УДК 550.93:552.3

**В. Е. ГУЗЕВ (ВСЕГЕИ, СПГУ), Г. А. КОЗЛОВ, А. В. ТЕРЕХОВ,
А. В. МОЛЧАНОВ, И. О. ЛЕБЕДЕВ, Ю. Л. СВЕТЛОВА (ВСЕГЕИ)**

Чаро-Синский дайковый пояс (среднее течение р. Лена): локальный U-Pb возраст циркона и петролого-геохимические особенности

В работе впервые представлена детальная петролого-геохимическая и изотопно-геохронологическая характеристики пород Чаро-Синского дайкового пояса, картируемых в среднем течении р. Лена. Интрузивы Чаро-Синского дайкового пояса, обрамляющего Вилюйский рифт с юго-востока, выражены преимущественно дайками различного состава – от долеритов и габбро-долеритов до сиенитов, реже встречаются небольшие силлы, штоки и хонолиты. В целом по особенностям распределения петрогенных, редких и редкоземельных элементов изученные породы обладают значительной схожестью со среднепалеозойскими интрузивами Вилюйского рифта, в частности с Вилюйско-Мархинским дайковым поясом. Полученные результаты изотопного датирования циркона U-Pb методом показали, что формирование пород Чаро-Синского дайкового пояса в среднем течении р. Лена произошло в относительно короткий промежуток времени 364–374 млн лет, который полностью соответствует временному интервалу (357–379 млн лет) формирования девонского дайкового магматизма в крупной Якутско-Вилюйской изверженной провинции.

Ключевые слова: U-Pb возраст, циркон, Чаро-Синский дайковый пояс, крупная Якутско-Вилюйская изверженная провинция, Вилюйский рифт.

**V. E. GUZEV (VSEGEI, SPMU), G. A. KOZLOV, A. V. TEREKHOV,
A. V. MOLCHANOV, I. O. LEBEDEV, YU. L. SVETLOVA (VSEGEI)**

Chara-Sinsk dike swarm (middle reach of the Lena River): local U-Pb age of zircon and petrological and geochemical features of rocks

The research focuses on the comprehensive analysis of petrological, geochemical, and isotopic-geochronological characteristics of the Chara-Sinsk dike swarm, which is mapped in the middle reaches of the Lena River. Intrusions of the Chara-Sinsk dike swarm frame the Vilyui rift from the southeast. The intrusions are dikes, small sills, stocks, and chonoliths. Their petrological composition varies from dolerite and gabbro-dolerite to syenite. In general, in terms of the distribution of petrogenic, trace elements and REE, the studied rocks have a significant similarity with Middle Paleozoic intrusions of the Vilyui rift, in particular, with the Vilyui-Markha dike swarm. The results of isotopic dating of the zircon by the U-Pb method showed that the formation of the Chara-Sinsk dike swarm occurred during a relatively short time interval of 364–374 Ma. The obtained isotope dating results fully correspond to the time interval (357–379 Ma) of Devonian dike magmatism in the large Yakutsk-Vilyui igneous province.

Keywords: U-Pb dating, zircon, Chara-Sinsk dike swarm, large Yakutsk-Vilyui igneous province, Vilyui rift.

Для цитирования: Гузев В. Е. Чаро-Синский дайковый пояс (среднее течение р. Лена): локальный U-Pb возраст циркона и петролого-геохимические особенности / В. Е. Гузев, Г. А. Козлов, А. В. Терехов, А. В. Молчанов, И. О. Лебедев, Ю. Л. Светлова // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 87. – С. 28–41. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_87_28-41

Введение. Сибирский кратон, как и большинство других кратонов мира, за время своего существования неоднократно был подвержен тектоническим перестройкам. Соответствующие события зафиксированы проявлениями базитового магматизма различного возраста. Одна из масштабных перестроек данной территории – развитие в среднем палеозое в пределах восточной границы кратона Вилюйской рифтовой системы, которая осложнена проявлением интенсивной магматической активности [3]. Формирование Вилюйского рифта связано с термальным и механическим воздействием Якутского плюма на кратонную литосферу, центр которого располагался в районе, перекрытом в современной структуре форландом мезозойского Верхоянского складчато-надвигового пояса [8; 11]. Рифт протяженностью около 800 км при ширине 450 км представлен системой впадин с возрастом от среднего девона до раннего карбона, которые выполнены вулканогенно-осадочными толщами мощностью до 7 км [5]. Важная характеристика этой рифтовой системы – среднепалеозойский магматизм, который привел к разрывам литосферы и образованию крупной

DOI: 10.52349/0869-7892_2021_87_28-41

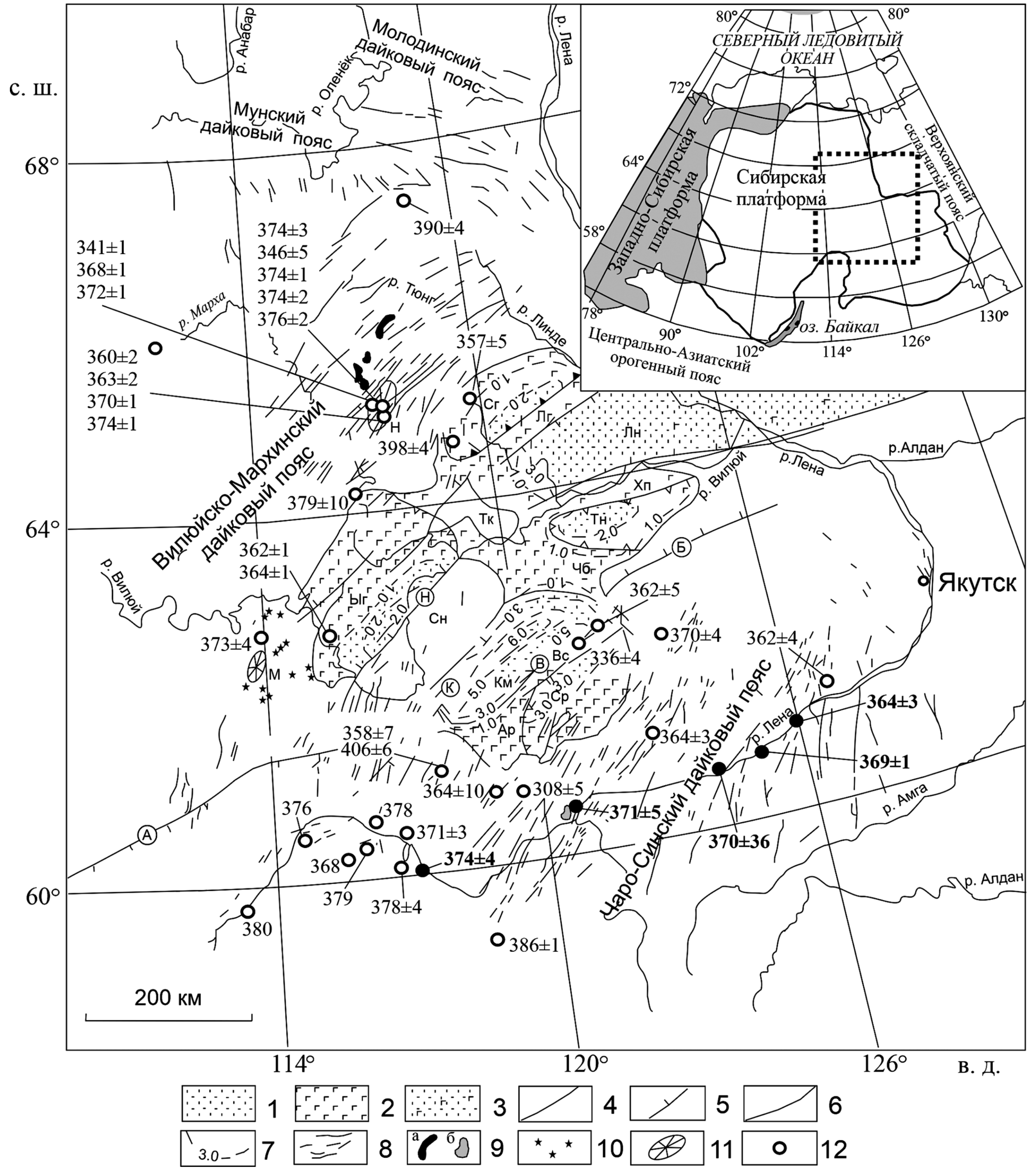

Рис. 1. Схема строения восточной части Сибирской платформы на среднепалеозойский структурный ярус [1; 9]

1 – фаменско-нижнекаменноугольный туфогенно-осадочный комплекс; *2* – франский 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 – Тюкянское, Чб – Чыбыдинское; впадины: Км – Кемпендяйская, Лн – Линденская, Сг – Сыангдинская, Ср – Сарсанская, Тн – Тангнарынская, Ыг – Ыгыаттинская); *5* – разломы (А – Ангаро-Вилюйский, Б – Баппагайский, В – Верхнесинский, К – Кемпендяйский, Н – Нюрбинский); *6* – границы распространения девонско-нижнекаменноугольных пород; *7* – мощность (км) верхнедевонско-нижнекаменноугольных отложений; *8* – среднепалеозойские дайки и силлы долеритов и габбро-долеритов; *9* – среднепалеозойские хонолиты габбро-долеритов (*а*) и штоки сиенит-порфиров (*б*); *10* – среднепалеозойские базальтовые трубки взрыва; *11* – Малоботуобинское (М) и Накынское (Н) кимберлитовые поля; *12* – имеющиеся $^{40}Ar/^{39}Ar$ и U-Pb определения возраста (млн лет) среднепалеозойских даек, силлов и базальтов по [5; 6; 9; 10; 15–17]. Черными кружками показаны места отбора образцов. На врезке обозначен контур изучаемого участка

Якутско-Вилюйской изверженной провинции с радиальной системой рифтовых впадин, разломов и дайковых поясов [9; 15]. Дайковые пояса особенно масштабно проявились в обрамлении рифта и известны как Вилюйско-Мархинский на северо-западе и рассматриваемый Чаро-Синский на юго-востоке (рис. 1). Наряду с дайковыми поясами парагенетически связан кимберлитовый магматизм, который наиболее интенсивно проявился в пределах Вилюйско-Мархинского дайкового пояса (Мирнинское и Накынское поля алмазоносных кимберлитов) [4; 5].

Детальные петролого-геохимическая и изотопно-геохронологическая характеристики пород Чаро-Синского дайкового пояса рассмотрены в ряде публикаций [5–7; 9; 10; 13; 15–17]. Тем не менее, несмотря на их значительное количество, вопросы петрологии и возраста интрузивов в среднем течении р. Лена (реки Бол. Патома, Марха и Малыкан) подробно не исследовались. В настоящей работе приводится петролого-геохимическая характеристика и результаты геохронологических исследований пород Чаро-Синского дайкового пояса в пределах рассматриваемой территории.

Геологическая характеристика. Чаро-Синский дайковый пояс расположен на юго-восточном плече Вилюйского рифта. Размещение магматических образований контролируется системами крупных разломов северо-восточного простирания (10°–40°) протяженностью более 500 км и шириной до 230 км [6]. В пределах рассматриваемой территории магматические образования представлены преимущественно дайками, реже встречаются небольшие силлы, штоки и хонолиты. Интрузивы сложены долеритами, габбро-долеритами, кварцевыми долеритами и кварцевыми габбро-долеритами, реже встречаются монцонит-порфиры, кварцевые монцонит-порфиры, сиениты и сиенит-порфиры. Тела прорывают толщи кембрия, ордовика и силура, в единичных случаях среднедевонские отложения. На северо-востоке дайковый пояс перекрыт юрскими отложениями. Протяженность магматических тел 1–50 км, в редких случаях до 250 км (Туолбинская дайка, картируемая вдоль р. Туолба); мощность варьируется от 5 до 60 м, реже до 250 м в телах сложного строения. В магнитном поле дайкам соответствуют протяженные положительные линейные аномалии различной контрастности [6; 7].

Дайки распределены неравномерно, образуя сближенные группы и пучки. Характерно кулисообразное расположение отдельных даек в разрывных нарушениях [6; 9]. По характеру внедрения интрузивы преимущественно однофазные, недифференцированные (либо слабодифференцированные), сложенные долеритами и габбро-долеритами. В многофазных телах встречаются более кислые и щелочные породы. В телах сложного строения выделяются три фазы внедрения (рис. 2): долериты и габбро-долериты с средне-мелкозернистой офитовой, пойкилоофитовой, габбровой микроструктурой и массивной текстурой; умереннощелочные кварцевые долериты, кварцевые габбро-долериты, кварцевые монцонит-порфиры с габбровой, офитовой, порфировой микроструктурой и массивной текстурой; сиениты и сиенит-порфиры с гипидиоморфнозернистой, порфировой, аплитовой микроструктурой и массивной текстурой. Краевые части интрузивных тел сложены микродолеритами [7].

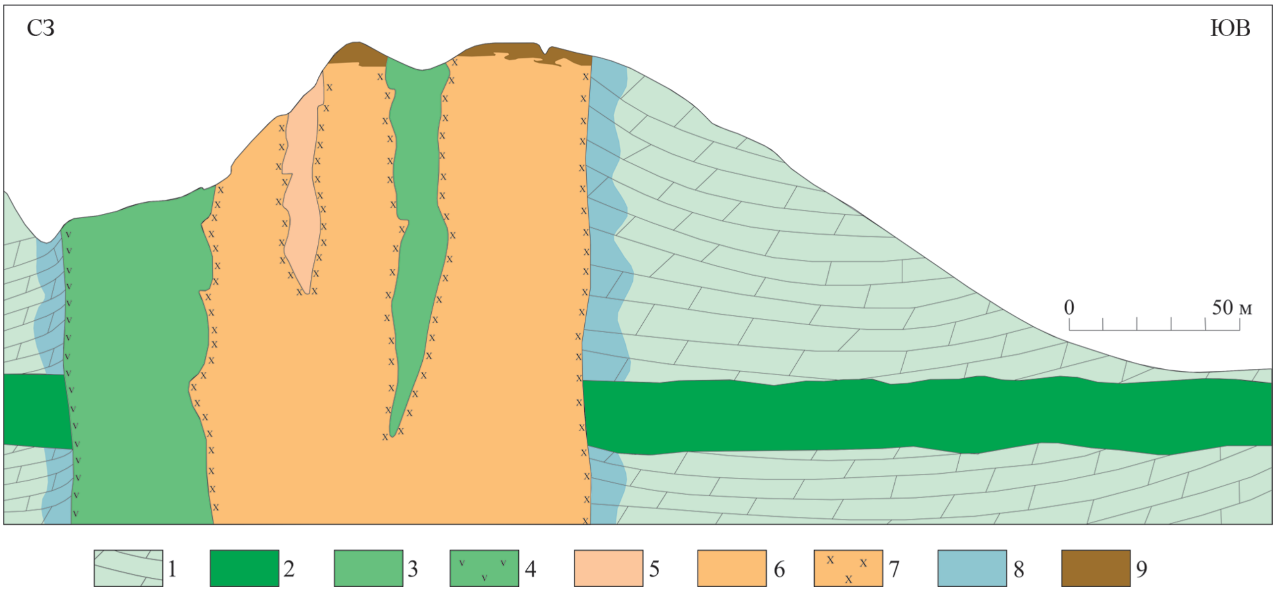

Рис. 2. Схема геологического строения многофазного интрузива в устье р. Нуччалы-Юрях (правый приток р. Олёкма) [7]

1 – известняки и доломиты (чарская свита, нижний кембрий); *2* – офитовые долериты; *3* – кварцевые габбро-долериты; *4* – мелкозернистые кварцевые габбро-долериты; *5* – кварцевые монцонит-порфиры; *6* – кварцевые сиенит-порфиры; *7* – мелкозернистые кварцевые сиенит-порфиры; *8* – зона контактовой мраморизации известняков и доломитов; *9* – реликты глинистой коры выветривания по магматическим образованиям

Методы исследований. Аналитические исследования выполнены в Центральной аналитической лаборатории и Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург). Химический состав пород на петрогенные элементы осуществлен рентгеноспектральным флюоресцентным методом (XRF) на приборе ARL 9800. Определение микроэлементов произведено масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS) на приборе ELAN 6100 DRC.

Возраст циркона устанавливался локальным U-Pb методом на ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP II по стандартной методике [19]. Для выбора точек анализа использовались изображения зерен минерала в проходящем свете, в режиме катодолюминесценции (CL) и в обратно-отраженных электронах (BSE). Результаты U-Pb датирования обработаны с помощью программы Isoplot [14].

Петрографическая характеристика пород. Приведена краткая характеристика основных разновидностей пород Чаро-Синского дайкового пояса.

Долериты и кварцевые долериты характеризуются средне-мелкозернистой офитовой и пойкилоофитовой микроструктурой с массивной текстурой. Они состоят из (%): плагиоклаза (лабрадор) – 40–45, клинопироксена (авгит и диопсид) – 40–45, оливина < 10 и кварца < 5 (рис. 3, *а*). Вторичные минералы представлены цоизитом, иддингситом, хлоритом, биотитом и серицитом; акцессорные минералы – апатитом, титанитом и цирконом. Плагиоклаз присутствует в виде длиннопризматических и таблитчатых сдвойникованных зерен размером до 3 мм. Клинопироксен выражен таблитчатыми зернами (0,2–1,5 мм), которые частично замещены роговой обманкой (уралит), биотитом и хлоритом. Оливин, встречающийся в виде округлых изометричных зерен, обычно разрушен и замещен иддингситом и хлоритом. Кварц занимает межзерновое пространство в виде ксеноморфных зерен до одного миллиметра.

Габбро-долериты и кварцевые габбро-долериты обладают схожим с долеритами составом, но отличаются от них четко выраженной габбровой и габбро-офитовой микроструктурой (рис. 3, *б*). Породы состоят из (%): плагиоклаза (лабрадор) – 55–60, клинопироксена (авгит и диопсид) – 15–27, амфибола (роговая обманка – уралит) < 10 и кварца < 5. Вторичные минералы представлены цоизитом, хлоритом, биотитом, серицитом; акцессорные минералы – апатитом, титанитом и цирконом. Рудные минералы (магнетит, ильменит) образуют кристаллы таблитчатой или игольчатой форм, приуроченные в основном к измененным и замещенным участкам плагиоклаза и клинопироксена. Плагиоклаз составляет основную массу породы и образует крупные лейсты (2–3 мм), реже изометрично-полигональные индивиды. Фенокристы плагиоклаза полисинтетически сдвойникованы, при этом двойниковые швы обладают более или менее четкой выраженностью. Клинопироксен встречается как в виде призматических и таблитчатых индивидов, так и ксеноморфных зерен размером от 1 до 2,5 мм. Амфибол развивается по клинопироксену, образуя каймы вокруг зерен, а также присутствует в виде мелких (0,2–0,4 мм) зерен и их скоплений.

Монцонит-порфиры и кварцевые монцонит-порфиры характеризуются гипидиоморфнозернистой, порфировой структурой и массивной текстурой, которые состоят из (%): плагиоклаза (лабрадор-андезин) – 55–60, амфибола (роговая обманка – актинолит) – < 30, клинопироксена (авгит и диопсид) – < 5 и кварца до 5 (рис. 3, *в*). Вторичные минералы представлены хлоритом, эпидотом, палагонитом; акцессорные минералы – апатитом, магнетитом и ильменитом. Породы не образуют самостоятельных интрузивов, однако участвуют в качестве второй фазы внедрения при формировании многофазных трещинных даек наряду с умереннощелочными кварцевыми габбро-долеритами. Контакт между монцонит-порфирами и габбро-долеритами проявляется в относительном уменьшении зернистости первых и лейкократизации вторых, а также отмечаются шлиры пегматоидных габбро-долеритов. Все это свидетельствует о внедрении монцонитоидного расплава в не полностью раскристаллизованные габбро-долериты. Клинопироксен практически замещен амфиболом. Для пород свойственно постоянное присутствие калиевого полевого шпата (микроклин и ортоклаз), который образует ксеноморфные выделения в основной массе (до 15 %) либо формирует микропегматитовые сростки с кварцем.

Сиениты и сиенит-порфиры отличаются гипидиоморфнозернистой, порфировой структурой, а в краевых частях интрузивы – аплитовой, текстура массивная (рис. 3, *г*). Породы состоят из (%): калиевого полевого шпата (микроклин и ортоклаз) – 80–90, кварца – 2–7, биотита – 1–7, амфибола (роговая обманка – актинолит) < 5. Вторичные минералы представлены хлоритом, эпидотом, палагонитом, кальцитом; акцессорные – апатитом и цирконом. Основная масса породы сложена идиоморфными зернами калиевых полевых шпатов и ксеноморфных зерен кварца. Порфировые выделения, составляющие 6–12 % объема породы, выражены коротко-таблитчатыми кристаллами калиевых полевых шпатов.

Петрохимические особенности пород. На TAS-диаграмме породы Чаро-Синского дайкового пояса образуют вытянутый тренд от габбро и монцо-габбро до сиенитов. При этом долериты и габбро-долериты локализуются преимущественно в области монцо-габбро, частично попадая в область, соответствующую габбро, монцониты – в поле монцодиоритов, а сиениты закономерно – в поле состава сиенитов. На диаграмме $K_2O–SiO_2$ долериты и габбро-долериты находятся в поле

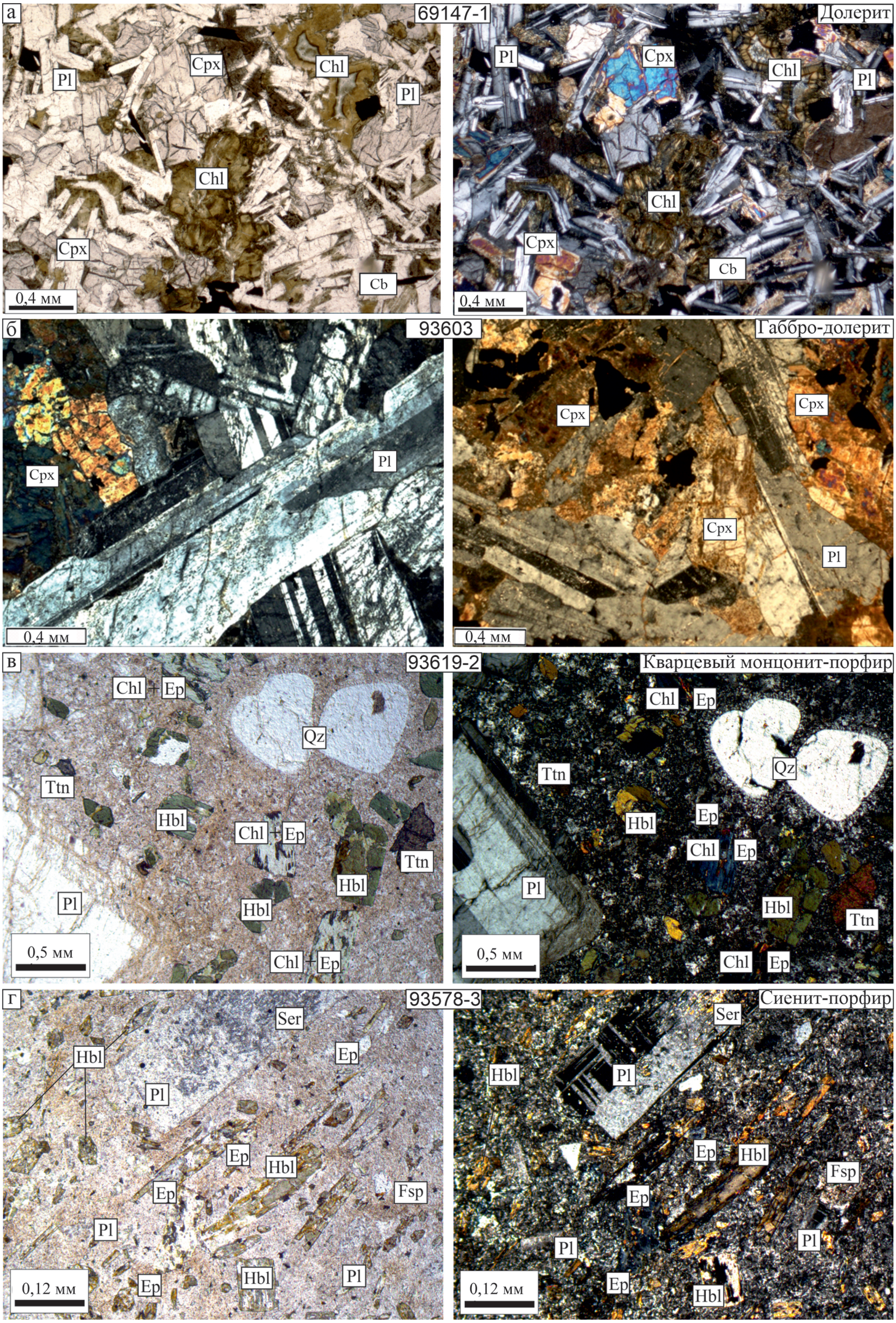
а
69147-1
Долерит
Pl
Cpx
Chl
Pl
Chl
Cpx
Cb
0,4 мм
Pl
Cpx
Chl
Pl
Chl
Cpx
Cb
0,4 мм
б
93603
Габбро-долерит
Cpx
Pl
0,4 мм
Cpx
Cpx
Cpx
Pl
0,4 мм
в
93619-2
Кварцевый монцонит-порфир
Chl + Ep
Qz
Ttn
Hbl
Chl + Ep
Ttn
Hbl
Pl
Hbl
Chl + Ep
0,5 мм
Chl Ep
Ttn
Qz
Hbl
Ep
Chl Ep
Pl
Hbl
Ttn
Chl Ep
0,5 мм
г
93578-3
Сиенит-порфир
Ser
Hbl
Ep
Pl
Ep
Hbl
Ep
Fsp
Pl
Ep
Hbl
Pl
0,12 мм
Ser
Hbl
Pl
Ep
Hbl
Fsp
Ep
Pl
Pl
Ep
Hbl
0,12 мм

Рис. 3. Микрофотографии основных разновидностей магматических пород Чаро-Синского дайкового пояса (слева – без анализатора, справа – с анализатором)

а – долерит, *б* – габбро-долерит, *в* – кварцевый монцонит-порфир, *г* – сиенит-порфир. Pl – плагиоклаз (лабрадор-андезин), Fsp – калиевый полевой шпат, Cpx – клинопироксен (авгит, диопсид), Hbl – роговая обманка, Chl – хлорит, Cb – карбонат, Ttn – титанит, Qz – кварц, Ep – эпидот, Ser – серицит

высококалиевой, монцонит-порфиры соответствуют умереннокалиевой, а сиениты локализуются в области шошонитовой серий.

По содержанию большинства петрогенных элементов (табл. 1) долериты и габбро-долериты значимо не различаются между собой. Содержания SiO_2 в них варьируются (мас. %): 47,4–48,8 при среднем значении 47,9, а сумма щелочей $Na_2O + K_2O$ = 3,52–5,71 при среднем 4,90. При этом наблюдается преобладание натрия над калием – среднее отношение Na_2O/K_2O = 1,63. Породы характеризуются относительно низкими содержаниями MgO = 3,40–5,25 мас. %. Средние содержания (мас. %): TiO_2 ~ 3,40, Al_2O_3 ~ 14,1, MnO ~ 0,18, CaO ~ 8,60 и P_2O_5 ~ 0,57.

Химический состав монцонит-порфиров и сиенитов изменяется в незначительных пределах. Так, например, содержания (мас. %): SiO_2 в монцонит-порфирах 51,8–52,4 при среднем значении 52,1, а сумма щелочей $Na_2O + K_2O$ = = 5,39–5,76 при среднем 5,57. Породы характеризуются заметным преобладанием натрия над калием (в среднем 3,04). Содержания (мас. %): TiO_2 2,67–2,71, Al_2O_3 12,2–12,4, MnO 0,23–0,25, CaO 6,28–6,73, P_2O_5 0,62–0,64. Состав сиенитов отличается высоким содержанием калия – 6,49–6,59 мас. % при вариациях кремнезема в диапазоне 62,3–62,7 мас. %. Отмечается преобладание калия над натрием (K_2O/Na_2O = 1,93–2,26) при сумме щелочей от 9,50 до 9,85 мас. %. Для сиенитов характерны невысокие содержания (мас. %): TiO_2 ~ 1,36, MgO ~ 2,43, MnO ~ 0,035 и P_2O_5 ~ 0,33 и средние – Al_2O_3 ~ 11,4, $Fe_2O_{3общ}$ ~ 8,39, CaO ~ 1,85.

Распределение REE в породах дайкового пояса (рис. 4, *а*) обладает дифференцированным характером: отношение La/Yb = 9,02–13,1 в долеритах и габбро-долеритах, La/Yb = 7,60–9,07 в монцонит-порфирах, La/Yb = 18,4–19,4 в сиенитах. Суммарное содержание REE в долеритах и габбро-долеритах – 128,9–165,4 ppm; в монцонит-порфирах – 218,3–219,5 ppm, в сиенитах – 272,8–300,1 ppm. В долеритах и габбро-долеритах (образцы 93538, 93561, 93603 и 93617-1) слабо проявлена отрицательная Eu-аномалия (Eu/Eu* = = 0,74–0,92), в то время как образцы 69147-1 и 93624 характеризуются наличием слабовыраженной положительной Eu-аномалией (Eu/Eu* = = 1,13–1,36). В монцонит-порфирах отмечается умеренная отрицательная Eu-аномалия (Eu/Eu* = 0,71–0,81), а в сиенитах отсутствует (Eu/Eu* = 1,02; обр. 93578-3) или умеренно проявлена отрицательная Eu-аномалия (Eu/Eu* = = 0,71; обр. 93578-5). Во всех породах установлены низкие содержания Th (3,39–15,7 ppm) и U (0,74–3,35 ppm), величина отношения Th/U составляет в среднем 4,83. В распределении редких элементов (рис. 4, *б*) различимы колебания в концентрациях мобильных крупноионных литофильных элементов – Rb и Sr, а содержания менее подвижных высокозарядных элементов (Y, Zr, Nb и Ta) сравнительно выдержаны.

Результаты U-Pb исследования циркона. U-Pb изотопное исследование циркона выполнено по монофракциям этого минерала из долеритов (22 определения для двух образцов), габбро-долеритов (24 определения для двух образцов) и сиенитов (12 определений для одного образца – Олёкминский шток) (табл. 2). Исследуемая коллекция пород, из которой был выделен циркон для дальнейшего датирования Чаро-Синского дайкового пояса, не включает всего их разнообразия из-за отсутствия (или необнаружения) циркона в изученных образцах. Тем не менее данная выборка позволяет отразить возраст и последовательность образования пород исследуемого дайкового пояса.

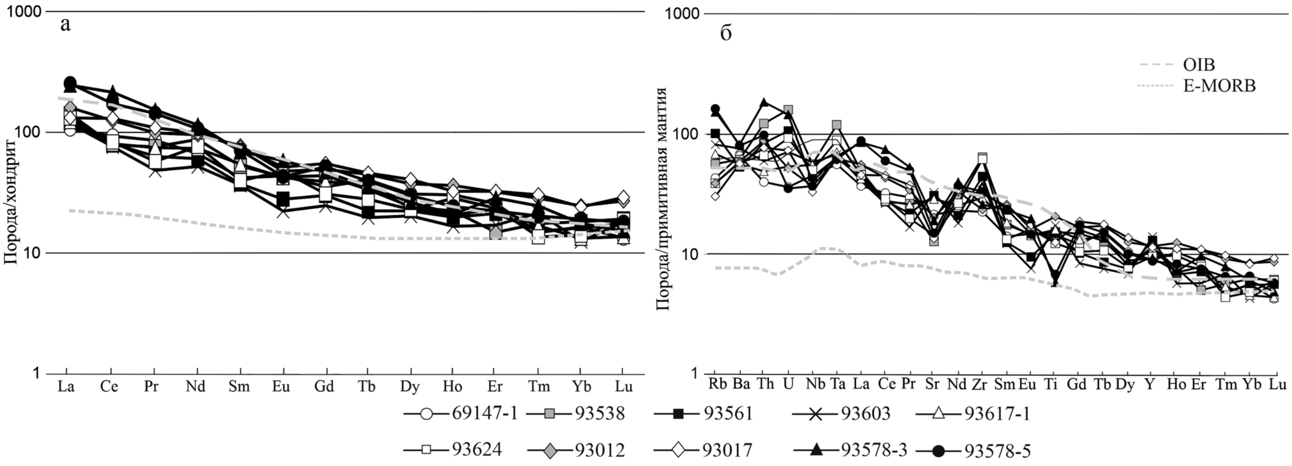

Рис. 4. Нормированные распределения [18] редкоземельных (*а*) и редких элементов (*б*) в породах Чаро-Синского дайкового пояса

Таблица 1

Химический состав пород Чаро-Синского дайкового пояса

Элементы	Образцы									
	69147-1	93538	93561	93603	93617-1	93624	93012	93017	93578-3	93578-5
	Долериты			Габбро-долериты			Монцонит-порфиры		Сиениты	
Содержание петрогенных оксидов, мас. %										
SiO_2	48,4	47,6	47,5	48,8	47,4	47,7	52,4	51,8	62,7	62,3
TiO_2	3,13	3,32	3,68	3,23	3,75	3,48	2,67	2,71	1,26	1,47
Al_2O_3	15,2	13,2	14,3	14,7	12,9	14,6	12,4	12,2	11,3	11,6
Fe_2O_3	5,51	6,51	6,24	6,84	5,99	6,03	6,37	6,04	3,45	3,52
FeO	6,66	9,06	7,18	6,94	8,97	7,18	7,52	7,13	4,80	5,01
MnO	0,13	0,26	0,16	0,15	0,17	0,24	0,23	0,25	0,04	0,03
MgO	3,40	5,25	4,52	3,44	4,31	4,62	3,58	3,65	2,29	2,57
CaO	9,33	8,10	8,61	7,58	9,24	8,71	6,28	6,73	1,63	2,08
Na_2O	3,50	2,23	3,40	3,22	2,46	3,29	4,52	3,83	2,91	3,36
K_2O	1,93	1,29	1,87	2,49	1,91	1,80	1,24	1,56	6,59	6,49
P_2O_5	0,49	0,45	0,63	0,79	0,53	0,56	0,62	0,64	0,36	0,31
LOI	0,96	1,30	1,77	0,60	0,97	1,78	2,20	3,12	2,67	1,36
Сумма	99,4	99,6	99,9	99,6	99,6	100	100	99,7	100	100
Na_2O+K_2O	5,43	3,52	5,27	5,71	4,37	5,09	5,76	5,39	9,50	9,85
K_2O/Na_2O	0,55	0,58	0,55	0,77	0,78	0,55	0,27	0,41	2,26	1,93
Содержание элементов-примесей, ppm										
Sc	24,6	22,2	30,4	26,5	34,3	29,7	23,4	26,8	15,4	18,2
V	239	103	318	220	355	264	265	318	141	128
Cr	10,4	8,69	16,1	2,41	21,3	13,2	6,26	9,87	19,4	17,6
Co	21,3	10,3	15,8	27,3	30,3	11,5	31,5	33,7	17,3	18,1
Ni	17,3	9,80	23,3	11,4	18,8	12,6	12,3	17,9	9,08	10,4
Rb	27,3	35,8	64,2	51,9	43,4	24,7	24,7	19,2	97,0	103
Sr	451	269	648	686	607	304	426	285	401	316
Y	40,6	51,9	59,2	63,5	50,3	43,5	53,1	51,8	42,1	39,8
Zr	252	717	496	439	330	691	263	354	290	371
Nb	32,2	40	31,4	41,5	39,4	35,7	26,2	23,5	28,4	26,3
Ba	460	430	372	530	390	406	412	396	571	559
La	25,4	33,9	29,8	28,0	29,2	31,3	38,2	31,4	58,5	60,3
Ce	57,3	48,3	49,5	46,8	49,3	51,2	76,7	80,2	132	106
Pr	8,21	7,26	6,04	4,63	7,14	5,47	9,45	10,4	14,6	13,7
Nd	31,2	41,1	28,4	24,5	34,5	35,9	44,8	46,6	54,0	50,2
Sm	6,47	8,08	5,76	5,62	8,39	6,12	11,9	11,5	10,7	10,9
Eu	2,54	2,51	1,63	1,30	2,46	2,78	2,78	3,01	3,40	2,51
Gd	7,32	9,02	6,21	5,11	8,07	6,38	10,2	11,4	9,69	10,7
Tb	1,52	1,26	0,84	0,74	1,38	1,05	1,69	1,73	1,33	1,48
Dy	7,89	6,19	5,72	5,19	6,01	5,88	9,56	10,4	6,72	7,65
Ho	1,73	1,27	1,13	0,95	1,18	1,62	2,07	1,85	1,20	1,38
Er	4,27	2,48	3,54	2,84	3,87	3,92	5,34	5,41	4,77	3,72
Tm	0,38	0,45	0,39	0,55	0,43	0,35	0,73	0,78	0,63	0,52
Yb	2,82	3,11	2,76	2,14	2,27	2,41	4,21	4,13	3,01	3,28
Lu	0,34	0,49	0,45	0,46	0,35	0,48	0,69	0,74	0,39	0,46
Ta	2,29	4,89	2,60	2,77	2,89	3,63	2,56	2,63	2,68	2,52
Th	3,39	10,4	7,14	5,05	4,16	5,65	7,47	6,53	15,7	8,32
U	0,76	3,35	2,23	1,49	1,13	1,94	1,09	1,53	3,05	0,74
ΣREE	157,4	165,4	142,2	128,9	154,5	154,9	218,3	219,5	300,1	272,8
La/Yb	9,02	10,9	10,8	13,1	12,8	13,0	9,07	7,60	19,4	18,4
Eu/Eu*	1,13	0,90	0,83	0,74	0,92	1,36	0,77	0,81	1,02	0,71

Примечание. $Eu/Eu^* = Eu_N/sqrt(Sm_N \times Gd_N)$.

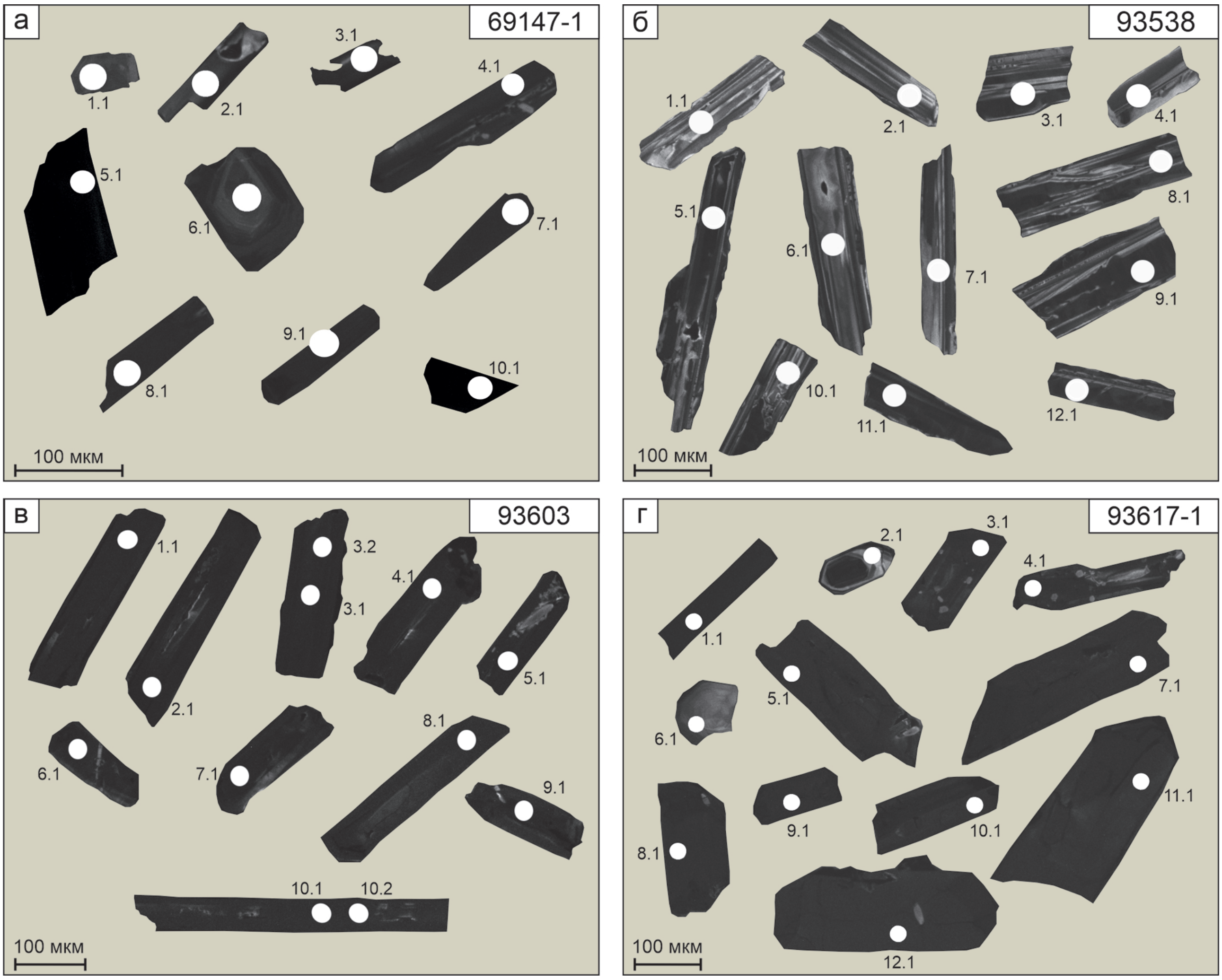

Рис. 5. Изображение изученных зерен циркона из долеритов (*а, б*) и габбро-долеритов (*в, г*) Чаро-Синского дайкового пояса в режиме CL

Кружками отмечено положение кратеров (диаметр около 20 мкм) при изотопно-геохимическом исследовании

Долериты. U-Pb изотопное датирование долеритов проводилось по циркону из обр. 69147-1 и обр. 93538 (рис. 5, *а*, *б*; 6, *а*, *б*). Циркон из обр. 69147-1 в основном представлен удлиненными призматическими кристаллами (50–150 мкм по удлинению, к. у. 1,5–5) и их обломками; реже зернами изометричной формы с неровными границами. В CL-изображении циркон практически черного цвета при полном отсутствии признаков ростовой зональности, за исключением одной точки 6.1 (рис. 5, *а*). U-Pb возраст по 6 точкам определен как 364 ± 3 млн лет (СКВО = 0,66; рис. 6, *а*). Содержание U и Th высокое, в среднем 1246 и 2735 ppm соответственно, отношение Th/U составляет в среднем 2,25. Для единичных зерен циркона (точки 1.1 и 6.1) получены значения древнего U-Pb возраста 1863 ± 17 и 1890 ± ± 16 млн лет. В изучаемых точках содержание U и Th низкое, в среднем 145 и 75,7 ppm соответственно, отношение Th/U в среднем равняется 0,54. Палеопротерозойский возраст совпадает со временем формирования структуры Сибирского кратона (2,10–1,84 млрд лет), и вероятно, циркон с древним возрастом был захвачен породами Чаро-Синского дайкового пояса из фундамента [2].

В обр. 93538 циркон представлен коротко- и длиннопризматическими кристаллами (100–420 мкм по удлинению, к. у. 1,5–5) с корродированными границами. На изображении в CL зерна циркона имеют темно-серый оттенок с умеренным свечением и тонкоритмичной зональностью, часто нарушенной (рис. 5, *б*). Конкордантный возраст по всем 12 точкам составляет 374 ± 4 млн лет (СКВО = 0,26; рис. 6, *б*). Содержание U и Th в среднем не велико – 467 и 231 ppm соответственно, величина отношения Th/U – в среднем 0,61.

Габбро-долериты. Исследование циркона из габбро-долеритов проведено по материалу из двух образцов: 93603 и 93617-1 (рис. 5, *в*, *г*; 6, *в*, *г*). Циркон из обр. 93603 образует коротко- и длиннопризматические кристаллы (150–500 мкм по удлинению, к. у. 2–7), часто с изъеденными границами и слабовыраженной пятнистой окраской в темных тонах в CL-изображении (рис. 5, *в*). U-Pb возраст по всем 12 точкам составляет

Таблица 2

Данные U-Pb датирования пород Чаро-Синского дайкового пояса по циркону

Точка изме-рения	$^{206}Pb_c$, %	Содержание, ppm			$^{232}Th/^{238}U$	$^{206}Pb/^{238}U$ возраст, млн лет		Изотопные отношения								Rho
		U	Th	$^{206}Pb^*$				$^{238}U/^{206}Pb^*$	±, %	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	±, %	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±, %	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±, %	
Обр. 69147-1																
1.1	0,06	126	74,5	36,3	0,60	1863	± 17	3,0	1,1	0,1128	0,7	5,213	1,3	0,33520	1,1	0,84
2.1	0,24	234	183	10,8	0,81	337	± 3	19	1,0	0,0521	2,8	0,385	3,0	0,05363	1,0	0,34
3.1	3,16	1038	2438	54,4	2,43	370	± 6	17	1,7	0,0553	6,6	0,450	6,8	0,05900	1,7	0,26
4.1	0,06	943	1517	47,0	1,66	363	± 3	17	0,9	0,0530	1,1	0,424	1,4	0,05791	0,9	0,63
5.1	0,05	1352	2103	67,1	1,61	362	± 3	17	0,9	0,0530	0,8	0,422	1,2	0,05771	0,9	0,72
6.1	–	164	77,0	47,9	0,49	1890	± 16	3,0	1,0	0,1123	0,6	5,276	1,1	0,34070	1,0	0,87
7.1	0,04	1507	3103	75,2	2,13	364	± 3	17	0,9	0,0535	0,7	0,428	1,1	0,05802	0,9	0,77
8.1	0,00	1395	2602	74,8	1,93	390	± 3	16	0,9	0,0536	0,8	0,461	1,2	0,06245	0,9	0,72
9.1	0,18	1524	4243	77,9	2,88	372	± 4	17	1,0	0,0544	1,3	0,446	1,6	0,05938	1,0	0,61
10.1	–	1114	3010	55,5	2,79	364	± 4	17	1,0	0,0544	0,8	0,435	1,3	0,05805	1,0	0,81
Обр. 93538																
1.1	–	188	158	9,94	0,87	386	± 7	16	2,0	0,0540	2,9	0,459	3,5	0,06170	2,0	0,56
2.1	0,07	343	256	17,3	0,77	368	± 7	17	1,9	0,0537	2,3	0,435	3,0	0,05870	1,9	0,64
3.1	0,09	560	238	28,4	0,44	369	± 7	17	1,9	0,0535	1,8	0,436	2,6	0,05900	1,9	0,71
4.1	0,08	302	140	15,7	0,48	379	± 7	16	1,9	0,0547	2,4	0,457	3,1	0,06060	1,9	0,62
5.1	0,05	935	445	47,7	0,49	371	± 7	17	1,9	0,0537	1,4	0,439	2,4	0,05930	1,9	0,81
6.1	–	161	211	8,34	1,35	378	± 8	17	2,1	0,0542	3,2	0,451	3,8	0,06040	2,1	0,55
7.1	0,57	225	109	12,9	0,50	413	± 8	15	2,0	0,0543	4,5	0,495	4,9	0,06610	2,0	0,41
8.1	0,10	314	198	16,4	0,65	379	± 7	16	1,9	0,0540	2,4	0,451	3,1	0,06060	1,9	0,62
9.1	0,05	965	462	48,9	0,49	369	± 6	17	1,8	0,0546	1,4	0,443	2,3	0,05890	1,8	0,80
10.1	0,53	208	130	10,9	0,65	380	± 7	16	1,9	0,0524	4,7	0,439	5,1	0,06080	2,0	0,38
11.1	0,04	835	256	42,2	0,32	369	± 6	17	1,8	0,0553	1,4	0,446	2,4	0,05890	1,8	0,77
12.1	0,06	565	175	28,8	0,32	371	± 7	17	1,8	0,0553	1,7	0,448	2,6	0,05920	1,8	0,71
Обр. 93603																
1.1	0,13	1569	2370	83,7	1,56	388	± 4	16	1,0	0,0536	1,1	0,458	1,5	0,06198	1,0	0,68
2.1	0,24	3299	6752	183	2,12	403	± 4	15	1,0	0,0537	0,9	0,477	1,3	0,06446	1,0	0,75
3.1	0,18	2065	4420	111	2,21	392	± 4	16	1,0	0,0540	1,1	0,466	1,5	0,06267	1,0	0,69
3.2	0,12	1457	2422	78,3	1,72	391	± 4	16	1,1	0,0539	1,2	0,464	1,6	0,06246	1,1	0,67
4.1	0,19	2718	5375	153	2,04	407	± 4	15	1,0	0,0533	0,9	0,480	1,4	0,06524	1,0	0,74
5.1	4,47	1375	4587	76,3	3,45	386	± 4	16	1,1	0,0536	4,7	0,456	4,8	0,06172	1,1	0,22

6.1	0,16	2503	4488	136	1,85	394	± 4	16	1,0	0,0535	1,0	0,466	1,4	0,06311	1,0	0,73
7.1	0,10	1743	2684	92,3	1,59	385	± 4	16	1,0	0,0537	1,0	0,456	1,5	0,06157	1,0	0,70
8.1	0,17	1672	3535	91,7	2,18	398	± 4	16	1,0	0,0536	1,2	0,471	1,6	0,06376	1,0	0,64
9.1	0,08	4767	5906	265	1,28	404	± 4	15	10	0,0540	0,6	0,482	1,2	0,06473	1,0	0,86
10.1	0,13	3308	4758	185	1,49	405	± 4	15	1,0	0,0534	0,8	0,477	1,3	0,06487	1,0	0,78
10.2	0,08	3047	4152	165	1,41	394	± 4	16	1,0	0,0539	0,8	0,468	1,3	0,06300	1,0	0,80
Обр. 93617-1																
1.1	0,15	1341	2861	68	2,20	369	± 1	17	0,4	0,0537	2,0	0,436	2,1	0,05891	0,4	0,20
2.1	4,66	258	142	9,46	0,57	257	± 3	24	1,1	0,0542	11	0,304	11	0,04069	1,1	0,10
3.1	0,02	1578	3115	79,8	2,04	369	± 1	17	0,4	0,0541	1,0	0,439	1,0	0,05885	0,4	0,33
4.1	0,58	1848	1616	93,5	0,90	367	± 1	17	0,4	0,0529	1,5	0,427	1,5	0,05855	0,4	0,25
5.1	0,02	2435	6442	130	2,73	388	± 1	16	0,3	0,0534	0,8	0,457	0,9	0,06207	0,3	0,34
6.1	0,00	223	68,7	12,9	0,32	420	± 3	15	0,8	0,0548	2,4	0,508	2,5	0,06726	0,8	0,31
7.1	0,13	2038	7245	107	3,67	382	± 1	16	0,4	0,0528	1,0	0,444	1,1	0,06109	0,4	0,34
8.1	0,11	2390	6487	125	2,81	381	± 1	16	0,3	0,0527	0,9	0,442	0,9	0,06094	0,3	0,32
9.1	0,02	2243	5995	115	2,76	372	± 1	17	0,3	0,0539	0,8	0,442	0,9	0,05947	0,3	0,34
10.1	0,03	1045	2595	52,6	2,57	367	± 1	17	0,4	0,0539	1,2	0,435	1,3	0,05852	0,4	0,32
11.1	0,06	2076	3657	106	1,82	372	± 1	17	0,4	0,0537	0,9	0,439	1,0	0,05934	0,4	0,37
12.1	0,16	1379	2919	69,7	2,19	368	± 1	17	0,4	0,0539	1,3	0,437	1,4	0,05876	0,4	0,27
Обр. 93578-3																
1.1	0,98	37,6	30,0	2,03	0,82	388	± 10	16	2,6	0,0513	11	0,440	12	0,06210	2,6	0,22
2.1	0,37	135	125	6,71	0,95	361	± 7	17	2,0	0,0542	4,8	0,430	5,2	0,05760	2,0	0,39
3.1	1,55	32,7	19,2	1,72	0,61	377	± 11	17	3,1	0,0599	14	0,498	15	0,06030	3,1	0,21
4.1	1,41	2186	959	39,4	0,45	132	± 2	48	1,8	0,0466	4,3	0,133	4,7	0,02068	1,8	0,39
5.1	1,07	72,8	68,1	3,73	0,97	369	± 8	17	2,3	0,0552	14	0,449	14	0,05900	2,3	0,17
6.1	0,00	69,4	49,7	3,46	0,74	364	± 8	17	2,3	0,0578	5,5	0,463	5,9	0,05810	2,3	0,38
7.1	0,54	144	141	7,37	1,01	370	± 7	17	2,0	0,0563	5,2	0,458	5,6	0,05910	2,0	0,37
8.1	0,66	117	107	6,02	0,94	372	± 8	17	2,1	0,0555	8,2	0,455	8,5	0,05950	2,1	0,25
9.1	1,43	90,3	89,2	4,70	1,02	373	± 9	17	2,4	0,0508	12	0,418	13	0,05960	2,4	0,19
10.1	2,17	61,0	60,4	3,17	1,02	370	± 9	17	2,4	0,0521	12	0,425	12	0,05910	2,4	0,20
11.1	1,53	50,3	40,0	2,64	0,82	377	± 9	17	2,5	0,0589	11	0,489	12	0,06020	2,5	0,22
12.1	0,96	142	170	7,31	1,24	371	± 7	17	2,1	0,0536	7,5	0,439	7,8	0,05930	2,1	0,26

П р и м е ч а н и я. Pb_c и Pb^* – обыкновенный и радиогенный свинец. Ошибки при калибровке стандарта 0,37 % (обр. 69147-1), 0,50 % (обр. 93538, 93578-3) и 0,43 % (обр. 93603), 0,24 % (обр. 93617-1) не включены в указанные выше ошибки, но требуются при сравнении данных из разных источников. Коррекция на обыкновенный свинец при расчете возраста по измеренному ^{204}Pb. Rho – коэффициент корреляции ошибок.

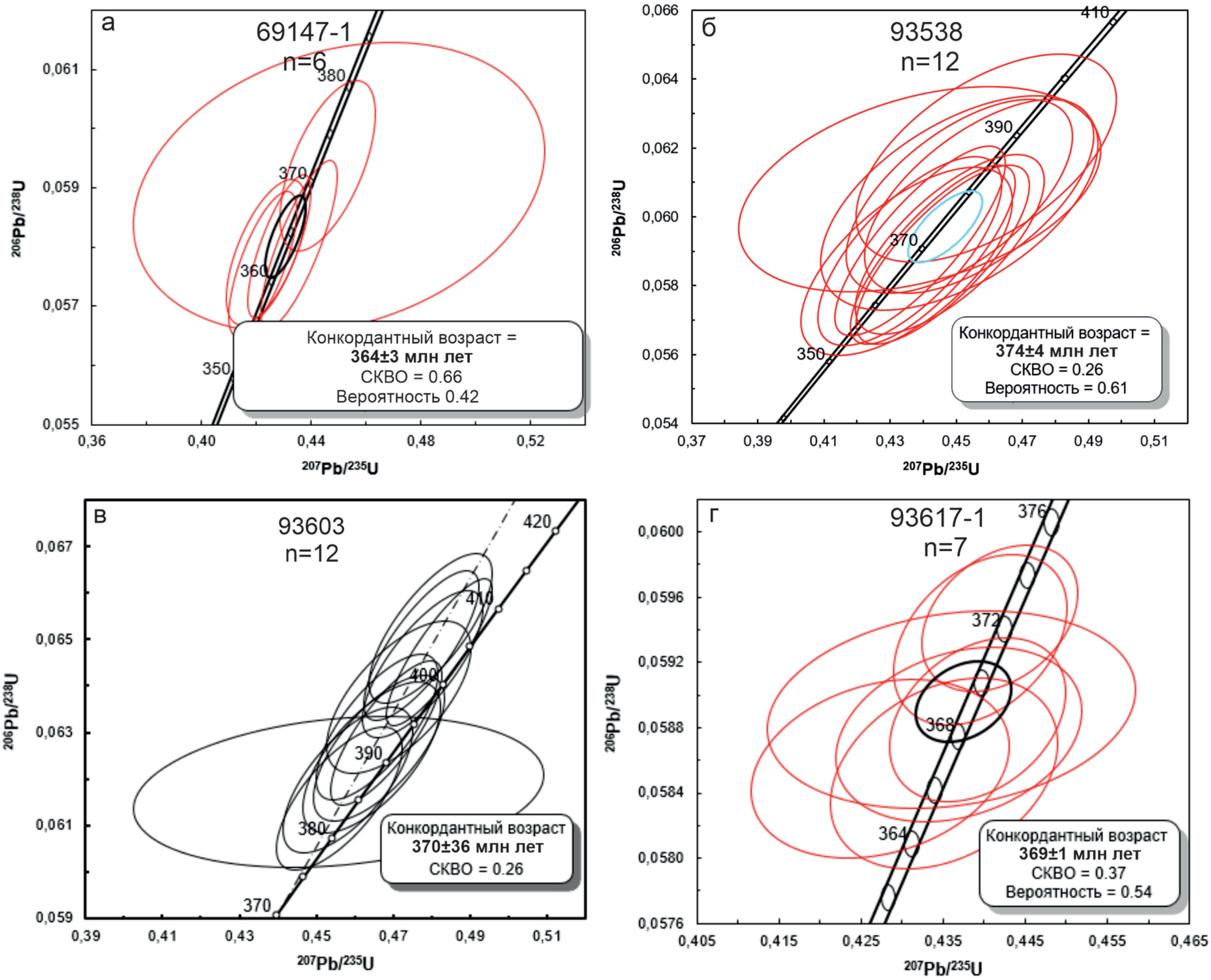

Рис. 6. Графики с конкордией для циркона из долеритов (*а, б*) и габбро-долеритов (*в, г*) Чаро-Синского дайкового пояса

370 ± 36 млн лет (СКВО = 0,26; рис. 6, *в*). Содержание U и Th аномально высокое, в среднем – 2460 и 4287 ppm соответственно, отношение Th/U в среднем – 1,91.

В обр. 93617-1 циркон в основном представлен обломками длиннопризматических кристаллов (100–350 мкм по удлинению, к. у. 1,5–3,5). В CL-изображении зерна циркона темные, вплоть до черных с пятнистой окраской в темных тонах, за исключением точек 2.1 и 6.1 (рис. 5, *г*). Циркон в точке 2.1 характеризуется отчетливо выраженной ростовой осцилляционной зональностью и секториальностью, а циркон в точке 6.1 отличается более светлой окраской. Конкордантный возраст по 7 точкам составляет 369 ± 1 млн лет (СКВО = 0,37; рис. 6, *г*). Содержание U и Th аномально высокое, в среднем – 1693 и 3750 ppm соответственно, величина отношения Th/U в среднем – 2,27.

Сиениты. U-Pb изотопное датирование сиенитов проводилось по циркону из обр. 93578-3 (Олёкминский шток) (рис. 7). Циркон представлен длиннопризматическими, субидиоморфными кристаллами (120–370 мкм по удлинению, к. у. 1,7–3,3) и их обломками. В CL-изображении краевая область зерен обладает более светлым цветом, чем центральная; в большинстве зерен наблюдается ростовая зональность и секториальность или ее следы (рис. 7, *а*). U-Pb возраст по 11 точкам определен как 371 ± 5 млн лет (СКВО = 0,88; рис. 7, *б*). Содержание U и Th низкое, в среднем 86 и 82 ppm соответственно, отношение Th/U составляет в среднем 0,92. Единственное измерение темно-серого циркона в краевой зоне (точка 4.1), отличающегося крайне высоким содержанием U – 2186 ppm и Th – 959 ppm при величине отношения Th/U – 0,45, показало заниженное значение U-Pb возраста 132 ± 2 млн лет, поэтому точка 4.1 не учитывалась при расчете конкордантного возраста для образца.

Обсуждение результатов и выводы. Чаро-Синский дайковый пояс представлен интрузивами высококалиевых долеритов и габбро-долеритов, умереннокалиевых монцонит-порфиров и ультракалиевых сиенитов и сиенит-порфиров. Низкие

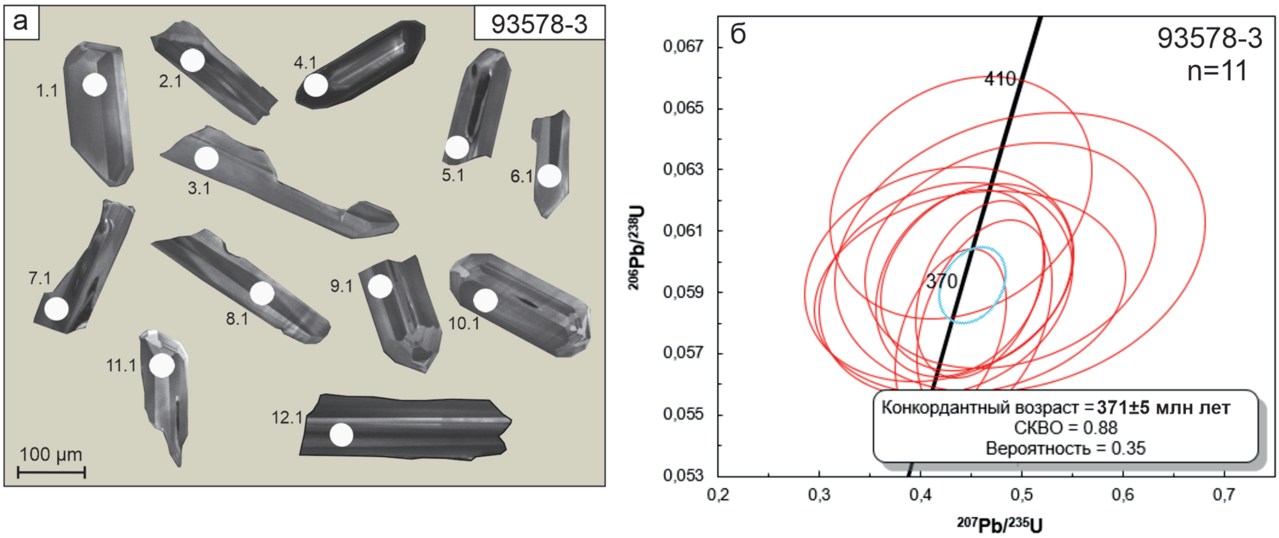

Рис. 7. U-Pb возраст циркона из сиенитов Чаро-Синского дайкового пояса

а – CL-изображение циркона с положением точек измерений, *б* – график с конкордией

содержания MgO в изученных породах указывают, что материнские для них расплавы испытали фракционирование уже до подъема к поверхности. Судя по спектрам распределения редких и редкоземельных элементов, породы по составу близки к базальтам океанических островов (OIB). Вероятно, субстратом плавления для среднепалеозойского магматизма была однородная умеренно деплетированная мантия плюма [6]. На мультиэлементной диаграмме спектры распределения микроэлементов демонстрируют преимущественно положительные аномалии Ti, Nb и Ta (TNT). Отсутствие TNT-минимума исключает заметное влияние корового материала на исходный состав расплавов. В целом по особенностям распределения петрогенных, редких и редкоземельных элементов изученные породы имеют значительную схожесть с среднепалеозойскими интрузивами Вилюйского рифта, в частности с Вилюйско-Мархинским дайковым поясом [6; 9; 15].

Полученные данные изотопного датирования циркона U-Pb методом показали, что формирование пород Чаро-Синского дайкового пояса в среднем течении р. Лена произошло в относительно короткий промежуток времени 364–374 млн лет, который укладывается во временные рамки позднего девона. Отношение Th/U во всех исследованных цирконах варьируется от 0,32 до 3,67 при среднем 1,45. Полученные величины соответствуют значениям для циркона магматического происхождения и, вероятно, свидетельствуют о магматической кристаллизации минерала [12]. Таким образом, проведенные авторами геохронологические исследования не противоречат возрасту пород, установленному ранее другими авторами [5; 6; 9; 10; 15–17], и полностью соответствуют возрастному интервалу (357–379 млн лет) девонского дайкового магматизма в крупной Якутско-Вилюйской изверженной провинции.

На сегодняшний день выявленные алмазоносные кимберлитовые трубки располагаются в пределах Вилюйско-Мархинского дайкового пояса, обрамляющего Вилюйский рифт с северо-запада. Вместе с тем имеющиеся фактические данные указывают, что алмазоносные тела могут быть найдены в юго-восточной части рифта [4; 5; 7]. Согласно полученным петролого-геохимическим особенностям и возрастным характеристикам, породы Чаро-Синского дайкового пояса в среднем течении р. Лена идентичны интрузивам Вилюйско-Мархинского дайкового пояса, что в свою очередь свидетельствует о синхронности формирования и генетической связи этих поясов, пространственно значительно удаленных друг от друга. Вероятно, мощные толщи платформенного чехла и неравномерная изученность территории затрудняют обнаружение кимберлитового магматизма, перспективного на выявление промышленно значимых объектов на алмазы. Вышесказанное позволяет предполагать рассматриваемую территорию благоприятной для обнаружения высокопродуктивных алмазоносных кимберлитов.

Авторы выражают признательность Н. В. Родионову и П. А. Львову (ЦИИ ВСЕГЕИ) за помощь в изучении цирконов, а также В. В. Шатову (ВСЕГЕИ) за консультации на различных этапах составления и написания текста статьи.

1. Гайдук В. В. Вилюйская среднепалеозойская рифтовая система. – Якутск: ЯФ СО АН СССР. – 1988. – 128 с.

2. Донская Т. В. Возраст и источники палеопротерозойских дометаморфических гранитоидов Голоустенского блока Сибирского кратона: геодинамические следствия / Т. В. Донская, Д. П. Гладкочуб, А. М. Мазукабзов, Е. Н. Лепехина // Петрология. – 2016. – Т. 24, № 6. – С. 587–606. DOI: 10.7868/S0869590316050046

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

4. Избеков Э. Д., Подъячев Б. П., Афанасьев В. П. Признаки симметричной алмазоносности восточной части Сибирской платформы (относительно оси Вилюйской синеклизы) // Докл. РАН. – 2006. – Т. 411, № 3. – С. 352–353. DOI: 10.31857/S0016777020040024

5. Киселёв А. И. Пространственно-временные отношения среднепалеозойских базитов и алмазоносных кимберлитов на северо-западном плече Вилюйского рифта (Сибирский кратон) / А. И. Киселёв, В. В. Ярмолюк, А. В. Иванов, К. Н. Егоров // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 2. – С. 185–196. DOI: http://dx.doi.org/10.15372/GiG201400202

6. Киселёв А. И. Чаро-Синский дайковый рой в структуре среднепалеозойской Вилюйской рифтовой системы (Сибирский кратон) / А. И. Киселёв, К. М. Константинов, В. В. Ярмолюк, А. В. Иванов // Докл. РАН. – 2016. – Т. 471, № 2. – С. 209–213. DOI: 10.7868/S0869565216320220

7. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Вулканизм и тектоника Патомско-Вилюйского среднепалеозойского авлакогена. – М.: Недра. – 1975. – 183 с.

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

9. Прокопьев А. В. Среднепалеозойский и среднетриасовый импульсы траппового магматизма на востоке Сибирской платформы: результаты первых $^{40}Ar/^{39}Ar$-датировок долеритовых силлов / А. В. Прокопьев, О. П. Полянский, О. В. Королева, Д. А. Васильев, М. Д. Томшин, В. В. Ревердатто, С. А. Новикова // Докл. РАН. – 2020. – Т. 490, № 1. – С. 7–11. DOI: 10.31857/S2686739720010090

10. Courtillot V. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): eruption at the time of Late Devonian extinction events? / V. Courtillot, V. A. Kravchinsky, X. Quidelleur, P. R. Renne, D. P. Gladkochub // Earth and Planetary Science Letters. – 2010. – Vol. 300. – Pp. 239–245. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.09.045

11. Ernst R. E., Buchan K. L. The use of mafic dike swarms in identifying and locating mantle plumes // Geological Society of America, Special Paper. – 2001. – Vol. 352. – Pp. 247–266.

12. Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2003. – Vol. 53, no. 1. – Pp. 27–62. DOI: 10.2113/0530027

13. Kiselev A. I. Radiating rifts and dyke swarms of the Middle Paleozoic Yakutsk plume of eastern Siberian craton / A. I. Kiselev, R. E. Ernst, V. V. Yarmolyuk, K. N. Egorov // Journal of Asian Earth Sciences. – 2012. – Vol. 45. – Pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.jseaes.2011.09.004

14. Ludwig K. R. Using Isoplot/Ex, Version 2.01: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. – Berkeley Geochronology Center Special Publication. – 1999. – No. 1a. – 47 p.

15. Polyansky O. P. Temporal correlation between dyke swarms and crustal extension in the Middle Palaeozoic Vilyui rift basin, Siberian platform / O. P. Polyansky, A. V. Prokopiev, O. V. Koroleva, M. D. Tomshin, V. V. Reverdatto, A. Yu. Selyatitsky, A. V. Travin, D. A. Vasiliev // Lithos. – 2017. – Vol. 282/283. – Pp. 45–64. DOI: 10.1016/j.lithos.2017.02.020

16. Powerman V. Palaeogeography of the Siberian platform during Middle Palaeozoic times (~ 450–400 Ma): new palaeomagnetic evidence from the Lena and Nyuya rivers / V. Powerman, A. Shatsillo, R. Coe, Xixi Zhao, D. Gladkochub, R. Buchwaldt, V. Pavlov // Geophysical Journal International. – 2013. – Vol. 194. – Pp. 1412–1440. DOI: 10.1093/gji/ggt197

17. Ricci J. New $^{40}Ar/^{39}Ar$ and K-Ar ages of the Viluy traps (Eastern Siberia): further exidence for a relationship with the Frasnian-Famennian mass extinction / J. Ricci, X. Quidelleur, V. Pavlov, S. Orlov, A. Shatsillo, V. Courtillot // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2013. – Vol. 386. – Pp. 531–540. DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.06.020

18. Sun S.-S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society, London, Special Publications. – 1989. – Vol. 42. – Pp. 313–345.

19. Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe // Reviews in Economic Geology. – 1998. – Vol. 7. – Pp. 1–35.

---

1. Gayduk V. V. Vilyuyskaya srednepaleozoyskaya riftovaya Sistema [Vilyui Middle Paleozoic rift system]. Yakutsk, 1988, 128 p.

2. Donskaya T. V., Gladkochub D. P., Mazukabzov A. M., Lepekhina E. N. Age and sources of the Paleoproterozoic premetamorphic granitoids of the Goloustnaya block of the Siberian Craton: geodynamic applications. *Petrology*, 2016, vol. 24, no. 6, pp. 587–606. (In Russian). DOI: 10.7868/S0869590316050046

3. Zonenshayn L. P., Kuz'min M. I., Natapov L. M. Tektonika litosfernykh plit territorii SSSR [Tectonics of lithospheric plates in the territory of the USSR]. Moscow, Nedra, 1990, vol. 2, 334 p.

4. Izbekov E. D., Podiachev B. P., Afanasiev V. P. Signs of symmetrical diamond content of the eastern part of Siberian Platform (with regard to Vilyui syneclise axis). *Doklady Earth Sciences*, 2006, vol. 411, no. 3, pp. 352–353. (In Russian). DOI: 10.31857/S0016777020040024

5. Kiselev A. I., Yarmolyuk V. V., Ivanov A. V., Egorov K. N. Middle Paleozoic basaltic and kimberlitic magmatism in the northwestern shoulder of the Vilyui Rift, Siberia: relations in space and time. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 2, pp. 185–196. (In Russian). DOI: http://dx.doi.org/10.15372/GiG201400202

6. Kiselev A. I., Konstantinov K. M., Ivanov A. V., Yarmolyuk V. V. The Chara-Sina dyke swarm in the structure of the Middle Paleozoic Vilyui rift system (Siberian Craton). *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 471, no. 2, pp. 209–213. (In Russian). DOI: 10.7868/S0869565216320220

7. Masaytis V. L., Mikhaylov M. V., Selivanovskaya T. V. Vulkanizm i tektonika Patomsko-Vilyuyskogo srednepaleozoyskogo avlakogena [Volcanism and tectonics of the Patomsko-Vilyui Middle Paleozoic aulacogen]. Moscow, Nedra, 1975, 183 p.

8. Polyanskii O. P., Prokop'ev A. V., Babichev A. V., Korobeinikov S. N., Reverdatto V. V. The rift origin of the Vilyui Basin (East Siberia), from reconstructions of sedimentation and mechanical mathematical modeling. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 163–183. (In Russian).

9. Prokopiev A. V., Polyansky O. P., Koroleva O. V., Vasiliev D. A., Tomshin M. D., Reverdatto V. V., Novikova S. A. The Mid-Paleozoic and Mid-Triassic pulses of trap magmatism in the east of the Siberian platform: evidence from the first $^{40}Ar/^{39}Ar$ isotope dating of dolerite sills. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 490, no. 1, pp. 7–11. (In Russian). DOI: 10.31857/S2686739720010090

10. 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 and Planetary Science Letters*, 2010, vol. 300, pp. 239–245. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.09.045

11. Ernst R. E., Buchan K. L. The use of mafic dike swarms in identifying and locating mantle plumes. *Geological Society of America, Special Paper*, 2001, vol. 352, pp. 247–266.

12. Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, vol. 53, no. 1, pp. 27–62. DOI: 10.2113/0530027

13. Kiselev A. I., Ernst R. E., Yarmolyuk V. V., Egorov K. N. Radiating rifts and dyke swarms of the Middle Paleozoic Yakutsk plume of eastern Siberian craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, vol. 45, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.jseaes.2011.09.004

14. Ludwig K. R. *Using Isoplot/Ex, Version 2.01: a geochronological toolkit for Microsoft Excel.* Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1999, no. 1a, 47 p.

15. Polyansky O. P., Prokopiev A. V., Koroleva O. V., Tomshin M. D., Reverdatto V. V., Selyatitsky A. Yu., Travin A. V., Vasiliev D. A. Temporal correlation between dyke swarms and crustal extension in the Middle Palaeozoic Vilyui rift basin, Siberian platform. *Lithos*, 2017, vol. 282/283, pp. 45–64. DOI: 10.1016/j.lithos.2017.02.020

16. Powerman V., Shatsillo A., Coe R., Zhao Xixi, Gladkochub D., Buchwaldt R., Pavlov V. Palaeogeography of the Siberian platform during Middle Palaeozoic times (~ 450–400 Ma): new palaeomagnetic evidence from the Lena and Nyuya rivers. *Geophysical Journal International*, 2013, vol. 194, pp. 1412–1440. DOI: 10.1093/gji/ggt197

17. Ricci J., Quidelleur X., Pavlov V., Orlov S., Shatsillo A., Courtillot V. New $^{40}Ar/^{39}Ar$ and K-Ar ages of the Viluy traps (Eastern Siberia): further evidence for a relationship with the Frasnian-Famennian mass extinction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, vol. 386, pp. 531–540. DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.06.020

18. Sun S.-S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society*, *London*, *Special Publications*, 1989, vol. 42, pp. 313–345.

19. Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Reviews in Economic Geology*, 1998, vol. 7, pp. 1–35.

Гузев Владислав Евгеньевич – геолог, ВСЕГЕИ [1]. <vladislav_guzev@vsegei.ru>; аспирант, Санкт-Петербургский горный университет (СПГУ). 21-я линия, Васильевский остров, д. 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106. <s195007@stud.spmi.ru>

Козлов Глеб Александрович – аспирант, геолог, ВСЕГЕИ [1]. <gleb_kozlov@vsegei.ru>

Терехов Артем Валерьевич – канд. геол.-минерал. наук, зам. зав. отделом, ВСЕГЕИ [1]. <artem_terekhov@vsegei.ru>

Молчанов Анатолий Васильевич – доктор геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ [1]. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Лебедев Иван Олегович – ведущий геолог, ВСЕГЕИ [1]. <ivan_lebedev@vsegei.ru>

Светлова Юлия Леонидовна – геолог, ВСЕГЕИ [1]. <yuliya_svetlova@vsegei.ru>

Guzev Vladislav Evgen'evich – Geologist, VSEGEI [1]. <vladislav_guzev@vsegei.ru>; Ph. D. Student, Saint-Petersburg Mining University (SPMU). 2 21st Line, St. Petersburg, Russia, 199106. <s195007@stud.spmi.ru>

Kozlov Gleb Aleksandrovich – Ph. D. Student, Geologist, VSEGEI [1]. <gleb_kozlov@vsegei.ru>

Terekhov Artem Valer'evich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Head of the Department, VSEGEI [1]. <artem_terekhov@vsegei.ru>

Molchanov Anatoly Vasilyevich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI [1]. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Lebedev Ivan Olegovich – Leading Geologist, VSEGEI [1]. <ivan_lebedev@vsegei.ru>

Svetlova Yulia Leonidovna – Geologist, VSEGEI [1]. <yuliya_svetlova@vsegei.ru>

[1] Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.