

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОТНОШЕНИЯ СРЕДНЕПАЛЕОЗОЙСКИХ
БАЗИТОВ И АЛМАЗОНОСНЫХ КИМБЕРЛИТОВ НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ПЛЕЧЕ
ВИЛЮЙСКОГО РИФТА (Сибирский кратон)**

А.И. Киселев, В.В. Ярмолюк*, А.В. Иванов, К.Н. Егоров

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

** Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
190017, Москва, Старомонетный пер., 35, Россия*

Среднепалеозойское тектонотермальное событие на востоке Сибирского кратона наиболее полно реализовалось в области Вилюйского рифта в виде системы рифтовых впадин с их осадочно-вулканогенным наполнением ($D_{2-3}-C_1$) и протяженных дайковых поясов базитов на плечах рифта. Преобладающая часть базальтов сосредоточена в верхнедевонских отложениях. Их объем резко сокращается в нижнекарбоневых отложениях. В пределах Вилюйско-Мархинского дайкового роя (ВМР), обрамляющего рифт с северо-запада, наряду с дайками долеритов присутствуют Мирнинское и Накынское поля алмазоносных кимберлитов. Массовые внедрения базитов в форме даек и силлов предшествовали становлению кимберлитовых тел. В Мирнинском поле кимберлиты тр. Мир прорывают силл и дайку долеритов, а в Накынском поле, наоборот, кимберлиты тр. Нюрбинская интродуцированы сложной дайкой долеритов — монзонит-порфиров. Таким образом, в данном случае кимберлиты оказываются внутри более длительного временного периода среднепалеозойского базальтового магматизма. В отличие от базальтов, находящихся в фаунистически охарактеризованных среднепалеозойских отложениях, абсолютный возраст долеритов ВМР остается неопределенным. В статье рассматриваются вероятные причины пространственно-временных отношений базитов и кимберлитов с позиций девонского плюм-литосферного взаимодействия, вариации их возраста, а также приводятся оригинальные данные $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ определения возраста долерит-монзонит-порфировой дайки, прорывающей кимберлиты тр. Нюрбинская.

Кимберлиты, базиты, дайковый рой, девонский плюм, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Сибирский кратон, Вилюйский рифт.

**MIDDLE PALEOZOIC BASALTIC AND KIMBERLITIC MAGMATISM IN THE NORTHWESTERN
SHOULDER OF THE VILYUI RIFT, SIBERIA: RELATIONS IN SPACE AND TIME**

A.I. Kiselev, V.V. Yarmolyuk, A.V. Ivanov, and K.N. Egorov

A Middle Paleozoic tectonothermal event in the eastern Siberian craton was especially active in the area of the Vilyui rift, where it produced a system of rift basins filled with Devonian–Early Carboniferous volcanics and sediments, as well as long swarms of mafic dikes on the rift shoulders. Basalts occur mostly among Middle Devonian sediments and are much less spread in Early Carboniferous formations. The dolerite dikes of the Vilyui–Markha swarm in the northwestern rift border coexist with the Mirnyi and Nakyn fields of diamond-bearing kimberlites. The voluminous dikes and sills intruded before the emplacement of kimberlites. The Mir kimberlite crosscuts a dolerite sill and a dike in the Mirnyi field, while a complex dolerite dike (monzonite porphyry) cuts through the Nyurba kimberlite in the Nakyn field. Thus, the kimberlites correspond to a longer span of Middle Paleozoic basaltic magmatism. The basalts in Middle Paleozoic sediments have faunal age constraints, but the age of dolerite dikes remains uncertain. The monzonite porphyry dike in the Nyurba kimberlite has been dated by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method, and the obtained age must be the upper bound of the dike emplacement. The space and time relations between basaltic and kimberlitic magmatism were controlled by Devonian plume–lithosphere interaction.

Kimberlite basalt, dike swarm, Devonian plume, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages, Siberian craton, Vilyui rift

ВВЕДЕНИЕ

Протяженные дайковые рои, крупные ареалы покровных базальтов и кластеры кимберлитовых тел в пределах древних кратонов находятся под пристальным вниманием многих исследователей. Это связано с тем, что подобные проявления магматизма фиксируют разную степень растяжения литосферы вплоть до ее расколов. Они являются важными элементами палеогеодинамических реконструкций, металлогенических и прогностических построений, а также в познании геодинамики мантии в геологическом прошлом.

Сибирский кратон, как и большинство других кратонов, за время своего существования был подвержен неоднократным перестройкам. Стабилизация его литосферы произошла в палеопротерозое около 1.9 млрд л.н. [Розен и др., 2006]. В последующей истории кратон неоднократно вовлекался в различные континентальные агломерации (например, при формировании Родинии), а также отторгался от них в ходе деструкции суперконтинентов. Соответствующие события зафиксированы роями даек различного возраста. Среди них наиболее известными являются позднерифейские рои базитовых даек, возникшие при распаде Родинии и отразившие, по крайней мере, позднерифейский возраст южной границы кратона [Gladkochub et al., 2010]. Значительные по размерам рои и скопления долеритовых даек были сформированы в среднем палеозое. Одна из наиболее эффективных систем девонских дайковых роев расположена на востоке кратона. Их появление было сопряжено с развитием Вилюйской рифтовой системы, которое завершилось расколом континента и формированием его восточной границы [Зоненшайн и др., 1990]. Важной характеристикой этой рифтовой системы является радиальное распределение ее главных структурных элементов, включая дайковые рои, в том числе с кластерами алмазоносных кимберлитовых трубок. Подобное положение и особенности строения рифтовой системы позволили связать ее появление и развитие с механическим и термальным воздействием плюма на кратонную литосферу, центр которого располагался в районе, перекрытом в современной структуре форландом мезозойского Верхоянского складчато-надвигового пояса [Ernst, Buchan, 2001]. В соответствии с данными о закономерностях распределения грабенов (рифтовых впадин) и дайковых роев поперечник головы плюма в основании рифтовой системы достигал 1500 км, а его площадь охватывала > 700 тыс. км² [Kiselev et al., 2012]. В процессе плюм-литосферного взаимодействия в местах растяжения литосферы и локального апвеллинга плюмового вещества в головной части плюма происходило его адиабатическое плавление и крупномасштабное образование базальтовых расплавов. В пределах террейнов с толстой кратонной литосферой, не затронутой рифтогенезом, имело место внедрение малообъемных высокофлюидизированных кимберлитовых расплавов, транспортирующих к поверхности алмазы и другие высокобарные минеральные ассоциации [Соловьева и др., 2012; Соболев и др., 2013].

В настоящей статье мы акцентируем внимание на причинах и условиях пространственно-временного совмещения среднепалеозойских базитового и кимберлитового магматизма в пределах Вилюйско-Мархинского дайкового роя, представляющего собой область перехода от Вилюйского рифта к внутренним стабильным частям Сибирского кратона.

БАЗИТОВЫЙ И КИМБЕРЛИТОВЫЙ СРЕДНЕПАЛЕОЗОЙСКИЙ МАГМАТИЗМ НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ПЛЕЧЕ ВИЛЮЙСКОГО РИФТА

Вилюйский рифт. Среднепалеозойский рифтинг, охвативший восточную часть Сибирского кратона, завершился формированием его восточной границы. Раскол континента был сопряжен с появлением тройной системы рифтов, наиболее крупная ветвь которой представлена внутриконтинентальным Вилюйским рифтом, слепо выклинивающимся в теле кратона [Зоненшайн и др., 1990; Киселев и др., 2006; Kiselev et al., 2012; Полянский и др., 2013]. Этот рифт представляет собой систему впадин, выполненных вулканогенно-осадочными толщами общей мощностью до 7 км, возраст которых варьируется от среднего девона до нижнего карбона включительно (рис. 1). Во впадинах покровы базальтов переслаиваются с терригенными и карбонатными породами. Все эти стратифицированные образования характеризуются преимущественно пологим залеганием, однако интенсивно нарушены сбросами и взбросами. Дизъюнктивные деформации обусловлены главным образом инверсией рифта, имевшей место в раннем карбоне [Гайдук, 1988]. Накопление лавовых толщ происходило в лагунных мелководных условиях или на участках островной суши. Мощность потоков колеблется от первых метров до 10—20 м, протяженность — до нескольких десятков километров. Слагаемые ими пачки могут достигать первых сотен метров, иногда до 900 м.

Вилюйско-Мархинский дайковый рой. Важными элементами строения Вилюйского рифта являются дайки. Особенно масштабно они проявились в обрамлении рифта на его юго-восточном и северо-западном плечах, известные как Чаро-Синский и Вилюйско-Мархинский девонские дайковые рои (см. рис. 1). Вилюйско-Мархинский рой контролируется системой крупных разломов протяженностью > 700 км при ширине до 30 км на юго-западе и более 70 км на северо-востоке. В пределах роя наиболее распространенными являются дайки в толщах верхнего кембрия и нижнего ордовика. Реже встречаются силлы и хонолиты. Дайки протяженностью от 2 до 30 км имеют кулисообразное строение, преимущественно северо-восточное, реже северо-западное и субмеридиональное простирание. Мощность даек изменяется от первых до 50—80 м и более. Под юрскими отложениями дайки распознаются в виде линейных магнитных аномалий различной контрастности. Силлы Вилюйско-Мархинского роя имеют как одноярусное, так и многоярусное расположение в платформенном чехле с мощностями от первых до первых десятков метров. Силлы и большинство даек представлены долеритами. Более редкими являются тела сложного строения с вариациями состава от оливинсодержащих долеритов до монцонит-порфиров.

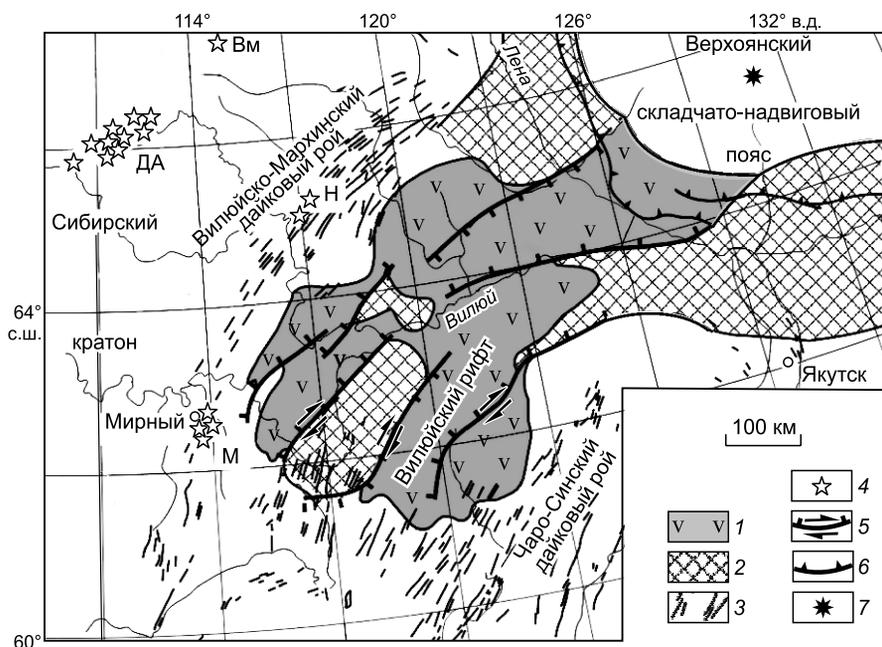


Рис. 1. Схема строения среднепалеозойского Вилуйского рифта, по [Тектоника..., 2001] с изменениями.

1 — эффузивно-осадочные толщи рифтовых впадин; 2 — участки относительных поднятий (реликты палеосвода); 3 — дайки долеритов; 4 — среднепалеозойские поля алмазонасных кимберлитов (М — Мирнинское, Н — Накынское, ДА — Далдыно-Алакитское, Вм — Верхнемунское); 5 — разломы, 6 — фронт фанерозойского орогенного пояса; 7 — центр Якутского плюма [Ernst, Buchan, 2001].

Кимберлиты в пределах Вилуйско-Мархинского дайкового роя образуют два кластера трубок, известных как Мирнинское (Малоботуобинское) и Накынское поля, удаленных друг от друга примерно на 300 км. Следует подчеркнуть, что кимберлиты расположены на плече рифта за пределами зоны депрессий, т.е. там, где рифтогенные процессы в их структурном выражении проявились в ослабленном виде (рис. 1, 2). Особый интерес вызывает проблема пространственно-временных отношений кимберлитового и базитового магматизма. В тр. Мир (Мирнинское поле) кимберлиты прорывают силл и дайку среднепалеозойских долеритов.

Взаимоотношения кимберлитов и базитов было изучено нами в тр. Нюрбинская Накынского поля (рис. 3, 4). Трубка перекрыта терригенными нижнеюрскими отложениями мощностью около 50 м. Она имеет асимметричную овальную форму (300 × 100 м) и состоит из кимберлитовых брекчий и порфирировых кимберлитов. Брекчии характеризуются высоким содержанием псевдоморфоз по оливину (до 30 %). В подавляющем большинстве это серпентин и кальцит в разных количественных соотношениях. Цементирующая часть брекчии имеет серпентин-карбонатный, иногда существенно карбонатный состав с высоким (до 30 % объема) содержанием мелкочешуйчатого, в основном хлоритизированного флогопита. Кроме того, состав цемента характеризуется отсутствием перовскита и аномально низким содержанием рудных и барофильных минералов. Порфирировые кимберлиты в сравнении с кимберлитовыми брекчиями содержат больше псевдоморфоз по оливину, но меньше мантийных и коровых ксенолитов.

Долерит-монцонитовая дайка мощностью ~ 50—70 м, прорывающая кимберлиты тр. Нюрбинская, является уникальным объектом (см. рис. 3, 4). Ее краевые части сложены оливинсодержащими (1—2 %) витрофировыми и микропорфирированными долеритами. По направлению к центру тела они переходят в безоливиновые среднезернистые долериты и кварцсодержащие габбро-долериты. Центральную часть дайки (7—10 м) слагают монцонит-порфиры (см. рис. 4). Структурные разновидности долеритов порой обнаруживают между собой сложные отношения, отражающие динамику остывания и кристаллизации расплава — от стекловатых и тонкозернистых в приконтактных частях тела до среднезернистых в его центральных частях. Наряду с этим отмечаются признаки неоднократного пульсационного внедрения расплава при становлении дайки, указывающие на длительность ее образования.

Преобладающими минералами долеритов являются плагиоклаз и клинопироксен, в меньших количествах присутствуют кварц (3—5 %) или оливин (2—7 %), а также титаномагнетит, ильменит (3—

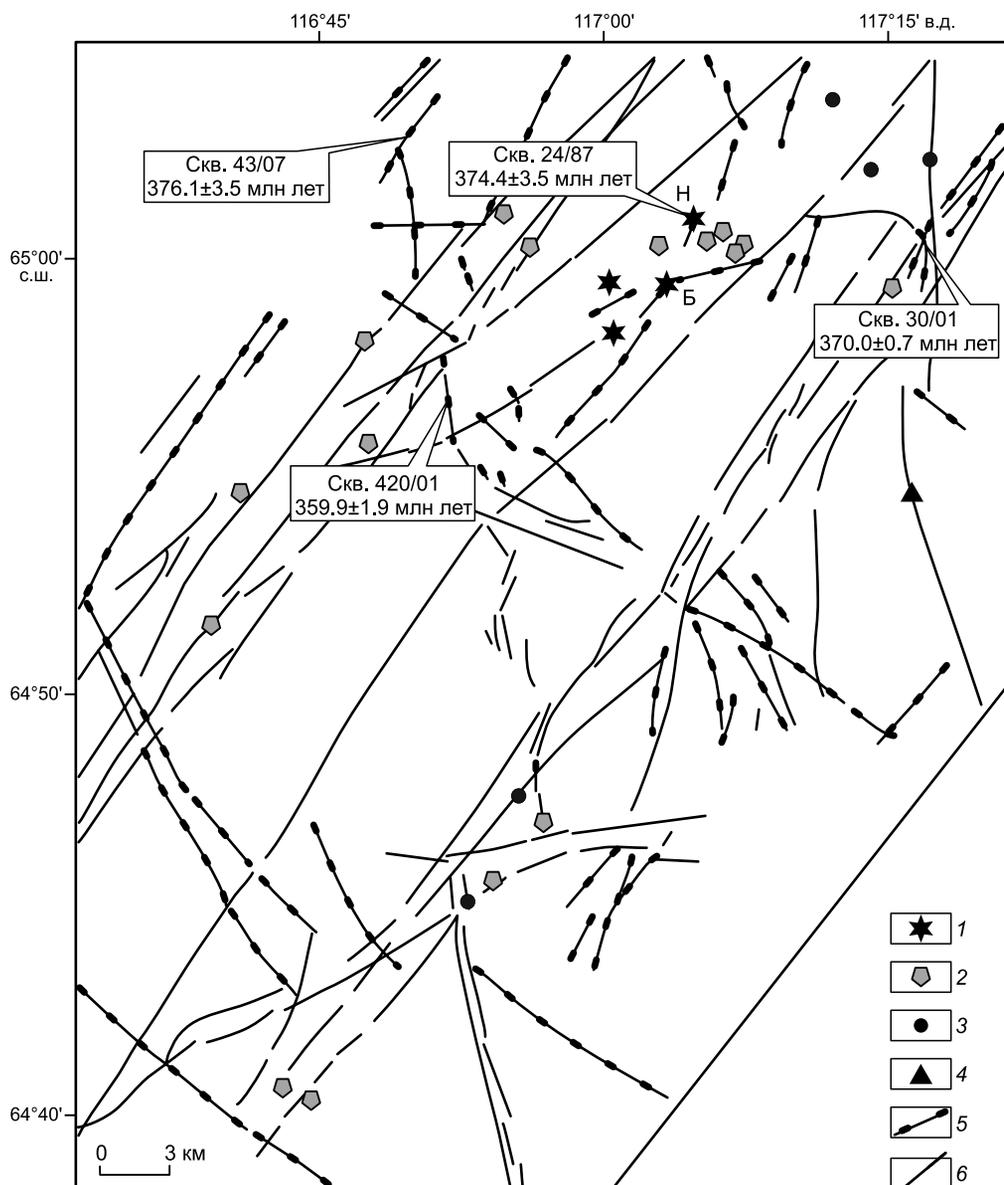


Рис. 2. Размещение проявлений кимберлитового и базитового магматизма в Накыинском поле.

1 — кимберлитовые тела (Б, Н — Ботуобинская и Нюрбинская трубки соответственно); 2 — базитовые эксплозивные брекчии; 3 — высококальциевые долериты в участках локального метасоматического изменения даек; 4 — монцонит-порфиры; 5 — дайки долеритов; 6 — разломы.

6 %), роговая обманка и хлорит. В отношении кремнезема отмечается вариабельность от недосыщенных кремнеземом (оливинсодержащих) долеритов (на контакте с вмещающими породами) до насыщенных кварцсодержащих долеритов и монцонит-порфиров. Последние связаны с завершающим поступлением насыщенного кремнеземом расплава в центральную часть базитовой дайки. Монцонит-порфиры содержат вкрапленники таблитчатого плагиоклаза до 5 мм (~ 20 %) и клинопироксена ($\leq 7\%$). Структура породы порфировая, гломеропорфировая. Тонкозернистый матрикс сложен плагиоклазом, щелочным полевым шпатом ($K_2O = 10.1-10.5$, $Na_2O = 2.6-3.3$ мас. %), роговой обманкой, биотитом ($\leq 5\%$), кварцем ($< 10\%$), титаномagnetитом, ильменитом, аксессуарными апатитом и титанитом. Вторичные минералы представлены серицитом, хлоритом и карбонатом. Смена состава пород от оливинсодержащих долеритов до монцонит-порфиров при отсутствии между ними резких контактов дает основание предполагать вовлечение в интрузивный процесс разных по составу порций фракционирующего расплава. Интрузивные контакты между кимберлитами и базитами четкие, ровные, местами извилистые (рис. 5).

Рис. 3. Контакт между кимберлитами и прорывающими их долеритами на разрезе тр. Нюрбинская по профилю разведочных скважин.

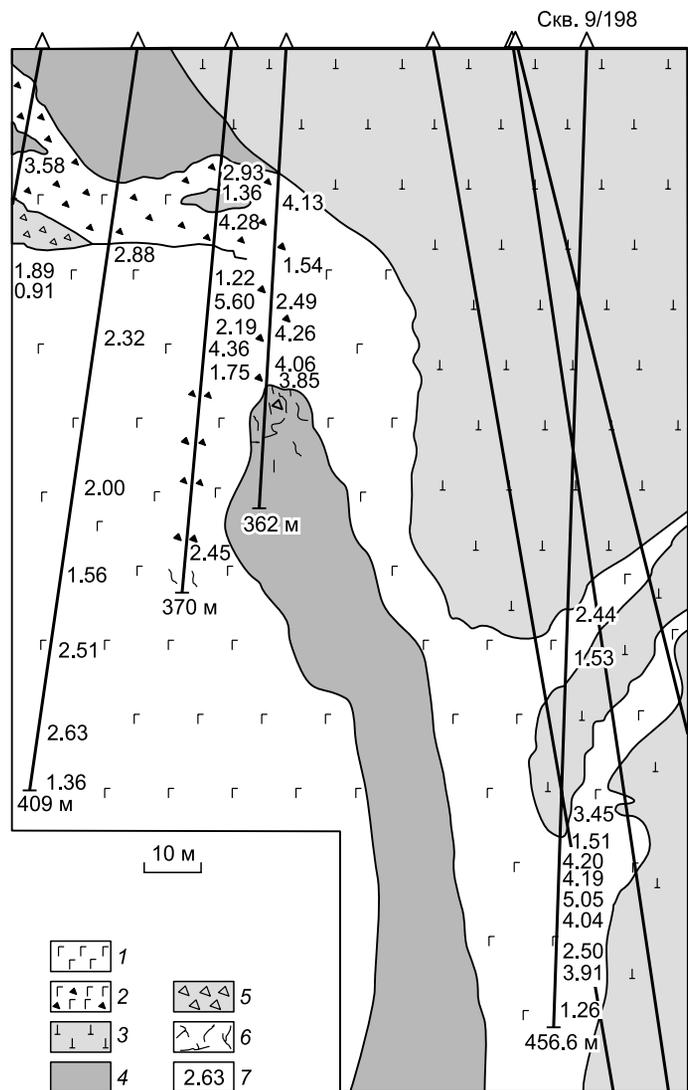
1 — долериты; 2 — базитовые эксплозивные брекчии; 3 — кимберлиты; 4 — алевролиты (PZ₁); 5 — брекчированные алевролиты; 6 — участки повышенной тектонической трещиноватости; 7 — содержание K₂O в долеритах (мас. %).

Определение химического и фазового состава минералов в зоне контакта показало, что экзоконтактовая зона кимберлита испытала высокотемпературное воздействие со стороны базитового расплава. В кимберлитовой приконтактовой зоне мощностью 4—5 мм порода полностью сложена тальк-серпентиновой минеральной ассоциацией. По составу серпентин характеризуется повышенным содержанием глинозема, что присуще для серпентинов, образующихся при высоких *PT*-параметрах и обычно встречающихся в ультраосновных породах высокобарических комплексов [Егоров и др., 1999]. По данным термического анализа серпентина из приконтактовой зоны, температура эндоэффекта кривой равна 740 °С, что типично для антигоритов. Антигоритовая природа серпентина из экзоконтакта также подтверждена рентгенометрическим анализом. Тальк-антигоритовая ассоциация образуется в результате перекристаллизации серпентинизированных альпинотипных гипербазитов при температуре выше 500 °С [Варлаков, 1986]. Таким образом, установленные признаки высокотемпературной переработки кимберлита в зоне контакта однозначно свидетельствуют о более позднем внедрении базальтового расплава.

В приведенных разрезах скважин (см. рис. 3, 4) отмечаются высокие (до 7 мас. % K₂O) незаконномерные вариации содержания калия в витрофировых и микропорфировых долеритах в приконтактовой зоне с кимберлитами, обусловленные низкотемпературным метасоматическим преобразованием пород [Киселев и др., 2009]. На удалении от контакта с кимберлитами содержание калия в долеритах варьируется в пределах 1.3—1.7 мас. % и редко превышает 2.0 мас. %.

Оценки возраста базитов и кимберлитов на северо-западном плече Вилуйского рифта. Согласно геологическим и биостратиграфическим данным, наиболее масштабные излияния базальтов в пределах рифтовых впадин происходили в верхнем девоне и завершились в нижнем карбоне [Гайдук, 1988]. Кимберлитовый магматизм на северо-западном плече Вилуйского рифта также соответствует временному интервалу девон—ранний карбон. Первые прецизионные определения абсолютного возраста кимберлитов Мирнинского района, полученные уран-свинцовым методом по цирконам, оцениваются для разных трубок в пределах 409.5—346.0 млн лет [Дэвис и др., 1980].

Девонские осадочные отложения на территории Накынского поля отсутствуют в результате глубокого (> 500 м) эрозионного среза палеозойских отложений [Тарабукин и др., 2003]. Но они сохранились в виде ксенолитов в кимберлитовых трубках, содержащих силурийский и девонский комплексы конодонтов. Наиболее молодой комплекс конодонтов из ксенолитов тр. Нюрбинская имеет среднедевонский возраст. Он представлен видами *Icriodus difficilis* Z. et Kl. и *Panderodus* sp. Первый вид присутствует в живетских и раннефранских отложениях Западной Европы, Северной Америки и Азии [Cocks et al., 1983]. Оба вида широко распространены в среднедевонских отложениях северо-востока Азии [Тарабукин и др., 2003]. Следовательно, есть твердое основание полагать, что абсолютный возраст кимберлитов



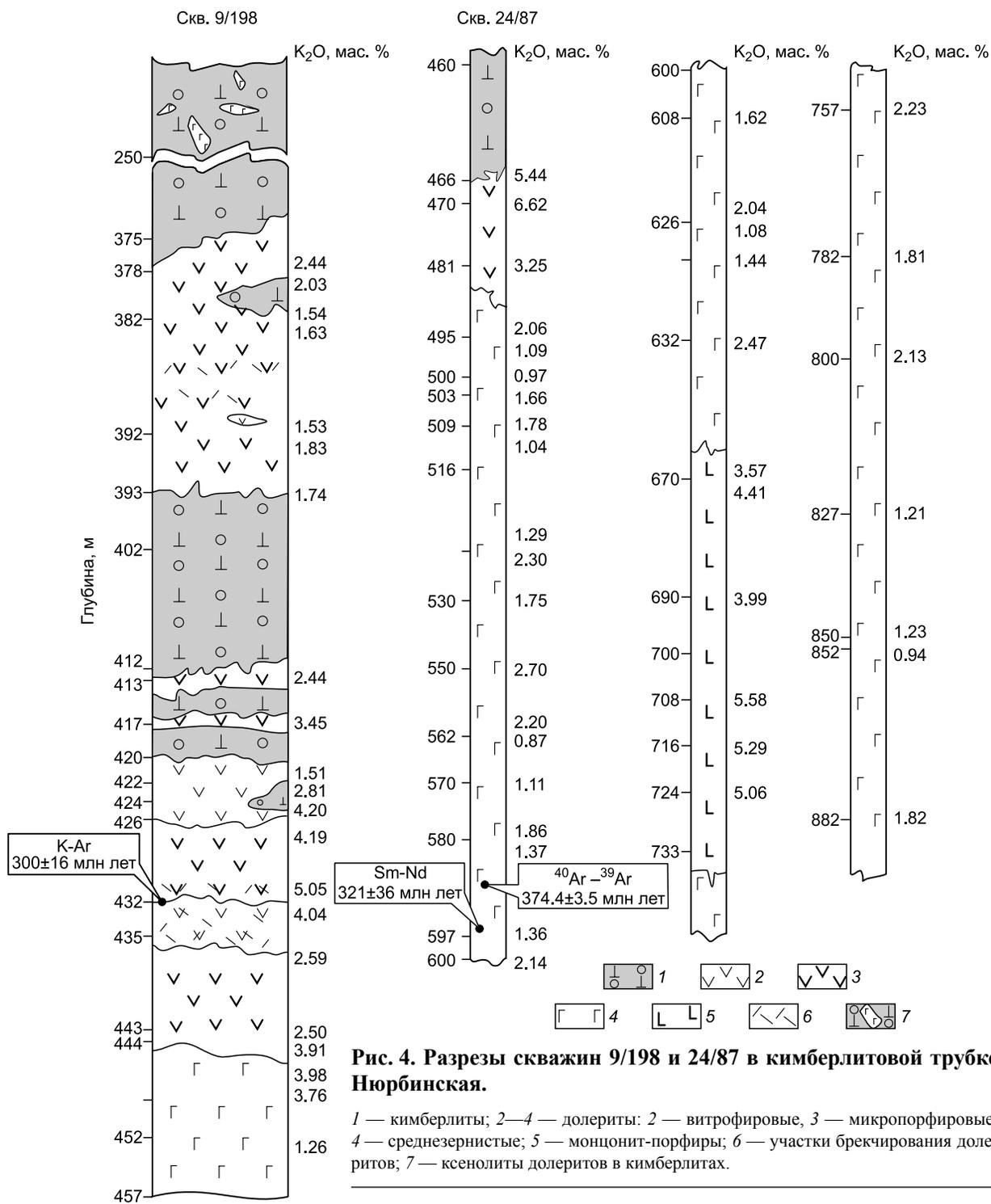


Рис. 4. Разрезы скважин 9/198 и 24/87 в кимберлитовой трубке Нюрбинская.

1 — кимберлиты; 2—4 — долериты: 2 — витрофировые, 3 — микропорфировые, 4 — среднезернистые; 5 — монзонит-порфиры; 6 — участки брекчирования долеритов; 7 — ксенолиты долеритов в кимберлитах.

тр. Нюрбинская не может быть древнее возраста 383.6 ± 3.0 млн лет [Vleeschouwer et al., 2012], отвечающего границе между живетским и франским ярусами девона.

Определение абсолютного возраста кимберлитов из трубок Нюрбинская и Ботубинская (таблица) было выполнено Rb-Sr методом в Университете Хоккайдо (Япония) на масс-спектрометре FINIGAN-MAT-262 [Agashev et al., 2001; Агашев и др., 2004]. Полученная датировка (365 млн лет) соответствует верхнему девону.

Для долеритов Накынского поля в разных лабораториях России получен значительный объем изотопных датировок разными методами (см. таблицу), однако это не позволяет строго определить возрастной диапазон среднепалеозойского базитового магматизма на его территории. Широкие вариации зна-

Изотопные датировки долеритов и кимберлитов Накынского поля

| Объект | Возраст, млн лет | Метод | Литературный источник |
|--|--|---------------------------------|--|
| Дайки долеритов Накынского поля | 349—496 | K-Ar | [Томшин, Яныгин, 1997] |
| | 366—386 | $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | [Томшин и др., 2004] |
| | от 337.8 ± 4.8 до 370.3 ± 5.3 | K-Ar | [Courtillot et al., 2010] |
| Силл долеритов, руч. Лиендокит | 370.0 ± 0.7 | $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | » |
| | 426 ± 42 | Sm-Nd | [Мащак и др., 2004] |
| Кимберлиты (тр. Нюрбинская) | 364.5 ± 5 | Rb-Sr | [Agashev et al., 2001; Агашев и др., 2004] |
| Кимберлиты (тр. Ботуобинская) | 364 ± 9 | » | » |
| Посткимберлитовые долериты в тр. Нюрбинская | 399.6 ± 4.6 | Rb-Sr | [Саблуков и др., 2008] |
| | 269 ± 20 | » | » |
| | 325 ± 140 | Sm-Nd | » |
| Скв. 24/87, гл. 594 м | 321 ± 36 | » | [Мащак и др., 2004] |

чений абсолютного возраста пород могут быть обусловлены тремя причинами: ограничениями применяемых методов; значительной продолжительностью магматизма; вторичным обогащением долеритов калием в результате их низкотемпературного метасоматического преобразования, что приводит к омоложению их реального возраста. Ограничения K-Ar метода для неизменных долеритов применительно к Накынскому полю (см. таблицу) убедительно показаны в работе [Courtillot et al., 2010], где был использован $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метод для определения возраста долеритов из дайки, расположенной в 10 км восточнее тр. Нюрбинская (см. рис. 2).

Для нас главной задачей являлось надежное определение возраста долеритов из дайки, прорывающих кимберлиты тр. Нюрбинская. Прежние определения возраста варьируют от 269 ± 12 до 321 ± 36 млн лет (см. таблицу). Исследуемый обр. 75/01 отобран из скв. 24/87 (глубина 587 м, см. рис. 3). Ранее из этой же скважины возраст долерита (обр. 24/87, гл. 594 м), полученный Sm-Nd методом, составил 321 ± 36 млн лет (см. таблицу).

По имеющимся данным (см. таблицу), оценки абсолютного возраста базитов в пределах Накынского кимберлитового поля до сих пор остаются весьма неопределенными. Что касается кимберлитов трубок Нюрбинская и Ботуобинская, то их Rb-Sr изохронный возраст [Agashev et al., 2001; Агашев и др., 2004] в целом с учетом погрешностей измерений соответствует главному импульсу внедрения среднепалеозойских алмазоносных кимберлитов в южной части Сибирского кратона, установленному ранее [Дэвис и др., 1980; Кинни и др., 1997]. В данной статье сделана попытка уточнить возраст долерит-монцонитовой дайки, прорывающей кимберлиты тр. Нюрбинская, для выяснения пространственно-временных отношений кимберлитового и базитового магматизма.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Методика. Датирование долеритов из дайки, прорывающей кимберлиты тр. Нюрбинская, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом осуществлено в ИЗК СО РАН (г. Иркутск) с помощью мультиколлекторного масс-спектрометра Argus VI с

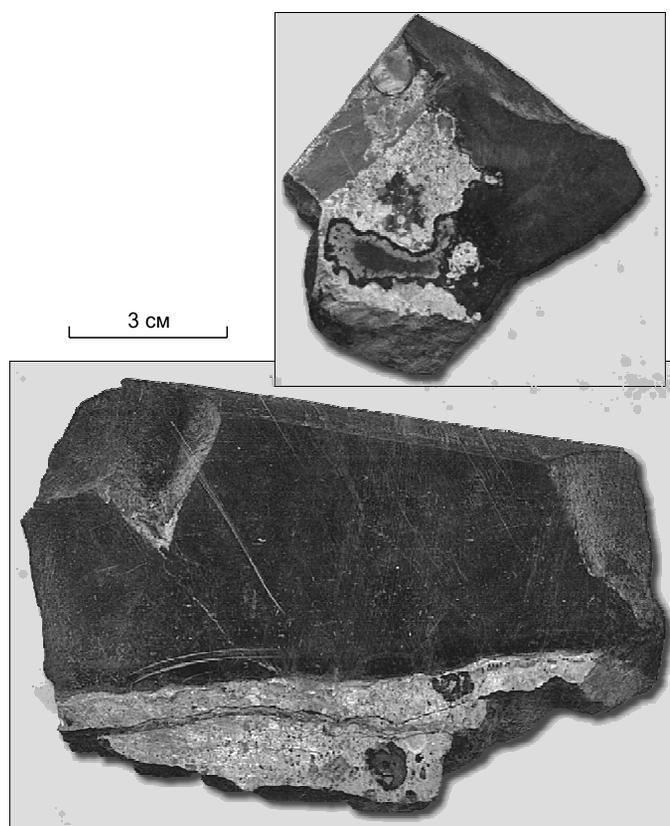


Рис. 5. Трубка Нюрбинская.

Контакт между кимберлитами и микропорфировыми долеритами в керне разведочной скважины.

высоковакуумной печью двойного вакуума, позволяющей нагревать образец свыше 1700 °С. Для датирования использовались мономинеральные навески плагиоклаза 0.5—0.25 мм, обработанные разбавленной азотной кислотой. По две аликвоты каждого образца, завернутые в алюминиевую фольгу, помещали в стеклянную ампулу вместе со стандартами BERN4M, возраст которых принимался равным 18.700 ± 0.096 млн лет [Ivanov et al., 2009]. Использование такого возраста для стандарта BERN4M позволяет согласовать датировки с датировками, рассчитанными относительно широко использующегося стандарта GA1550 с возрастом 98.79 млн лет [Renne et al., 1998], что однако приводит к систематическому омоложению $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировок на ~ 0.9 % относительно U-Pb датировок [Иванов, 2006]. Ампула с образцами облучалась в исследовательском ядерном реакторе ВВР-К (г. Томск). Параметры облучения такие же, как в работах [Vernikovsky et al., 2003; Травин и др., 2009]: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000522 \pm 0.000006$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000810 \pm 0.000005$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.089 \pm 0.001$. Градиент нейтронного потока и связанные с ним вариации J -фактора, используемого при расчете возраста, контролировались путем измерения стандарта BERN4M. Качественный контроль за вариациями J -фактора осуществлялся за счет того, что аликвоты одной и той же мономинеральной фракции помещались на удалении друг от друга. Суммарная ошибка в расчете, вызванная неточностью определения возраста стандарта BERN4M и ошибкой в определении J -фактора для измеряемого образца, составляла 0.9 %. Значения возраста рассчитаны при помощи макроса Isoplot 3.75 [Ludwig, 2012] в ИЗК СО РАН.

Результаты датирования представлены на рис. 6. Обе аликвоты обр. 75/01 показывают идентичные значения возраста. Они отличаются между собой тем, что аликвота 1 имела меньшую массу и, соответственно, анализировалась в 4 ступени, тогда как аликвота 2 большей массы — в 11 ступеней. Возраст плато в диапазоне температур от 690 до 830 °С по аликвоте 2 составляет 374.4 ± 3.5 млн лет

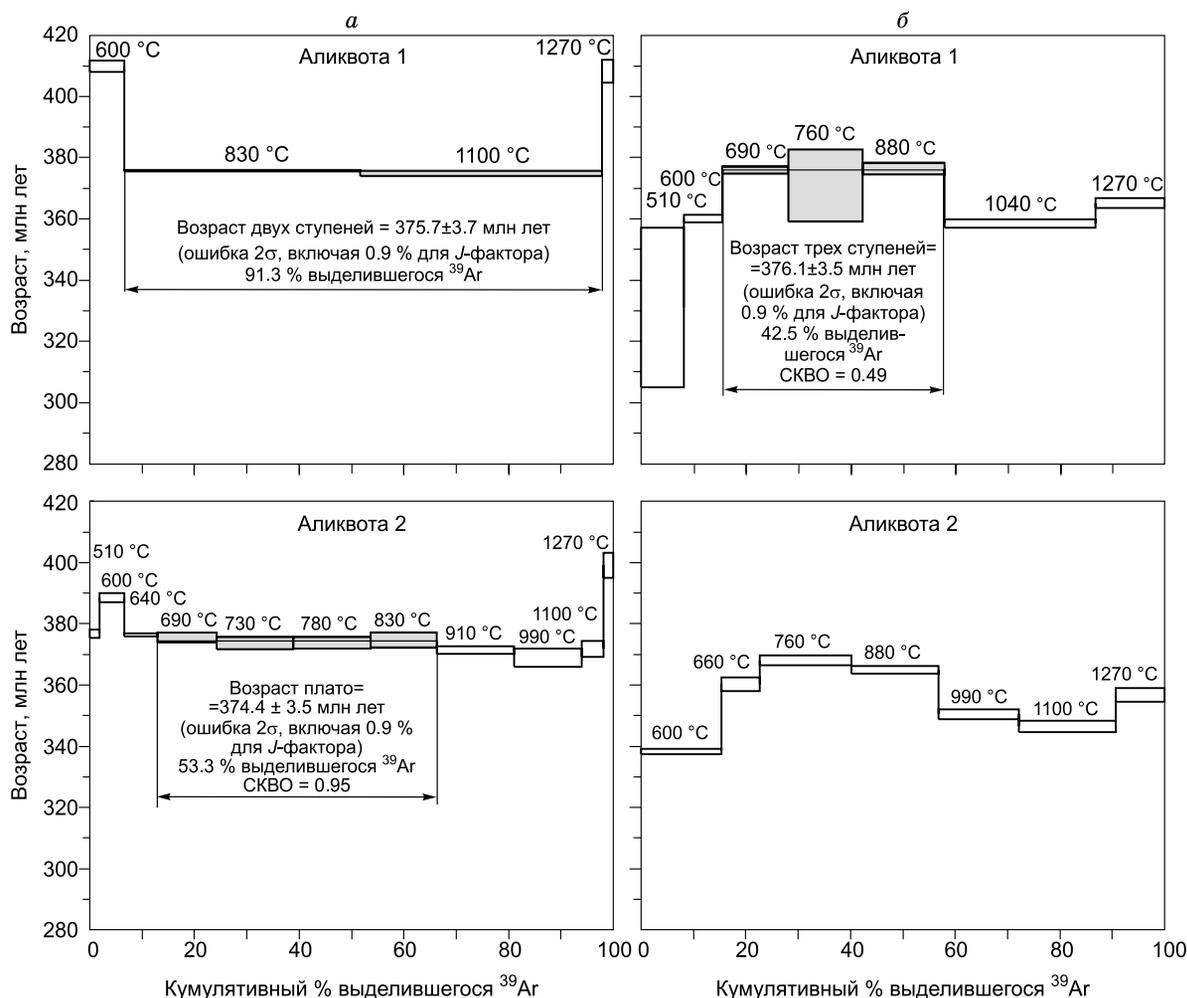


Рис. 6. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования посткимберлитовых долеритов из тр. Нюрбинская, полученные А.В. Ивановым в ИЗК СО РАН.

Значения возраста рассчитаны при помощи макроса Isoplot 3.75 [Ludwig, 2012]. а — обр. 75/01, б — обр. 43/01.

(включая суммарную ошибку в J -факторе). По-видимому, этот возраст наиболее близок времени кристаллизации плагиоклаза из обр. 75/01. Обе аликвоты обр. 43/01 показали нарушенные формы спектров, характерные для образцов с заметными потерями радиогенного аргона. Тем не менее аликвота 1 этого образца имеет три ступени в средней части спектра, интегральный возраст которых совпадает в пределах погрешности измерения с возрастом плато для аликвоты 2 обр. 75/01. Это указывает на то, что оба образца являются разновозрастными.

Ранее К-Аг и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методами [Courtillot et al., 2010] датировалось несколько образцов долеритов, отобранных нами из даек Накынского поля (см. рис. 2). Образец 30/01 из этой работы показал возраст плато 370.0 ± 0.7 млн лет, рассчитанный относительно стандарта FCs с принятым возрастом 28.02 млн лет [Renne et al., 1998], который, в свою очередь, соответствует используемому нами возрасту 18.7 млн лет стандарта BERN4M [Ivanov et al., 2009].

В работе [Courtillot et al., 2010], однако, не приводится полная ошибка измерения, учитывающая ошибку в J -факторе, которая не может быть заметно менее 1 % от возраста. Таким образом, вопрос, является ли различие возрастов между образцами 75/01 (данная работа) и 30/01 [Courtillot et al., 2010] значимым или оно связано с незначительными различиями, вызванными в калибровке используемых стандартов, остается открытым. Так или иначе оба образца показывают фаменские возрасты, т.е. моложе ожидаемой границы франа и фамена (383.6 ± 3.0 млн лет), с которой связывается одно из глобальных массовых вымираний. Кроме того, обр. 42а/01 [Courtillot et al., 2010] показал заметно более молодой возраст плато 359.9 ± 1.9 млн лет (граница девона и карбона), а еще два образца показали спектры, подобные нашему образцу, указывающие на значительные потери радиогенного аргона.

Присутствие ксенолитов осадочных пород с руководящей верхнедевонской фауной в кимберлитах тр. Нюрбинская однозначно свидетельствует о том, что ее возраст не может быть древнее возраста границы между живетским и франским ярусами, который оценивается в 383.6 ± 3.0 млн лет [Vleeschouwer et al., 2012]. Полученный в нашем исследовании возраст долеритов 374.4 ± 3.5 млн лет из дайки, прорывающей кимберлиты, может являться верхним возрастным ограничением времени ее формирования.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО СОВМЕЩЕНИЯ БАЗИТОВОГО И КИМБЕРЛИТОВОГО МАГМАТИЗМА

Мы полагаем, что пространственно-временное совмещение базитового и кимберлитового магматизма в пределах Вилюйско-Мархинского дайкового роя предопределялось предшествующей тектонической эволюцией литосферы Сибирского кратона. На месте Вилюйского рифта в палеопротерозое находился Аkitканский орогенный пояс, литосфера которого была значительно тоньше по отношению к кратонной литосфере смежных архейских Анабарского и Алданского супертеррейнов [Розен и др., 2006]. В мезоэопротерозое на территории Вилюйского рифта существовал Нюрбинский рифт [Смелов и др., 2003]. В пределах Вилюйского рифта, представляющего область с изначально тонкой палеопротерозойской литосферой, в среднем палеозое проявился исключительно базитовый магматизм. Вилюйско-Мархинский дайковый рой находится в области умеренного растяжения архейской кратонной литосферы на плече рифта и здесь проявился как базитовый, так и кимберлитовый магматизм. На удалении ~ 400 км от Вилюйского рифта на территории, не затронутой рифтогенезом, находятся Далдыно-Алакитское и Верхнемунское среднепалеозойские кимберлитовые поля (см. рис. 1). Уменьшение мощности литосферы от рифта к внутренним частям кратона согласуются с данными термобарометрии. В среднем палеозое мощность литосферы в Мирнинском поле составляла 190 км, а в Далдыно-Алакитском поле — 230 км [Griffin et al., 1999].

Мезоэопротерозойские тектонические события в области Вилюйского рифта совпадают по времени с модельными возрастными (0.8—1.4 млн лет) обогащения компонентом ЕМ1 мантийного источника кимберлитов Накынского поля [Богатиков и др., 2004; Агашев и др., 2004; Костровицкий и др., 2007; Лапин и др., 2007]. В Мирнинском поле мезоэопротерозойское событие нашло отражение в образовании алмазов. Согласно Re-Os датировкам сульфидных включений в некоторых алмазах, их возраст для тр. Мир составил 800—1100 млн лет, для тр. 23 съезд КПСС — 898 ± 48 млн лет [Специус, Гриффин, 2009].

Для среднего девона зона перехода от Вилюйского рифта к кратону характеризуется латеральными вариациями мощности литосферы. На северо-западном плече рифта в Мирнинском поле ее мощность составляет 190 км, тогда как внутри кратона (Далдыно-Алакитское поле) она увеличивается до 230 км [Griffin et al., 1999]. Согласно численным экспериментам [Burov et al., 2007], при плюм-литосферном воздействии в пограничной зоне между кратоном и областью с относительно тонкой литосферой возникает слэбоподобная нестабильность, сопровождаемая возвратным нисходящим потоком плюмового материала с фрагментами деламинированной кратонной литосферы. Подобная нестабильность может инициировать и усиливать мантийное плавление с того момента, когда деламинированные части

основания кратонной литосферы при погружении вступают в контакт с горячей адвектирующей мантией. Данное обстоятельство согласуется с высоким содержанием никеля (до 2.79 мас. % NiO) в экссольюционных оливинах мейджоритового граната из тр. Мир, температура кристаллизации которого оценивается в ~1500 °C [Sirotkina et al., 2012].

Сонахождение среднепалеозойского кимберлитового и базальтового магматизма в пределах Вилюйско-Мархинского дайкового роя ограничивается областью перехода от толстой кратонной литосферы архейских террейнов к относительно тонкой литосфере в основании Вилюйского рифта. Поэтому мы полагаем, что взаимосвязь разнородного магматизма определялась разной реакцией литосферы в зависимости от ее мощности на воздействие мантийного плюма. Локальный апвеллинг горячего мантийного вещества под областями с утоненной литосферой сопровождался более высокой степенью адиабатического плавления и появлением больших объемов базальтовых расплавов, образующих магматические очаги и субаэральный вулканизм собственно в рифтовой зоне. Подъем плюма под архейскими террейнами с толстой тугоплавкой литосферой ограничивался более глубинными уровнями. Соответственно, плюм продуцировал малообъемные кимберлитовые расплавы на астеносферных глубинах и в основании кратонной литосферы. Подобная ситуация, по-видимому, была характерна для Далдыно-Алакитского и Верхнемунского полей среднепалеозойских кимберлитов Якутской алмазоносной провинции.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Наличие ксенолитов осадочных пород с руководящей верхнедевонской фауной в кимберлитах тр. Нюрбинская дает основание полагать, что ее возраст не может быть древнее возраста границы между живецким и франским ярусами, который оценивается в 383.6 ± 3.0 млн лет. Определенный нами возраст долеритов 374.4 ± 3.5 млн лет из дайки, прорывающей кимберлиты, может являться верхним возрастным ограничением времени ее формирования.

2. Геодинамическая обстановка среднепалеозойского магматизма и рифтогенеза на востоке Сибирского кратона определялась плюм-литосферным взаимодействием. Подъем вещества плюма к основанию относительно тонкой палеопротерозойской литосферы в области Вилюйского рифта сопровождался плавлением и образованием больших объемов исключительно базитовых расплавов. Подъем плюма под архейскими террейнами к северу от рифта ограничивался более мощной (до 230 км) литосферой, что обуславливало образование под ними малообъемных протокимберлитовых расплавов. В области перехода от Вилюйского рифта к стабильным архейским террейнам имело место сочетание как базитового, так и кимберлитового магматизма.

3. Соотношения возрастов между базальтами и кимберлитами, вероятно, отражает их причинно-следственную связь по отношению к мантийным плюмам. Ряд факторов, таких как соответствующая мощность и природа кратонной литосферы, температура плюма и расстояние от мантийных плюмов, очевидно, играют существенную роль в управлении пространственным распределением кимберлитов, ассоциирующих с базитами.

Статья подготовлена при поддержке РФФИ (гранты 11-05-00444, ОФИ-м-13-05-12043, ОФИ-м-13-05-12026).

ЛИТЕРАТУРА

Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В., Поляничко В.В., Мальковец В.Г., Соболев Н.В. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазоносной провинции // ДАН, 2004, т. 399, № 1, с. 95—99.

Богатиков О.А., Кононова В.А., Голубева Ю.Ю., Зинчук Н.Н., Илупин И.П., Ротман А.Я. Петрогеохимические и изотопные вариации состава кимберлитов Якутии и их причины // Геохимия, 2004, № 9, с. 915—939.

Варлаков А.С. Петрология процессов серпентинизации гипербазитов складчатых областей. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1986, 224 с.

Гайдук В.В. Вилюйская среднепалеозойская рифтовая система. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1988, 128 с.

Дэвис Г.Л., Соболев Н.В., Харькив А.Д. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутии, полученные уран-свинцовым методом по цирконам // Докл. АН СССР, 1980, т. 254, № 1, с. 175—179.

Егоров К.Н., Мельников А.И., Меньшагин Ю.В. Процессы серпентинизации гранатовых перидотитов Саксонского гранулитового массива // ЗВМО, 1999, № 4, с. 29—35.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Т. 2. М., Недра, 1990, 334 с.

Иванов А.В. Систематическое различие между U-Pb и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировками: причина и способ учета // Геохимия, 2006, № 10, с. 1125—1131.

Кинни П.Д., Гриффин Б.Дж., Хеамэн Л.М., Брахфогель Ф.Ф., Специус З.В. Определение U-Pb возрастов перовскитов из якутских кимберлитов ионно-ионным масс-спектрометрическим (SHRIMP) методом // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (1), с. 91—99.

Киселев А.И., Ярмолюк В.В., Егоров К.Н., Чернышов Р.А., Никифоров А.В. Среднепалеозойский базитовый магматизм северо-западной части Вилюйского рифта: состав, источники, геодинамика // Петрология, 2006, № 6, с. 660—682.

Киселев А.И., Ярмолюк В.В., Егоров К.Н. «Калиевые» базальты и «пикритобазальты» девонских кимберлитовых полей Западной Якутии и их связь с кимберлитовым магматизмом (Россия) // Геология рудных месторождений, 2009, т. 51, № 1, с. 38—57.

Костровицкий С.И., Морикю Т., Серов И.В., Яковлев Д.А., Амиржанов А.А. Изотопно-геохимическая систематика кимберлитов Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (3), с. 350—371.

Лапин А.В., Толстов А.В., Антонов А.В. Изотопный состав Sr- и Nd-кимберлитов и конвергентных с ними пород Сибирской платформы // ДАН, 2007, т. 414, № 2, с. 78—82.

Мащак М.С., Наумов В.М., Леухин В.И., Молчанов Ю.Д., Шаталов В.И., Яныгин Ю.Т. Среднепалеозойский базитовый магматизм Марха-Тюнгского междуречья (Накынское кимберлитовое поле) // Региональная геология и металлогения, 2004, № 20, с. 122—138.

Полянский О.П., Прокопьев А.В., Бабичев А.В., Коробейников С.Н., Ревердатто В.В. Рифтогенная природа формирования Вилюйского бассейна (Восточная Сибирь) на основе реконструкций осадконакопления и механико-математических моделей // Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 2, с. 163—183.

Розен О.М., Манаков А.В., Зинчук Н.Н. Сибирский кратон: формирование, алмазонасность. М., Научный мир, 2006, 212 с.

Саблуков С.М., Саблукова Л.И., Стегницкий Ю.Б., Карпенко М.А., Спиваков С.В. Вулканические породы трубки Нюрбинская: отражение состояния верхней мантии региона от рифея до карбона, геодинамические следствия // Глубинный магматизм, его источники и плюмы. Труды VIII Международного семинара. Вып. 2. Иркутск, Изд-во Института географии СО РАН, 2008, с. 131—165.

Соболев Н.В., Логвинова А.М., Николенко Е.И., Лобанов С.С. Минералогические критерии алмазонасности верхнетриасовых россыпей северо-восточной окраины Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1162—1178.

Соловьева Л.В., Ясныгина Т.А., Егоров К.Н. Метасоматические парагенезисы в глубинных ксенолитах из трубок Удачная и Комсомольская-Магнитная — индикаторы переноса флюидов через мантийную литосферу Сибирского кратона / Геология и геофизика, 2012, т. 53 (12), с. 1698—1721.

Смелов А.П., Тимофеев В.Ф., Зайцев А.И. Строение, этапы становления фундамента Северо-Азиатского кратона и фанерозойский кимберлитовый магматизм // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной компании «АЛРОСА», современное состояние, перспективы, решения. Воронеж, Изд-во Воронеж. ун-та, 2003, р. 186—191.

Специус З.В., Гриффин В.Л. U—Pb и Re—Os системы в минералах кимберлитов и мантийных образований: результаты и проблемы датировки. Изотопные системы и время геологических процессов // Материалы IV Российской конференции по изотопной геохронологии (2—4 июня 2009 г., СПб.). СПб., ИГГД РАН, 2009, с. 194—196.

Тарабукин В.П., Реймерс А.Н., Нефедова Е.В. Оценка эрозионного среза кимберлитовых трубок Накынского поля // Отечественная геология, 2003, № 6, с. 84—85.

Тектоника, геодинамика и металлогения Республики Саха (Якутия) / Под ред. Л.М. Парфенова, М.И. Кузьмина. М., Наука/Интерпериодика, 2001, 571 с.

Томшин М.Д., Фомин А.С., Корнилова В.П., Черный С.Д., Яныгин Ю.Т. Особенности магматических образований Накынского кимберлитового поля Якутской провинции // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (12), с. 1693—1703.

Томшин М.Д., Зайцев А.И., Земнухов А.Л., Копылова А.Г. Характер становления базитов в Накынском кимберлитовом поле Якутии // Отечественная геология, 2004, № 5, с. 44—49.

Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г., Хромых С.В., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Колотилина Т.В. Термохронология чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // Геохимия, 2009, № 11, с. 1181—1199.

Agashev A.M., Watanabe T., Budaev D.A., Pokhilenko N.P., Fomin A.S., Maehara K., Maeda J. Geochemistry of kimberlites from the Nakyn field, Siberia: evidence for unique source composition // Geology, 2001, v. 29, № 3, p. 267—270.

Burov E., Guillou-Frottier L., d'Acremont E., Le Pourhiet L., Cloetingh S. Plume head–lithosphere interactions near intra-continental plate boundaries // *Tectonophysics*, 2007, v. 434, № 1–4, p. 15–38.

Cocks L.R.M., Lane P.D., Richards R.D. The Llandovery area as the type for the first series of the Silurian system // *Submission to the Subcommission on Silurian Stratigraphy*, 1983, p. 17–19.

Courtillot V., Kravchinsky V.A., Quidelleur X., Renne P.R., Gladkochub D.P. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): Eruption at the time of Late Devonian extinction events? // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2010, v. 300, p. 239–245.

Ernst R.E., Buchan K.L. The use of mafic dike swarms in identifying and locating mantle plumes // *Mantle plumes: their identification through time* / Eds. R.E. Ernst, K.L. Buchan. *Geol. Soc. Amer. Spec. Papers* 352, 2001, p. 247–266.

Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Ernst R., Wingate M.T.D., Söderlund U., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Hamilton M.A. Proterozoic mafic magmatism in Siberian craton: an overview and implications for paleocontinental reconstruction // *Precam. Res.*, 2010, v. 183, № 3, p. 660–668.

Griffin W.L., Ryan C.G., Kaminsky F.F., O'Reilly Y.O., Natapov L.M., Win T.T., Kinny P.D., Hupin I.P. The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian craton // *Tectonophysics*, 1999, v. 310, № 1–4, p. 1–35.

Ivanov A.V., He H., Yang L., Nikolaeva I.V., Paleskii S.V. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of intrusive magmatism in the Angara-Taseevskaya syncline and its implication for duration of magmatism of the Siberian Traps // *J. Asian Earth Sci.*, 2009, v. 35, № 2, p. 1–12.

Kiselev A.I., Ernst R.E., Yarmolyuk V.V., Egorov K.N. Radiated rifts and dyke swarms of the middle Paleozoic Yakutsk plume of eastern Siberian craton // *J. Asian Earth Sci.*, 2012, v. 45, № 2, p. 1–16.

Ludwig K.R. Isoplot 3.75. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication № 5, rev. January 30, 2012, 75 p.

Renne P.R., Swisher C.C., Deino A.L., Karner D.B., Owens T.L., DePaolo D.J. Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating // *Chem. Geol.*, 1998, v. 145, № 1, p. 117–152.

Sirotkina E.A., Bobrov A.V., Garanin V.K., Shkurskii B.B., Korost D.V. Exsolution textures in majoritic garnet from the Mir kimberlite pipe (Yakutia, Russia) // 10th International kimberlite conference, Bangalore-2012. Extended abstract, 2012, 10IKC-157.

Vernikovskiy V.A., Pearse V.L., Vernikovskaya A.E., Romanov A.P., Gee D.G., Travin A.V. First report of Early Triassic *A*-type granite and syenite intrusions from Taimyr: Product of the northern Eurasian superplume? // *Lithos*, 2003, v. 66, p. 23–36.

Vleeschouwer D.D., Whalen M.T., Day J.E. (Jed), Claeys Ph. Cyclostratigraphic calibration of the Francian (Late Devonian) time scale (western Alberta, Canada) // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 2012, v. 124, № 11, p. 928–942.

*Поступила в редакцию
23 сентября 2013 г.*