

## U-Pb возраст цирконов из комплекса параллельных даек в блоке офиолитов в структуре Ревдинского массива Платиноносного пояса Урала

С. В. Берзин, В. С. Червяковский

Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,  
e-mail: sbersin@ya.ru

Поступила в редакцию 22.04.2021 г., принята к печати 24.06.2021 г.

**Объект исследований.** Изучался тектонический блок офиолитов, соответствующий уровню корневой зоны комплекса параллельных даек, в восточной части Ревдинского массива Платиноносного пояса Урала (ППУ). **Материалы и методы.** U-Pb-датирование цирконов выполнено методом LA-ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре NexION 300S с приставкой для лазерной абляции NWR 213. **Результаты.** Цирконы с возрастом  $425.6 \pm 2.9$  млн лет характеризуются первично-магматической зональностью и, по всей видимости, отвечают времени внедрения комплекса параллельных даек. В цирконах с возрастом  $404.0 \pm 2.9$  млн лет зафиксированы включения метаморфогенных минералов (амфибола, шамозита, кварца, клиноцоизита), и, вероятно всего, они фиксируют перекристаллизацию породы или метаморфизм, например, при внедрении более поздних жильных пород диорит-тоналитовой серии или параллельных даек второй генерации. Три точки определения показали более молодой возраст –  $362 \pm 5.6$  млн лет. **Выводы.** Впервые получен силурийский U-Pb возраст цирконов (LA-ICP-MS) из блока офиолитов (корневая зона комплекса параллельных долеритовых даек) в структуре Ревдинского массива ППУ. Полученный возраст внедрения комплекса параллельных даек ( $425.6 \pm 2.9$  млн лет) совпадает с возрастом цирконов ( $428.5 \pm 3.7$  млн лет) из скринов габбро в параллельных дайках Восточно-Уральской зоны, полученном В.Н. Смирновым и К.С. Ивановым в 2010 г., и отвечает времени прохождения спрединга над зоной субдукции на Среднем Урале.

**Ключевые слова:** комплекс параллельных даек, офиолиты, Платиноносный пояс Урала, циркон, U-Pb возраст, LA-ICP-MS

### Источник финансирования

Исследование выполнено в рамках государственной темы ИГГ УрО РАН, номер госрегистрации АААА-А18-118052590032-6, и при финансовой поддержке РФФИ и правительства Ханты-Мансийского автономного округа–Югры в рамках научного проекта № 18-45-860008

## U-Pb zircon age of a sheeted dike complex in ophiolites in the structure of the Revdinsky massif, Ural Platinum Belt

Stepan V. Berzin, Vasily S. Chervyakovskiy

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia, e-mail: sbersin@ya.ru

Received 22.04.2021, accepted 24.06.2021

**Research subject.** A tectonic block of ophiolites, corresponding to the root zone of a sheeted dike complex, in the eastern part of the Revdinsky massif of the Platinum-bearing belt of the Urals (UPB). **Materials and methods.** Zircons for dating were collected in the first-generation dolerite dikes of the sheeted dike complex under study, which had been previously considered as Ordovician. U-Pb dating of zircons was performed by LA-ICP-MS on a NexION 300S quadrupole mass spectrometer with a laser ablation attachment NWR 213. **Results.** Zircons with an age of  $425.6 \pm 2.9$  Ma are characterized by primary magmatic zoning and apparently correspond to the time of intrusion of the sheeted dike complex. In zircons with an age of  $404.0 \pm 2.9$  Ma, inclusions of metamorphogenic minerals (amphibole, chamosite, quartz, clinozoisite) were

**Для цитирования:** Берзин С.В., Червяковский В.С. (2021) U-Pb возраст цирконов из комплекса параллельных даек в блоке офиолитов в структуре Ревдинского массива Платиноносного пояса Урала. *Литосфера*, **21**(6), 849–866. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-6-849-866>

**For citation:** Berzin S.V., Chervyakovskiy V.S. (2021) U-Pb zircon age of a sheeted dike complex in ophiolites in the structure of the Revdinsky massif, Ural Platinum Belt. *Lithosphere (Russia)*, **21**(6), 849–866. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-6-849-866>

discovered. This age reflects rock recrystallization or metamorphism, for example, during the intrusion of later vein rocks of the diorite-tonalite series or dolerite dikes of the second generation. Three points of determination showed a younger age of  $362 \pm 5.6$  Ma, probably reflecting the time of metamorphism at the beginning of collisional processes. *Conclusions.* For the first time, the Silurian U-Pb age of zircons (LA-ICP-MS) was obtained for the ophiolite block (root zone of the sheeted dike complex) in the structure of the Revdinsky massif UPB. The obtained age of intrusion of the sheeted dike complex ( $425.6 \pm 2.9$  Ma) coincides with the age of zircons ( $428.5 \pm 3.7$  Ma) from gabbro screens in sheeted dikes of the East Ural zone determined earlier (Smirnov, Ivanov, 2010) and corresponds to the time of spreading over the subduction zone in the Middle Urals.

**Keywords:** sheeted dike complex, ophiolite, Ural Platinum Belt, zircon, U-Pb age, LA-ICP-MS

#### Funding information

*This work was carried out within the framework of the state assignment of IGG UB RAS, project No. AAAA-A18-118052590032-6, and was funded by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra of the Russian Federation, grant No. 18-45-860008*

## ВВЕДЕНИЕ

Комплекс параллельных долеритовых даек маркирует зоны спрединга в условиях срединно-океанических хребтов или в обстановках над зоной субдукции (задуговой, междугуовой, внутридуговой или преддуговой спрединг) и является составной частью офиолитового разреза. Нами изучен тектонический блок офиолитов в восточной части Ревдинского массива (рис. 1), сложенный комплексом параллельных даек со скринами габбро. Массив расположен на Среднем Урале и является самым южным в цепочке массивов Платиноносного пояса Урала (ППУ).

Долеритовый дайковый комплекс в восточной части Ревдинского массива был описан в ходе геологосъемочных работ под руководством И.И. Зенкова в 1973 г. Позднее И.В. Семеновым с соавторами эти долериты были определены как комплекс параллельных даек (Семенов и др., 1978, 1999; Коротеев, Семенов, 2008). Впоследствии нами было показано, что по ряду геохимических признаков данный комплекс параллельных даек сформировался в результате спрединга над зоной субдукции, а вмещающие его габброиды по геохимическим характеристикам относятся к офиолитовой ассоциации (Берзин, 2014; Берзин, Дугушкина, 2020). Фактически в восточной части Ревдинского массива выделяется блок надсубдукционных офиолитов, соответствующих уровню корневой зоны комплекса параллельных даек.

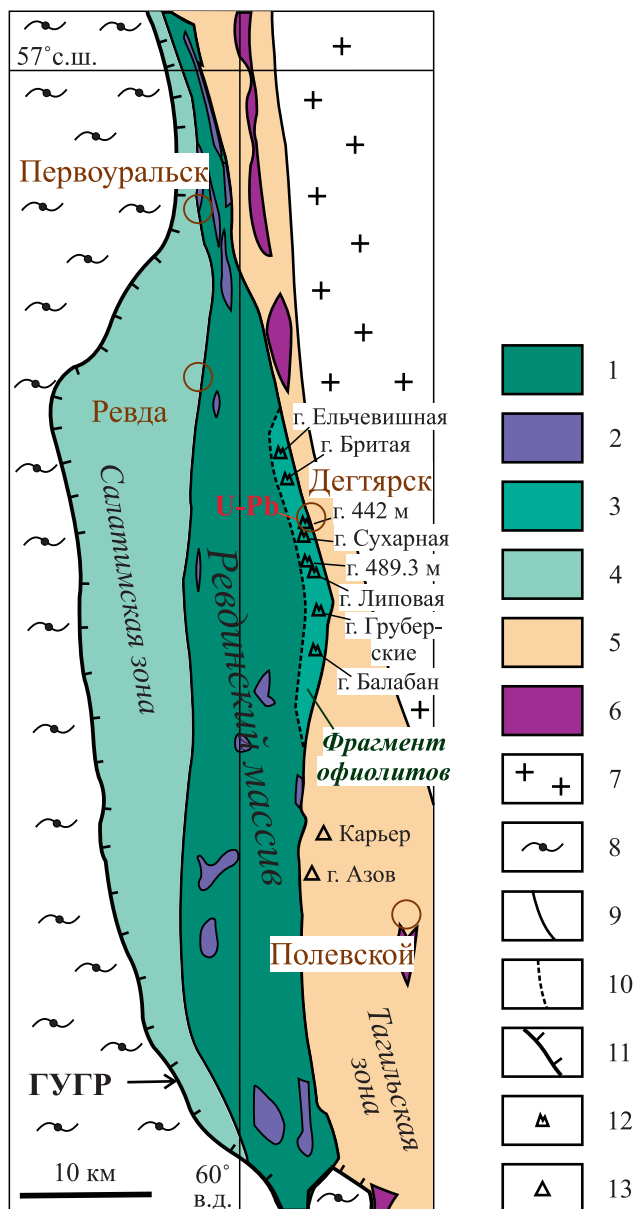
Присутствие блока офиолитов в структуре концентрически-зональных массивов Платиноносного пояса Урала вызывает ряд вопросов о времени и условиях формирования данных офиолитов, а также о времени их сочленения с породами Платиноносного пояса Урала. Долгое время параллельные долеритовые дайки условно считались ордовикскими и при составлении геологических карт традиционно относились к мариинскому комплексу ( $O_{2-3}$ ) (Петров и др., 2011; Водолазская и др., 2015; Калугина и др., 2017). Попытка определить возраст

Sm-Nd методом ранее была сделана И.В. Семеновым и Ю.Л. Ронкиным, при этом были получены позднесилурийские возрасты с достаточно высокой погрешностью: для долеритов –  $426 \pm 51$  млн лет, для вмещающих габбро –  $429 \pm 23$  млн лет (Семенов, 2007). Данные датировки охватывали весь раннепалеозойский этап формирования Уральского складчатого пояса от ордовика до девона, т. е., по сути, все время существования Тагильской островной палеодуги, и не вносили существенных уточнений в возраст дайкового комплекса. Кроме того, данные изохроны были построены по трем точкам и их истинная неопределенность возраста может значительно превышать расчетную погрешность. Задача данной работы – определение возраста комплекса параллельных даек в тектоническом блоке офиолитов в структуре Ревдинского массива ППУ.

## ОБНАЖЕНИЯ КОМПЛЕКСА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ДАЕК

Обнажения пород офиолитовой ассоциации (габбро, прорываемые комплексом параллельных даек) прослеживаются в узкой зоне шириной не более 1–2 км, протянувшейся вдоль восточной границы Ревдинского массива от горы Ельчевишной на севере до горы Балабан на юге (см. рис. 1). Наиболее представительные обнажения наблюдаются на вершинах гор Балабан, Груберские, Бритая, Липовая и Ельчевишная, на высотах с абсолютными отметками 489.3 и 442.0 м в окрестностях г. Дегтярск.

Во всех изученных обнажениях габбро прорываются комплексом параллельных долеритовых даек двух генераций, пересекающихся под углами  $40\text{--}70^\circ$ , между внедрением которых происходило формирование пород жильной диорит-тоналит-плагиогранитной серии. Вмещающие породы представлены средне- и крупнозернистыми массивными габбро, габбродиоритами и кварцевыми диоритами. Вмещающие диориты и кварцевые диори-



**Рис. 1.** Геологическая схема Ревдинского массива ППУ и положение на ней блока оphiолитов внутри массива и точки отбора пробы на U-Pb датирование по данным ГТК 1 : 1 000 000 и 1 : 200 000, по (Петров и др., 2011; Водолазская и др., 2015; Калугина и др., 2017), с упрощениями и дополнениями.

1, 2 – породы Ревдинского массива: 1 – габбро, габбро-нориты, оливковые габбро, габбро-амфиболиты, 2 – дуниты, верлиты, клинопироксениты, горнблендиты; 3 – фрагменты оphiолитов внутри Ревдинского массива (габро, параллельные долеритовые дайки); 4 – метаморфизованные вулканиты и вулканогенно-осадочные породы Салатимской зоны; 5 – вулканогенные и осадочные породы Тагильской палеоостроводужной зоны; 6 – тела серпентинитов Серовско-Маукского оphiолитового пояса; 7 – гранитоиды Верх-Исетского массива; 8 – выступ кристаллических пород Западно-Уральской мегазоны; 9, 10 – границы: 9 – тектонические, 10 – предполагаемая западная тектоническая граница бло-

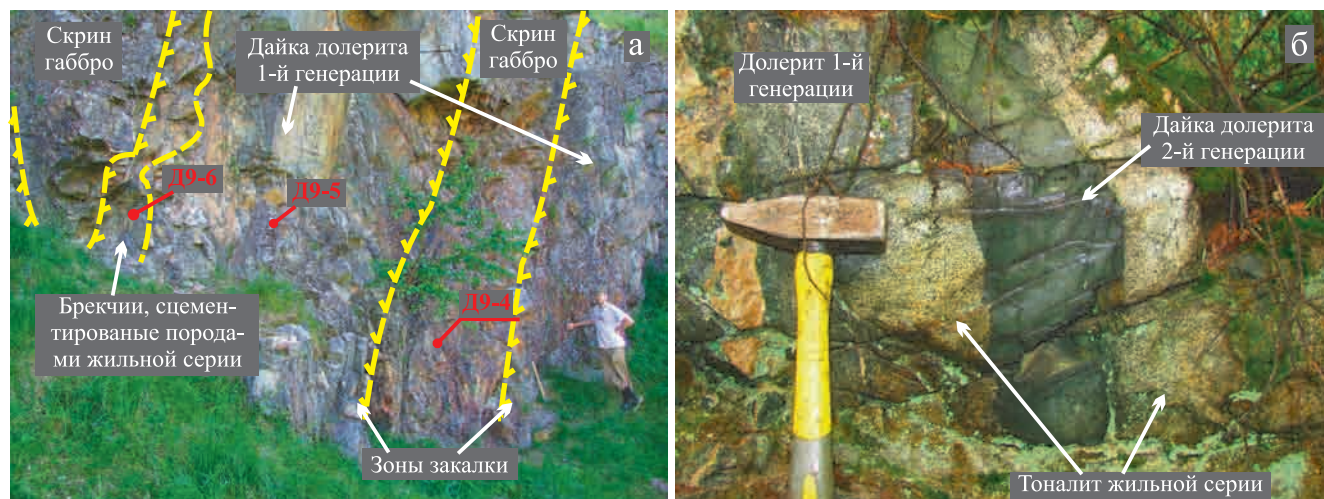
ка оphiолитов; 11 – Главный Уральский глубинный разлом (ГУГР); 12 – изученные обнажения пород оphiолитовой ассоциации внутри Ревдинского массива (параллельные долеритовые дайки, секущие габбро); 13 – обнажения комплекса параллельных долеритовых даек, секущих подушечные лавы в восточном обрамлении Ревдинского массива (Иванов и др., 2012; Иванов, Берзин, 2013; Иванов и др., 2019).

**Fig. 1.** Schematic geological map of the Revdinsky massif of the Ural Platinum Belt and the position of the ophiolite block within the massif with the sampling point for U-Pb dating according to the State Geological Map with scale 1 : 1 000 000 and 1 : 200 000, by (Petrov et al., 2011; Vodolazskaya et al., 2015; Kalugina et al., 2017), with simplifications and additions.

1, 2 – rocks of the Revdinsky massif: 1 – gabbro, gabbro-norite, olivine gabbro, gabbro-amphibolite, 2 – dunite, wehrlite, clinopyroxenite, hornblende; 3 – fragments of ophiolites within the Revdinsky massif (gabbro, sheeted dike complex); 4 – metamorphosed volcanics and volcanogenic-sedimentary rocks of the Salattimskaya zone; 5 – volcanic and sedimentary rocks of the Tagil paleo-island arc zone; 6 – serpentinites of the Serovsko-Mauksky ophiolite belt; 7 – granite of the Verkh-Isetsy massif; 8 – crystalline rocks of the West Ural megazone; 9, 10 – boundaries: 9 – tectonic; 10 – assumed; 11 – Main Ural deep-seated fault; 12 – studied outcrops of ophiolite association rocks within the Revdinsky massif (sheeted dike complex intersecting gabbro); 13 – outcrops of a complex of sheeted dike complex intersecting pillow lavas in the eastern framing of the Revdinsky massif (Ivanov et al., 2012; Ivanov, Berzin, 2013; Ivanov et al., 2019).

ты ( $\text{SiO}_2$  – 55.8–56.3 мас. %) встречаются нами в обнажениях на горе Ельчевишная. Долеритовые дайки 1-й генерации мощностью 2–6 м (рис. 2а) имеют северо-восточное простирание по азимуту 30–45°, крутое падение и сложены полнокристаллическими мелко-среднезернистыми долеритами. В обнажениях встречаются структуры типа “дайка в дайке” с односторонними зонами закалки. Породы жильной диорит-тоналит-плагиигранитной серии слагают дайки и маломощные прожилки, пересекающие под углом долеритовые дайки 1-й генерации со скринами габбро. Кроме того, лейкократовые диориты, плагииоклазиты и тоналиты жильной серии слагают цемент тектонических брекчий, прослеживающихся в виде линейных круто падающих зон мощностью 1–2 м. Все перечисленные породы прорываются параллельными дайками долеритов 2-й генерации, имеющими мощность 0.3–1.5 м (рис. 2б), азимут простирания 320–350°. Дайки долеритов 2-й генерации образуют тесно сближенные рои. В обнажениях повсеместно наблюдаются структуры типа “дайка в дайке” с односторонними зонами закалки. Долериты 2-й генерации имеют зеленовато-серую окраску, скрытокристаллическую, тонкозернистую или мелкопорфировую структуру с вкрапленниками плагииоклаза и амфибола.





**Рис. 2.** обнажения комплекса параллельных долеритовых даек, прорывающих габбро в блоке офиолитов в восточной части Ревдинского массива.

а – дайки долеритов 1-й генерации со скринами габбро, в. 442 м, в черте г. Дегтярска (место отбора пробы для U-Pb датирования). Красным показаны точки отбора образцов для геохимических исследований.

б – долеритовая дайка 2-й генерации пересекает брекцию из обломков долеритов 1-й генерации, сцементированных тоналитом жильной серии, гора Брита.

**Fig. 2.** Outcrops of a sheeted dike complex cutting through gabbro in the ophiolite block in the structure of the Revdinsky massif.

а – dolerite dikes of the 1st generation with gabbro screens, Mt. 442 m, within Degtyarsk town (place of sampling for U-Pb dating). The red points are samples location for research.

б – Dolerite dike of 2nd generation intersects the breccia of the 1st generation dolerite fragments cemented with tonalite of the vein series, Mt. Britaya.

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ на порообразующие окислы проводился методом РФА на CPM-35 и EDX-8000. Элементный анализ выполнен методом ICP-MS на “ELAN-9000” (ЦКП “Геоаналитик”, ИГГ УрО РАН). Съемка катодолюминесцентных изображений цирконов и электронно-зондовый анализ производились на микроанализаторе Cameca SX100.

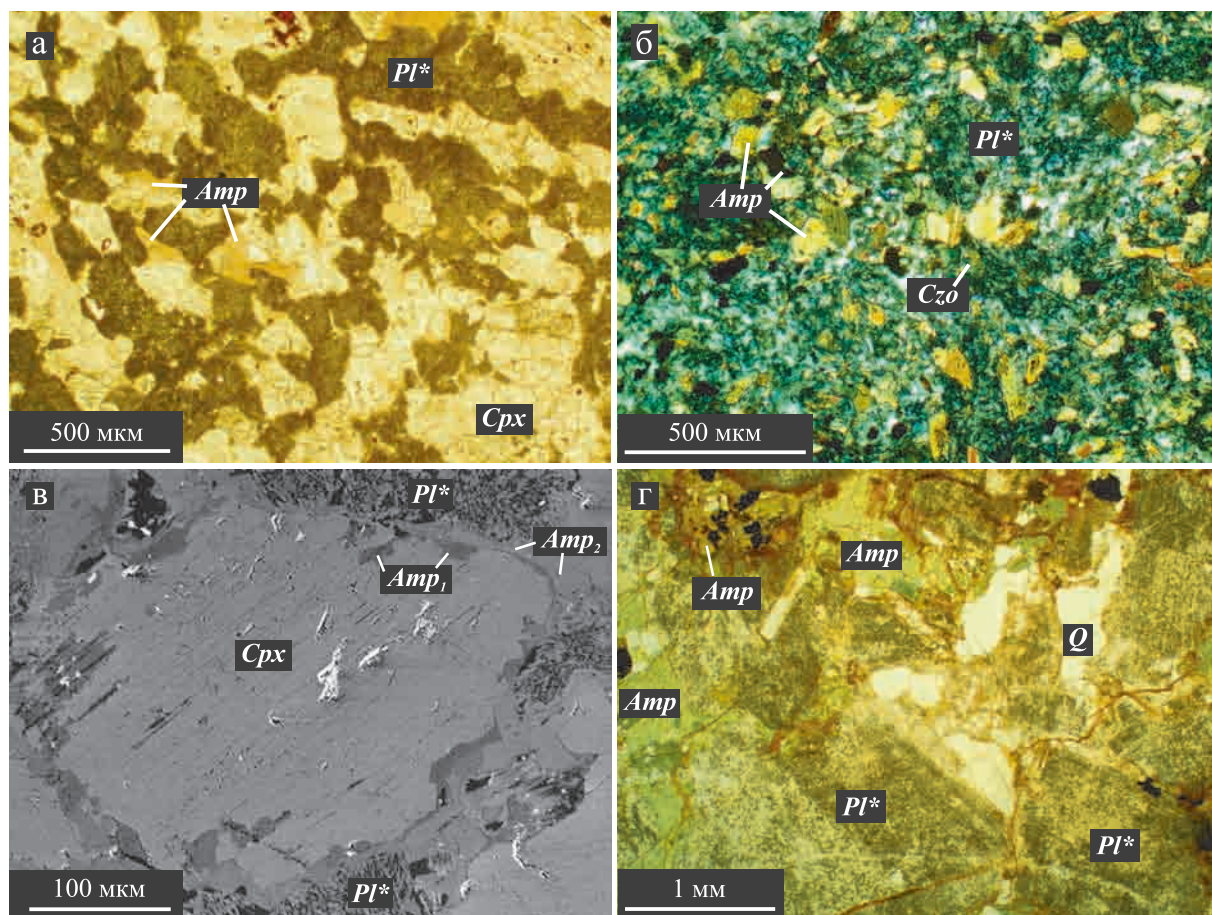
Для определения возраста были выделены цирконы из пробы долеритов параллельных даек 1-й генерации, отобранной из обнажения на горе 442 м в черте г. Дегтярск (56°42'7.5" с. ш., 60°4'47.2" в. д.). Проба представлена массивным мелкозернистым долеритом, сложенным амфиболизированным клинопироксеном и полностью сосюритизированным плагиоклазом.

Изучение цирконов проводилось в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН. U-Pb-датирование цирконов выполнено методом LA-ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре NexION 300S с приставкой для лазерной абляции NWR 213. Диаметр кратера 25 мкм. Методика измерения Pb/U-изотопных отношений и алгоритм расчета возраста опубликованы в (Зайцева и др., 2016).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Минералого-петрографическая характеристика пород

Все перечисленные породы метаморфизованы в условиях низов амфиболитовой–зеленосланцевой фаций метаморфизма. Клинопироксен сохранился только в виде реликтовых центральных частей зерен в некоторых образцах габбро и долеритов гор Груберские и на горе 489.3 м (рис. 3а, в, табл. 1). При этом клинопироксен замещается каймами амфибола двух генераций: высокотемпературным амфиболом 1-й генерации (магнезиогастингситом) с температурой образования 840–970°C по геотермометру (Otten, 1984) и по внешней кайме низкотемпературным амфиболом 2-й генерации (тремолитом) с температурой образования 580°C по тому же геотермометру (см. рис. 3в, табл. 2). В большинстве образцов габбро и долеритов 1-й генерации пироксен полностью замещен низкотемпературными амфиболами (тремолитом или магнезиальной роговой обманкой) с температурами образования 550–650°C по геотермометру (Otten, 1984) (табл. 2), что соответствует низам амфиболитовой (эпидот-



**Рис. 3.** Строение долеритов комплекса параллельных даек (а–в) и пород жильной диорит-тоналитовой серии (г).

а – слабо метаморфизованный долерит 1-й генерации из комплекса параллельных даек, горы Груберские (обр. Д18-1); б – долерит из дайки 2-й генерации, гора 489.3 м (обр. Д6-1); в – клинопироксен (Cpx), замещаемый высокотемпературным амфиболом (Amp<sub>1</sub>) и низкотемпературной роговой обманкой (Amp<sub>2</sub>) в долерите из дайки 1-й генерации, карьер гор Груберские (обр. Д18-1); г – диорит жильной серии, цементирующий тектоническую брекчию, гора Бритая (обр. Р31-2). Pl\* – сосюритизированный плагиоклаз, Amp – амфибол, Q – кварц. а, б, г – фотографии в проходящем свете, в – изображение в обратно-отраженных электронах (BSE).

**Fig. 3.** Dolerites of a sheeted dike complex (а–в) and rocks of the vein diorite-tonalite series (г).

а – weakly metamorphosed dolerite of the 1st generation from a sheeted dike complex, Mt. Gruberskie (sample Д18-1); б – dolerite from a 2nd generation dike, Mt. 489.3 m (sample Д6-1); в – clinopyroxene (Cpx), replaced by high temperature amphibole (Amp<sub>1</sub>) and low temperature hornblende (Amp<sub>2</sub>) in the dolerite from the 1st generation dike, open pit at Mt. Gruberskie (sample Д18-1); г – diorite of the vein series cementing tectonic breccia, Mt. Britaya (sample Р31-2). Pl\* – saussuritized plagioclase, Amp – amphibole, Q – quartz. а, б, г – photos in transmitted light, в – back-scattered electrons (BSE) image.

амфиболитовой) фации метаморфизма. Плагиоклаз замещается альбитом и клиноцоизитом. В долеритах 2-й генерации клинопироксен полностью замещен амфиболом (магнезиальной роговой обманкой, реже чермакитом), плагиоклаз полностью сосюритизирован.

В породах жильной диорит-тоналит-плагиогранитной серии из темноцветных минералов присутствуют амфибол (магнезиальная роговая обманка, тремолит) и биотит, замещаемый шамозитом (см. рис. 3). Плагиоклаз сосюритизирован. В слабо измененных жильных тоналитах фиксируются зональные зерна альбита-олигоклаза (An<sub>2–20</sub>).

Хромовая шпинель в виде единичных акцессорных зерен встречается в пикродолерите из параллельных даек 2-й генерации на вершине 489.3 м (обр. Д30-2 и Д3-4), а также в долерите из параллельных даек 1-й генерации на горе Сухарная (обр. Д16-4) (рис. 4а). Зерна хромовой шпинели имеют размер 50–80 мкм. В обоих образцах они идиоморфные, иногда со скругленными углами. По составу хромовая шпинель отвечает хромиту, отношение Cr/(Cr + Al + Fe<sup>3+</sup>) варьирует от 0.55 до 0.88. В хромите отмечены примеси (мас. %): ZnO – до 2.85, MnO – 0.96–1.82, TiO<sub>2</sub> – 0.20–0.91 и V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – до 0.17 (табл. 3). На диаграмме TiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 4б)



**Таблица 1.** Состав клинопироксена (мас. %) из долеритов параллельных даек и вмещающих габбро**Table 1.** Composition of clinopyroxene (wt %) from dolerites of sheeted dike complex and host gabbro

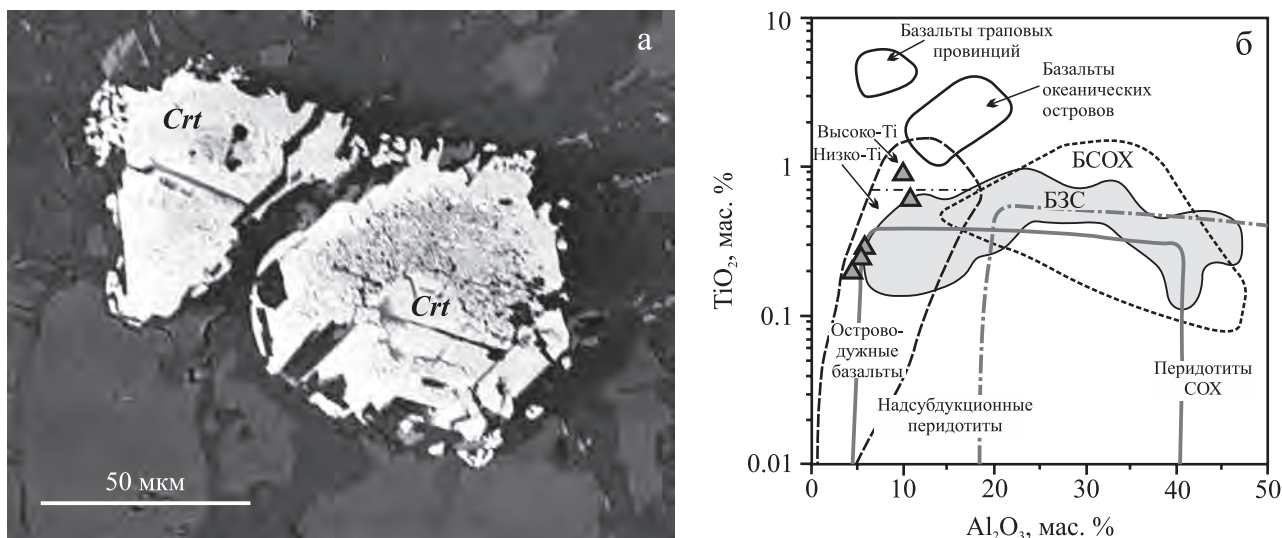
Обнажение	Горы Груберские										Гора 489.3 м
Порода	Долериты 1-й генерации					Габбро					
Образец	Д18-1		Д18-2	Д18-3	Д18-4		Д18-5	Д19-5		Д3-5	
№ анализа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	50.2	50.4	50.2	51.6	51.8	49.6	51.1	49.8	50.5	53.5	55.0
TiO <sub>2</sub>	0.87	1.00	0.74	0.61	0.12	0.94	0.84	1.00	0.40	0.21	Н.о.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.57	2.66	2.67	1.69	1.21	4.16	2.20	4.67	2.46	0.85	1.44
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	0.19	0.18	0.14	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.28	0.29	Н.о.	Н.о.
FeO	7.79	8.44	7.88	6.57	7.05	7.84	6.88	7.32	7.02	6.34	11.0
MnO	0.27	0.25	0.26	0.25	0.22	0.20	0.19	0.18	0.20	0.23	0.33
MgO	14.1	14.8	14.0	14.3	14.5	13.9	14.9	14.6	14.9	15.1	16.8
CaO	22.3	20.6	22.3	24.2	24.1	21.7	23.0	19.9	22.3	24.6	13.1
Na <sub>2</sub> O	0.47	0.40	0.44	0.44	0.22	0.70	0.35	0.67	0.35	0.17	0.24
K <sub>2</sub> O	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.03	Н.о.	Н.о.	0.03
Сумма	98.8	98.7	98.7	99.7	99.2	98.9	99.5	98.4	98.4	101.0	98.1
Fe/(Mg + Fe) <sub>мол</sub>	0.16	0.19	0.16	0.13	0.15	0.14	0.14	0.18	0.13	0.16	0.27
Содержание миналов, %											
W	49	45	49	50	50	49	49	45	49	50	29
En	43	45	43	43	42	44	44	46	45	42	52
Fs	8	11	8	7	8	7	7	10	7	8	19

Примечание. Здесь и далее сумма Fe<sup>3+</sup> и Fe<sup>2+</sup> представлена в виде FeO. Состав минералов определен методом EPMA на Самеса SX100 (ИГТ УрО РАН). Н.о. – содержание элемента ниже пределов обнаружения.

Note. Hereafter the sum of Fe<sup>3+</sup> and Fe<sup>2+</sup> is represented as FeO. The composition of the minerals was determined by EPMA on a Cameca SX100 (IGG UB RAS). Н.о. – element content below the detection limits.

**Таблица 2.** Состав амфибола из долеритов комплекса параллельных даек**Table 2.** Composition of amphibole from dolerite of the sheeted dike complex

Обнажение	Горы Груберские				Гора 489.3						Гора 442 м		Гора Ельчевишная			
Порода	Долерит 1-й генерации				Долерит 2-й генерации						Долерит 1-й генерации		Долерит 2-й генерации			
Образец	Д18-2	Д18-1	Д18-3	Д3-3	Д3-1	Д3-4	Д3-6	Д10-4	Д13-5	Д13-3						
№ анализа	1	2	3	4	5	6	9	10	7	8	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	41.7	43.7	55.0	52.9	43.2	50.7	46.5	58.1	49.9	48.7	50.9	51.7	45.7	49.6	40.0	39.7
TiO <sub>2</sub>	3.03	2.20	0.26	0.29	1.52	0.35	0.09	0.01	0.35	0.68	0.75	0.10	0.80	0.57	1.21	1.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.5	10.7	1.73	2.70	11.3	4.56	8.73	0.21	5.85	5.50	4.45	4.29	8.46	5.25	12.8	12.5
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.17	0.14	0.12	0.03	0.01	0.08	0	0	0	0.01	0.06	0.18	0	0.19	0	0.01
FeO	11.9	10.9	5.96	9.05	15.7	12.8	14.7	2.62	8.82	17.2	10.1	10.6	16.5	13.4	19.2	19.7
MnO	0.16	0.19	0.16	0.17	0.38	0.28	0.35	0.20	0.15	0.56	0.21	0.16	0.44	0.41	0.63	0.66
MgO	13.1	14.3	20.3	17.7	10.9	14.9	12.4	22.6	18.6	12.0	16.2	16.3	11.9	14.6	8.00	8.07
CaO	11.5	11.7	12.7	13.1	11.3	11.9	12.2	13.2	11.5	11.5	12.9	12.8	11.6	11.8	12.0	12.0
Na <sub>2</sub> O	2.51	2.30	0.36	0.48	1.96	0.89	1.25	0.08	0.73	0.97	0.61	0.60	1.00	0.55	1.31	1.18
K <sub>2</sub> O	0.32	0.24	0.02	0.02	0.17	0.18	0.33	0.02	0.05	0.23	0.27	0.23	0.33	0.18	0.75	0.87
Сумма	95.8	96.4	96.6	96.5	96.4	96.6	96.5	97.0	95.9	97.3	96.4	96.9	96.7	96.5	95.9	95.8
Mg/(Mg + Fe) <sub>мол</sub>	0.73	0.78	0.92	0.79	0.64	0.74	0.66	0.95	1.00	0.64	0.75	0.76	0.69	0.77	0.50	0.51
Минеральный вид	Магнезиогастингсит		Тремолит		Чермакит		Магнезиальная роговая обманка								Чермакит	
T, °C, по (Otten, 1984)	970	836	579	583	747	591	557	546	591	636	643	558	652	620	710	694



**Рис. 4.** Хромовая шпинель в долеритах параллельных даек.

а – зерна хромовой шпинели (Crt) в долерите из даек 1-й генерации, гора Сухарная, обр. Д16-4, изображение в обратно-отраженных электронах (BSE); б – состав хромовых шпинелей из параллельных даек на диаграмме с полями составов для хромовой шпинели из вулканитов различных геодинамических обстановок, а также из перидотитов зон СОХ и из надсубдукционных перидотитов, по (Kamenetsky et al., 2001). БСОХ – базальты срединно-океанических хребтов, БЗС – базальты зон задугового спрединга.

**Fig. 4.** Chromium spinel in dolerites of sheeted dikes.

а – chromium spinel (Crt) in dolerite from dikes of the 1st generation, Mt. Sukharnaya, sample Д16-4, backscattered electron (BSE) image; б – composition of chromium spinel from sheeted dikes on diagram with fields for chromium spinel from volcanic rocks of different geodynamic settings, as well as from peridotites of MOR and of suprasubduction peridotites after (Kamenetsky et al., 2001). BSOX – basalts of mid-oceanic ridges (MORB), БЗС – basalts of back-arc spreading zones (BABB).

**Таблица 3.** Состав хромовой шпинели из долеритов комплекса параллельных даек

**Table 3.** Composition of chromite from dolerites of sheeted dike complex

Долериты	1-й генерации		2-й генерации		
Обнажение	Гора Сухарная		Гора 489.3 м		
Образец	Д16-4		Д30-2		Д3-4
№ анализа	1	2	3	4	5
SiO <sub>2</sub>	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
TiO <sub>2</sub>	0.62	0.91	0.24	0.28	0.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.8	9.88	5.17	5.55	4.40
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.5	31.3	55.2	54.4	59.5
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.17	0.16	Н.о.	Н.о.	Н.о.
FeO*	46.0	50.5	31.4	32.4	33.0
MnO	1.82	1.24	0.96	1.05	1.02
MgO	0.21	0.27	0.85	0.88	0.88
CaO	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
NiO	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
ZnO	2.85	2.06	1.18	1.10	Н.о.
Сумма	97.9	96.4	95.2	95.8	99.0

точки анализов попадают в поле составов хромовой шпинели островодужных толеитов и частично в поле составов хромовой шпинели задугово-спрединговых базальтов по данным (Kamenetsky et al., 2001).

### Геохимические особенности пород

Долериты параллельных даек и габбро соответствуют низкокалийным толеитовым базальтам и андезибазальтам нормальной щелочности. Параллельные дайки 2-й генерации сложены гипабиссальными породами, по составу варьирующими от пикродолеритов до андезидацитов (SiO<sub>2</sub> – 43–63 мас. %) (табл. 4). Долериты параллельных даек характеризуются пониженными содержаниями TiO<sub>2</sub>, пологими спектрами распределения РЗЭ, на спайдерграммах наблюдаются минимумы по Ta, Nb, Th, Zr, Ti, максимумы по Sr, K, Ba, Cs (табл. 5, рис. 5). В пробе долерита из дайки 1-й генерации на горах Груберские наблюдается пониженное содержание легких РЗЭ и слабая положительная Eu-аномалия (Eu/Eu\* = 1.46) (см. рис. 5). В долеритах 1-й генерации, по сравнению с долеритами 2-й генерации, наблюдается обогащение Ti, Mg и Ni и большие вариации в содержаниях ряда некогерентных элементов

Таблица 4. Химический состав комплекса параллельных даек

Table 4. Chemical composition of sheeted dike complex

Образец	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	Сумма
Параллельные дайки 1-й генерации													
Д4-2	55.49	0.82	16.04	5.49	2.30	0.10	4.55	8.63	4.42	0.14	0.18	1.90	100.06
Д5-3	52.09	0.86	14.22	6.81	3.90	0.15	6.69	10.02	2.24	0.18	0.18	2.80	100.13
Д6-2	48.51	1.48	14.27	5.15	5.50	0.18	9.15	9.32	3.32	0.72	0.25	2.30	100.15
Д9-8	50.80	0.95	15.15	4.15	5.30	0.15	6.86	9.34	3.92	0.81	0.19	2.30	99.92
Д10-4	50.62	0.65	14.68	3.32	3.30	0.13	10.08	11.43	2.17	1.05	0.16	2.20	99.78
Д13-8	52.48	0.53	16.52	4.89	3.60	0.18	5.85	8.90	3.45	1.05	0.16	2.70	100.31
Д21-2	47.17	1.83	13.65	5.64	7.80	0.25	7.36	7.23	3.51	1.20	0.30	4.00	99.95
Д18-1	48.95	0.79	14.39	2.89	4.90	0.14	10.12	12.32	2.70	0.10	0.17	2.50	99.97
Д20-3	46.90	1.37	14.58	8.58	6.10	0.19	5.57	10.11	3.79	0.13	0.28	2.40	99.99
Параллельные дайки 2-й генерации													
Д4-4	46.19	0.72	14.04	7.03	5.90	0.17	9.58	10.60	2.46	0.18	0.17	2.90	99.94
Д5-2	54.16	0.71	13.7	5.91	4.50	0.12	5.90	9.08	3.09	0.13	0.16	2.60	100.06
Д20-1	47.66	0.63	19.01	5.09	4.50	0.15	5.40	8.62	5.17	0.09	0.17	3.50	99.99
Д3-1	45.31	0.89	15.08	10.36	4.20	0.19	6.36	11.77	3.00	0.19	0.16	3.10	100.61
Д3-2	46.98	0.77	17.00	8.05	4.00	0.18	6.10	10.87	2.80	0.16	0.15	3.60	100.66
Д3-3/1	47.17	0.67	16.79	6.03	5.70	0.19	6.41	11.08	2.50	0.42	0.09	3.40	100.45
Д3-3/2	47.69	0.79	16.46	8.83	3.90	0.19	6.22	9.95	3.00	0.28	0.11	3.20	100.61
Д3-4	43.16	0.54	8.73	6.70	6.20	0.20	19.18	9.32	1.00	0.28	0.08	5.00	100.39
Д30-2	44.17	0.48	9.52	6.07	4.90	0.19	19.19	9.88	0.72	0.43	0.15	4.10	99.80
Д3-6	62.46	1.41	14.52	6.18	2.30	0.15	1.74	5.12	4.80	0.21	0.31	1.40	100.60
Д15-1	47.07	2.61	14.03	6.47	7.40	0.20	5.56	9.89	3.79	0.27	0.39	2.30	99.98
Д16-5	57.37	1.43	15.77	4.48	4.30	0.17	2.69	5.93	5.15	0.55	0.38	1.90	100.12
Д22-2	46.14	0.91	17.10	8.17	5.70	0.22	6.03	6.31	3.48	1.75	0.19	4.10	100.08
Д13-7	49.97	0.61	16.75	6.13	4.10	0.18	5.83	8.91	3.35	0.77	0.16	3.20	99.96
Д13-6	63.13	0.78	15.01	5.59	2.20	0.16	1.62	4.06	5.10	0.49	0.23	1.95	100.31

Примечание. Места отбора проб: гора Балабан (обр. Д4-2, Д5-3, Д4-4, Д5-2), гора 483.9 (обр. Д6-2, Д3-1, Д3-2, Д3-3/1, Д3-3/2, Д3-4, Д30-2, Д3-6), гора 442 м (обр. Д9-8, Д10-4, Д15-1), гора Сухарная (обр. Д16-5), гора Ельчевишная (обр. Д13-8, Д13-7, Д13-6), гора Липовая (обр. Д21-2, Д22-2), горы Груберские (обр. Д18-1, Д20-3, Д20-1).

Note. Places of sampling: Mt. Balaban (samples Д4-2, Д5-3, Д4-4, Д5-2), Mt. 483.9 (samples Д6-2, Д3-1, Д3-2, Д3-3/1, Д3-3/2, Д3-4, Д30-2, Д3-6), Mt. 442 m (samples Д9-8, Д10-4, Д15-1), Mt. Suharnaya (sample Д16-5), Mt. Yelchevishnaya (samples Д13-8, Д13-7, Д13-6), Mt. Lipovaya (samples Д21-2, Д22-2), Mts. Gruberskie (samples Д18-1, Д20-3, Д20-1).

(Ta, Nb, Th, U и др.). Долериты 2-й генерации, по сравнению с внедрившимися ранее габбро, долеритами 1-й генерации и породами жильной серии, характеризуются большей железистостью.

Долериты из параллельных даек обеих генераций отчасти близки по составу к долеритам параллельных даек восточного обрамления Ревдинского массива (гора Азов и другие обнажения), по данным (Иванов, Берзин, 2013; Берзин, 2016), однако отличаются от них большими вариациями содержания TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O и ряда некогерентных элементов (см. рис. 5).

На дискриминационной диаграмме AFM (Kuno, 1968) точки составов долеритов попадают на границу полей составов толеитов и известково-щелочных базальтов, при этом заметно перекрываясь с полем составов долеритов параллельных даек горы Азов (рис. 6а). На диаграмме MnO–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–TiO<sub>2</sub> (Mullen, 1983) точки анализов группируются вблизи поля составов толеитов островных дуг и также значительно перекрываются с полем долеритов го-

ры Азов (рис. 6б). На диаграмме Th–Zr/117–Nb/16 (Wood, 1980) точки анализов попадают в поле составов базальтов островных дуг и частично в поля составов базальтов срединно-океанических хребтов (рис. 6в). На диаграмме Y–Cr (Pearce, 1982) точки составов образуют большой разброс, попадая преимущественно в поле составов толеитов островных дуг (рис. 6г). Таким образом, изученные долериты параллельных даек по геохимическим особенностям наиболее близко соответствуют базальтам обстановки спрединга над зоной субдукции.

Породы жильной серии также относятся к низковольтной нормальнощелочной серии (K<sub>2</sub>O – 0.08–0.53, Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O – 3.16–6.85 мас. %) и по содержанию кремнезема (SiO<sub>2</sub> – 45–73 мас. %) варьируют от лейкократовых габбро-диоритов до тоналитов и плагиогранитов.

Вмещающие габбро и диориты из изученных обнажений характеризуются вариациями содержания SiO<sub>2</sub> – от 42–45% в меланократовых габбро до



**Таблица 5.** Микроэлементный состав комплекса параллельных даек, г/т

**Table 5.** Element composition of dolerites from a sheeted dike complex, ppm

Порода	Долериты 1-й генерации				Долериты 2-й генерации			
Образец	Д6-2	Д18-1	Д10-4	Д13-8	Д3-2	Д30-2	Д15-2	Д13-7
Sc	32.417	42.729	34.065	22.722	26.148	51.695	26.188	26.517
V	215.32	223.81	161.28	186.83	268.47	271.01	268.91	248.69
Cr	316.67	350.49	269.86	53.783	20.421	1307.6	4.6012	3.2543
Mn	708.39	790.27	518.63	962.13	623.94	1242.2	598.91	967.52
Co	44.013	64.738	46.023	48.869	37.977	80.114	28.620	49.400
Ni	108.91	83.434	70.605	26.390	17.809	426.79	5.2662	7.3509
Cu	47.036	66.747	12.280	69.517	93.421	45.989	276.10	101.46
Zn	62.785	45.109	34.722	72.711	50.938	84.006	186.99	61.305
Rb	10.4950	0.2925	15.505	13.907	2.0067	5.2832	4.4162	9.9962
Sr	148.40	225.58	263.40	371.79	418.89	92.048	337.62	559.18
Y	23.811	11.448	11.550	12.134	9.5471	8.5825	12.651	11.756
Zr	28.008	15.658	26.251	31.565	11.645	23.647	22.674	17.047
Nb	3.8015	0.4841	1.3029	2.0089	1.0526	0.9546	1.1475	1.0246
Mo	0.1418	0.0937	0.0844	0.5091	0.0458	0.3855	0.8167	0.5616
Ag	0.0909	0.0612	0.3151	0.1321	5.8880	0.0432	0.5065	0.0797
Cd	0.0668	0.0704	0.0324	0.1111	0.1494	0.0762	0.7734	0.0957
Cs	0.1393	0.0281	0.2749	0.2710	0.0626	0.1524	0.0878	0.2402
Ba	76.472	7.510	99.917	179.77	31.120	76.163	39.061	133.22
La	5.2688	1.0842	3.1017	9.3821	3.1444	4.3105	5.9432	6.8285
Ce	15.684	3.8051	8.7982	22.846	8.1492	11.3459	15.251	16.162
Pr	2.5588	0.7113	1.3656	3.1018	1.2451	1.6128	2.3422	2.3246
Nd	12.905	3.7812	6.9244	12.786	6.0172	7.3037	11.605	9.9410
Sm	3.9983	1.6563	2.0210	2.9359	1.7738	1.9994	2.8907	2.5128
Eu	1.3189	0.8989	0.6753	1.0748	0.7722	0.7365	1.0274	0.9529
Gd	4.3784	2.1255	2.1441	2.5613	1.7713	1.9007	2.5927	2.4396
Tb	0.7003	0.3573	0.3322	0.3904	0.2846	0.3002	0.3905	0.3822
Dy	4.7325	2.4728	2.2602	2.4561	1.9471	1.8133	2.5185	2.3890
Ho	0.9661	0.5094	0.4637	0.4947	0.4221	0.3524	0.5129	0.4820
Er	2.9403	1.3819	1.3505	1.4049	1.2032	1.0366	1.4814	1.5175
Tm	0.3761	0.1932	0.1886	0.2208	0.1540	0.1488	0.1978	0.2175
Yb	2.5453	1.2284	1.2152	1.4872	1.0077	0.9936	1.2566	1.4815
Lu	0.3448	0.1669	0.1726	0.2304	0.1412	0.1366	0.1850	0.2311
Hf	1.2833	0.6303	0.9844	0.9318	0.4324	0.7183	0.7423	0.5593
Ta	0.2426	0.0462	0.1037	0.1214	0.0698	0.0340	0.0509	0.0700
Pb	0.4124	0.2615	0.6322	4.3828	1.1134	1.0705	9.4456	1.7156
Bi	0.0105	0.0047	0.0022	0.0309	0.0051	0.0211	0.0655	0.0189
Th	0.3118	0.0231	0.2793	1.0922	0.1811	0.2330	0.6171	0.4189
U	0.0798	0.0132	0.0846	0.3169	0.1060	0.1507	0.2290	0.1189

Примечание. Места отбора проб: гора 489.3 м (обр. Д6-2, Д3-2, Д30-2), горы Груберские (обр. Д18-1), гора 442 м (обр. Д10-4, Д15-2), гора Ельчевишная (обр. Д13-8, Д13-7).

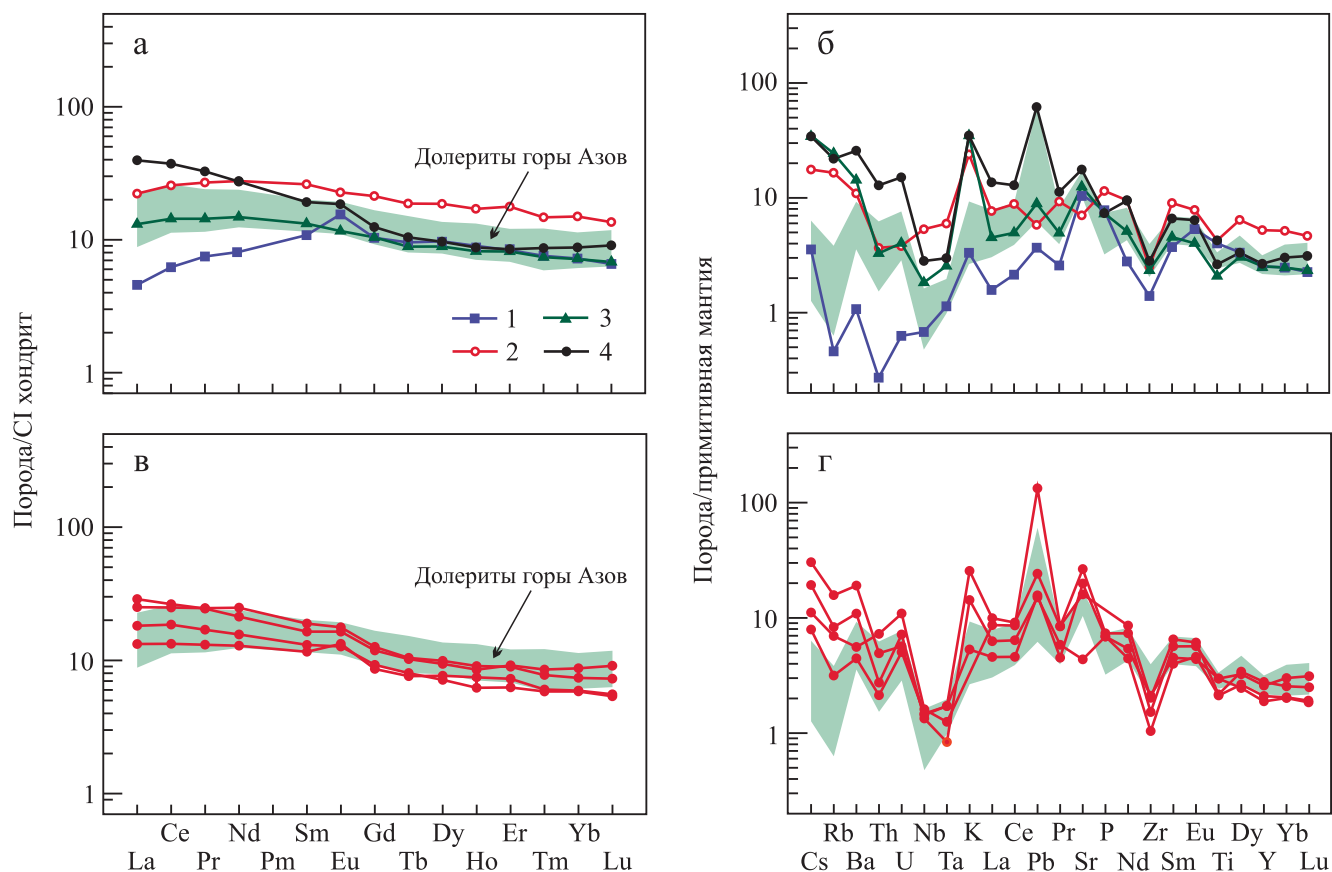
Note. Places of sampling: Mt. 489.3 m (samples Д6-2, Д3-2, Д30-2), Mts. Gruberskie (sample Д18-1), Mt. 442 m (samples Д10-4, Д15-2), Mt. Yelchevishnaya (samples Д13-8, Д13-7).

53–56 мас. % в лейкократовых габбро и в кварцевых диоритах (гора Ельчевишная). По сравнению с габброидами массивов Платиноносного пояса габбро из скринов комплекса параллельных даек характеризуется повышенным содержанием MgO – 5.8–12.0 мас. %, преимущественно низкой железистостью ( $Fe/(Fe + Mg)_{\text{мол}} = 0.40$ ) и пониженным содержанием Sr (180–260 г/т), что соответствует габбро офиолитовой ассоциации. Кварцевые диориты горы Ельчевишная также относятся к нормально-

щелочной низкокалийевой серии, характеризуются умеренной железистостью ( $Fe/(Fe + Mg)_{\text{мол}} = 0.54–0.56$ ) и умеренными содержаниями Sr (532 г/т). Диориты и кварцевые диориты являются достаточно нетипичными породами для офиолитового разреза.

#### U-Pb возраст цирконов из параллельных даек

Цирконы представлены короткопризматическими кристаллами и их осколками размером от



**Рис. 5.** Спайдерграмма распределения редкоземельных (а, в) и редких элементов (б, г) для долеритов комплекса параллельных даек, нормированных соответственно по CI хондриту и примитивной мантии, по (Sun, McDonough, 1989).

а, б – долеритовые дайки 1-й генерации (1 – обр. Д18-1, горы Груберские, 2 – обр. Д6-2, гора 489.3 м, 3 – обр. Д10-4, гора 442 м, 4 – обр. Д13-7, гора Ельчевишная); в, г – параллельные дайки 2-й генерации. Серое поле – составы долеритов параллельных даек и базальтов в блоке офиолитов в восточном обрамлении Ревдинского массива (гора Азов и др. обнажения) (Иванов, Берзин, 2013; Берзин, 2016).

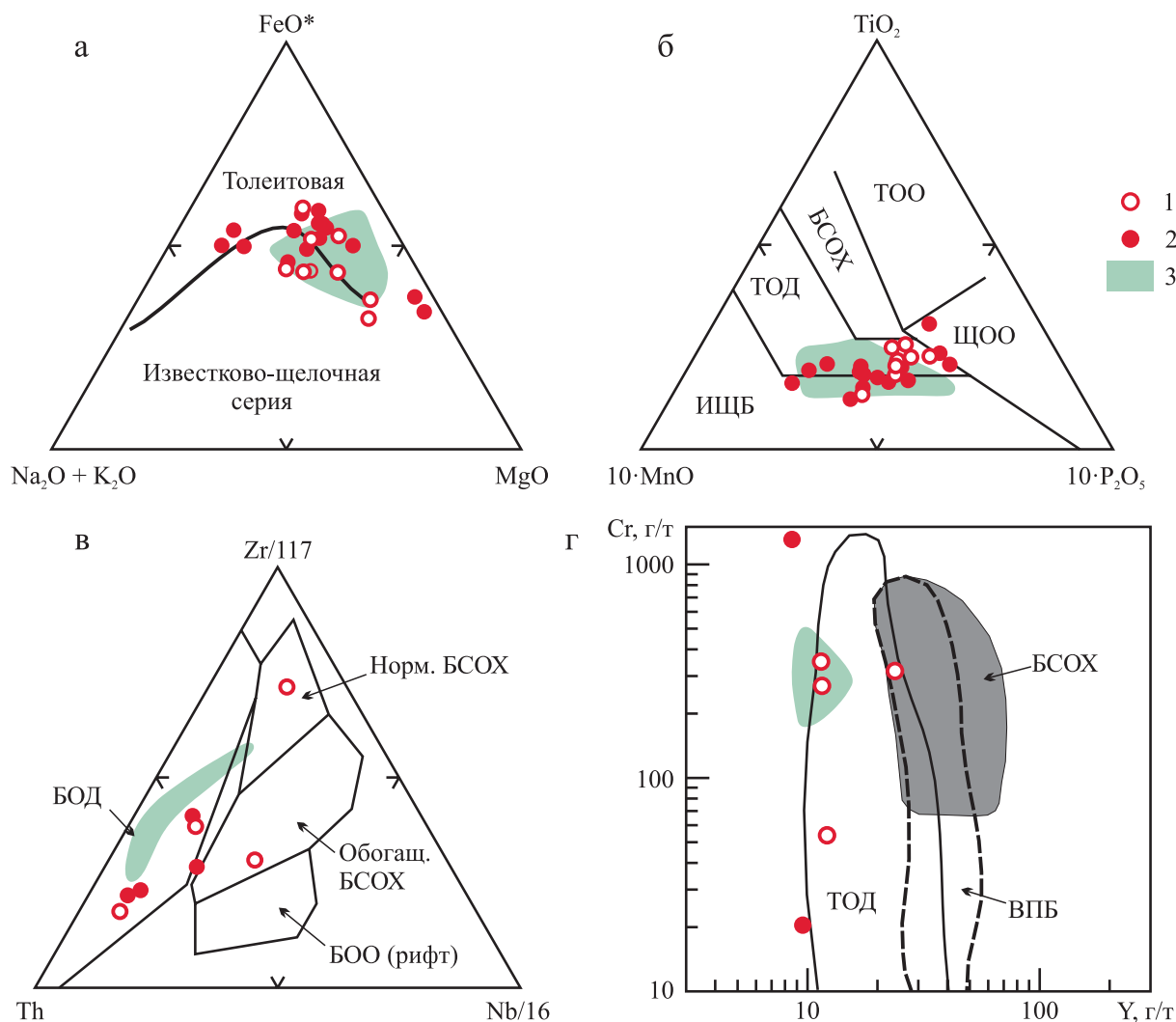
**Fig. 5.** Diagram of the distribution of rare earth (a, в) and trace elements (б, г) for dolerites of the complex of sheeted dikes, normalized to CI chondrite and primitive mantle respectively, according to (Sun, McDonough, 1989).

а, б – dolerite dykes of the 1st generation (1 – sample Д18-1, Mts. Gruberskie, 2 – sample Д6-2, Mt. 489.3 m, 3 – sample Д10-4, Mt. 442 m, 4 – sample Д13-7, Mt. Yelchevishnaya). в, г – dolerite dykes of the 2nd generation. Gray field – compositions of dolerites of sheeted dikes and basalts in the ophiolites block in the eastern frame of the Revdinsky massif (Ivanov, Berzin, 2013; Berzin, 2016).

100 до 300 мкм (рис. 7). U-Pb возраста цирконов преимущественно группируются в два кластера (табл. 6, рис. 8). Первый кластер со средним конкордантным возрастом  $425.6 \pm 2.9$  млн лет ( $N = 9$ , СКВО = 2.2, вероятность = 0.14) соответствует лудловскому отделу силура. Второй кластер с возрастом  $404.0 \pm 2.9$  млн лет ( $N = 9$ , СКВО = 0.14, вероятность = 0.71) отвечает нижнему девону. Кроме того, три кратера в цирконах 4 и 17 показали более молодые датировки с конкордантным возрастом  $362.0 \pm 5.6$  млн лет ( $N = 3$ , СКВО = 0.063, вероятность = 0.80), соответствующим верхнему девону. Ядро циркона 23 (точка 23-1) имеет более древний  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возраст – 452 млн лет (см. табл. 6, рис. 7).

В других цирконах не выявилась разница в возрасте между ядерной частью и каймой. Несколько анализов в цирконах показали дискордантные возрасты (см. табл. 6, рис. 8).

Цирконы с возрастом  $425.6 \pm 2.9$  млн лет имеют тонкую осциляторную зональность (см. рис. 7, цирконы 15, 18, 23, 31 и 32) или секториально-зональное строение (см. рис. 7, цирконы 6 и 22). В цирконе 31 выявлено включение размером около 10 мкм, сложенное плагиоклазом  $An_{54}$  (рис. 9), вероятно захваченное при кристаллизации магматического расплава. Все эти данные позволяют интерпретировать возраст  $425.6 \pm 2.9$  млн лет как время внедрения параллельных долеритовых да-



**Рис. 6.** Положение точек составов долеритов параллельных даек на дискриминационных диаграммах. а – AFM (Kuno, 1968), б –  $\text{MnO}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{TiO}_2$  (Mullen, 1983), в –  $\text{Th}-\text{Zr}/117-\text{Nb}/16$  (Wood, 1980), г –  $\text{Y}-\text{Cr}$  (Pearce, 1982).

1 – долеритовые дайки 1-й генерации, 2 – параллельные дайки 2-й генерации, 3 – составы долеритов параллельных даек и базальтов в блоке офиолитов в восточном обрамлении Ревдинского массива (гора Азов и другие обнажения) (Иванов, Берзин, 2013; Берзин, 2016).

**Fig. 6.** Composition points of dolerites of sheeted dikes on discrimination diagrams. а – AFM (Kuno, 1968), б –  $\text{MnO}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{TiO}_2$  (Mullen, 1983), в –  $\text{Th}-\text{Zr}/117-\text{Nb}/16$  (Wood, 1980), г –  $\text{Y}-\text{Cr}$  (Pearce, 1982).

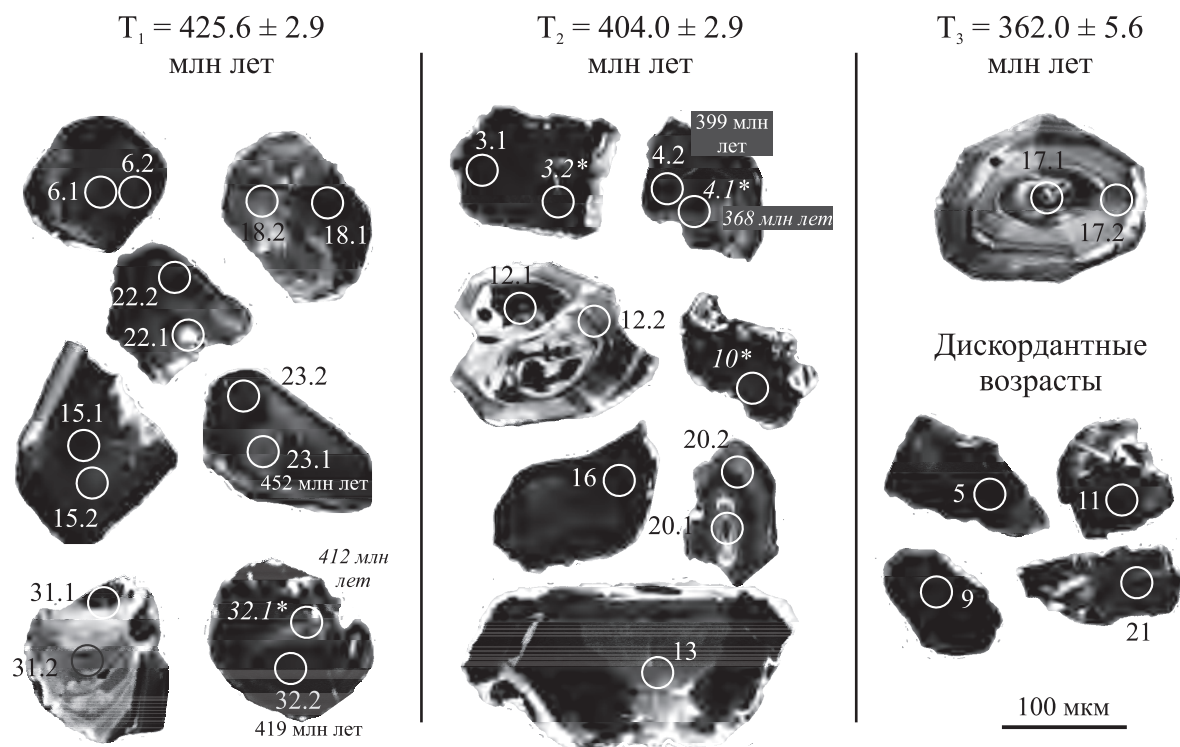
1 – dolerite dykes of the 1st generation, 2 – sheeted dikes of the 2nd generation, 3 – compositions of dolerites of sheeted dikes and basalts in the ophiolites at east frame of the Revdinsky massif (Ivanov, Berzin, 2013; Berzin, 2016).

ек 1-й генерации. В цирконе 32 наблюдается линейная зона рекристаллизации (залеченная трещина). На наш взгляд, омоложенный  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возраст 412 млн точки 32.1 связан с частичным попаданием в кратер абляции данной зоны рекристаллизации. Поэтому данное определение возраста не было использовано при расчете конкордантного возраста кластера  $T_2$ .

Цирконы из возрастного кластера  $404.0 \pm 2.9$  млн лет имеют как ритмично-зональное строение, так и следы наложенной перекристаллизации (см.

рис. 7). Например, в цирконах 3 и 10 на катодолюминесцентных снимках отсутствует зональность или секториальное строение, их строение можно охарактеризовать как блоковое или микрозернистое (см. рис. 7). В данных цирконах присутствуют многочисленные флюидные включения, а также включения низкотемпературных метаморфогенных минералов (магнезиальная роговая обманка, шамозит, клиноцоизит, кварц) (см. рис. 9). Исходя из этого, можно предположить, что данные цирконы сформировались в результате перекристаллиза-





**Рис. 7.** Катодолюминесцентные (CL) изображения цирконов из долеритов комплекса параллельных даек блока офиолитов в структуре Ревдинского массива.

Кружками показаны точки измерения U-Pb возраста. Номера кратеров соответствуют номерам в табл. 1. Звездочкой (\*) и курсивом отмечены омоложенные возраста в зонах перекристаллизации в цирконах 32, 3, 4, 10.

**Fig. 7.** Cathodoluminescent (CL) images of zircons from dolerites of a sheeted dike complex from an ophiolite block in the structure of the Revdinsky massif.

The circles indicate the measurement points of the U-Pb age. The crater numbers correspond to the numbers in Table 1. An asterisk (\*) and italics indicate rejuvenated ages in recrystallization zones in zircons 32, 3, 4, 10.

ции ранее сформировавшихся кристаллов циркона под действием флюидных растворов на этапе метаморфизма или внедрения более молодых жильных комплексов.

В центральной части циркона 12 наблюдаются зоны рекристаллизации (светлые на катодолюминесцентном изображении, см. рис. 7, 9), пересекающие вкрест ритмичную зональность. Зоны рекристаллизации имеют сложную криволинейную форму с “разветвлениями” и, по всей видимости, сформировались при рекристаллизации (залечивании) трещин в кристалле циркона. В данном цирконе встречены включения, сложенные андезином ( $An_{36}$ ), кварцем и клиноцоизитом (см. рис. 9). Последние два минерала приурочены к зоне рекристаллизации в кристалле циркона. Кратеры для определения возраста в цирконе 12 были выставлены в участки с ритмично-зональным строением и не попали в зоны рекристаллизации. Поэтому полученный в данном зерне  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возраст 406 и 408 млн лет интерпретируется нами как время кристаллизации данного циркона.

В цирконе 4 отмечены включения амфибола (магнезиальная роговая обманка) и калиевого полевого шпата (см. рис. 9). Вблизи включений наблюдается нечетко очерченная осветленная зона, вероятно представляющая собой зону рекристаллизации (см. рис. 7).  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возраст кратера 4.2, расположенного в ритмично-зональной зоне, составляет 400 млн лет и, по всей видимости, соответствует времени образования циркона. Возраст  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  кратера в осветленной зоне вблизи включений составил 361 млн лет, он попадает в возрастную кластер  $T_3$  и, возможно, отвечает времени рекристаллизации под действием метаморфических флюидов.

Возрасты цирконов 3 и 10 со следами перекристаллизации составляют 400–410 млн лет (см. табл. 6) и перекрываются возрастами цирконов “магматического” облика из кластера  $T_2$ . Вероятно, это связано с перекристаллизацией цирконов под влиянием флюидов при внедрении более поздних жильных пород диорит-тоналитовой серии или параллельных даек 2-й генерации.

**Таблица 6.** Результаты LA-ICP-MS U-Pb-датирования цирконов

**Table 6.** Results of LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons

№ образ- ца	Изотопные отношения							Возраст, млн лет					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	Rh <sub>o</sub>	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$
Древнее ядро													
23-1	0.057	0.003	0.57	0.03	0.073	0.001	0.33	475	123	455	22	452	8
$T_1 = 425.6 \pm 2.9$ млн лет													
6-1	0.057	0.003	0.53	0.03	0.067	0.001	0.34	491	96	431	17	420	7
6-2	0.055	0.003	0.51	0.03	0.067	0.001	0.33	420	113	420	19	420	7
15-1	0.059	0.003	0.55	0.03	0.068	0.001	0.34	585	106	448	19	422	7
18-1	0.056	0.004	0.53	0.04	0.069	0.002	0.30	446	153	434	26	432	9
18-2	0.055	0.005	0.51	0.05	0.068	0.002	0.29	402	196	421	32	424	11
22-1	0.055	0.003	0.53	0.03	0.069	0.001	0.31	432	139	432	23	432	9
23-2	0.060	0.003	0.57	0.03	0.070	0.001	0.33	589	117	460	21	434	8
31-1	0.057	0.008	0.56	0.08	0.070	0.003	0.30	509	294	448	50	437	17
32-2	0.058	0.005	0.53	0.04	0.067	0.002	0.31	514	168	434	30	419	10
$T_2 = 404.0 \pm 2.9$ млн лет													
12-1	0.054	0.004	0.49	0.04	0.065	0.001	0.29	376	157	402	25	406	9
12-2	0.055	0.005	0.49	0.05	0.065	0.002	0.25	393	200	406	31	408	9
13	0.055	0.004	0.48	0.03	0.063	0.001	0.30	399	144	396	23	395	8
16	0.057	0.003	0.51	0.03	0.065	0.001	0.34	477	103	417	17	407	7
20-1	0.055	0.005	0.49	0.05	0.064	0.002	0.27	414	202	402	32	400	10
20-2	0.055	0.006	0.48	0.06	0.064	0.002	0.28	397	253	400	40	400	13
3-1	0.055	0.004	0.49	0.04	0.065	0.002	0.31	421	180	408	29	406	10
4-2	0.055	0.003	0.48	0.03	0.064	0.001	0.32	407	125	400	20	399	8
10	0.056	0.003	0.51	0.03	0.066	0.001	0.33	444	121	416	20	411	8
$T_3 = 362 \pm 5.6$ млн лет													
17-1	0.054	0.005	0.41	0.04	0.056	0.002	0.28	350	215	349	31	349	10
17-2	0.054	0.008	0.44	0.07	0.059	0.003	0.28	353	301	368	47	370	15
4-1	0.053	0.004	0.43	0.03	0.059	0.001	0.30	320	147	361	21	368	8
Дискордантные определения возраста													
3-2	0.061	0.003	0.55	0.02	0.065	0.001	0.34	631	91	443	16	407	6
5	0.060	0.003	0.53	0.03	0.065	0.001	0.34	587	101	434	18	406	7
9	0.059	0.003	0.52	0.03	0.065	0.001	0.34	560	101	427	18	403	7
11	0.060	0.003	0.52	0.02	0.064	0.001	0.35	600	92	428	16	397	6
15-2	0.060	0.003	0.56	0.03	0.067	0.001	0.33	618	112	452	20	421	8
22-2	0.062	0.004	0.56	0.03	0.066	0.001	0.33	670	125	452	23	411	8
21	0.064	0.004	0.61	0.04	0.069	0.002	0.32	739	140	481	27	429	9
32-1	0.055	0.006	0.50	0.06	0.066	0.002	0.29	409	253	411	40	412	14
31-2	0.065	0.006	0.59	0.05	0.066	0.002	0.30	759	182	472	34	415	11

Три точки определения в цирконах 4 и 17 показали более молодые датировки с конкордантным возрастом  $362 \pm 5.6$  млн лет ( $N = 3$ , СКВО = 0.063, вероятность = 0.8), соответствующим фаменскому ярусу верхнего девона. Циркон 17 имеет ритмично-зональное строение и содержит включения кварца (см. рис. 7, 9).

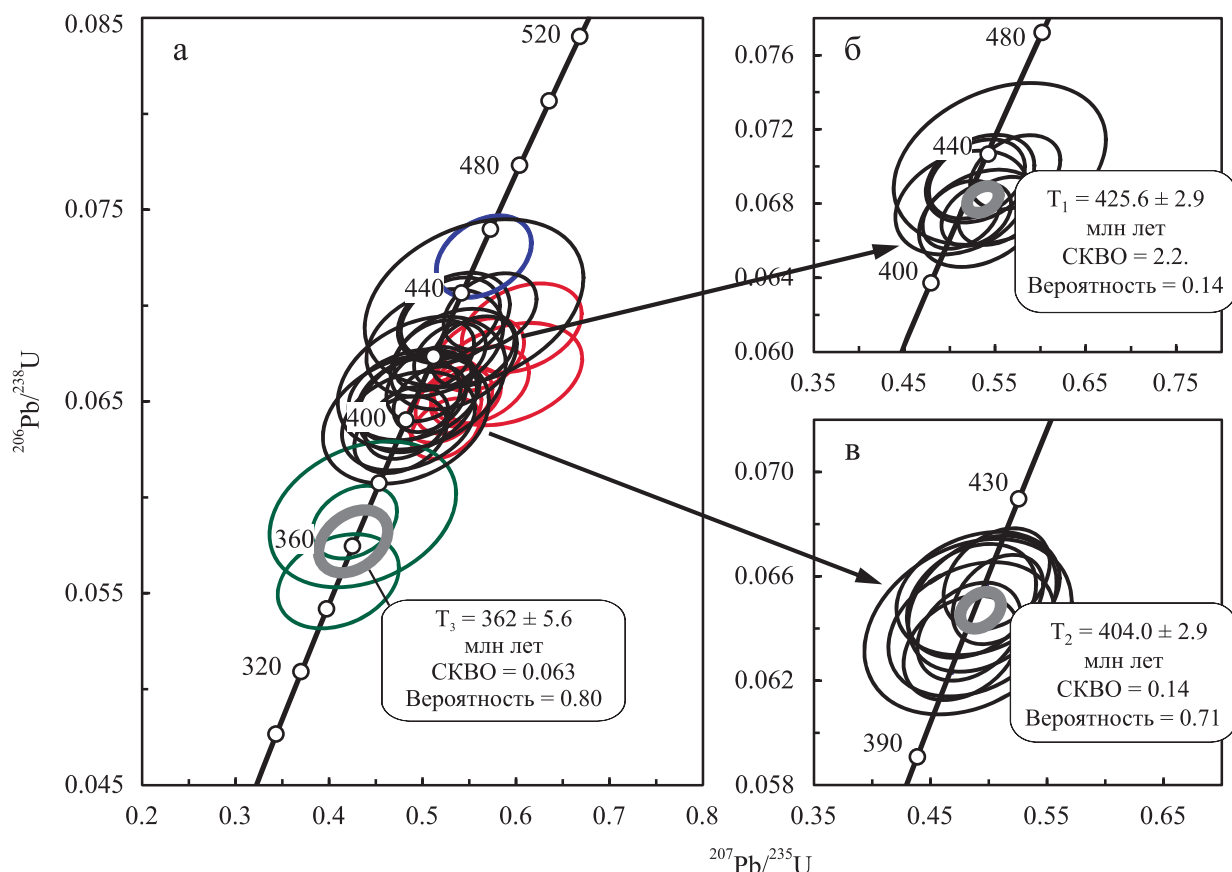
Более древнее ядро в цирконе 23 с  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возрастом 452 млн лет отчетливо выделяется на катодолуминесцентном изображении. В отличие от призматического габитуса конечного кристалла циркона ядро имеет изометричный облик с преобладанием граней дипирамиды. Вероятнее всего, ядро является ксеногенным и было захвачено из источника формирования магмы.

Дискордантные цирконы имеют секториальное строение (с темной окраской на катодолуми-

несцентных изображениях) или сложное блочное строение, которое можно интерпретировать как результат перекристаллизации.

## ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В структуре Ревдинского массива Платиноносного пояса Урала присутствуют тектонические блоки офиолитов, соответствующие уровню корневой зоны комплекса параллельных даек, сложенные низкостроениевыми габброидами офиолитовой ассоциации, прорываемыми двумя генерациями параллельных долеритовых даек, между становлением которых происходило внедрение пород жильной диорит-тоналитовой серии. Формирование офиолитов в данных тектонических блоках происходило в обстановке спрединга над зоной



**Рис. 8.** Диаграмма  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  с конкордией для цирконов из долеритов комплекса параллельных даек из блока офиолитов в структуре Ревдинского массива.

а – все определения возраста; серым кружком показан конкордантный возраст  $362.0 \pm 5.6$  млн лет по трем точкам (зеленые кружки), синим выделен возраст древнего ядра в цирконе 23, красным – дискордантные определения возраста; б, в – возрастные кластеры  $425.6 \pm 2.9$  и  $404.0 \pm 2.9$  млн лет (без дискордантных определений возраста).

**Fig. 8.** Diagram  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  with concordia for zircons from dolerites of the sheeted dike complex from the ophiolite block in the structure of the Revdinsky massif.

а – all age determinations; the gray circle shows the concordant age of  $362.0 \pm 5.6$  Ma at three points (green circles), blue indicates the age of the ancient core in the zircon 23, red indicates discordant age definitions; б, в – age clusters  $425.6 \pm 2.9$  and  $404.0 \pm 2.9$  Ma (without discordant age definitions).

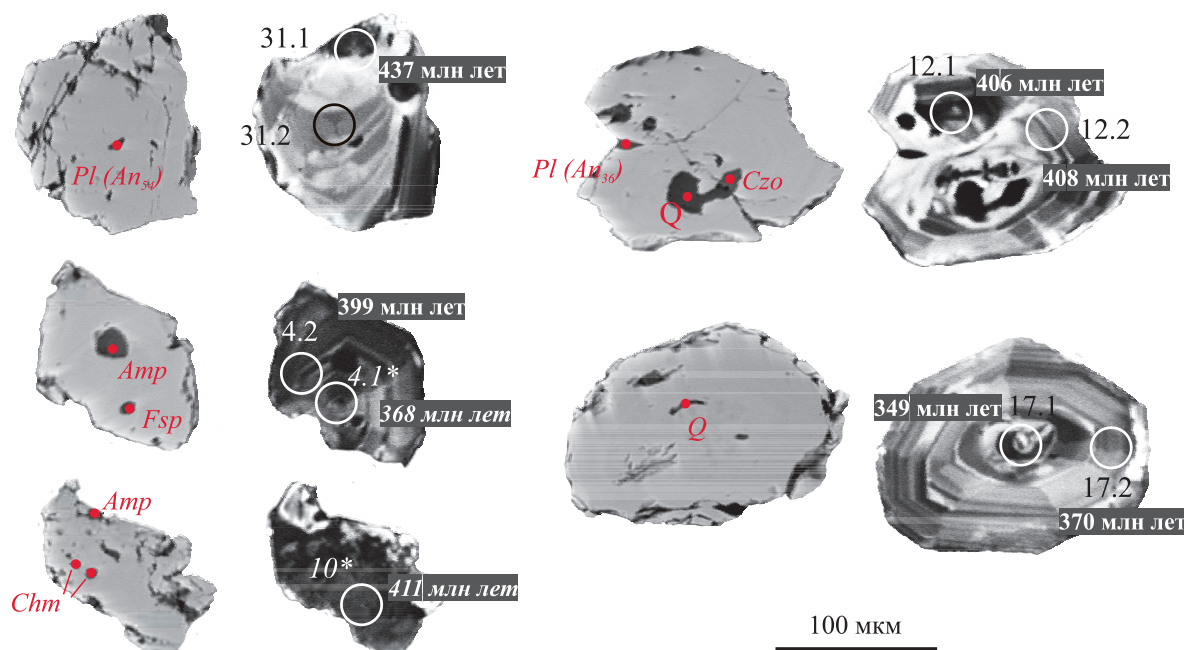
субдукции. Между внедрением параллельных даек 1-й и 2-й генераций произошел относительный разворот оси спрединга на  $40\text{--}70^\circ$  и некоторое изменение геохимических характеристик внедряющихся базальтовых магм.

Исходя из полученных данных о строении цирконов и минералогии включений в цирконах, возраст цирконов  $425.6 \pm 2.9$  млн лет определен нами как время внедрения комплекса параллельных даек в тектоническом блоке офиолитов. Ранее данный комплекс параллельных даек условно считался ордовикским. Фактически возраст  $425.6 \pm 2.9$  млн лет отвечает времени прохождения спрединга над зоной субдукции в Тагильской палеоостровной дуге.

Возраст цирконов  $404.0 \pm 2.9$  млн лет обусловлен наложенными вторичными изменениями доле-

ритов в ходе последующих тектоно-магматических событий. Вероятнее всего, он связан с внедрением в непосредственной близости жильных пород диорит-тоналитовой серии и внедрением параллельных даек 2-й генерации. Включения метаморфогенных минералов в цирконах данного возраста могли сформироваться в результате замещения магматических включений или могли быть захвачены при росте цирконов в процессе метаморфизма. Датированные нами долериты из даек 1-й генерации метаморфизованы в условиях зеленосланцевой и низов амфиболитовой фации регионального метаморфизма. В них не сохранилось заметных следов ороговикования или перекристаллизации в ходе контактового метаморфизма. Поэтому, вероятнее всего, решающую роль в перекристалли-





**Рис. 9.** Включения в цирконах. Изображения в обратно-отраженных электронах (BSE) (слева) и катодолюминесцентные изображения (CL) (справа).

Красным цветом показаны точки электронно-зондового анализа. Кружками отмечены кратеры (как на рис. 7), указаны их номера и их  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возрасты. Минералы: *Amp* – амфибол (магнезиальная роговая обманка), *Chm* – шамозит, *Czo* – клиноцоизит, *Fsp* – калиевый полевой шпат, *Pl* – плагиоклаз, *An* – содержание анортитового минала в плагиоклазе, *Q* – кварц.

**Fig. 9.** Inclusions in zircons. Backscattered electron (BSE) images (left) and cathodoluminescence (CL) images (right).

The red dots indicate the points of electron probe micro analysis. The circles mark the craters (as in Fig. 7), their numbers and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age. Abbreviations of minerals: *Amp* – amphibole (magnesian hornblende), *Chm* – chamosite, *Czo* – clinozoisite, *Fsp* – potassium feldspar, *Pl* – plagioclase, *An* – content of anorthite in plagioclase, *Q* – quartz.

зации цирконов играли метаморфические флюидные растворы.

Следует отметить, что возрасты цирконов из двух данных кластеров частично перекрываются в пределах погрешности, что вызывает некоторые сложности в разграничении сближенных во времени тектоно-магматических событий. Поэтому возраст внедрения жильных пород диоритоналитовой серии и параллельных даек 2-й генерации нуждается в дополнительном уточнении. Возраст цирконов  $362.0 \pm 5.6$  млн лет соответствует времени существования активной континентальной окраины на Среднем Урале (Смирнов и др., 2014, 2016).

Полученный возраст внедрения долеритовых даек в блоке офиолитов в структуре Ревдинского массива ( $425.6 \pm 2.9$  млн лет) совпадает в пределах погрешности с U-Pb возрастом цирконов ( $428.5 \pm 3.7$  млн лет) из габбро в скринах параллельных даек в тектоническом блоке в пределах Рефтинского массива (Восточная зона Среднего Урала), определенным В.Н. Смирновым и К.С. Ивановым (2010). Таким образом, подтверждается одинаковое время прохождения процессов спрединга над зоной суб-

дукции в Восточно-Уральской и в Тагильской зонах Среднего Урала. На Среднем Урале в лудловское время происходило излияние островодужных вулканитов (базальтов, андезибазальтов, трахибазальтов) Тагильской островной дуги с формированием именовской свиты и гороблаготатской толщи (Бороздина и др., 2010; Пучков, 2010; Петров и др., 2011; Водолазская и др., 2015).

Для параллельных долеритовых даек, секущих подушечные лавы, горы Азов в восточном обрамлении Ревдинского массива ранее были получены более молодые U-Pb (SHRIMP-II) возрасты цирконов ( $382.3 \pm 4.4$ ,  $387.1 \pm 4.1$  и  $374.3 \pm 6.2$  млн лет) (Иванов, Берзин, 2013). Однако данные датировки, вероятнее всего, являются “омоложенными” в результате метаморфизма, поскольку в цирконах данного возраста зафиксированы включения метаморфогенных минералов, а Sm-Nd возраст данных пород указывает на их более древнее раннепалеозойское время формирования (Иванов и др., 2019). Несмотря на то что параллельные дайки горы Азов и изученные обнажения параллельных даек, секущих габбро, образуют близко расположенные тектонические блоки, разница в U-Pb возрасте цирконов

пока что не позволяет рассматривать их как разноглубинные уровни одного офиолитового разреза.

В пределах Тагильской зоны на широтном уровне Ревдинского массива прослеживаются тектонические блоки серпентинитов, относимые к Серовско-Маукскому офиолитовому поясу. Гипотетически изученные нами тектонические блоки офиолитов в структуре Ревдинского массива могут быть связаны с ультрамафитами Серовско-Маукского офиолитового пояса, однако прямые доказательства этого на настоящий момент отсутствуют. В качестве аргумента против такой интерпретации выступает тот факт, что севернее офиолиты Серовско-Маукского офиолитового пояса прослеживаются в восточной части Тагильской зоны. Соответственно, блоки офиолитов на границе Тагильской зоны и массивов Платиноносного пояса по их положению в структуре Урала можно выделить в отдельный офиолитовый пояс.

Совмещение изученных блоков пород офиолитовой ассоциации и габброидов Платиноносного пояса в рамках Ревдинского массива, по всей видимости, произошло в результате тектонического сочленения. Остается неизвестным время совмещения данных пород разного генезиса. Возможно, данному событию отвечает возрастной кластер цирконов  $362.0 \pm 5.6$  млн лет. Если рассматривать Ревдинский массив по границам тектонических разломов, отделяющих его с запада от метаморфизованных вулканитов Салатимской зоны, а с востока – от вулканитов Тагильской зоны, то Ревдинский массив можно рассматривать как полиформационный, сложенный породами двух генетически разных ассоциаций. В то же время, поскольку изученные фрагменты офиолитов приурочены к восточному тектоническому контакту Ревдинского массива, их можно рассматривать как тектонические блоки офиолитов, маркирующие крупный тектонический разлом. Последнее вполне типично для Урала и в целом для многих складчатых поясов мира. Однако в этом случае стоит обратить внимание на то, что западная тектоническая граница блока офиолитов достоверно не была прослежена ни в результате предшествующих геологосъемочных работ, ни авторами в ходе полевых исследований. Ее положение только предполагается по косвенным признакам (отрицательным формам рельефа). В этой связи изученные фрагменты офиолитов рассмотрены нами в структуре Ревдинского массива, пока достоверно не установлена их обособленная тектоническая природа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берзин С.В. (2014) Фрагменты офиолитов мариинского комплекса в обрамлении и в структуре Ревдинского массива (Средний Урал). *VII Сибирская науч.-практ. конф. молодых ученых по наукам о Земле (с участ. иностранных специалистов)*. Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т., 8-9.
- Берзин С.В. (2016) Офиолиты мариинского комплекса в восточном и западном обрамлении Ревдинского массива. *Литосфера*, (1), 88-106.
- Берзин С.В., Дугушкина К.А. (2020) Комплекс параллельных даек в обрамлении и в структуре Ревдинского массива Платиноносного пояса Урала. *Металлогения древних и современных океанов*. Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 191-193.
- Бороздина Г.Н., Иванов К.С., Богоявленская В.М. (2010) Стратиграфия вулканогенных и вулканогенно-осадочных отложений Салатимской и Тагильской зон Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 152 с.
- Водолазская В.П., Тетерин И.П., Кириллов В.А., Лукьянова Л.И., Петров Г.А., Стефановский В.В., Морозов Г.Г., Жданов А.В., Жиганов А.В., Стряпунина Е.В., Еськин А.Г., Петрова Т.А., Вербицкий И.В., Вербицкая Н.В. (2015) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист О-40. Пермь. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 497 с.
- Зайцева М.В., Пупышев А.А., Шапова Ю.В., Вотяков С.Л. (2016) U-Pb-датирование цирконов с помощью квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой NexION300S и приставки для лазерной абляции NWR213. *Аналитика и контроль*, 20(4), 294-306.
- Иванов К.С., Берзин С.В. (2013) Первые данные о U-Pb возрасте цирконов из реликтовой зоны задугового спрединга горы Азов (Средний Урал). *Литосфера*, (2), 92-104.
- Иванов К.С., Берзин С.В., Ерохин Ю.В. (2012) Первые данные об U-Pb возрасте цирконов из реликтовых зон спрединга на Среднем Урале. *Докл. АН*, 443(1), 78-83.
- Иванов К.С., Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Ронкин Ю.Л., Хиллер В.В. (2019) Время задугового спрединга Уральской палеоостровной дуги (по результатам Sm-Nd и U-Pb датирования долеритов и изучения состава включений в цирконе). *Докл. АН*, 484(3), 340-343.
- Калугина Р.Д., Копанев В.Ф., Стороженко Е.В., Лукин В.Г., Степанов А.Е., Михалева Е.Н., Рапорт М.С., Ильясова Г.А., Суслов Д.Л., Шуб И.З., Михайлов А.П., Глазырина Н.С., Герасименко Б.Н. (2017) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 200 000. Изд. 2-е. Сер.: Среднеуральская. Лист О-41-XXXI. Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГБУ ВСЕГЕИ, 180 с.
- Коротеев В.А., Семенов И.В. (2008) Влияние конвекционно-спрединговых и мантийно-плумовых процессов в формировании химического состава базальтов и плутонических пород рифта палеоуральского океана. *Литосфера*, (5), 54-83.
- Петров Г.А., Жиганов А.А., Стефановский В.В., Шалагинов В.В., Петрова Т.А., Овчинников Р.А., Гертман Т.А. (2011) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист О-41. Екатеринбург. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 492 с.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (акту-

- альные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Семенов И.В. (2007) Влияние мантийных плюмов на сегментарность, химический состав базальтов и плутонов рифта Уральского палеоокеана. *Геология Урала и сопредельных территорий*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 75-97.
- Семенов И.В., Шилов В.А., Верховский А.М. (1978) О структурных и возрастных соотношениях рифтогенного комплекса параллельных базальтовых даек с габбро-гипербазитовыми массивами Платиноносного пояса Урала. *Докл. АН СССР*, **243**(1), 187-190.
- Семенов И.В., Шилов В.А., Ронкин Ю.Л. (1999) Структурные и относительно-возрастные соотношения комплекса параллельных долеритовых даек с породами Ревдинского габбрового массива (Средний Урал). *Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 146*, 132-139.
- Смирнов В.Н., Иванов К.С. (2010) Первая силурийская U-Pb-датировка (SHRIMP-II) офиолитов на Урале. *Докл. АН*, **430**(2), 218-221.
- Смирнов В.Н., Иванов К.С., Ларионов А.Н. (2014) Возраст и геодинамические условия формирования гранитоидов Верхисетского батолита, восточный склон Среднего Урала (по результатам U-Pb SIMS-датирования цирконов). *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **22**(6), 26-44.
- Смирнов В.Н., Иванов К.С., Шокальский С.П. (2016) Новые данные о времени существования окраинно-континентальной зоны субдукции на Среднем Урале. *Докл. АН*, **471**(4), 455-458.
- Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. (2001) Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *J. Petrol.*, **42**, 655-671.
- Kuno H. (1968) Differentiation of basalt magmas. *Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition. V. 2*. N. Y., Interscience, 623-688.
- Mullen E.D. (1983) MnO-TiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **62**, 53-62.
- Otten M.T. (1984) The origin of brown hornblende in the Artfjallet gabbro and dolerites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, 189-199.
- Pearce J.A. (1982) Trace element characteristics of lavas from destructive plate margins. *Andesites: Orogenic andesites and related rocks*. John Wiley and Sons, 525-548.
- Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, **42**, 313-345.
- Wood D.A. (1980) The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **50**(1), 11-30.
- Берзин С.В. (2014) Fragments of ophiolites of the Mariinsky complex in the frame and structure of the Revdinsky massif (Middle Urals). *VII Siberian Scientific and Practical Conference of Young Scientists on Earth Sciences (with the participation of foreign experts)*. Novosibirsk, Novosibirsk State Univ. Publ., 8-9. (In Russ.)
- Berzin S.V. (2016) Ophiolites of Mariinsky complex at east and west frames of Revdinsky Massif. *Lithosphere (Russia)*, (1), 88-106. (In Russ.)
- Berzin S.V., Dugushkina K.A. (2020) A sheeted dike complex in the frame and structure of the Revdinsky massif of the Ural Platinum Belt. *Metallogeny of ancient and modern oceans*. Miass, SU FSC MG UB RAS, 191-193. (In Russ.)
- Borozdina G.N., Ivanov K.S., Bogoyavlenskaya V.M. (2010) Stratigraphy of volcanic and volcano-sedimentary rocks of the Salatimskaya and Tagil'skaya zones of the Ural. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 152 p. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Berzin S.V. (2013) The first data on the U-Pb age of zircons from dolerites of the relic zone in Azov mountain back-arc spreading (Middle Urals). *Lithosphere (Russia)*, (2), 92-104. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Berzin S.V., Erokhin Y.V. (2012) The first U-Pb age data of zircons from relic spreading zones in the Middle Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **443**(1), 302-307.
- Ivanov K.S., Berzin S.V., Erokhin Yu.V., Ronkin Yu.L., Khiller V.V. (2019) Timing of Back-Arc Spreading of the Paleozoic Island Arc of the Urals: Implication of Sm-Nd and U-Pb Dating of Dolerites and the Composition of Inclusions in Zircon. *Dokl. Earth Sci.*, **484**(1), 97-100.
- Kalugina R.D., Kopanov V.F., Storozhenko E.V., Lukin V.G., Stepanov A.E., Mikhaleva E.N., Rapoport M.S., Il'yasova G.A., Suslov D.L., Shub I.Z., Mikhailov A.P., Glazyrina N.S., Gerasimenko B.N. (2017) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200 000. Ed. 2nd. Ser.: Sredneural'skaya. Sheet O-41-XXXI. Explanatory letter. Moscow, Moscow branch of FSBI VSEGEI Publ., 180 p. (In Russ.)
- Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. (2001) Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *J. Petrol.*, **42**, 655-671.
- Koroteev V.A., Semenov I.V. (2008) Influence of convection-spreading and mantle-plume processes on the chemical composition of Paleourals ocean rift's basalts and plutonic rocks. *Lithosphere (Russia)*, (5), 54-83. (In Russ.)
- Kuno H. (1968) Differentiation of basalt magmas. *Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition. V. 2*. N. Y., Interscience, 623-688.
- Mullen E.D. (1983) MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **62**, 53-62.
- Otten M.T. (1984) The origin of brown hornblende in the Artfjallet gabbro and dolerites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, 189-199.
- Pearce J.A. (1982) Trace element characteristics of lavas from destructive plate margins. *Andesites: Orogenic andesites and related rocks*. John Wiley and Sons, 525-548.
- Petrov G.A., Zhiganov A.A., Stefanovsky V.V., Shalaginov V.V., Petrova T.A., Ovchinnikov R.A., Gertman T.A. (2011) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Ural series. Sheet O-41, Ekaterinburg. Explanatory letter. St.Petersburg, Cartographic factory VSEGEI Publ., 492 p. (In Russ.)

## REFERENCES



- Puchkov V.N. (2010) Geology of the Urals and Cis-Uralian (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa, DesignPoligrafService Publ., 280 p. (In Russ.)
- Semenov I.V. (2007) Influence of mantle plumes on the segmentation and chemical composition of basalts and plutonites of the rift of the Ural paleocean. *Geology of the Urals and adjacent territories*. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 75-97. (In Russ.)
- Semenov I.V., Shilov V.A., Ronkin Yu.L. (1999) Structural and relative-age relationships of the sheeted dike complex with the rocks of the Revdinsky gabbro massif (Middle Urals). *Proc. IGG UB RAS. V. 146*, 132-139. (In Russ.)
- Semenov I.V., Shilov V.A., Verkhovsky A.M. (1978) Structural and age relationships of the riftogenic complex of sheeted basaltic dikes with gabbro-hyperbasite massifs of the Ural Platinum Belt. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **243**(1), 187-190. (In Russ.)
- Smirnov V.N., Ivanov K.S. (2010) The first zircon U-Pb dating (SHRIMP II) for the Silurian ophiolites in the Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **430**(1), 15-18.
- Smirnov V.N., Ivanov K.S., Larionov A.N. (2014) The U-Pb SIMS zircon age and geodynamic conditions of formation of granitoides of the Verkhisetsk batholith, the Eastern slope of the Middle Urals. *Stratigr. Geol. Correl.*, **22**(6), 576-593.
- Smirnov V.N., Ivanov K.S., Shokalsky S.P. (2016) New data on the period of existence of the continental margin subduction zone in the Middle Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **471**(2), 1226-1229.
- Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, **42**, 313-345.
- Vodolazskaya V.P., Teterin I.P., Kirillov V.A., Luk'yanova L.I., Petrov G.A., Stefanovsky V.V., Morozov G.G., Zhdanov A.V., Zhiganov A.V., Stryapunina E.V., Es'kin A.G., Petrova T.A., Verbitsky I.V., Verbitskaya N.V. (2015) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Ural series. Sheet O-40. Perm. Explanatory letter. St.Petersburg, Cartographic factory VSEGEI Publ., 497 p. (In Russ.)
- Wood D.A. (1980) The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectono-magmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **50**(1), 11-30.
- Zaitseva M.V., Pupyshev A.A., Shchapova Yu.V., Votyakov S.L. (2016) Dating of zircons using NexION 300S quadrupole mass spectrometer with inductively coupled plasma and NWR213 attachment for laser ablation. *Analytics and Control*, **20**(4), 294-306. (In Russ.)