



Минералого-петрохимические особенности габбро-долеритов криволукского комплекса

А. А. Самигуллин, Д. Е. Савельев

Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа
samigullinaidar85@gmail.com; savl71@mail.ru

В статье впервые приводятся детальные минералогические, петрографические и петрохимические исследования ранневендских габбро-долеритов бельской и ирлинской даек криволукского комплекса юго-восточной части Башкирского антиклинория. Установлено, что породы комплекса претерпели низкотемпературные изменения, вследствие которых темноцветные породообразующие минералы (амфиболы и пироксены) нацело заместились хлоритом. В габбро-долеритах отмечается повышенное содержание сульфатов стронция и бария. Геологическое положение и содержания P_2O_5 и TiO_2 ставят под сомнение приуроченность даек у с. Кага к криволукскому комплексу.

Ключевые слова: криволукский комплекс, барит, целестин, долериты, дайки, магматизм.

Mineralogical and petrochemical features of gabbro-dolerites of the Krivoluksky complex

A. A. Samigullin, D. E. Saveliev

Institute of geology UFRC RAS, Ufa

The manuscript presents novel detailed mineralogical, petrographic and petrochemical studies of Early Vendian gabbro-dolerites of the Belskaya and Irlinskaya dikes of the Krivoluksky complex in the southeastern part of the Bashkir anticlinorium. We determined that the rocks of the complex underwent low-temperature changes, as a result of which dark-colored rock-forming minerals (amphiboles and pyroxenes) were completely replaced by chlorite. The gabbro-dolerites possess an increased content of sulfates strontium and barium. The geological position and contents of P_2O_5 and TiO_2 cast doubt on the confinement of dikes near the village of Kaga to the Krivoluksky complex.

Keywords: Krivoluksky complex, barite, celestine, petrography, dolerites, dykes, magmatism.

Введение

Проведенные геолого-съёмочные работы и тематические исследования в 1968—1985 гг. на западном склоне Южного Урала значительно расширили и углубили представления об интрузивном магматизме этого региона, выявили его характерные особенности. Большой вклад в изучение позднедокембрийских магматических и метаморфических комплексов был внесён А. А. Алексеевым, который на основе формационного анализа предложил схему корреляции (Алексеев, 1981; 1984). Им же были составлены карты магматизма и метаморфизма западного склона Южного Урала. Магматизм западного склона Южного Урала приурочен к отрезкам активизации тектонических движений на границах седиментационных циклов (Алексеев, 1984; Князев и др., 2013; Ларионов и др., 2015).

Насыщенность интрузивными магматическими телами пород Башкирского мегаантиклинория возрастает с запада на восток (Князев, 2013; Ларионов, 2015). В этом же направлении повышается интенсивность изменений разновозрастных интрузий. Важная роль в размещении интрузивных комплексов принадлежит субмеридиональным зонам наиболее круп-

ных разломов: Туканского, Караташского, Суранского, Лапыштинского, Зюраткульского (Алексеев, 1981; 1984). При определении времени формирования интрузивных комплексов учтена их общая геологическая позиция, взаимоотношения с вмещающими породами, присутствие в терригенных образованиях обломков интрузивных пород, данные абсолютного возраста, петролого-геохимические особенности и степень вторичных изменений. Несмотря на длительную историю изучения интрузивных тел, отнесение конкретных образований к тому или иному комплексу часто является проблематичным.

В восточной части Башкирского мегаантиклинория, в районе урочища Кривая Лука, вдоль долины р. Белая находится петротип криволукского габбро-долеритового комплекса. Породы петротипа всесторонне изучены.

В этой статье впервые приводятся детальные минералогические, петрографические и петрохимические исследования габбро-долеритов бельской и ирлинской даек юго-восточной части Башкирского антиклинория, относимых к ранневендскому криволукскому комплексу, с целью корреляции их с породами петротипа на урочище Кривая Лука.

Для цитирования: Самигуллин А. А., Савельев Д. Е. Минералого-петрохимические особенности габбро-долеритов криволукского комплекса // Вестник геонаук. 2023. 1(337). С. 30–41. DOI: 10.19110/geov.2023.1.4

For citation: Samigullin A. A., Saveliev D. E. Mineralogical and petrochemical features of gabbro-dolerites of the Krivoluksky complex. Vestnik of Geosciences. 2023, 1(337), pp. 30–41, doi: 10.19110/geov.2023.1.4



Геологическое строение района

Район исследований расположен в юго-восточной части Башкирского мегаантиклинория, в долине р. Белая, и сложен породами верхнего рифея и венда, в 3 км восточнее находится граница с Зилаирским синклинорием (рис. 1). Район представлен зильмердакской, катавской, инзерской, миньярской свитами верхнего рифея и криволукской свитой венда. Верхнерифейский возраст рассматриваемых отложений устанавливается по своеобразному (третьему) комплексу строматолитов и микрофитоцитов. По строматолитам в верхнем рифее выделяются три горизонта: 1) катавский с *Ineria tjomusi* Kry1, *Iurusania cylindrica* Kry1, 2) миньярско-подинзерский с *Minjaria uralica* Kry1, *Jymnosolen ramrai* Steinm, *J. levis* Kry1, *Katavi karatavica* Kry1, *Conophyton miloradovici* Raab, и др.; 3) укский с *Linella ukka* (Стратиграфия..., 1983).

Зильмердакская свита (RF_{3zl}) представлена терригенным материалом: разной степени зернистости песчаниками, гравелитами, в подчинённом значении алевролитами, аргиллитами и сланцами. Разделена на 4 подсвиты: бирьянскую, нугушскую, лемезинскую и бедерышинскую. Общая мощность свиты — 1400—1800 м.

Катавская свита (RF_{3kt}) сложена известняками в западной части площади в виде широких (250—1500 м) полос в субмеридиональном направлении. Кроме того, катавские известняки распространены и в Восточно-Башкирской зоне, ими сложены небольшие антиклинальные структуры в Авзяно-Кагинской синклиналиной зоне. Свита является хорошим марки-

рующим горизонтом благодаря своим весьма специфическим литологическим и структурно-текстурным особенностям (Алексеев, 1981).

Инзерская свита (RF_{3in}) представлена песчаниками и сланцами. Породы слоистые, тонкополосчатые, имеют плитчатую отдельность и окрашены в пёстрые, красные, зелёные и бурые тона. Как литофациальное подразделение, инзерская свита весьма выразительна, хорошо отделяется от ниже- и вышележащих карбонатных толщ и служит картировочным и корреляционным репером. Мощность свиты 250—380 м.

Миньярская свита (RF_{3mn}) слагает ядерную часть Авзяно-Кагинской синклиналиной зоны, благодаря чему на площади изучения проявлена довольно широко. Сложена перекристаллизованными мелкозернистыми доломитами. Мощность свиты 450—700 м.

Криволукская свита (V_{1kr}) распространена на ограниченной территории, представлена терригенными породами — песчаниками, алевролитами и аргиллитами, присутствуют редкие прослои зеленовато-серых сланцев. Мощность около 200 м.

Небольшие ранневендские интрузивные тела криволукского габбро-долеритового комплекса (β, νβ, β' V_{1k}) локализованы в полях распространения катавской свиты верхнего рифея и криволукской свиты нижнего венда. Они развиты в восточной части Башкирского мегаантиклинория. Петротип комплекса расположен в районе урочища Кривая Лука, вдоль долины р. Белая и представлен межпластовыми силловыми телами мощностью до 60 м и дайками мощностью до 5 м

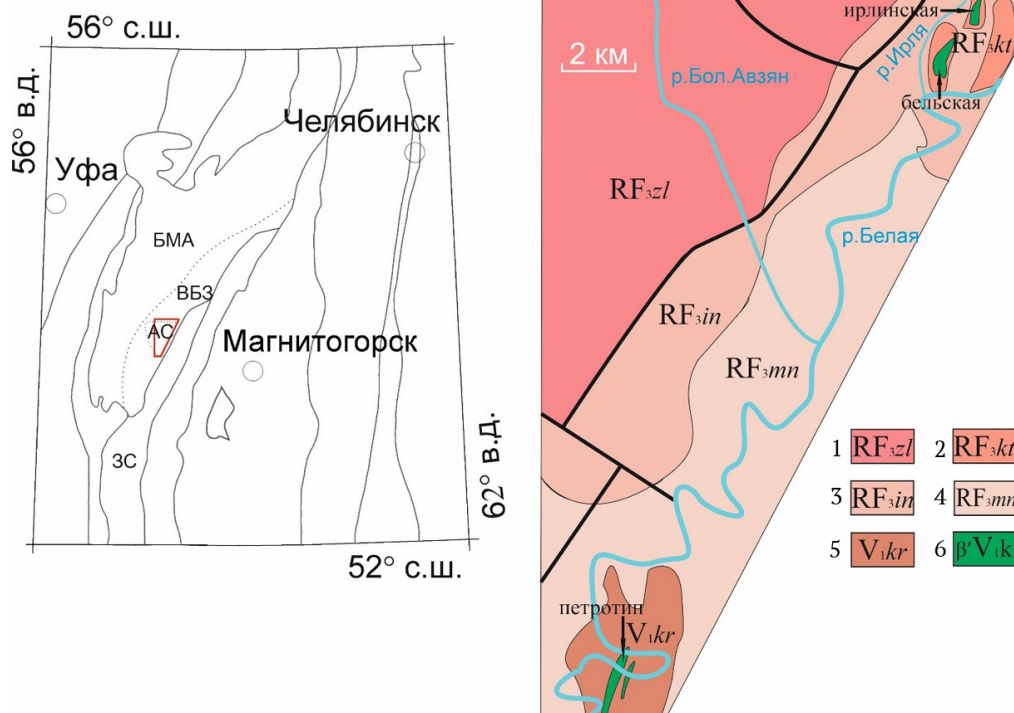


Рис. 1. Схема геологического строения исследуемого участка: 1 — зильмердакская свита (RF_{3zl}); 2 — катавская свита (RF_{3kt}); 3 — инзерская свита (RF_{3in}); 4 — миньярская свита (RF_{3mn}); 5 — криволукская свита (V_{1kr}); 6 — интрузивные тела криволукского габбро-долеритового комплекса (β, νβ, β' V_{1k}). ЗС — Зилаирский синклинорий; БМА — Башкирский мегаантиклинорий; ВБЗ — Восточно-Башкирская зона; АС — Авзяно-Кагинская синклиналиная зона

Fig. 1. Scheme of geological structure of researching area: 1 — Zilmerdak Formation (RF_{3zl}); 2 — Katav Formation (RF_{3kt}); 3 — Inzer Formation (RF_{3in}); 4 — Minyar Formation (RF_{3mn}); 5 — Krivoluk Formation (V_{1kr}); 6 — intrusive bodies of Krivoluk gabbro-dolerite complex (β, νβ, β' V_{1k}). ЗС — Zilair sinclinorium; БМА — Bashkir megaanticlinorium; ВБЗ — East-Bashkir zone; АС — Avzyan-Kaga sinclinorium zone

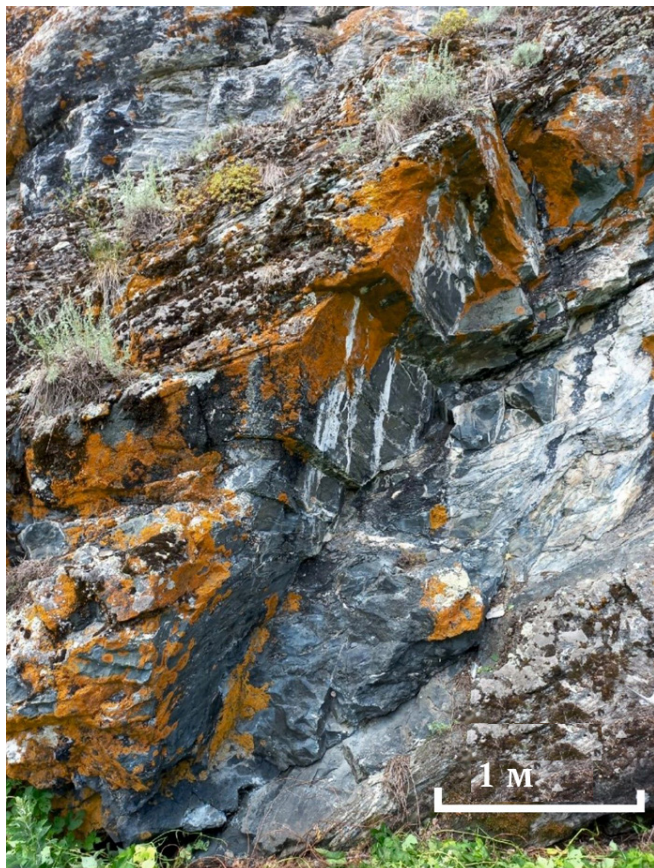


Рис. 2. Обнажение интрузивного тела; габбро-долериты отчётливо выделяются тёмно-зелёным цветом на фоне известняков катавской свиты

Fig. 2. Intrusive body; gabbro-dolerites distinctly distinguished by their dark green color against the background of limestones of the Katav Formation

(Алексеев, 1981, 1984). Силлы имеют симметрично-зональное строение: центральные части представлены средне-, крупнокристаллическими, в приконтактных — тонко- и мелкокристаллическими и порфировыми структурами.

Ранневендский возраст пород комплекса на петро-типе определяется по геологическому положению малых тел и радиоизотопным датировкам (рубидий-стронциевый метод — 660 млн лет) (Алексеев, 1981, 1984).

Объект и методы исследований

Объектом исследования являются габбро-долериты, слагающие небольшие тела (бельская и ирлинская дайки) в поле развития катавской свиты и относящиеся к криволукскому габбро-долеритовому комплексу у с. Кага.

Габбро-долериты отчётливо выделяются своим тёмно-зелёным цветом на фоне известняков катавской свиты (рис. 2). Вмещающие породы катавской свиты падают на восток (аз. пад. 80°) под углом 60° ; азимут простираения даек 15° . На границе даек и вмещающих пород отсутствует зона закалки и какие-либо изменения.

Во время полевых работ нами были определены формы и размеры интрузивных тел, сделаны замеры элементов залегания и отобраны образцы для исследований.

Использованы методы оптической и электронной микроскопии. Из образцов были изготовлены петрографические шлифы и пластины, которые изучались под поляризационным микроскопом Zeiss Axioskop 40 в Институте геологии УФИЦ РАН. Электронно-микроскопические исследования и изучение состава минералов проводились в пластинах на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 4 Compact с энергодисперсионным анализатором Xplorer 15 Oxford Instruments (ИГ УФИЦ РАН, Уфа). Обработка спектров производилась автоматически при помощи программного пакета AzTec One с использованием методики TrueQ. При съёмке использованы следующие установки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда в диапазоне 3–4 нА, время накопления спектра в точке — 60 секунд в режиме Point&ID.

Методом рентгенофлуоресцентного анализа в порошковых пробах определялся макроэлементный химический состав пород (спектрометр VRA-30, Carl Zeiss с рентгеновской трубкой с W-анодом (30–40 кВ, 40 мА) в ИГ УФИЦ РАН). Установлены содержания некоторых микроэлементов (Zn, Ni, Co, Cu, Pb, Cr, V, Sr, Rb, Zr, Ba), для большинства которых предел обнаружения составлял 0.001 мас. %.

Петрографическая характеристика пород

Габбро-долериты на макроуровне тёмно-зелёного цвета, присутствуют тёмные чешуйки хлорита. Породы обладают массивной текстурой. Ввиду карбонатизации при воздействии соляной кислоты начинают закипать. Местами видны кварцевые прожилки мощностью до 2 мм.

Были изучены две дайки — бельская и ирлинская. В целом по структурно-текстурным особенностям породы идентичны, за исключением некоторых особенностей. Так, зёрна минералов в габбро-долеритах и габбро ирлинской дайки имеют более крупные размеры, в породах наблюдаются участки с чётко выраженными идиоморфными лейстами плагиоклаза, размером фенокристаллов от 0.4 до 0.8 мм и с порфировидной структурой, минералы меньше затронуты наложенными процессами. Текстура пород — массивная, структура — порфировидная, офитовая (долеритовая) и габбровая (Андреева, 1985; Петрографический ..., 2009; Практическая ..., 2017).

Вторичные изменения затронули породы даек в достаточно сильной степени, так как темноцветные минералы (амфиболы и пироксены) были полностью замещены хлоритом (рипидолит и пикнохлорит). Интерференционные окраски хлорита весьма разнообразны — от фиолетового до тёмно-зелёного. Жилы кварца включают в себя мелкодисперсные сульфиды и магнетит. Породы подверглись карбонатизации. Акцессорные минералы представлены пиритом, халькопиритом, магнетитом, гематитом, рутилом, титанитом, апатитом, монацитом, цирконом, баритом и целестином.

Вмещающие породы представлены рассланцованными известняками катавской свиты верхнего рифея (RF₃kt), обладают нетипичными текстурно-структурными особенностями: окварцованы (на рис. 3, а хорошо виден результат окварцевания), хлоритизированы (в целом прослой хлорита распространены параллельно слоистости), по своему внешнему виду и текстуре

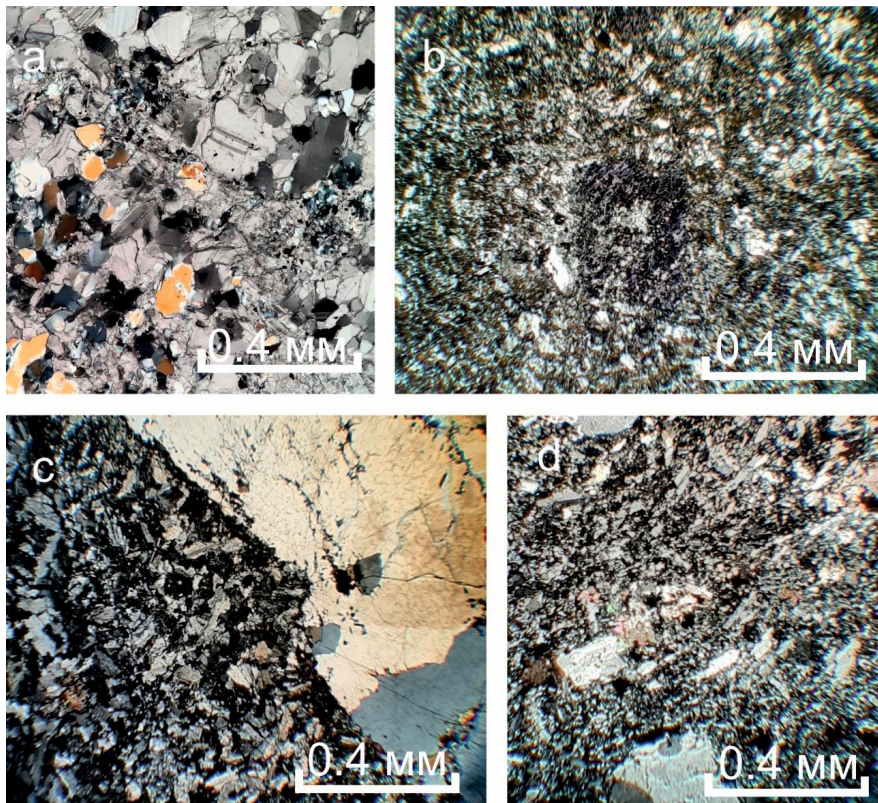


Рис. 3. Петрографические особенности габбро-долеритов криволукского комплекса с вмещающими породами (фото с анализатором): а — вмещающая порода — известняк катавской свиты; б — замещение темноцветного минерала хлоритом с фиолетовой интерференционной окраской; с — жила кварца в дайке; д — порфировидная структура в габбро-долерите, фенокристаллы представлены плагиоклазом

Fig. 3. Petrography features of gabbro-dolerites of Krivoluksky complex and their host rocks (photo with analyzer): a — the host rock — limestone of Katav formation; b — replacement of a dark-colored mineral with chlorite with a violet interference color; c — vein of quartz in dyke; d — porphyritic structure in gabbro-dolerite, phenocrysts are represented by plagioclase

очень сильно отличаются от пород стратотипа западного крыла Башкирского мегаантиклинория (Алексеев, 1981, 1984).

В отличие от пород петротипа урочища Кривая Лука, исследуемые габбро-долериты претерпели более сильные вторичные изменения. По данным предыдущих исследователей, в петрографических шлифах присутствуют зёрна клинопироксена и обломки оливина, в то время как в габбро-долеритах даек бельской и ирлинской мы наблюдаем абсолютно полное замещение темноцветных минералов хлоритом (Алексеев, 1981, 1984).

Минералогическая характеристика пород

Впервые методом электронной микроскопии получена информация по составу породообразующих и

акцессорных минералов из габбро-долеритов криволукского комплекса (рис. 4).

Плагиоклаз является одним из породообразующих минералов в габбро-долеритах. Он сохранил свою первичную структуру и представлен удлинёнными гипидиоморфными лейстами и таблитчатыми фенокристаллами. Плагиоклаз имеет следующий химический состав (мас. %): Na₂O — 10.58—11.90, Al₂O₃ — 19.40—21.36, SiO₂ — 66.28—70.99, CaO — 0.00—0.67, FeO — 0.00—0.69 (табл. 1). Исходя из данных химического анализа, плагиоклаз практически полностью альбитизирован.

Первичные темноцветные минералы (амфиболы и пироксены) нацело замещены хлоритом. Он образует сплошные массы и с окружающими минералами имеет неровные границы. Хлорит обладает

Таблица 1. Химический состав плагиоклаза (мас. %)

Table 1. Chemical composition of plagioclase (wt. %)

№ п/п	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	Сумма / Total
1	11.17	20.51	70.99	0.00	0.21	102.89
2	11.34	20.68	69.35	0.00	0.21	101.57
3	11.31	20.42	69.30	0.15	0.15	101.34
4	11.11	20.14	69.58	0.67	0.00	101.49
5	11.19	20.78	68.86	0.60	0.26	101.68
6	10.58	21.36	67.50	0.27	0.49	100.20
7	11.31	20.78	68.43	0.53	0.21	101.25
8	11.90	19.46	66.28	0.00	0.68	98.32
9	11.74	19.49	66.90	0.00	0.69	98.83
10	11.77	19.40	66.66	0.00	0.45	98.28

Примечание: 1—7 — бельская дайка; 8—10 — ирлинская дайка.

Note: 1—7 — Belskaya dyke; 8—10 — Irlinskaya dyke.

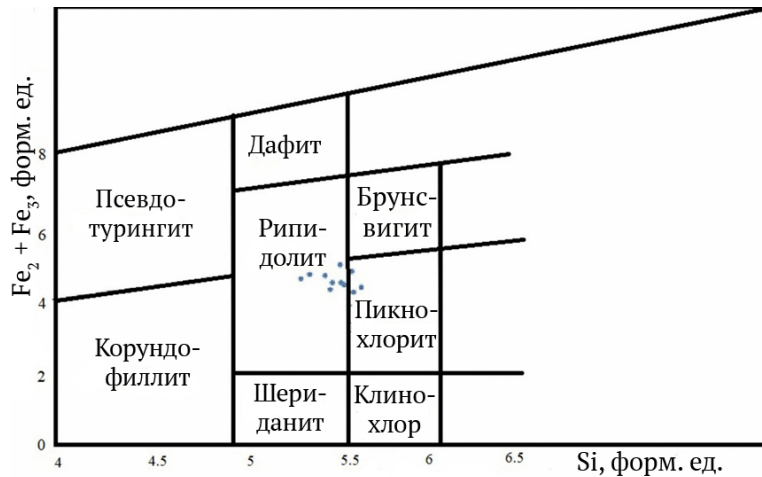


Рис. 4. Классификационная диаграмма состава хлорита из габбро-долеритов криволукского комплекса (Hey, 1954)

Fig. 4. Classification diagram of chlorite composition from gabbro-dolerites of Krivoluksky complex (Hey, 1954)

Таблица 2. Химический состав хлорита (мас. %)

Table 2. Chemical composition of chlorite (wt. %)

№ п/п	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	Сумма / Total
1	15.14	19.55	28.24	27.57	0.81	0.00	92.00
2	14.93	20.29	27.86	29.19	0.20	0.16	93.87
3	18.03	19.87	28.61	26.63	0.31	0.58	94.11
4	17.73	21.36	30.00	26.31	0.10	0.43	95.93
5	18.14	19.76	29.23	26.15	0.05	0.44	93.77
6	17.41	20.48	28.26	26.73	0.21	0.57	93.98
7	17.99	22.02	29.19	26.77	0.00	0.39	96.50
8	18.94	19.34	27.73	22.32	0.12	0.47	88.45
9	15.27	20.27	26.27	26.28	0.13	0.27	88.22
10	16.90	19.64	27.36	25.32	0.15	0.54	89.38
11	14.78	20.68	25.59	26.15	0.21	0.28	87.40
12	14.86	20.87	25.14	25.21	0.22	0.67	86.30
13	13.07	19.55	28.26	26.49	0.21	0.00	88.27
14	13.57	19.76	28.35	25.55	0.33	0.00	87.56
15	13.55	19.59	25.67	27.85	0.20	0.13	86.86

Формульные коэффициенты, O = 28 / Formula coefficients, O = 28

№ п/п	Mg	Al	Si	Fe ₂₊	Fe ₃₊	Mn	Сумма / Total
1	4.58	4.67	5.36	3.90	0.11	0.00	18.62
2	4.44	4.69	5.54	3.85	0.31	0.11	18.94
3	4.81	4.51	5.45	3.70	0.51	0.09	19.07
4	4.79	4.87	5.39	3.90	0.15	0.06	19.16
5	4.81	4.79	5.49	4.00	0.06	0.07	19.22
6	4.76	4.77	5.51	3.80	0.21	0.09	19.14
7	4.34	4.66	5.53	4.10	0.00	0.06	18.69
8	4.64	4.17	5.57	3.90	0.19	0.08	18.55
9	4.41	4.44	5.34	3.89	0.17	0.04	18.29
10	4.87	4.51	5.49	4.00	0.14	0.09	19.10
11	4.12	4.19	5.45	4.01	0.21	0.05	18.03
12	3.99	4.14	5.4	3.89	0.31	0.12	17.85
13	4.17	4.39	5.5	3.80	0.21	0.00	18.07
14	4.14	4.49	5.49	3.87	0.19	0.00	18.18
15	3.93	4.66	5.32	3.60	0.41	0.09	18.01

Примечание: количество Fe²⁺ и Fe³⁺ рассчитано по балансу зарядов.
 Note: quantity of Fe²⁺ and Fe³⁺ was counted by balance of charges.



следующим химическим составом (мас. %): MgO 13.07–18.14, Al₂O₃ 19.34–22.02, SiO₂ 25.14–30.00, FeO 22.44–29.39 (табл. 2). Формульные коэффициенты в таблице 2 рассчитаны с помощью кислородного метода.

На классификационной диаграмме состава хлоритов большая часть попадает в поле рипидолита и небольшая часть — в поле пикнохлорита (рис. 4). Согласно геотермическим вычислениям, рипидолит образовался при температуре 130–133 °С, а пикнохлорит — при температуре 133–138 °С (Lanari et al., 2014). Расчёты температуры образования хлорита проведены по формульным коэффициентам (табл. 2): $T(\text{Chlorite})(^{\circ}\text{C}) = (172341 / -R * (\ln)K - 315.49) - 273.15$, где R — универсальная газовая постоянная, равная 8.31451 Дж/моль*К. (ln)K — натуральный логарифм кон-

станты равновесия, который вычисляется по формульным коэффициентам и равен –13.50...–12.50 (Lanari et al., 2014).

Из сульфатов наиболее часто диагностируются барит и целестин (табл. 3), а также переходные разности между ними. Барит и целестин представлены отдельными ксеноморфными зёрнами, иногда образуют скопления размером до 0.12 мм. Являются вторичными минералами (рис. 5).

Из сульфидов развиты пирит и халькопирит (табл. 4). Пирит (Fe — 46.11–48.31 мас. %; S — 49.19–53.63 мас. %) обнаружен внутри магнетита. Среди зёрен пирита встречается мышьяковистая разновидность с содержанием As 2.51 мас. %. Халькопирит имеет следующий химический состав (мас. %): Cu — 31.49–32.19, Fe — 32.39–32.77, S — 35.32–35.74.

Таблица 3. Химический состав сульфатов (мас. %)

Table 3. Chemical composition of sulfates (wt. %)

№ п/п	BaO	SO ₃	SrO	Сумма / Total	Минерал / Mineral
1	64.30	34.96	0.00	99.26	барит / barite
2	66.99	35.46	0.00	102.45	барит / barite
3	65.64	30.99	2.13	98.76	барит / barite
4	65.74	33.61	1.93	101.28	барит / barite
5	10.05	45.62	47.78	103.45	целестин / celestine
6	18.98	43.67	40.56	103.22	целестин / celestine

Примечание: 1–6 — бельская дайка.

Note: 1–6 — Belskaya dyke.

Таблица 4. Химический состав сульфидов (мас. %)

Table 4. Chemical composition of sulfides (wt. %)

№ п/п	Al	Si	S	As	Ca	Ti	Fe	Cu	Сумма / Total	Минерал / Mineral
1	0.19	0.09	53.50	0.00	0.00	0.00	46.15	0.00	100.04	пирит / pyrite
2	0.15	0.10	53.62	0.00	0.00	0.00	46.14	0.00	100.01	пирит / pyrite
3	0.13	0.24	53.25	0.00	0.18	0.15	46.11	0.00	100.06	пирит / pyrite
4	0.14	0.00	53.63	0.00	0.00	0.00	46.24	0.00	100.01	пирит / pyrite
5	0.00	0.00	49.19	2.51	0.00	0.00	48.31	0.00	100.01	пирит / pyrite
6	0.00	0.00	35.74	0.00	0.00	0.00	32.77	31.49	100	халькопирит / chalcopyrite
7	0.00	0.00	35.32	0.00	0.00	0.00	32.39	32.19	99.9	халькопирит / chalcopyrite

Примечание: 1–4 — бельская дайка, 5–7 — ирлинская дайка.

Note: 1–4 — Belskaya dyke, 5–7 — Irlynskaya dyke.

Таблица 5. Химический состав монацита (мас. %)

Table 5. Chemical composition of monazite (wt. %)

№ п/п	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	FeO	CeO ₂	La ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Сумма / Total
1	0.00	0.00	29.79	1.60	0.00	38.68	19.83	3.29	11.97	105.16
2	0.00	0.58	30.25	1.29	0.00	34.60	17.45	3.46	12.34	99.97
3	0.26	0.56	31.42	2.03	0.00	32.72	16.06	3.46	11.37	97.88
4	0.42	0.64	30.04	0.88	0.81	35.62	18.01	3.38	11.38	101.18
5	0.94	0.72	30.16	1.26	0.90	35.62	18.25	3.80	12.71	104.36
6	0.00	0.00	29.63	2.15	0.66	33.28	14.24	3.29	13.13	96.38

Примечание: 1–5 — бельская дайка, 6 — ирлинская дайка.

Note: 1–5 Belskaya dyke, 6 — Irlynskaya dyke.



Фосфаты представлены апатитом и монацитом (табл. 5). Апатит развит в виде гипидиоморфных вытянутых игольчатых агрегатов. Он имеет следующий химический состав (мас. %): CaO — 49.29—55.25, P₂O₅ — 39.64—42.51, Cl — 0.00—0.28, F — 3.29—4.30. Монацит представлен ксеноморфными зёрнами и их сростками.

Кальцит является вторичным минералом и развит равномерно по всему объёму породы. Он образует массивные скопления и имеет следующий химический состав (мас. %): CaO — 54.00, CO₂ — 41.81. В кальците выявлены содержания примесей FeO (0.40 мас. %) и MnO (0.87 мас. %).

Кварц встречается в виде мелких и крупных (до 4 см) жил, секущих интрузивное тело. Содержит мелкодисперсные вкрапления пирита и магнетита. В химическом составе выявлено содержание примеси FeO (0.00—0.80 мас. %).

Магнетит присутствует в виде гипидиоморфных зёрен. В химическом составе выявлены содер-

жания примесей V₂O₅ (0.13—0.35 мас. %) и TiO₂ (0.12—1.55 мас. %).

Гематит широко распространён в виде ксеноморфных зёрен субизометричного и неправильного облика. В нем присутствуют примеси с содержанием CaO (0.00—0.74 мас. %) и SiO₂ (4.02 мас. %).

Наиболее распространенным среди рудных минералов является титанит. В породе он распределен равномерно. Титанит не имеет свойственных ему кристаллографических очертаний, зерна чаще субидиоморфного и неправильного облика. В химическом составе выявлено содержание примесей Al₂O₃ (0.00—0.65 мас. %) и FeO (0.12—0.55 мас. %).

Рутил представлен в виде вытянутых зёрен субидиоморфного облика, обладает резкими и чёткими границами с окружающими минералами. В его химическом составе отмечаются содержания примесей CaO (0.44 мас. %), SiO₂ (0.33 мас. %), FeO (0.22 мас. %), Al₂O₃ (0.29 мас. %).

Таблица 6. Содержание петрогенных компонентов (мас. %) и редких элементов (г/т) в породах криволукского комплекса

Table 6. Content of petrogenic components (wt. %) and trace elements (ppm) in the rocks of Krivoluksky complex

Element	№ образца / Sample No.											
	KG1	KG2	KG3	KG4	KG5	KG6	KG7	KG8	KL1	KL2	KL3	KL4
SiO ₂	47.7	47.81	47.49	48.68	48.95	47.95	49.06	49.07	44.51	44.87	43.99	44.12
TiO ₂	2.49	2.63	2.76	2.7	2.85	2.75	2.78	2.57	1.39	1.36	1.41	1.12
Al ₂ O ₃	14.05	14.76	14.16	15.98	13.96	14.72	14.08	15.03	16.84	16.91	16.71	17.41
FeO _t	11.87	10.07	10.85	9.06	10.19	10.53	11.51	10.61	11.11	10.55	11.89	10.93
MnO	0.14	0.16	0.22	0.21	0.22	0.21	0.23	0.16	0.17	0.21	0.15	0.11
MgO	7.78	7.6	7.46	7.03	6.76	6.8	6.05	7.55	8.68	8.67	8.93	8.91
CaO	5.19	5.83	4.98	5.01	5.9	5.78	5.42	5.59	7.21	7.23	7.51	7.88
Na ₂ O	4.02	4.35	4.45	3.62	3.41	3.41	3.45	3.75	3.86	4.02	3.01	3.31
K ₂ O	0.14	0.19	0.94	0.41	0.94	0.29	0.22	0.04	0.22	0.24	0.19	0.21
P ₂ O ₅	0.79	0.85	1.11	1.02	1.05	0.91	1.06	0.86	0.31	0.22	0.27	0.22
ППП / POI	6.01	6.13	5.21	6.17	6.11	6.22	6.05	5.09	6.05	6.12	6.01	6.01
Сумма / Total	100.18	100.38	99.63	99.89	100.34	99.57	99.91	100.32	100.35	100.4	100.07	100.23
Zn	90	86	75	76	73	84	95	90	101	127	71	100
Ni	68	66	99	51	51	59	32	69	160	111	125	112
Co	31	25	23	24	25	30	26	25	66	45	51	56
Cu	60	67	45	76	80	65	39	70	107	101	106	106
Pb	9	13	3	5	10	7	4	5	11	4	5	4
Cr	140	155	206	104	146	107	115	122	91	100	101	95
V	310	295	206	297	122	162	410	312	210	232	212	210
Y	15	13	14	14	14	13	16	11	13	13	13	14
Sr	472	464	488	569	471	362	370	461	400	412	390	250
Rb	62	72	22	63	32	41	42	45	51	59	63	63
Zr	141	119	81	123	134	123	159	97	120	113	123	110
Ba	380	472	389	378	469	283	371	365	320	380	431	400

Примечание: KG1—KG8 — бельская и ирлинская дайки, KL1—KL4 — породы криволукского петротипа. FeO_t — сумма железа.

Note: KG1—KG8 — Belskaya and Irlinskaya dykes, KL1—KL4 — rocks from Krivoluksky petrotype. FeO_t — amount of iron.

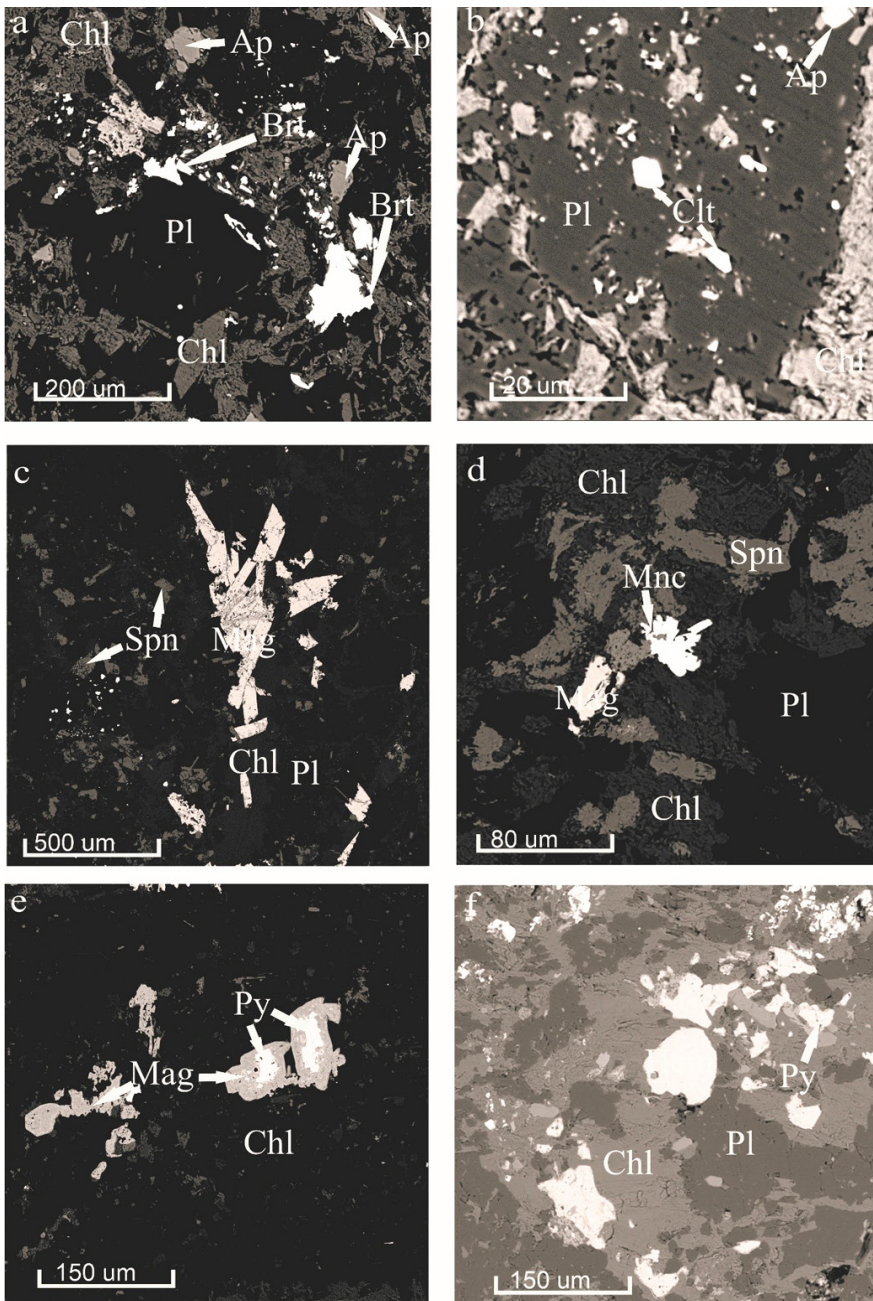


Рис. 5. Взаимоотношения минералов в габбро-долеритах криволукского комплекса. Фото в обратнорассеянных электронах

Условные обозначения: Chl — хлорит, Spn — титанит, Ap — апатит, Clt — целестин, Mnc — монацит, Pl — плагиоклаз, Py — пирит, Mag — магнетит, Hem — гематит, Brt — барит

Fig. 5. Relationships between minerals in gabbro-dolerites of the Krivoluksky complex. Photo in backscattered electrons

Legend: Chl — chlorite; Spn — titanite; Ap — apatite; Clt — Celestine; Mnc — monazite; Pl — plagioclase; Py — pyrite; Mag — magnetite; Hem — hematite; Brt — barite

Из аксессуарных минералов присутствует циркон. Он образует мелкие ксеноморфные зёрна и находится в ассоциации с хлоритом и титанитом.

Петрохимическая характеристика пород

Петрохимическими особенностями пород петротипа являются: низкая кремнезёмистость, умеренная глинозёмистость, титанистость и магнизиальность, пониженная железистость и несколько повышенная щёлочность. Несмотря на вторичные изменения, отмеченные выше петрохимические черты выдержаны и отражают первичные особенности пород рассматриваемого комплекса (Алексеев, 1981, 1984).

Габбро-долериты у с. Кага характеризуются повышенной кремнезёмистостью (46—49 мас. %) и щёлочностью $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (3.67—5.35 мас. %), высокой титанистостью (2.49—2.85 мас. %) (рис. 7), низкой и умеренной глинозёмистостью (13.96—15.98 мас. %)

(рис. 8), повышенным содержанием P_2O_5 (0.79—1.11 мас. %) (табл. 6).

Для интерпретации палеогеодинамических обстановок формирования габбро-долеритов криволукского комплекса были использованы две диаграммы, построенные по породообразующим элементам и микроэлементам. Первая диаграмма — соотношение Zr/Y и $\text{Zr}(\text{ppm})$, вторая диаграмма — соотношение $\text{TiO}_2(\text{мас. \%})$ и $\text{Zr}(\text{ppm})$ (Pearce..., 1979). Фигуративные точки пород комплекса целиком попали в поле WPB (within-plate basalts) — внутриконтинентальных базальтов (Pearce ..., 1979).

Содержания микроэлементов (Zn, Ni, Co, Cu, Pb, Cr, V, Y, Sr, Rb, Zr, Ba) эквивалентны кларкам этих микроэлементов в континентальных базальтах и долеритах (Marsh, 1987). Это наталкивает на противоречие: с одной стороны, породы комплекса довольно сильно изменены и испытали гидротермальное воздействие, как результат — несильно повышенные содержания

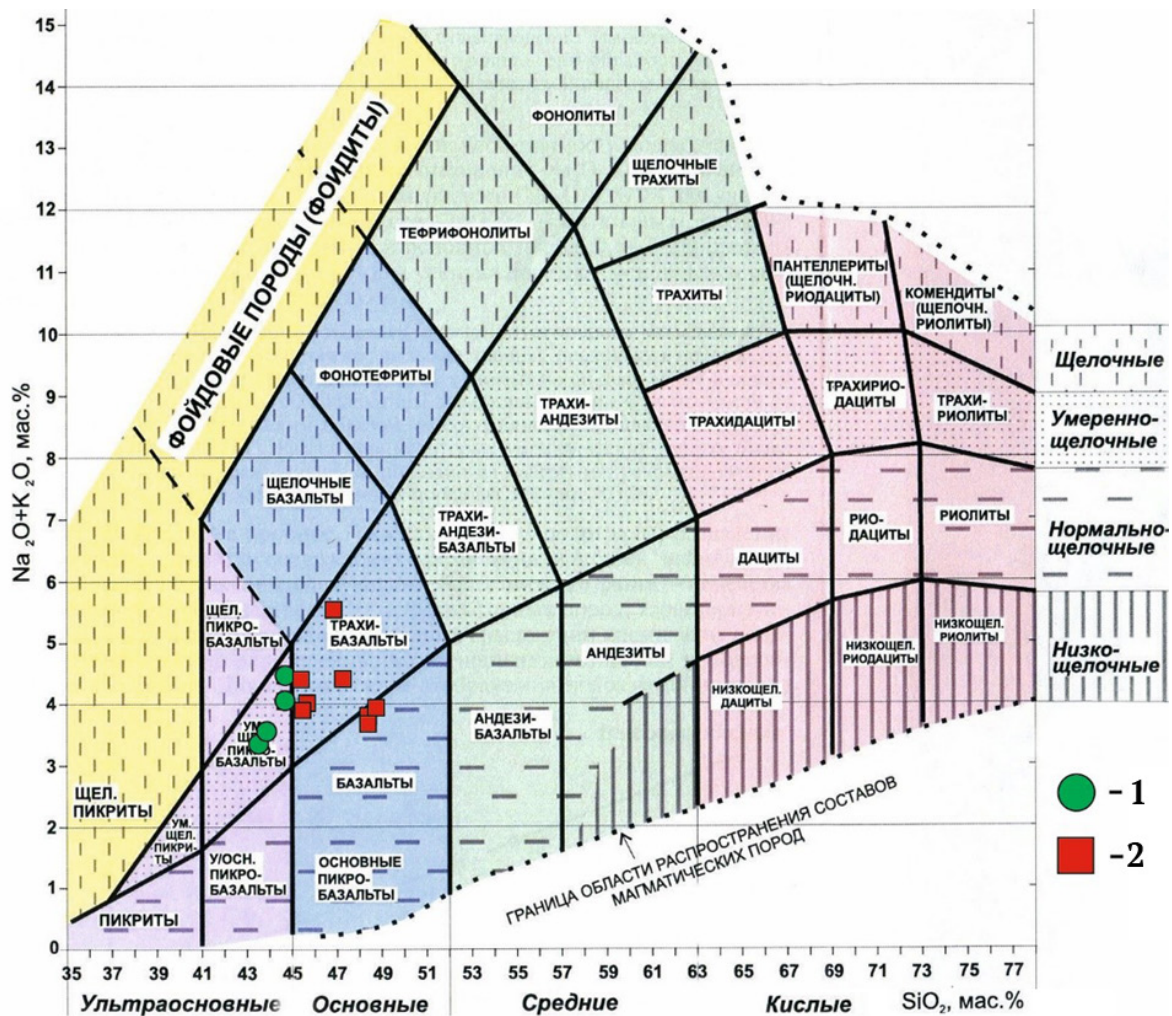


Рис. 6. TAS-диаграмма для пород криволукского комплекса (Петрографический..., 2009): 1 — породы петротипа, 2 — породы бельской и ирлинской даек

Fig. 6. TAS-diagram for rocks of Krivoluksky complex (Petrograficheskii..., 2009): 1 — rocks of petrotype, 2 — Belskaya and Irlinskaya dykes

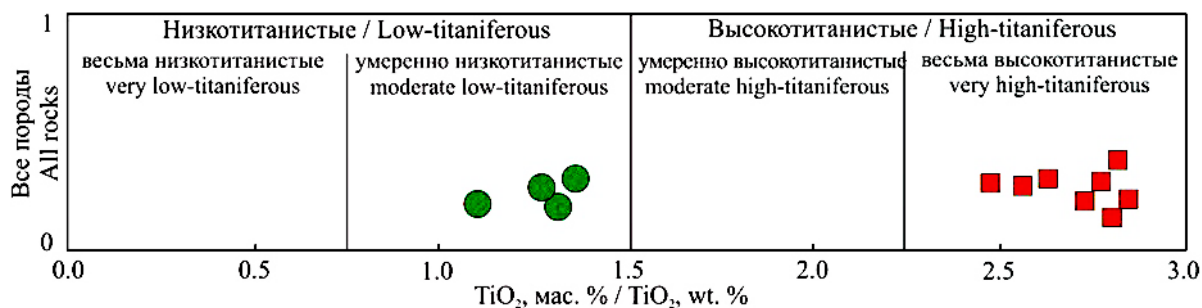


Рис. 7. Диаграмма для определения титанистости. Условные обозначения — на рис. 6 (Практическая ..., 2017)

Fig. 7. Diagram for determining the titanium content. Legend in Fig. 6 (Prakticheskaya..., 2017)

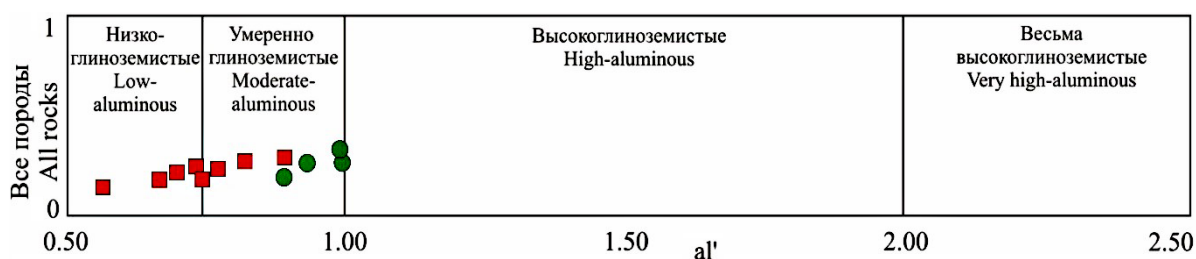


Рис. 8. Диаграмма для определения глинозёмистости. Условные обозначения — на рис. 6 (Практическая..., 2017). Примечание: $a_1' = Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + FeO + MgO)$

Fig. 8. Diagram for determining the alumina content. Legend in Fig. 6 (Prakticheskaya..., 2017). Note: $a_1' = Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + FeO + MgO)$



стронция и бария относительно кларка для данного типа пород, с другой — кларки других элементов практически идентичны неизменённым породам континентальной рифтогенной формации.

Обсуждение результатов

Проведенные детальные минералогические, петрографические и петрохимические исследования ранневендских габбро-долеритов бельской и ирлинской даек криволукского комплекса показали, что породы претерпели низкотемпературные изменения, вследствие которых темноцветные породообразующие минералы (амфиболы и пироксены) нацело заместились хлоритом. В габбро-долеритах отмечается повышенное содержание сульфатов стронция и бария. Следует отметить, что в юго-восточной части Башкирского мегаантиклинория повсеместно распространено множество точек минерализации, которые связаны с гидротермальными растворами, содержащими барий и стронций.

На диаграмме AFM точки составов долеритов криволукского комплекса тяготеют к линии, разделяющей породы толеитовой и известково-щелочной серий.

На рис. 10 отчетливо видно, что, во-первых, присутствует тренд, а во-вторых, точки удалены от линии, разделяющей известково-щелочную и толеитовую серии, в отличие от диаграммы AFM на рис. 9. Наряду с альбитизацией плагиоклаза удалённость от линии, разделяющей толеитовую и известково-щелочную серии, свидетельствует о том, что натрий является привнесённым элементом.

Габбро-долериты северной части криволукского комплекса у с. Кага и урочища Кривая Лука сформировались в единой геодинамической обстановке внутриконтинентального растяжения в венде, однако у них есть некоторые петрохимические различия. На диаграмме TAS (рис. 6) и на диаграмме рис. 10 прослеживается тренд дифференциации, что, скорее всего, связано с единым магматическим очагом для пород описываемых даек. Разное содержание элементов (TiO_2 , MgO , Al_2O_3 , сумма оксидов железа) также может быть связано с процессами дифференциации.

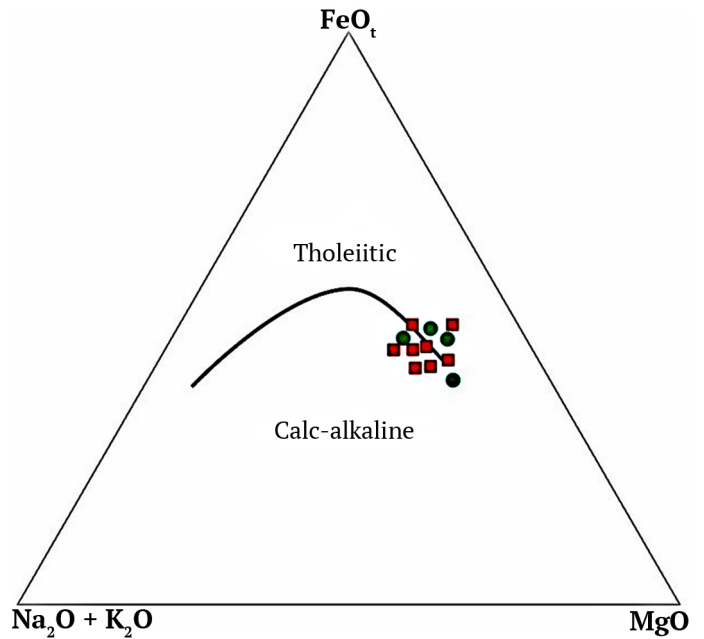


Рис. 9. Диаграмма AFM. Условные обозначения — на рис. 6 (Практическая..., 2017)

Fig. 9. AFM diagram. Legend — in Fig. 6 (Prakticheskaya..., 2017)

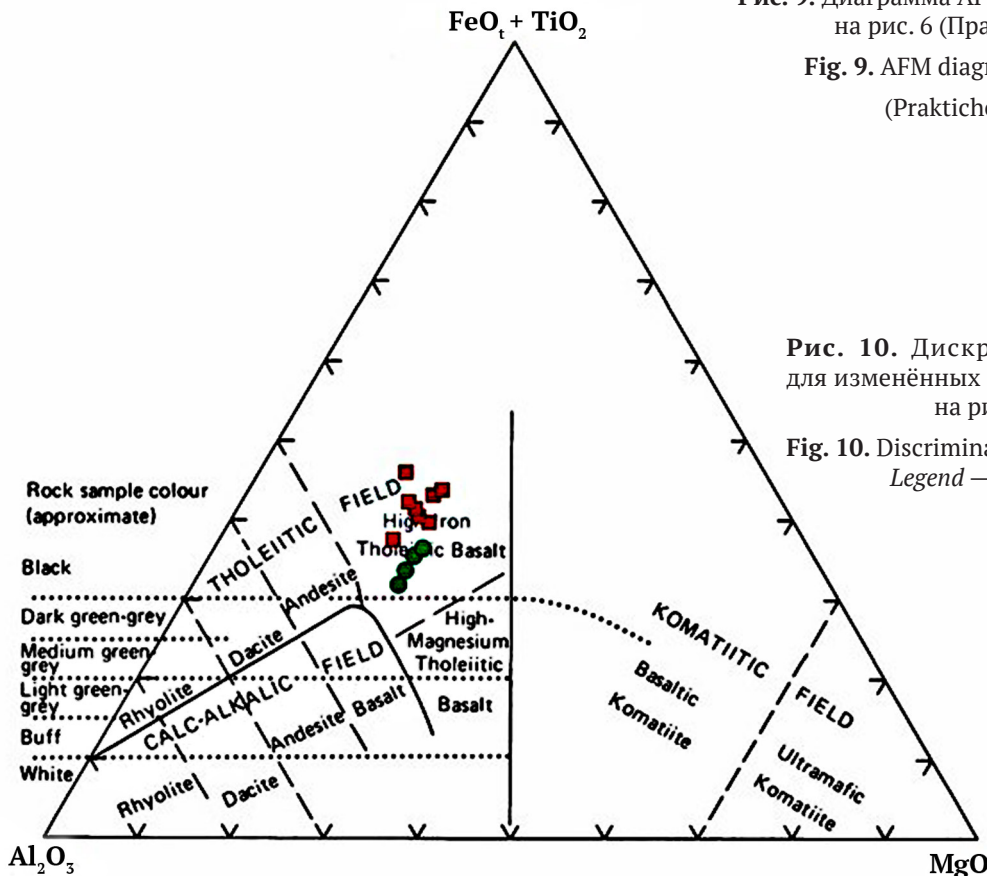


Рис. 10. Дискриминационная диаграмма для изменённых пород. Условные обозначения — на рис. 6 (Jensen, 1976)

Fig. 10. Discrimination diagram for altered rocks. Legend — in Fig. 6 (Jensen, 1976)



Недалеко от изученных даек, ниже по течению р. Ирля, находится отработанная россыпь, откуда добыли 5 кг золота мускульным способом. Можно предположить, что источником золота для россыпи были эти интрузивные тела, что требует более детальных исследований в будущем (Ларионов и др., 1985).

Выводы

Проведенные детальные минералогические, петрографические и петрохимические исследования ранневендских габбро-долеритов бельской и ирлинской даек криволукского комплекса показали, что породы претерпели низкотемпературные изменения, вследствие чего темноцветные породообразующие минералы (амфиболы и пироксены) нацело заместились хлоритом, образование которого происходило при температуре 130–138°. Помимо этого, вторичные изменения затронули и плагиоклаз, в результате чего произошла его полная альбитизация. С точки зрения петрографии породы урочища схожи с породами вышеуказанных даек.

Различия в содержаниях петрогенных оксидов (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , MgO) на первый взгляд могут указывать на иную природу бельской и ирлинской даек, однако при построении диаграмм везде отчетливо виден тренд, что указывает на дифференциацию. Исключение составляют содержания TiO_2 и P_2O_5 , где тренда не наблюдается. В породах комплекса отмечается различие в содержании микроэлементов: количество меди в габбро-долеритах у с. Кага в среднем ниже, а содержания хрома и циркония несколько выше, чем в породах петротипа. Схожее содержание стронция и бария в изучаемых породах у с. Кага и петротипа указывает на гидротермальное воздействие на постмагматическом этапе. Изучаемые и сравниваемые габбро-долериты имеют разное геологическое положение: породы петротипа залегают субсогласно и прорывают криволукскую свиту венда, а бельская и ирлинская дайки — исключительно в пределах катавской свиты верхнего рифея. В итоге мы имеем противоречивую ситуацию: тренды дифференциации, петрографические особенности и содержания микроэлементов свидетельствуют о том, что габбро-долериты у с. Кага относятся к криволукскому комплексу, а геологическое положение тел и кратные различия в содержании TiO_2 и P_2O_5 ставят под большое сомнение приуроченность исследуемых тел к комплексу.

Работа выполнена в рамках госзадания ИГ УФИЦ РАН (тема № FMRS-2022-0012).

Литература / References

1. Алексеев А. А. Рифейско-вендский магматизм западного склона Южного Урала. М.: Наука, 1984. 136 с.

Alekseev A. A. *Rifeysko-venedkiy magmatizm zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala* (Riphean-Vendian magmatism of the western slope of the Southern Urals). Moscow: Nauka, 1984, 82 p.

2. Алексеев А. А., Алексеева Г. В. Рифейско-палеозойские магматические формации, метаморфизм и эндогенное оруденение западного склона Южного Урала

// Условия формирования и метаморфизм магматогенных комплексов Южного Урала: Научный отчет. Уфа: ИГ БФ АН СССР, 1981. Том 1. 115 с.

Alekseev A. A., Alekseeva G. V. *Rifeysko-paleozoyskie magmaticheskie formatsii, metamorphism i endogennoe orudnenie zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala/ Nauchnyi otchet "Usloviya formirovaniya i metamorphism magmatogennykh kompleksov Yuzhnogo Urala* (Riphean-Paleozoic igneous formations, metamorphism and endogenous mineralization of the western slope of the Southern Urals / Scientific report "Formation conditions and metamorphism of igneous complexes of the Southern Urals). Volume 1. Ufa: IG BG AS USSR, 1981, 115 p.

3. Андреева Е. Д., Богатииков О. А. и др. Магматические горные породы. М.: Наука, 1985. Т. 3. 10–35 с.

Andreeva E. D., Bogatnikov O. A. et al. *Magmaticheskie gornye poroda* (Igneous rocks). V. 3, Moscow: Nauka, 1985, 10–35 p.

4. Князев Ю. Г., Князева О. Ю., Сначев В. И., Жданов А. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист N-40 — Уфа. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. 70 с.

Knyazev Y. G., Knyazeva O. Y., Snachev V. I., Zhdanov A. V. et al. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Ural series. Sheet N-40 — Ufa. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Map factory, 2013, 70 p.

5. Ларионов Н. Н., Бергазов И. Р. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-40-XXII — Тузан. Объяснительная записка. — М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015. 56 с.

Larionov N. N., Bergazov I. R. et al. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200 000. Second edition. Series South Ural. Sheet N-40-XXII - Toucan. Explanatory note. Moscow: MF VSEGEI, 2015, 56 p.

6. Ларионов Н. Н., Рудниченко В. П., Быкова Л. С. и др. Отчет о геологическом доизучении в масштабе 1 : 50 000 по объекту «Авзянская площадь» 1979-85 гг. Уфа: ТГФ РБ, 1985.

Larionov N. N., Rudnichenko V. P., Bykova L. S. et al. *Otchet o geologicheskom doizuchenii v mashtabe 1 : 50 000 po objektu "Avzyanskaya ploschad"* (Report on additional geological study on the scale of 1 : 50 000 on the object "Avzyanskaya area" 1979-85). Ufa: TGF RB, 1985, 59 p.

7. Петрографический кодекс России: Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / Под ред. О. А. Богатикова, О. В. Петрова, А. Ф. Морозова; отв. ред. Л. В. Шарпенюк. 3-е изд., испр. и доп. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 200 с.

Petrograficheskiy kodeks Rossii: Magmaticheskiye, metamorficheskiye, metasomaticheskiye, impaktnyye obrazovaniya (Petrographic Code of Russia: Igneous, Metamorphic, Metasomatic, Impact Formations). Eds. O. A. Bogatikova, O. V. Petrova, A. F. Morozov; resp. ed. L. V. Sharpenok, 3rd ed., Rev. and additional. St. Petersburg: VSEGEI, 2009, 200 p.

8. Практическая петрология: методические рекомендации по изучению магматических образований при-



менительно к задачам госгеолкарт. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2017. 16 с.

Prakticheskaya petrologiya: metodicheskiye rekomendatsii po izucheniyu magmaticheskikh obrazovaniy primenitel'no k zadacham gosgeolkart (Practical petrology: guidelines for the study of igneous formations in relation to the tasks of state geolmaps). St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2017, 168 p.

9. Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология // Тр. ГИН АН СССР; вып. 377. М.: Наука, 1983. 183 с.

Stratotip rifeya. Stratigraphiya. Geochronologiya (Riphean stratotype. Stratigraphy. Geochronology). GIN AS USSR, 377, Moscow: Nauka, 1983, 183 p.

10. Hey M. H. A new review of the chlorites // Min. Mag, 1954. V. 30. P. 277–292.

11. Jensen L. S. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks. Miscellaneous, Ontario Department of Mines, 1976, 22 p.

12. Lanari P., Wagner T., Vidal O. A thermodynamic model for ditriocahedral chlorite from experimental and natural data in the system MgO–FeO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O: applications to P–T sections and geothermometry. Contributions to Mineralogy and Petrology, vol. 167, 2014, pp. 268–287.

13. Marsh S. Basalt geochemistry and tectonic discrimination within continental flood basalt provinces. Journal of volcanology and geothermal research, volume 32, Issues 1–3, 1987, pp. 35–49.

14. Pearce and Norry. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks. Contrib. Mineral. Petrol. 69, 1979, 37 p.

Поступила в редакцию / Received 14.10.2022