

Петрохимия неархейских кислых метавулканитов лебяжинской свиты Кейвского террейна, арктическая зона Фенноскандинавского щита

Балаганский В.В.

Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, balagan@geoksc.apatity.ru

Аннотация. С использованием вариационных диаграмм и метода главных компонент факторного анализа проведено сравнение химических составов лебяжинских кислых метавулканитов (ЛКВ) самой верхней части разреза лебяжинской свиты с возрастом 2678 ± 7 млн. лет с таковыми наиболее репрезентативной опубликованной выборки (РВ) этих метавулканитов. Все изученные ЛКВ образуют единый ряд от меланократовых до лейкократовых пород, в котором с увеличением содержаний SiO_2 и K_2O уменьшаются количества остальных главных элементов. Нагрузку фактора F1 определяют SiO_2 и K_2O (коэффициенты корреляции, K_K , 0.94 и 0.60 соответственно), фактора F2 – Na_2O и Al_2O_3 ($K_K = 0.89$ и 0.54), и фактора F3 – K_2O и Al_2O_3 ($K_K = 0.67$ и 0.50). На диаграммах F1–F2 и F1–F3 поле мезократовых пород РВ разделяет поля лейко- и меланократовых пород РВ и не перекрывается с полем лейкократовых пород РВ. Это говорит об отсутствии единого петрохимического эталона для ЛКВ. Полученные результаты подтверждают корреляцию ЛКВ с кейвскими щелочными гранитами А-типа и их образование вместе с габбро-анортозитами в анорогенных условиях 2.68–2.66 млрд. лет назад.

Ключевые слова: кислые метавулканиты, петрохимия, А-гранитоиды, неархей, Кейвский террейн, Кольский регион, Фенноскандинавский щит.

Major element chemistry of Neoproterozoic acid metavolcanics of the Lebyazhka Formation, Keivy Terrane, Arctic part of the Fennoscandian Shield

Balagansky V.V.

Geological Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity
balagan@geoksc.apatity.ru

Abstract. Major element contents in Lebyazhka acid metavolcanics (LAM) that compose the uppermost part of the Lebyazhka Formation and are dated at 2678 ± 8 Ma have been compared with those of the most representative LAM collection available in the literature (RLAM) using variation diagrams and principal component plots. All these LAM form a single series, in which contents of SiO_2 and K_2O rise as contents of other major elements decline. Loading of factor F1 is defined by SiO_2 and K_2O (correlation coefficients, C_C , 0.94 and 0.60, respectively), factor 2 by Na_2O and Al_2O_3 ($C_C = 0.89$ and 0.54), and factor 3 by K_2O and Al_2O_3 ($C_C = 0.67$ and 0.50). On F1–F2 and F1–F3 plots all the LAM form a single series, in which the field of mesocratic RLAM separates those of leuco- and melanocratic RLAM and does not overlap with the field of leucocratic RLAM. It suggests that there is no single chemical composition standard suitable for the LAM. This study confirms that the LAM correlate with the Keivy A-type granites, and all these rocks and the Keivy gabbro-anorthosites formed in an anorogenic setting 2.68–2.66 Ga ago.

Key words: acid metavolcanics, major element chemistry, A-granitoid, Neoproterozoic, Keivy Terrane, Kola region, Fennoscandian Shield.

Введение

Кейвский террейн является составной частью архейской Кольской провинции, расположенной в северо-восточной части Фенноскандинавского щита (рис. 1 а), которая входит в арктическую зону России. Одной из отличительных черт Кейвского террейна (рис. 1 б) является парагенетическая ассоциация щелочных гранитов (Батиева, 1976) и габбро-анортозитов (Юдин, 1980) с возрастом 2.66–2.67 млрд. лет (Митрофанов и др., 2000; Баянова, 2004; Ветрин, Родионов, 2009; Кудряшов и др., 2019). Эта ассоциация сходна с комплексом анорогенных гранитов рапакиви и габбро-анортозитов палеопротерозоя (Радченко и др., 1992) и для ее неархейских щелочных гранитов и габбро-анортозитов предполагаются генетическая связь и образование в анорогенных условиях (Zozulya et al., 2005; Zozulya, Eby, 2008, 2009). Другой отличительной чертой Кейвского террейна является широкое развитие архейских кислых метавулканитов, которые объединяются в ле-

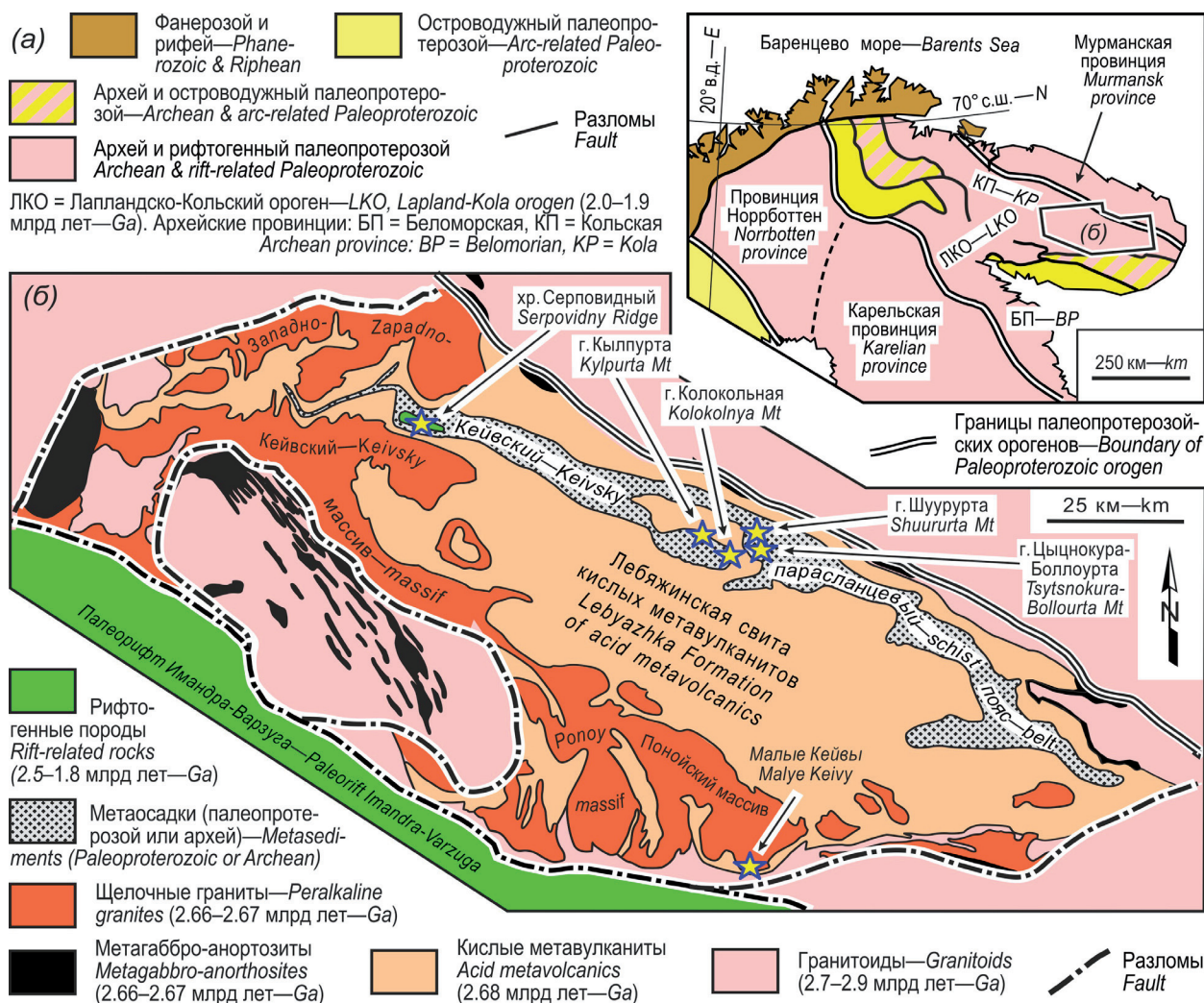


Рис. 1. (а) Главные тектонические единицы северной части Фенноскандинавского щита. (б) Схематическая геологическая карта Кейвского террейна (Геологическая карта..., 1996, с упрощениями).

Fig. 1. (a) Major tectonic units of the northern Fennoscandian Shield. (b) Schematic geological map of the Keivy terrane (Geological map..., 1996, simplified).

бязжинскую свиту (Белопищевский и др., 1980; Минц, 2010) и вместе с гранитоидами фундамента являются вмещающими породами для щелочных гранитов и габбро-анортозитов (рис. 1 б). Возраст метавулканитов сначала был определен U-Pb методом по циркону из кислого метатупфа района возвышенности Малые Кейвы (рис. 1 б) и составил 2871 ± 15 млн. лет (возраст верхнего пересечения по пяти дискордантным точкам (Баянова, 2004)). Этот позднеархейский возраст и петрохимические данные по лебяжинским кислым метавулканитам играют значительную роль в тектонических сценариях начальных стадий архейского тектогенеза в Кольском регионе (Минц, 2010; Козлов и др., 2019). Полученные позднее U-Pb датировки по трем образцам метавулканитов из района гг. Кырпурта, Колокольная и Шуурурта (рис. 1 б) оказались почти на 200 млн. лет моложе, а наиболее обоснованная из них равна 2678 ± 7 млн. лет (возраст верхнего пересечения по восьми конкордантным и двум субконкордантным точкам (Balagansky et al., 2021)). Отсюда следует, что излияние лебяжинских метавулканитов произошло в том же возрастном интервале, что и внедрение анорогенных щелочных гранитов и габбро-анортозитов. Более того, согласно данным о петрогенных (главных), примесных и редкоземельных элементах, лебяжинские метавулканиты аналогичны щелочным гранитам и также интерпретируются как анорогенные породы (Balagansky et al., 2021). Таким образом, новые данные по возрасту, петрохимии и геохимии лебяжинских метавулканитов указывают на необходимость ревизии существующих моделей тектонического развития Кольского ре-

гиона. Однако в работе (Balagansky et al., 2021) были проанализированы только те метавулканиды и щелочные граниты, для которых, помимо петрогенных элементов, имелись данные по примесным (второстепенным) и редкоземельным элементам. В результате в цитируемое исследование не была включена большая подборка силикатных химических анализов петрогенных элементов лебяжинских метавулканидов, опубликованных в работе (Белолипецкий и др., 1980), а также анализы двух образцов из коллекции М.В. Минца (Минц и др., 1996). Это обстоятельство несколько снижало обоснованность выводов, сделанных в работе (Balagansky et al., 2021). Настоящее сообщение устраняет этот пробел и посвящено сравнению данных по петрогенным элементам в образцах лебяжинских метавулканидов из коллекций разных исследователей, а также в щелочных гранитах, опубликованных в работах (Батиева, 1976; Белолипецкий и др., 1980; Balagansky et al., 2021). Сравнение проводилось с использованием вариационных диаграмм Харкера и одного из методов факторного анализа – метода главных компонент (Principal Component Analysis, Jolliffe, 2002). Для расчета главных компонент и сопутствующих параметров использовалась программа XLSTAT на базе компьютерной программы Excel

Характеристика лебяжинских кислых метавулканидов и щелочных гранитов

Кислые метавулканиды лебяжинской свиты архея, также известные как лебяжинские гнейсы, залегают на образованиях устьюгоньской свиты и перекрываются метаосадками Кейвского парасланцевого пояса (Белолипецкий и др., 1980). Устьюгоньская свита включает биотитовые гнейсы, часто с мусковитом и гранатом, двуслюдяные гнейсосланцы и плагиосланцы с прослоями амфиболовых, амфибол-биотитовых плагиосланцев и амфиболитов. В стратиграфической схеме кольского архея, разработанной в ГИ КНЦ РАН (Радченко и др., 1994), устьюгоньские образования отнесены к нижней части лебяжинской свиты. В результате лебяжинская свита является крупнейшим породным комплексом Кейвского террейна и занимает 40 % его площади (рис. 1 б). Преобладающими типами пород верхней части этой свиты являются слабо рассланцованные мелкозернистые и реже среднезернистые биотитовые, мусковит-биотитовые и гранат-биотитовые гнейсы. Многие из них содержат реликты кварцевых, биотитовых и карбонатных миндалин и порфириковых полевых шпатов; реже встречаются реликты пирокластических текстур, включая брекчиевидные разности с взрывными обломками и биотитовые обособления пламенеvidной формы, характерные для игнимбритов. В составе верхней части свиты доминируют эффузивные разности, пирокластические породы занимают подчиненное положение. Метаосадки практически отсутствуют.

Степень метаморфизма лебяжинских кислых вулканидов отвечает среднетемпературной амфиболитовой фации, при этом они не были мигматизированы и на значительных площадях испытывали щелочную метасоматоз. Главными индикаторами метасоматоза является появление в этих породах микроклина и гастингсита, и наиболее интенсивно метасоматоз проявился в породах нижних уровней лебяжинской свиты, а также в устьюгоньских образованиях (Белолипецкий и др., 1980). Новообразованные микроклиновые и гастингситовые гнейсы текстурно и структурно близки замещаемым лебяжинским гнейсам, связаны с ними постепенными переходами и отличаются только большей массивностью и большей однородностью (Белолипецкий и др., 1980; Минц, 2010). В наиболее метасоматизированных породах развитие гастингсита приводит к исчезновению граната и биотита, при этом местами появляется эгирин (Минц, 2010). Тем не менее, отмечается, что, согласно петрохимическим и геохимическим данным, метасоматоз не привел к существенному изменению химического состава метавулканидов, и микроклиновые и гастингситовые гнейсы в целом наследуют особенности состава этих пород (Минц, 2010).

Наблюдаемый структурный разрез кислых метавулканидов лебяжинской свиты в ее объеме, принятый в работе (Белолипецкий и др., 1980), интерпретируется как стратиграфический и подразделяется на верхнюю и нижнюю подсвиты. Нижняя подсвита сложена меланократовыми и мезократовыми биотитовыми гнейсами, содержащими все указанные выше признаки их первичной вулканической природы. Эти гнейсы для удобства дальнейшего анализа их петрохимических черт объединяются в две группы – группа I и группа II. В мезократовых разностях отмечаются редкие мало-

мощные прослои лейкократовых гнейсов. Верхняя подсвета состоит из мезократовых и лейкократовых мусковит- и гранатсодержащих биотитовых гнейсов, которые, как и гнейсы нижней подсветы, являются метавулканогенными породами. Они объединяются в группу *III*. Наиболее полный и представительный разрез верхней подсветы обнажается в районе гор Шуурурта и Цыцнокура-Боллоурта к югу от залегающего на этой подсвете Кейвского парасланцевого пояса (рис. 1 б). Именно в этом районе Больших Кейв, ограниченном указанными горами и горами Кырпурта и Колокольная, были взяты 13 из 15 образцов из коллекций Т.А. Мысковой и В.В. Балаганского, химический состав которых приведен в работе (Balagansky et al., 2021). Таким образом, судя по положению в структурном разрезе, кислые метавулканыты, представленные этими 13 образцами, находятся в самой верхней части структурного разреза лебяжинской свиты, и их следует относить к образованиям ее верхней подсветы. Из этой же части разреза в районе хр. Серповидный были взяты еще два образца из коллекции В.В. Балаганского. Наконец, все четыре образца лебяжинских метавулканытов, данные для которых опубликованы в монографии (Минц и др., 1996), были отобраны из гранат-биотитовых гнейсов, которые, согласно работе (Белоліпецкий и др., 1980), встречаются только в верхней подсвете, то есть в верхней части разреза лебяжинской свиты. Все эти гнейсы объединяются в группу *IV* (ниже для краткости Г-*IV*). Эта верхняя часть разреза была наименее затронута щелочным метасоматозом и находится на значительном удалении от областей развития метасоматических микроклиновых и гастингситовых гнейсов, локализованных в центральных частях Кейвского террейна (Геологическая карта..., 1996; Белоліпецкий и др., 1980),.

По петрохимическим данным и первичным структурам и текстурам, магматические протолиты лебяжинских гнейсов обеих подсвет отвечают дацитам, риодацитам, риолитам, трахитам, трахириолитам, трахириодацитам и туфам этих пород (Белоліпецкий и др., 1980; Минц, 2010; Balagansky et al., 2021). Петрохимическая характеристика лебяжинских кислых вулканытов, данная в работе (Белоліпецкий и др., 1980), основывается на химическом составе 48 образцов из коллекций геологов, изучавших геологию Кейвской возвышенности и прилегающих районов и картировавших эту территорию. Они включают 37 образцов, собранных геологами под руководством В.Г. Гаскельберга, два образца Е.Е. Федорова и один образец Б.А. Шлайфштейна, а также 11 образцов сотрудников Геологического института Кольского филиала АН СССР: Д.Д. Мирской (восемь образцов), И.Д. Батиевой, И.В. Белькова и Н.И. Плетневой (по одному образцу). Представляется, что эти образцы являются в полной мере представительными для верхних уровней разреза лебяжинской свиты, а группы *I*, *II* и *III* в являются геологически репрезентативными и далее для краткости обозначаются как РГ-*I*, РГ-*II* и РГ-*III*.

Наиболее значимыми петрохимическими чертами лебяжинских пород являются большое содержание K_2O и высокая железистость, причем железистость последовательно увеличивается вверх по разрезу от 0.78 у меланократовых биотитовых гнейсов до 0.96 у мусковит-биотитовых гнейсов соответственно в нижней и верхней частях свиты в понимании В.Г. Гаскельберга и его коллег (Белоліпецкий и др., 1980). Вверх по разрезу также последовательно увеличивается содержание SiO_2 и уменьшаются содержания всех остальных петрогенных элементов, за исключением Na_2O и K_2O . Таким образом, кислые метавулканыты нижней части подсветы петрохимически отличаются от таковых верхней подсветы, что наглядно иллюстрирует компонентная диаграмма на рис. 14 в работе (Белоліпецкий и др., 1980). На этой диаграмме указанные породы образуют два неперекрывающихся поля, между которыми, а между ними и внутри их располагаются фигуративные точки пород средней части разреза лебяжинской свиты. Все породы вместе образуют на диаграмме единую область, что предполагает их генетическую связь друг с другом.

Щелочные граниты являются самым распространенным типом плутонических пород Кейвского террейна и занимают 24 % его площади (рис. 1 б). По результатам изучения всех массивов щелочных гранитов, И.Д. Батиева (1976) выделила девять петрографических разновидностей этих пород и привела для них средние содержания петрогенных элементов. В порядке увеличения количества в них SiO_2 это следующие разновидности: (1) порфириновые лепидомелан-гастингситовые, (2) гнейсовидные лепидомелан-гастингситовые, (3) энигматит-эгириин-арфведсонитовые, (4) эгириин-

арфведсонитовые с энigmatитом, (5) эгирин-арфведсонитовые, (6) магнетит-эгириновые, (7) лепидомелановые с феррогастингситом, (8) эгирин- и лепидомелановые с эгирином и арфведсонитом, (9) арфведсонит-эгириновые. Как и лебязинские кислые метавулканыты, щелочные граниты отличаются высокой железистостью. По данным, опубликованным в работе (Balagansky et al., 2021), железистость в этих породах варьирует от 0.78 до 0.99, за исключением двух образцов из Западно-Кейвского массива с железистостью 0.57 и 0.72. При этом железистость, рассчитанная для средних химических составов крупнейших массивов щелочных гранитов – Западно-Кейвского и Понойского, а также всех девяти петрографических разновидностей этих пород, колеблется от 0.90 до 0.99.

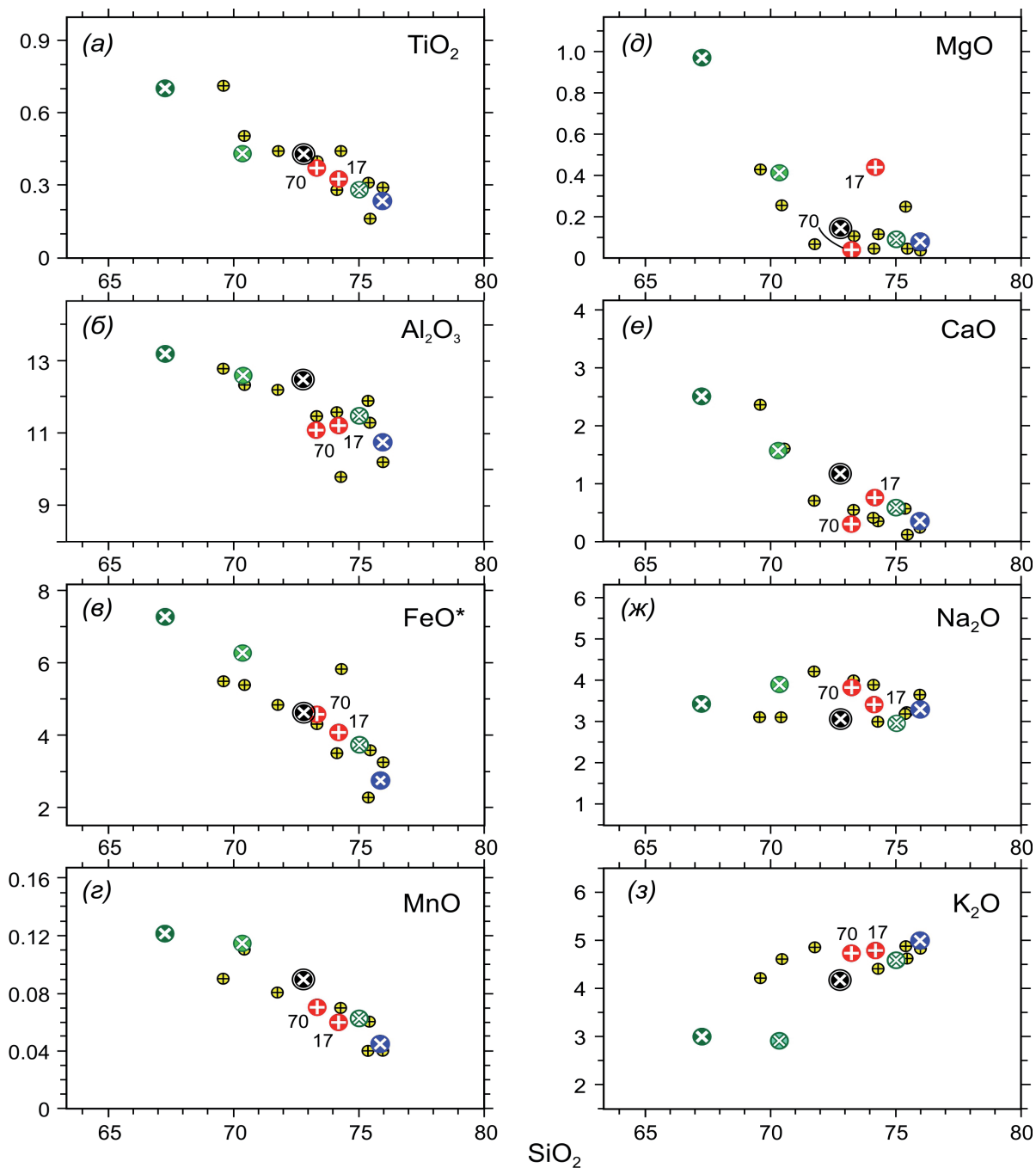
Петрохимия лебязинских кислых метавулканытов и щелочных гранитов

Анализ вариационных диаграмм. В работе (Balagansky et al., 2021) были приведены содержания петрогенных элементов для 17 образцов лейкократовых и мезократовых метавулканытов верхов лебязинской свиты, который соответствует ее верхней подсвиты и, скорее всего, самой верхней части нижней подсвиты. Как уже отмечалось выше, 13 образцов были взяты в районе Больших Кейв, а два образца – в районе хр. Серповидного из метавулканытов рядом с северной и южной границами Кейвского парасланцевого пояса (рис. 1 б). Оставшиеся два образца были взяты из гранат-биотитовых гнейсов верхней части разреза свиты. С учетом соответствия перечисленных образцов кислых метавулканытов породам только верхних уровней лебязинской свиты в понимании авторов работы (Белолипецкий и др., 1980), данные по подстилающим их устьюгоньским отложениям, относимых сейчас к лебязинским породам, не рассматривались. В итоге в работе (Balagansky et al., 2021) были проанализированы средние составы рассматриваемых 17 образцов кислых метавулканытов лебязинской свиты (группа Г-IV), трех групп верхних уровней ее разреза (РГ-I, РГ-II и РГ-III), Западно-Кейвского и Понойского щелочногранитных массивов, а также всех петрографических разновидностей щелочных гранитов. Согласно петрографическому описанию и положению в структурном разрезе метавулканыты Г-IV коррелируются с таковыми РГ-II и РГ-III.

На вариационных диаграммах содержания TiO_2 , Al_2O_3 , FeO^* , MgO , MnO и CaO во всех рассматриваемых метавулканытах и щелочных гранитах обнаруживают обратную линейную зависимость от содержания SiO_2 : они уменьшаются при возрастании доли кремнезема (рис. 2 а–е). Фигуративные точки этих элементов образуют единый хорошо выраженный линейный тренд, кроме MgO , фигуративных точки которого обнаруживают менее выдержанное линейное распределение. Исключение представляют только щелочи, которые проявляют разные тенденции: с увеличением количества SiO_2 содержание Na_2O снижается незначительно, меняясь в пределах всего лишь 1.3 % (рис. 2 ж), тогда как доля K_2O заметно возрастает (рис. 2 з).

Анализ компонентных диаграмм. Методом главных компонент были проанализированы данные для лебязинских метавулканытов, опубликованные в работах (Белолипецкий и др., 1980; Balagansky et al., 2021), а также два анализа из монографии (Минц и др., 1996), не вошедшие в работу (Balagansky et al., 2021), в результате чего число анализов в группе Г-IV составило 19. Анализ данных по петрогенным элементам щелочных гранитов всех массивов оказался невозможным из-за того, что в работе (Батиева, 1976), были опубликованы только средние составы разновидностей гранитов, а не первичные анализы образцов. Поэтому рассматривались только данные для 16 из 17 образцов Западно-Кейвского массива, приведенных в работе (Balagansky et al., 2021). Один анализ был исключен из-за аномально высоких содержаний TiO_2 и MnO (1.28 и 1.08 мас. % соответственно). Результаты анализа главных компонент представлены в таблицах 1 и 2, а также на рисунках 3 и 4.

Установлено, что все вариации химических составов лебязинских кислых метавулканытов описываются девятью факторами. Нагрузка фактора F1, доля которого в общей структуре факторов равна 54.02 % (табл. 1), определяется содержаниями SiO_2 и в меньшей мере K_2O (рис. 3 а) с коэффициентами корреляции (K_K) 0.937 и 0.599 соответственно (табл. 2). Для фактора F2 (его доля равна 17.64 %) определяющими являются Na_2O и Al_2O_3 ($K_K = 0.893$ и 0.540). Эти два фактора занимают 71.66 % от суммы всех факторов, что позволяет охарактеризовать главные петрохимические черты лебязинских кислых метавулканытов, достаточные для достижения цели данной работы.



Средние составы гнейсов (кислых метавулканитов) лебяжинской свиты—Average composition of gneisses (acid metavolcanics) of the *Lebyazhka Formation*:

- ⊗ лейко- и мезократовых (группа Г-IV)—*leuco- & mesocratic (Group G-IV)* ([1], N = 17),
- ⊗ лейко- и мезократовых верхней подсвиты (группа РГ-III)—*leuco- & mesocratic of the Upper Subformation (Group RG-III)* ([2], N = 10),
- ⊕ мезократовых нижней подсвиты (группа РГ-II)—*mesocratic of the Lower Subformation (Group RG-II)* ([2], N = 26),
- ⊗ меланократовых нижней подсвиты (группа РГ-I)—*melanocratic of the Lower Subformation (Group RG-I)* ([2], N = 12).

Средние составы кейвских щелочных гранитов—Average composition of the *Keivy peralkaline granites*:

- ⊗ Понойского массива—*Ponoy massif* ([3], N = 5),
- 70 ⊕ ⊕ 17 Западно-Кейвского массива—*Zapadno-Keivsky massif* ([4], N = 70; [1], N = 17),
- ⊕ петрографических разновидностей во всех массивах—*petrographical varieties in all the massifs* [5].

References: 1 = Balagansky et al., 2021, 2 = Белопицкий и др., 1980—*Belolipetsky et al., 1980*, 3 = Ветрин и др., 1999—*Vetrin et al., 1999*, 4 = Mikhailova et al., 2017, 5 = Батиева, 1976—*Batiyeva, 1976*.

Рис. 2. Вариационные диаграммы для лебяжинских кислых метавулканитов и щелочных гранитов.

Fig. 2. Variation diagrams for the Lebyazhka acid metavolcanics and peralkaline granites.

Таблица 1. Параметры факторов.
 Table 1. Eigenvalue, variability, and cumulative total.

Факторы	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Параметры									
Значение фактора	4.86	1.59	0.89	0.59	0.38	0.30	0.26	0.12	0.02
Доля фактора, %	54.02	17.64	9.91	6.54	4.22	3.25	2.93	1.28	0.22
Накопительный итог, %	54.02	71.66	81.57	88.10	92.32	95.57	98.50	99.78	100.00

Таблица 2. Корреляция между содержаниями оксидов и наиболее значимыми факторами.
 Table 2. Correlations between oxide abundances and the most significant factors.

Факторы	F1	F2	F3	F4	F5
Оксиды					
SiO ₂	0.937	-0.052	-0.284	0.053	0.022
TiO ₂	-0.783	-0.313	0.008	-0.183	-0.403
Al ₂ O ₃	-0.572	0.540	0.496	-0.300	0.130
FeO*	-0.863	-0.206	0.023	0.214	-0.089
MnO	-0.738	-0.004	0.198	0.591	0.111
MgO	-0.776	-0.402	-0.157	-0.145	0.022
CaO	-0.829	-0.184	-0.193	-0.207	0.374
Na ₂ O	-0.324	0.893	-0.122	0.050	-0.192
K ₂ O	0.599	-0.398	0.670	-0.020	-0.044

Примечание: жирным шрифтом выделены оксиды с коэффициентами корреляции ≥ 0.5.
 Note: oxides with values ≥ 0.5 are written in bold.

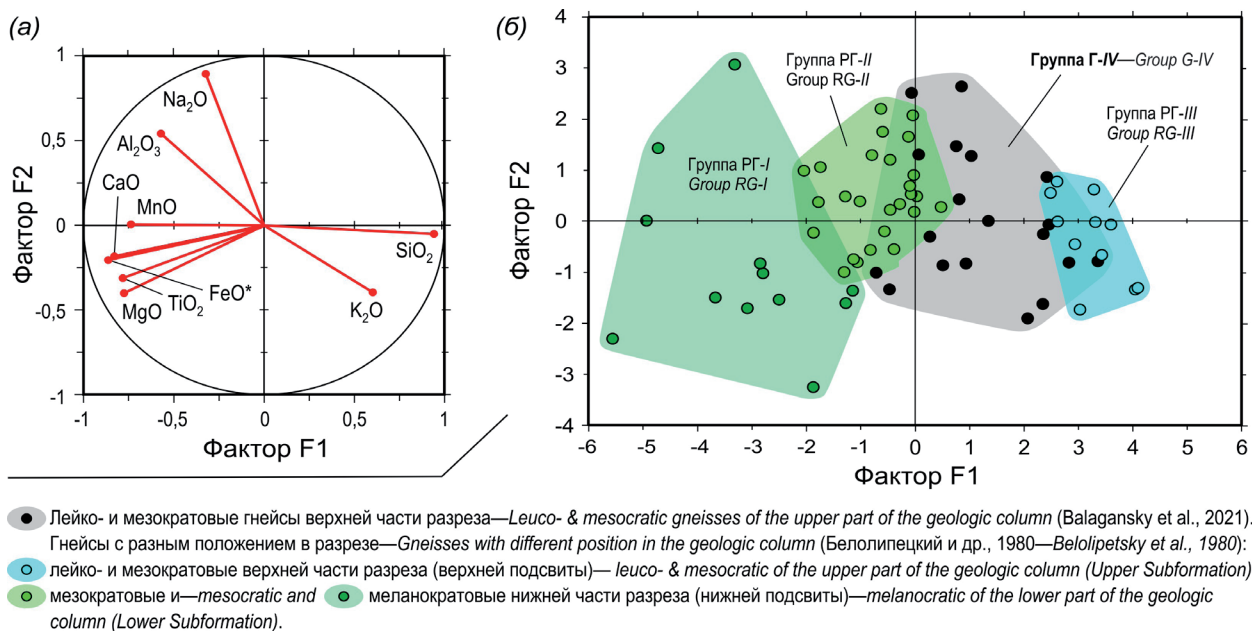


Рис. 3. Факторные диаграммы для оксидов петрогенных элементов лебяжинских кислых метавулканитов: (а) корреляция оксидов с факторами F1 и F2, (б) диаграмма F1—F2.

Fig. 3. Factor plots for oxides of major elements of Lebyazhka acid metavolcanics: (a) correlations between oxides and factors F1 and F2, (b) F1 vs F2 plot.

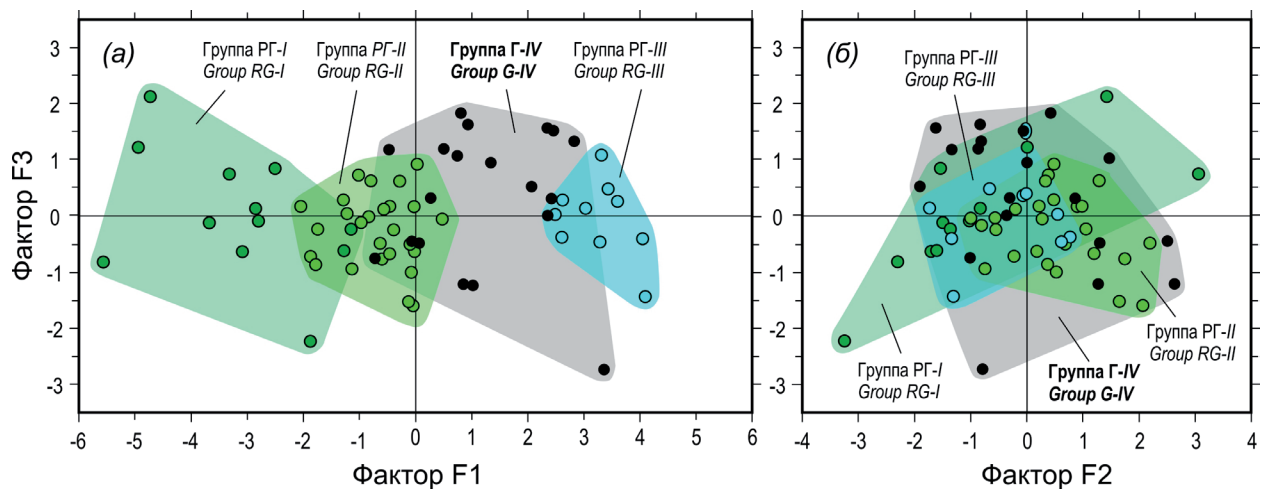


Рис. 4. Факторные диаграммы для оксидов петрогенных элементов лебяжинских кислых метавулканитов (условные обозначения те же, что и на рис. 3).

Fig. 4. Factor plots for major element oxides of Lebyazhka acid metavolcanics (for symbols see Fig. 3).

Анализ распределения фигуративных точек лебяжинских кислых метавулканитов на диаграмме F1—F2 (рис. 3 б) показывает, что увеличение фактора F1 отражает возрастание количества SiO_2 и K_2O и уменьшение количества всех остальных петрогенных элементов. Фигуративные точки групп PF-II и PF-III образуют две компактные области, удаленные друг от друга по оси F1 промежуток на ширину группы PF-III. Фигуративные точки группы G-IV заполняют этот промежуток, их распределение по оси F2 почти не выходит за пределы областей групп PF-II и PF-III, а образованное ими поле перекрывается с этими областями. В то же время область фигуративных точек группы PF-I более растянута по оси F2 и обнаруживает минимальное перекрытие с таковой группы PF-II. В результате фигуративные точки всех четырех групп образуют общее для них поле, вытянутое по оси F1.

Таким образом, в число важных петрохимических черт лебяжинских кислых метавулканитов следует включить поведение оксидов SiO_2 , K_2O , Na_2O и Al_2O_3 , которые определяют нагрузку факторов F1 и F2. При этом оказывается, что K_2O и Al_2O_3 определяют нагрузку следующего по значи-

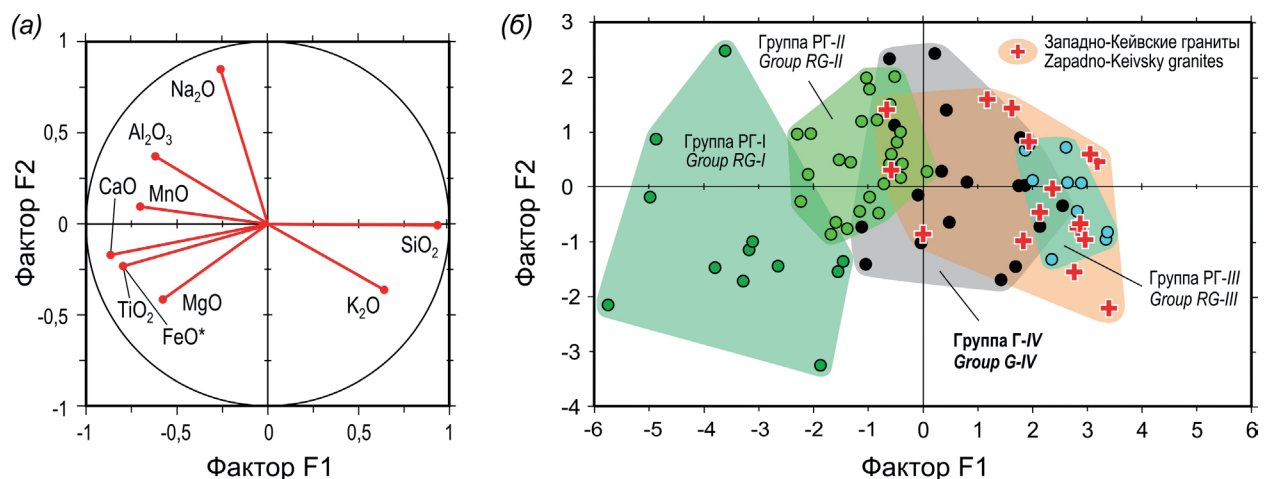


Рис. 5. Факторные диаграммы для оксидов петрогенных элементов лебяжинских кислых метавулканитов и западно-кейвских щелочных гранитов: (а) корреляция между оксидами и факторами F1 и F2, (б) диаграмма F1—F2 (условные обозначения те же, что и на рис. 3).

Fig. 5. Factor plots for oxides of major elements of Lebyazhka acid metavolcanics and peralkaline granites of the Zapadno-Keivsky massif: (a) correlations between oxides and factors F1 and F2, (b) F1 vs F2 plot (for symbols see Fig. 3).

мости фактора F3, а суммарная доля факторов F1, F2 и F3 равна 81.57 % (табл. 1). Хотя доля этого фактора составляет всего 9.91 % и он уже может отражать статистический шум, для сравнения было проанализировано распределение фигуративных точек всех групп на диаграммах F1—F3 и F2—F3. На диаграмме F1—F3 (рис. 4 а) области фигуративных точек всех четырех групп метавулканитов обнаруживают последовательное и существенное перекрытие друг с другом. При этом области групп РГ-*I* и Г-*IV* примыкают друг к другу по оси F1, а центр компактной области группы РГ-*II* совпадает с участком перекрытия. В целом на диаграмме F1—F3 наблюдается большее единство поля, общего для лебяжинских кислых метавулканитов. На диаграмме F2—F3 (рис. 4 б) все фигуративные точки рассматриваемых пород, за исключением трех точек группы РГ-*I* и одной точки группы Г-*IV*, полностью перекрываются друг с другом и дают одно компактное поле.

Совместный анализ лебяжинских кислых метавулканитов и щелочных гранитов Западно-Кейвского массива показал принципиально такие же результаты. Сохраняются и характер корреляции между оксидами и факторами F1 и F2 (рис. 5 а), и единое для метавулканитов и вытянутое по оси F1 поле фигуративных точек, в правой части которого располагаются фигуративные точки гранитов (рис. 5 б). Доли факторов F1 и F2 равны 50.84 и 14.58 %, а их сумма составляет 65.42 % (для метавулканитов 54.02, 17.64 и 71.66 % соответственно). Нагрузка фактора F1 определяется SiO₂ и K₂O при K_к = 0.94 и 0.64 соответственно, а фактора F2 – Na₂O и Al₂O₃ при K_к = 0.85 и 0.37 соответственно (для метавулканитов эти две пары K_к равны 0.94–0.60 и 0.89–0.54 соответственно).

Обсуждение результатов и выводы

Главный вывод, который следует из проведенного анализа, состоит в том, что все рассмотренные группы лебяжинских кислых метавулканитов вместе со всеми петрографическими разновидностями и двумя крупнейшими массивами щелочных гранитов образуют на вариационных диаграммах общий тренд и единое, вытянутое по оси F1 поле на компонентных диаграммах. Для метавулканитов эти тренд и поле образуют последовательность РГ-*I*—РГ-*II*—Г-*IV*—РГ-*III*, отражающую уменьшение содержаний всех петрогенных элементов с увеличением количества SiO₂ и в меньшей мере K₂O от меланократовых разновидностей метавулканитов к лейкократовым. При этом область группы Г-*IV* заполняет на диаграммах F1—F2 и F1—F3 разрыв между областями групп РГ-*II* и РГ-*III* и перекрывается с ними (рис. 3 б и 4 б). В результате часть единого поля лебяжинских метавулканитов, образованная этими тремя областями, отличается большей плотностью фигуративных точек по сравнению с прилегающей к ней такой же по площади областью группы РГ-*I* с минимальными содержаниями SiO₂ и K₂O. Учитывая, что метавулканиты групп РГ-*II*, РГ-*III* и Г-*IV* петрографически соответствуют друг другу и находятся на одном и том же, самом верхнем уровне разреза лебяжинской свиты, полученные результаты указывают на то, что все эти метавулканиты генетически связаны друг с другом, а также с метавулканитами группы РГ-*I*. Эта связь объясняется давно известным процессом кристаллизационной дифференциации магматических расплавов, когда последовательно образуются магмы все более кислого состава и происходит смена ранних меланократовых пород поздними лейкократовыми (например, Рябчиков, 1987). Для гранитных пород этот процесс всесторонне рассмотрен в монографии (Nédélec, Bouchez, 2015). Отсюда вытекает вывод о невозможности выделения единого для всей совокупности лебяжинских кислых метавулканитов петрохимического эталона, что наглядно иллюстрируют вариационные диаграммы Харкера и компонентные диаграммы (рис. 2, 3 б и 4).

Второй главный вывод заключается в том, что петрохимические черты всех петрографических разновидностей и двух крупнейших массивов щелочных гранитов совпадают с таковыми лебяжинских метавулканитов групп РГ-*II*, РГ-*III* и Г-*IV*. На вариационных диаграммах фигуративные точки средних составов этих плутонических пород ложатся в целом на тренды эволюции лебяжинских метавулканитов этих трех групп (рис. 2). Об этом же свидетельствует и расположение фигуративных точек западно-кейвских щелочных гранитов в области, единой для метавулканитов групп РГ-*II*, РГ-*III* и Г-*IV* на диаграмме F1—F2 (рис. 5 б).

Таким образом, проведенное на большем петрохимическом материале исследование подтвердило вывод о генетической связи лебяжинских кислых метавулканитов и щелочных гранитов, сделанный в работе (Balagansky et al., 2021). В этой же работе в метатрахирриолите был описан бадделеит, сохранившийся в виде реликтов внутри кристалла циркона с возрастом 2678 ± 7 млн. лет. Петрографические, минералогические, петрохимические и геохимические данные указывают на отсутствие какой-либо метасоматической переработки этого метавулканита. Присутствие реликтов бадделеита в цирконе свидетельствует о генетической связи лебяжинских кислых метавулканитов с кейвскими габбро-анортозитами, которые внедрялись вместе со щелочными гранитами 2.67–2.66 млрд. лет назад в анорогенных условиях (Митрофанов и др., 2000; Баянова, 2004; Ветрин, Родионов, 2009; Кудряшов и др., 2019). Бадделеит кристаллизуется только в основных, ультраосновных и щелочноультраосновных породах, а также в карбонатитах и может присутствовать в кислых породах только в виде включений в минералах, тем или иным способом попавших в кислый расплав и изолировавших его от этого расплава (Heaman, LeCheminant, 1993). В основных породах описаны единичные случаи образования позднемагматического бадделеита в виде кайм вокруг магматического ильменита и включений в нем (Bingen et al., 2001), а также метаморфического бадделеита (Rubatto, Scambelluri, 2003). Образование метасоматического бадделеита рассмотрено на примере замещения детритового циркона бадделеитом в сростании с рутилом и редким фосфатом флоренситом по трещинам и в виде кайм в рудопоявлении Ичетью, расположенном в осадочных породах Среднего Тимана (Скублов и др., 2018). Кристаллизация микроагрегатов этих минералов связывается с воздействием на циркон щелочных флюидов с температурой не менее $500\text{--}600^\circ\text{C}$, приносящих редкие земли, Y, Nb и Ti. Условия образования бадделеита во всех этих случаях не применимы для объяснения нахождения включений бадделеита внутри циркона в лебяжинском метатрахирриолите.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность П.Б. Соколову за всесторонние консультации по использованию метода главных компонент, представлению полученных результатов и их интерпретации. Автор также признателен Т.В. Картушинской за помощь в подготовке вариационных диаграмм и Т.В. Каулиной за внимательное прочтение рукописи и сделанные замечания, позволившие сделать текст более понятным.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 0226-2019-052.

Литература

1. Батиева И.Д. Петрология щелочных гранитоидов Кольского полуострова. Л. Изд-во: Наука. 1976. 224 с.
2. Баянова Т.Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. М. Изд-во: Наука. 2004. 174 с.
3. Белолипецкий А.П., Гаскельберг В.Г., Гаскельберг Л.А., Антонюк Е.С., Ильин Ю.И. Геология и геохимия метаморфических комплексов раннего докембрия Кольского полуострова. Л. 1980. 238 с.
4. Ветрин В.Р., Родионов Н.В. Геология и геохронология неогархейского анорогенного магматизма Кейвской структуры, Кольский полуостров // Петрология. 2009. Т. 17. № 5. С. 578–600.
5. Ветрин В.Р., Каменский И.Л., Баянова Т.Б., Тиммерман М., Беляцкий Б.В., Левский Л.К., Балашов Ю.А. Меланократовые включения и петрогенезис щелочных гранитоидов Понойского массива (Кольский полуостров) // Геохимия. 1999. № 11. С. 1178–1190.
6. Геологическая карта Кольского региона (северо-восточная часть Балтийского щита). Масштаб 1:500000. Гл. ред. Ф.П. Митрофанов. Отв. ред. А.Т. Радченко и К. Гиллен. Авторы: Балаганский В.В., Басалаев А.А., Беляев О.А., Пожиленко В.И., Радченко А.Т., Радченко М.К. Апатиты. ГИ КНЦ РАН. 1996.
7. Козлов Н.Н., Сорохтин Н. О., Мартынов Е.В., Марчук Т.С. Геодинамика Кейвского домена: петрогеохимический аспект // Вестник КНЦ РАН. 2019. № 3 (11). С. 80–86.
8. Кудряшов Н.М., Балаганский В.В., Удоратина О.В., Мокрушин А.В., Кобл М.А. Время формирования габбро-анортозитов Ачинского комплекса: U-Pb (SHRIMP RG) изотопно-геохронологическое изучение циркона // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 318–322.

9. Минц М.В. Кольский микроконтинент // Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые ранне-докембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС. М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС. 2010. Т. 1. С. 71–95.
10. Минц М.В., Глазнев В.Н., Конилов А.Н., Кунина Н.М., Никитичев А.П., Раевский А.Б., Седых Ю.Н., Ступак В.М., Фонарев В.И. Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры // М. Изд-во: Научный мир. 1996. 287 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 503).
11. Митрофанов Ф.П., Зозуля Д.Р., Баянова Т.Б., Левкович Н.В. Древнейший в мире анорогенный щелочногранитный магматизм в Кейвской структуре Балтийского щита // Доклады АН. 2000. Т. 374. № 2. С. 238–241.
12. Скублов С.Г., Красоткина А.О., Макеев А.Б., Галанкина О.Л., Мельник А.Е. Уникальная находка преобразования циркона в бадделеит (рудопоявление Ичетью, Средний Тиман) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2018. № 1. С. 27–35. DOI: 10.32454/0016-7762-2018-1-27-35.
13. Радченко А.Т., Балаганский В.В., Виноградов А.Н., Голионко Г.Б., Петров В.П., Пожиленко В.И., Радченко М.К. Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита (объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1: 500 000). СПб. Изд-во: Наука. 1992. 112 с.
14. Радченко А.Т., Балаганский В.В., Басалаев А.А., Беляев О.А., Пожиленко В.И., Радченко М.К. Объяснительная записка к геологической карте северо-восточной части Балтийского щита масштаба 1:500 000. Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН. 1994. 96 с.
15. Рябчиков И.Д. Физико-химические условия процессов генерации и дифференциации кислых и средних магм // Магматические горные породы. Т. 4. М.: Наука. 1987. С. 348–358.
16. Юдин Б.А. Габбро-лабрадоритовая формация Кольского полуострова и ее металлогения. Л. Изд-во: Наука. 1980. 168 с.
17. Balagansky V.V., Myskova T.A., Lvov P.A., Larionov A.N., Gorbunov I.A. Neoproterozoic A-type acid metavolcanics in the Keivy Terrane, northeastern Fennoscandian Shield: geochemistry, age, and origin // Lithos. 2020. V. 380–381. 105899. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105899.
18. Bingen B., Austrheim H., Whitehouse M. Ilmenite as a source for zirconium during high-grade metamorphism? Textural evidence from the Caledonides of Western Norway and implications for zircon geochronology // Journal of Petrology. 2001. V. 42. № 2. P. 355–375.
19. Heaman L.M., LeCheminant A.N. Paragenesis and U-Pb systematics of baddeleyite (ZrO₂) // Chemical Geology. 1993. V. 110. P. 95–126.
20. Jolliffe I.T. Principal component analysis. New York, etc.: Springer-Verlag. 2002. 487 p. DOI: 10.1007/b98835.
21. Mikhailova J.A., Pakhomovsky Ya.A., Ivanyuk G.Yu., Bazai A.V., Yakovenchuk V.N., Elizarova I.R., Kalashnikov A.O. REE mineralogy and geochemistry of the Western Keivy peralkaline granite massif, Kola Peninsula, Russia // Ore Geology Reviews. 2017. V. 82. P. 181–197. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.11.006
22. Nédélec A., Bouchez J.-L. Granites: Petrology, Structure, Geological Setting, and Metallogeny. Oxford: Oxford University Press. 2015. 348 p.
23. Rubatto D., Scambelluri M. U-Pb dating of magmatic zircon and metamorphic baddeleyite in the Ligurian eclogites (Voltri Massif, Western Alps) // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2003. V. 146. P. 341–355. DOI 10.1007/s00410-003-0502-x
24. Zozulya D.R., Eby G.N. The anorthosite–A-type peralkaline granite connection: a case study from the Keivy Terrane, Baltic Shield // Geological Association of Canada—Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Abstracts 33. Quebec: 2008. P. 190–191.
25. Zozulya D.R., Eby G.N. Geochemical constraints on the genetic relationship between A-type peralkaline granite and anorthosite from the Neoproterozoic Keivy alkaline province, NE Baltic Shield // Geochemistry of Magmatic Rocks. School «Geochemistry of alkaline rocks», Abstract Volume. Moscow: ONTI GEOKHI RAS Publishing. 2009. P. 180–182.
26. Zozulya D.R., Bayanova T.B., Eby G.N. Geology and Age of the Late Archean Keivy Alkaline Province, Northeastern Baltic Shield // The Journal of Geology. 2005. V. 113. P. 601–608.