качевский Л.К., Качевская Г.И., Грабовская Ж.М. Геологическая карта Енисейского кряжа масштаба 1:500 000 / Под ред. Мкртычяна А.К., Шермана М.Л. Красноярск: Красноярскгеолсъемка. 1998. 6 л.
14. Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Kotov A.B., et al. // Tectonophysics. 2003. V. 375. P. 147–168.
15. Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б. и др. // ДАН. 2018. Т. 403. № 5. С. 656–660.

## DYKE MAGMATISM IN THE EVOLUTION OF THE TRANSFORM ACTIVE CONTINENTAL MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON IN THE EDIACARAN

A. E. Vernikovskaya<sup>1,2</sup>, Academician of the RAS V. A. Vernikovskiy<sup>1,2</sup>,  
N. Yu. Matushkin<sup>1,2</sup>, P. I. Kadilnikov<sup>1,2</sup>, D. V. Metelkin<sup>1,2</sup>, Z. X. Li<sup>3</sup>,  
S. A. Wilde<sup>3</sup>, I. V. Romanova<sup>1,2</sup>, E. A. Bogdanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Curtin University, Perth, Western Australia, Australia

Received February 21, 2019

An Ediacaran complex of dyke rocks has been identified for the first time in the Yenisei Ridge orogen. These igneous rocks are represented by basic, intermediate and acid variants and formed in the conditions of the transform active continental margin at the stages of its development before and during the interruption of subduction and slab breakoff: from dykes of the picrodolerite — dolerite-quartz diorite — leucogranite association with age in the range of 626–623 Ma (U–Th–U isotope data for zircons, SHRIMP-II method, this work) up to adakite — gabbro-anorthosite magmatism at the end of the Ediacaran.

**Keywords:** dyke magmatism, dolerites, picrodolerites, quartz diorites, leucogranites, U–Th–Pb isotope data, Ediacaran, active and transform continental margins, Siberian Craton, Yenisei Ridge.