

УДК 552.323.5

DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007

Оригинальная статья

Высоко-фракционированные гранитоиды Пшишского редкометалльного рудного поля Северного Кавказа

А.И. Гусев 

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М.
Шукшина, Россия, 659333, г. Бийск, ул. Короленко, 53, e-mail: anzerg@mail.ru

Статья поступила: 26.01.2023, доработана: 27.02.2023, одобрена в печать: 03.03.2023

Резюме: Актуальность работы. На Северном Кавказе описаны различные типы гранитоидов разного возраста и состава. Позднепалеозойский этап формирования Центрального мегаблока Большого Кавказа имеет важнейшее значение в формировании гранитоидного магматизма и его металлогении. Интрузивный магматизм Пшишского рудного поля не получил освещения в литературе, однако с ним тесно связано оруденение стратегических металлов: бериллия, тантала, ниобия, вольфрама, лития. **Целью исследования** является получение комплексной петрологической и геохимической характеристики рудогенерирующих ультракислых гранитоидов и их типизация на современном уровне. Объектом для исследований были выбраны малые интрузии и сопровождающие их дайковые и жильные образования Пшишского участка, выделенного в качестве потенциального редкометалльного рудного поля. Материалы исследования. Материалы, используемые в статье, получены автором в процессе проведения специализированных металлогенических исследований, проводимых с 1967 года на Большом Кавказе. **Методы исследования.** Методы изучения, кроме геологического и петрографического описания пород и метасоматитов, включали получение количественных характеристик состава пород. Силикатный анализ пород на главные компоненты проведен рентгено-спектральным флуоресцентным методом, Co, Ni, Zn, Pb, Li, Sc, Cu – ISP-AES, остальных элементов, в том числе РЗЭ (редкоземельных элементов) – методом ISP-MS. Анализ пород проводился в лаборатории Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (г. Москва). **Результаты работы.** В результате комплексных исследований получены новые данные по петрогеохимии кремнекислого магматизма Пшишского участка с выделением двух фаз внедрения: двуслюдяных лейкогранитов и лейкогранитов. Рассмотрены также дайки грейзенизированных лейкогранитов и онгонитов. Все интрузивные дериваты генерированы путём плавления фельзитических пелитов нижней коры и отнесены к высоко-фракционированным разностям, при формировании которых происходило кристалл-фракционирование полевых шпатов, роговой обманки, а также акцессориев – апатита, алланита, монацита. В породах проявлены 2 типа тетрадного эффекта фракционирования редкоземельных элементов M- и W-типов. Менявшиеся физико-химические условия магматогенных флюидов приводили к предпочтительному обогащению последних рудными компонентами в условиях повышения щёлочности среды.

Ключевые слова: ультракислые гранитоиды, двуслюдяные лейкограниты, лейкограниты, грейзенизированные граниты, онгониты, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, кислотность-щёлочность среды.

Для цитирования: Гусев А.И. Высоко-фракционированные гранитоиды Пшишского редкометалльного рудного поля Северного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(1): ...-.... DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007.

DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007

Original paper

High-fractionation granitoids of Pschish rare metal of district the Northern Caucasus

A.I. Gusev 

Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy, 53 Korolenko str., Biisk 659333,
Russian Federation, e- mail: anzerg@mail.ru

Received: 26.01.2023, revised: 27.02.2023, accepted: 03.03.2023

Abstract: Relevance. The different type of granitoids various ages and composition described on the Northern Caucasus. The Late Paleozoic stage of forming Central megablock Greater Caucasus has significant meaning in forming granitoids magmatism and it metallogeny. The igneous magmatism of Pschish ore district did not receive illuminating in geological literature but ore mineralization of strategic metals of beryllium, tantalum, niobium, tungsten, lithium with it related. **The aim of the study** is to receive complex petrological and geochemical characteristics of ore generating of ultra acidic granitoids and its typization on the modern level. Objects of researching werechoose an epithermal deposits and manifestations gold-silver types in all tectonic zones of region. Materials of researching. Materials, using in paper, received by of author in process carrying out of prospecting, prospecting-estimation, geology-survey (1:50000) and special metallogenic researching that it conducted from 1967 year on the Greater Caucasus. **Methods.** Methods of study except of geological and petrographic of description of felsic granitoidsand include receiving quantitative characteristic of composition rocks. Thesilicateanalysis of rocks on the basic components determined by roentgen spectral fluorescent method, Co, Ni, Zn, Pb, Li, Sc, Cu – by ISP-AES, the other elements and REE – by method ISP-MSin Laboratory of Institute of Mineralogy, Geochemistry and crystal chemistry of rare elements (с. Moscow). **Results.** New data received on typezation of petro-geochemical silica-acid magmatism of Pschish areal with detach of two phase intrusion: two-mica leucogranites and leucotranites. Dikes of greisenization leucogranites and ongonitesdiscernedso. All intrusive derivates of Pschish areal generated by melting of felsic pellites lower crust and carry to high fractionation differences forming of its took place crystal-fractionation of feldspars, hornblende, and so accessory minerals – apatite, allanite, monazite. Two types tetradiceffectfractionationofrareearth elements M – and W- types display in rocks. Thephysic-chemistryconditionschange and it lead to preferable of enriching fluids of ore components in conditions rise of alkali environment.

Keywords: ultraacidic granitoids, two mica leucogranites, leucogranites, greisenizationleucogranites, ongonites, tetradic effect fractionation of REE, acidic-alkaly environment.

For citation: Gusev A.I. Early High-fractionation granitoids of Pschish rare metal of district the Northern Caucasus. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): xx-xx. DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007.

Введение

На Большом Кавказе развиты разнообразные типы гранитоидов, среди которых преобладают средне- и позднепалеозойские, слагающие ядерную часть Центрального Кавказа [Gurbanov et al., 1992; Гамкрелидзе, Шенгелия, 2005]. К позднепалеозойскому этапу гранитоидного магматизма относятся и необычные для Кавказского региона ультракислые лейкограниты Пшишского и Вазахохского участков, относи-

мых к Пшиш-Вазахохскому интрузивному комплексу. Они отличаются необычными формами интрузий, составом, сопровождающими жильными и дайковыми образованиями, а также пространственно и парагенетически связанным с ними редкометалльным оруденением. На Пшишском участке оруденение металлов Be, Ta, Nb и Li, относящихся к стратегическим материалам. Минерально-сырьевая база России испытывает дефицит в указанных металлах.

Известно, что корово-производные лейкограниты, характеризующиеся высокими содержаниями кремния и алюминия, обязаны присутствию в их составе пералюминиевых минералов, таких как гранат, мусковит, турмалин и кордиерит [Hu et al., 2018]. Так как лейкограниты образуются в результате частичного плавления корового материала или в результате корового анатексиса, то вещественный состав этих пород в пределах орогенных поясов сохраняет в себе геохимические и изотопные признаки их источника плавления и может обеспечивать признаки геодинамической и термальной эволюции тектонически утолщённой земной коры [Zhang et al., 2019; Парада, 2021; Газеев и др., 2022]. Однако природа и ассоциированные источники плавления пород дебатированы в литературе. Существуют 3 главных типа моделей по петрогенезису лейкогранитов: 1 – частичное плавление метаосадков в нижней-средней земной коре в согласии с петрологическими экспериментальными данными и геохимическими особенностями [Ma et al., 2017]; 2 – высоко-фракционированные магмы, производные из материнских расплавов при высоких температурах, делающие их источник характеристик трудно определяемым [Wu et al., 2017]; и 3 – высоко Sr/Y-лейкограниты в пределах Гималаев, подразумевающие происхождение в результате частичного плавления амфиболитов в условиях утолщённой земной коры [Hu et al., 2018]. Все перечисленные факты не вызывают сомнений в актуальности изучения лейкогранитов Пшишского участка.

Методы исследований

Аналитические исследования состава пород выполнены стандартными методами в сертифицированной Лаборатории Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (г. Москва). Проведен комплексный анализ состава пород с привлечением данных экспериментальных исследований по плавлению различных пород и современных диаграмм для типизации пород Пшишского участка и установления их генезиса. Построена авторская диаграмма Nb–TE_{1,3}, устанавливающая зависимость концентраций ниобия и тетрадного эффекта фракционирования редкоземельных элементов для пород участка. Авторская диаграмма Eu/Eu*–TE_{1,3} для породных типов Пшишского ареала позволяет выявлять кислотно-щелочные условия среды, что очень важно для понимания связи флюидного режима и тантал-ниобиевого оруденения.

Геологическое строение Пшишского участка

Пшишское редкометалльное рудное поле располагается в верховьях одноименной реки (правый приток реки Архыз) и её правого притока – реки Белой (рис. 1).

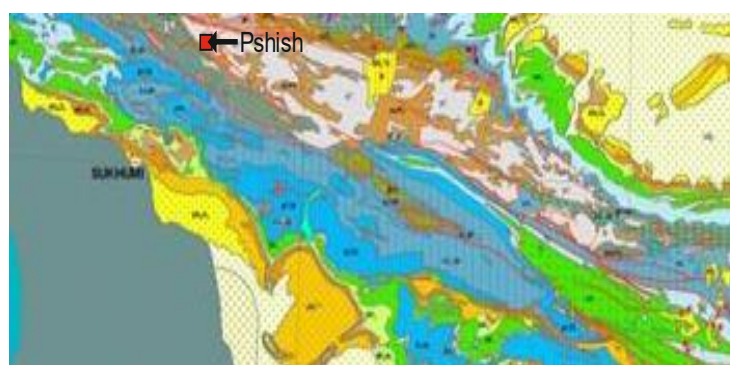


Рис. 1. Расположение участка Пшиш /

Fig. 1. Position of tract Pshish

В Пшишском Ве-Ta-Nb-рудном поле развиты малые интрузии неправильной и амёбовидной форм размерами от 0,1 до 2 км², интрузирующих раннепалеозойские гнейсы. Сложены они двуслюдяными лейкогранитами ранней (главной) фазы и лейкократовыми гранитами 2 фазы внедрения. В местах проявления поздней фазы лейкогранитов отмечены дайки грейзенизированных и альбитизированных гранитов, аплитов, онгонитов, а также жилы пегматитов (рис. 2).

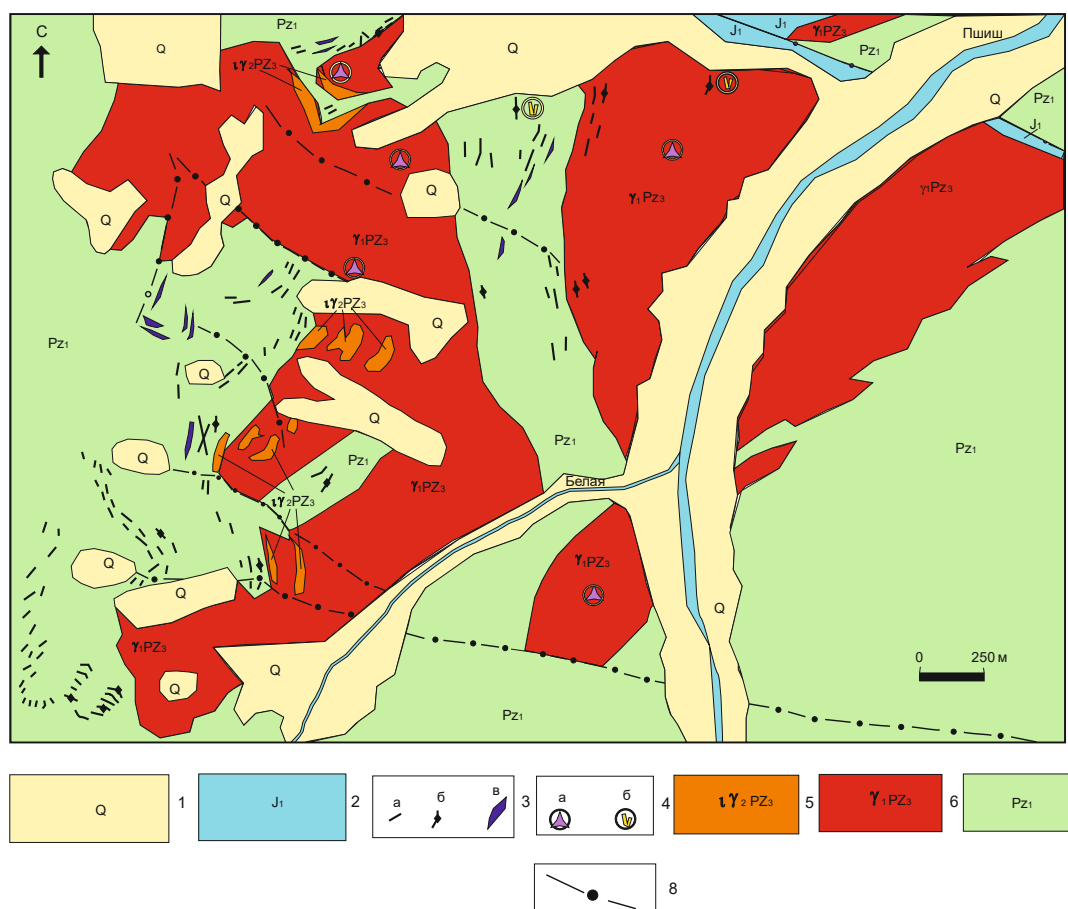


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Пшишского участка
(составлена автором с учётом данных Кузнецова К.М., Усика В.И.):

1) нерасчленённые аллювиальные, делювиальные моренные образования квартера; 2) глинистые сланцы, алевриты и песчаники ранней юры; 3) дайки и жилы: а – грейзенизированных и

альбитизированных гранит-порфиров, онгонитов и аплитов, б – пегматитов, в – кварцевых жил; 4) вкрапленность: а – танталита, б – берилла; 5) мелко-кристаллические лейкограниты второй фазы внедрения позднепалеозойского комплекса; 6) средне-кристаллические двуслюдяные лейкограниты первой (главной) фазы внедрения позднепалеозойского комплекса; 7) лейкократовые и меланократовые гнейсы раннего палеозоя; 8) разломы /

Fig. 2. Schematic geological map of Pshish tract (composed by author with discount data of Kuznetsov K.M., Usik V.I.):

1) non dissected alluvial, talus, tillstone deposits of quarter; 2) shales, aleurolites and sandstones of Early Jurassic; 3) dikes and veins: a – greisenization and albitization of granite porphyres, ongonites and aplites, b – pegmatites, c – quartz veins; 4) disseminate; a – tantalite, b – beryl; 5) fine crystalline leucogranites of second phase intrusion of Late Paleozoic complex; 6) middle crystalline two mica leucogranite of first (basic) phase intrusion of Late Paleozoic complex; 7) leucocratic and melanocratic gneiss of Early Paleozoic; 8) faults

Краткая петрографическая характеристика пород

Двуслюдяные лейкограниты главной фазы внедрения составляют центральные части интрузий и представляют собой среднезернистые массивные породы серой и светло-серой окраски. Их состав (%): плагиоклаз (32–47), микроклин (5–25), кварц (30–60), биотит (1–6), мусковит (2–4), протолитийонит (1–2). Структура гипидиоморфно-зернистая. Акцессорные минералы: апатит, монацит, ксенотим, ильменит, циркон, анатаз, реже – рутил, гранат, пирит, циртолит. Плагиоклаз (альбит-олигоклаз №№9–28) идиоморфный, образует короткопризматические выделения размерами 0,5–3,3 мм. Микроклин решётчатого строения, ксеноморфен часто содержит резорбированные фрагменты кварца и плагиоклаза. Он местами слабо пелитизирован. Кварц ксеноморфен, образует округлые зёрна с облачным погасанием. Чешуйки биотита часто хлоритизированы и содержат скопления лейкоксена с реликтами рутила. Изредка в биотите наблюдаются включения циркона и апатита. Мусковит наблюдается в виде мелкочешуйчатых скоплений вблизи биотита. Протолитийонит изредка присутствует в тесном парагенезисе с мусковитом.

Лейкократовые граниты второй фазы пользуются нешироким распространением в приконтактных частях интрузивов в виде зон и жил мощностью от 2 до 50 м и протяжённостью от 150 до 500 м. Такое положение лейкогранитов второй фазы в приконтактной части интрузивов указывает на проявление обратной зональности некоторых массивов. Она проявляется тогда, когда более эволюционированные порции магмы локализуются на периферии; контакты между фазами и фациями контрастные с дискордантными текстурами [Vigneressse, 2007]. Характер зональности интрузивов интерпретируется как результат химической дифференциации и скорости поступления последовательных фаз из глубинного очага. В случае быстрого поступления фаз и отдельных пульсаций предыдущие поступления не успевают закристаллизоваться и более поздние дериваты их легко прорывают и располагаются в центре интрузивов с формированием нормальной зональности. Наоборот, когда скорость становления массивов малая предыдущие фазы внедрения успевают закристаллизоваться и тогда более поздние фазы внедряются на периферию магматических тел с образованием обратной зональности. Внешне лейкократовые граниты второй фазы средне-крупнозернистые, иногда пегматоидного облика. Структуры гипидиоморфно-зернистая и аллотриоморфно-зернистая. Их состав такой же, как и двуслюдяных лейкогранитов. Плагиоклаз по составу отвечает альбит-олигоклазу с №№8–24 и представлен таблитчатыми кристаллами, полисинтетически сдвоенными размерами 0,5–2 мм. Микроклин резко ксеноморфен и имеет часто

распльвчатую решётчатую микроструктуру. Аксессуары в лейкогранитах – апатит, монацит, ильменит, циркон, рутил, анатаз. А в связи с процессами альбитизации и грейзенизации появляются гранат, цитролит, турмалин, топаз, вольфрамит, молибденит.

Грейзенизированные граниты наибольшее распространение получили вблизи контактов интрузивов и тесно ассоциируют с лейкократовыми гранитами. Их состав характеризуется преобладанием кварца (40–60%), существенной ролью плагиоклаза (20–30%) и мусковита (10–12%). Микроклин (5–12%) присутствует не повсеместно и часто замещается кварцем. Ксеноморфные зёрна первично магматического кварца в грейзенизированных гранитах испытывают перекристаллизацию и в связи с привнесением кремнезёма формируют мелкие зёрна с идиоморфными очертаниями. Плагиоклаз в грейзенизированных гранитах замещается мусковитом и в меньшей степени кварцем. Помимо, альбит-олигоклаза при грейзенизации появляются идиоморфные кристаллики альбита №3–6 свежего облика. Микроклин при грейзенизации активно замещается кварцем, не подвергаясь мусковитизации. Типоморфными аксессуарами грейзенового процесса являются гранат, турмалин, топаз, вольфрамит, молибденит. Пентагон-додекаэдрические и тетрагон-триоктаэдрические кристаллики граната размерами от 0,03×0,03 до 0,4×0,4 мм имеют розовый цвет и относятся к альмандину. На некоторых кристаллах наблюдаются скульптурные линии типа ступенчатого излома. Турмалин призматического габитуса со сглаженными рёбрами и гранями имеет размеры от 0,03×0,1 до 0,3×1,2 мм.

Дайковые онгониты приурочены в основном к толще метаморфических пород нижнего палеозоя (сланцы, гнейсы, амфиболиты) и тесно ассоциируют с грейзенизированными и альбитизированными гранитами и аплитами. Отдельные дайки онгонитов встречаются в эндоконтактной зоне лейкократовых гранитов и альбитизированных и грейзенизированных гранитов. Структура онгонитов порфировая, а основной ткани – аллотриоморфно-зернистая. Вкрапленники представлены кали-натриевым полевым шпатом, альбитом, кварцем, более редкими кристаллами литиевого фенгита, а также протолитонита. Количество порфировых выделений варьирует от 15 до 23%. Вкрапленники кварца часто дают дипирамидальные формы выделений. Среди второстепенных и аксессуарных минералов в онгонитах встречаются топаз, флюорит, циркон, монацит, ильменит, ксенотим, криолит, танталит-колумбит, касситерит, турмалин, флюорит, шеелит и апатит.

Петро-геохимический очерк пород

Состав пород Пшишского участка отражён в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Химический состав гранитоидов Пшишского участка (оксиды в %, элементы – в г/т). / Chemical composition of granitoids Pshish tract (oxides in %, elements – in ppm)

Компоненты / Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	74,37	74,4	74,6	75,46	75,1	75,4	77,6	77,7	75,5
TiO ₂	0,10	0,12	0,11	0,18	0,16	0,15	0,01	0,01	0,03
Al ₂ O ₃	15,01	14,98	15,02	14,63	14,9	14,77	13,86	13,85	15,1
Fe ₂ O ₃	0,11	0,12	0,11	0,03	0,04	0,03	0,31	0,25	0,05
FeO	1,06	0,99	0,98	0,97	0,92	0,89	0,6	0,56	0,7

Компоненты / Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MnO	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,11
MgO	0,12	0,11	0,11	0,25	0,16	0,15	0,3	0,26	0,14
CaO	0,94	0,91	0,89	0,82	0,81	0,83	0,7	0,49	0,36
Na ₂ O	3,28	3,3	3,36	3,54	3,55	3,6	3,62	3,4	3,9
K ₂ O	4,41	4,45	4,4	3,24	3,7	4,2	3,22	3,45	3,3
P ₂ O ₅	0,02	0,01	0,02	0,12	0,04	0,05	0,06	0,05	0,4
П.п.п	0,95	0,53	0,78	0,5	0,7	0,51	0,3	0,15	0,41
Σ	99,9	99,95	100,0	99,75	99,9	99,8	100,2	100,1	100,0
Li	187,9	188,3	199,2	190,4	191,3	189,2	223,1	222,5	231,7
Cs	34,7	35,7	36,7	35,2	36,5	35,4	40,7	41,3	42,7
Rb	438	440	435,2	423,8	467	489,3	498,7	497,2	502,2
Sr	71,8	72,2	73,7	70,6	72,2	73,3	73,2	75,7	75,8
Ba	169,8	170,3	175,2	170,6	172,1	180,1	180,5	182,5	198,7
La	18,5	28,1	3,08	5,64	4,35	45,8	32,5	51,8	7,38
Ce	37,4	58,1	6,73	15,2	8,51	59,7	36,2	56,8	14,4
Pr	4,35	6,9	0,93	1,87	1,02	10,1	7,0	7,3	1,71
Nd	15,3	23,4	3,15	7,11	3,66	25,2	25,2	29,6	6,42
Sm	3,49	4,6	1,11	2,25	0,81	6,6	4,9	5,4	1,4
Eu	0,59	0,45	0,06	0,03	0,08	1,2	0,13	1,12	0,19
Gd	3,33	3,8	1,24	2,17	0,73	6,7	0,9	4,0	1,49
Tb	0,46	0,65	0,27	0,46	0,35	1,2	0,11	0,66	0,23
Dy	2,51	3,1	1,77	2,87	0,94	5,0	0,7	1,22	1,46
Ho	0,43	0,5	0,32	0,61	0,26	0,6	0,2	0,5	0,33
Er	1,04	1,42	0,98	1,88	0,63	1,4	1,1	1,4	0,93
Tm	0,14	0,23	0,16	0,34	0,14	0,4	0,2	0,3	0,17
Yb	1	1,4	1,37	1,43	1,2	3,1	3,4	8,2	4,04
Lu	0,12	0,21	0,21	0,38	0,19	0,5	0,2	0,22	0,18
Y	39,4	33,2	38,6	35,2	39,1	28,9	51,6	56,8	64,8
Zr	150	144	147	148	143	152	154	147	153
Nb	38	40	39	41	38	39,5	38,8	41	39,3
Hf	8,9	9,0	7,9	8,5	8,3	8,8	7,8	7,7	8,0
Ta	7,9	8,2	9,2	7,5	7,7	8,1	9,9	10,2	10,3
Th	11,2	9,7	10,1	12,3	11,2	12,3	14,2	14,3	16,7
U	2,1	1,6	1,9	2,4	2,8	3,1	4,4	3,9	2,9
Sc	5,3	4,8	5,1	5,0	5,1	4,8	3,9	4,0	6,4
Co	2,2	2,1	2,2	2,3	2,2	2,2	2,1	2,0	2,0
Ni	3,1	2,9	2,9	2,5	2,7	2,9	2,8	2,5	2,3
Cu	6,8	7,0	7,1	6,9	7,3	7,8	8,2	8,8	7,8
Zn	40,6	42,7	43,8	45,1	50,2	51,2	49,7	50,2	55,6
Ag	1,6	2,0	2,2	2,3	2,2	2,6	2,4	2,1	2,6
Sb	2,4	2,5	2,9	3,1	3,1	3,3	3,1	3,0	3,9
Pb	28,8	29,4	30,2	31,3	34,1	36,1	38,1	41,6	45,7

Компоненты / Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Be	31,6	30,5	31,7	33,1	35,5	38,2	40,2	43,8	65,8
V	12,8	13,0	12,9	12,5	12,5	11,3	11,1	10,3	11,9
Cr	4,6	4,8	4,7	4,2	4,0	3,8	3,3	3,3	3,2
Ga	17,5	18,1	17,8	16,2	15,8	14,8	17,7	15,0	16,9
Mo	2,1	2,8	3,0	3,3	3,6	3,3	18,6	20,3	25,8
W	7,9	8,2	8,4	9,1	10,2	10,3	11,2	12,8	19,6
Sn	30,4	29,7	30,1	30,7	31,2	33,1	33,3	36,2	44,8
F	2567	2451	2355	2260	2566	2651	2720	2810	2800
Σ REE	127,96	165,0	59,98	74,4	80,78	194,5	118,24	224,3	122,0
Eu/Eu*	0,52	0,32	0,15	0,04	0,3	0,54	0,12	0,7	0,4
La/Yb _N	12,6	12,5	1,53	2,67	2,47	10,1	6,5	4,3	1,24
La/Sm _N	3,3	3,8	1,73	1,57	3,3	4,33	3,69	6,0	3,3
Nb/Ta	4,8	4,9	4,4	5,5	4,9	4,9	4,9	5,0	4,7
TE _{1,3}	1,21	1,12	1,16	1,15	1,25	1,18	0,73	0,73	0,95

Примечание: N – элементы нормированы по [McDonough, Sun, 1995]. $Eu^* = (Sm_N + Gd_N)/2$. TE_{1,3} – Тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, как среднее между первой и третьей тетрадами по [Irber, 1999]. Породы Пишишского участка: 1–3 – двуслюдяные лейкограниты ранней фазы, 4–6 – лейкократовые граниты 2 фазы, 7–8 – грейзенизированные граниты, 9 – онгонит. / Note: N – elements normalized after [McDonough, Sun, 1995]. $Eu^* = (Sm_N + Gd_N)/2$. TE_{1,3} – tetradic effect fractionation of REE, as middle between of first and third tetrads after [Irber, 1999]. Rocks of Pshish tract: 1–3 – two mica leucogranites of early phase, 4–6 – leucocratic granites of second phase; 7–8 – greisenization granites, 9 – ongonite.

На TAS-диаграмме анализируемые породы локализуются в области кислых пород в поле гранитов, смещаясь к его ультракислой части в виде компактного роя слегка вытянутого по вектору кремнекислотности (рис. 3).

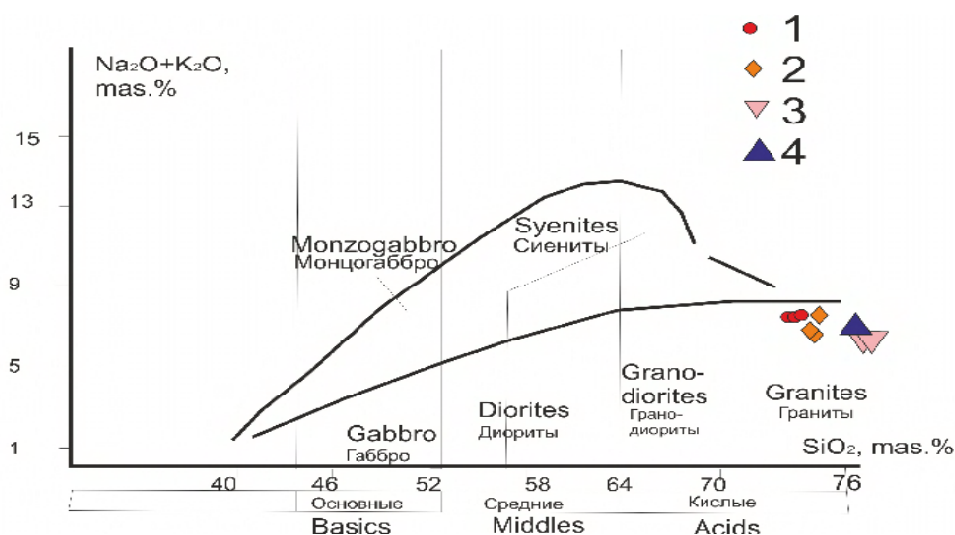


Рис. 3. Диаграмма $(Na_2O+K_2O) - SiO_2$ для пород Пишишского участка:
1 – двуслюдяные лейкограниты 1 фазы внедрения; 2 – лейкократовые граниты 2 фазы;
3 – грейзенизированные граниты; 4 – онгониты /

Fig. 3. Plot of $(Na_2O+K_2O) - SiO_2$ for rocks Pshish tract:
1 – Two mica leucogranites of first phase; 2 – leucocratic granites of second phase;
3 – greisenization granites; 4 – ongonite

Соотношение $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O) - Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$ определяет анализируемые породы как пералюминиевые (рис. 4а), в то время как в координатах железистости и магнезиальности их следует относить к железистым образованиям (рис. 4б/в).

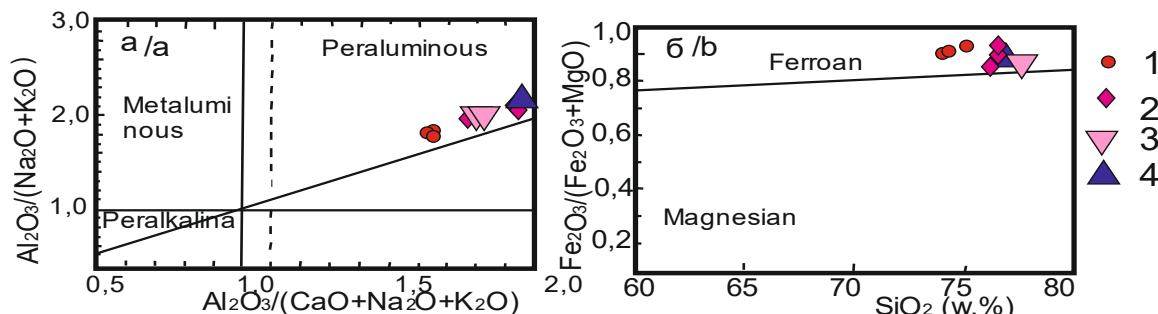


Рис. 4. Петрохимические диаграммы для породных типов Пшишского участка:
а) $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O) - Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ по [Maniar, Piccoli, 1989]; б) $Fe_2O_3 / (Fe_2O_3 + MgO) - SiO_2$ по [Villaseca, Barbero, 1998].

Остальные условные обозначения приведены на рисунке 3 /

Fig. 3. Petrochemical plots for rock types of Pshish tract:
а) $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O) - Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ no [Maniar, Piccoli, 1989];
б) $Fe_2O_3 / (Fe_2O_3 + MgO) - SiO_2$ no [Villaseca, Barbero, 1998].

Legend as in fig. 3

В координатах калия и кремнекислотности породы Пшишского участка относятся к высоко-калиевым дацитам высоко-К известково-щелочной серии пород по [Pecerrillo, Taylor, 1976].

Суммарные содержания редких земель в породах дают широкий размах значений и варьируют от 59,98 до 224,3 г/т. Отношения Eu/Eu^* также подвержены резким колебаниям (от 0,04 до 0,7) и повсеместно ниже хондритовых значений. Нормированные отношения лёгких к тяжёлым РЗЭ (La/Yb_N) весьма изменчивы, а максимальные значения указывают на сильно проявленное фракционирование РЗЭ. Возможно это связано с резкими изменениями состава магматогенных флюидов и различной активности летучих компонентов, что отразилось на проявлении обоих типов тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М- и W-типов (граничные значения более 1,1 и менее 0,9, соответственно).

Результаты работы и их обсуждение

Большое значение в понимании генезиса пород имеет источник плавления, за счёт которого образуются породы.

В соответствии с геохимическими данными анализируемых гранитоидов и в разрезе экспериментальных данных по плавлению различных пород пшишские лейкогранитные разности, а также грейзенизированные лейкограниты и онгониты имели источником плавления фельзитические пелиты (рис. 6а, б, с). Соотношение кремнекислотности и показателя А/СНК свидетельствует о том, что источник плавления анализируемых пород близок к кратонным фанерозойским сланцам (рис. 5d).

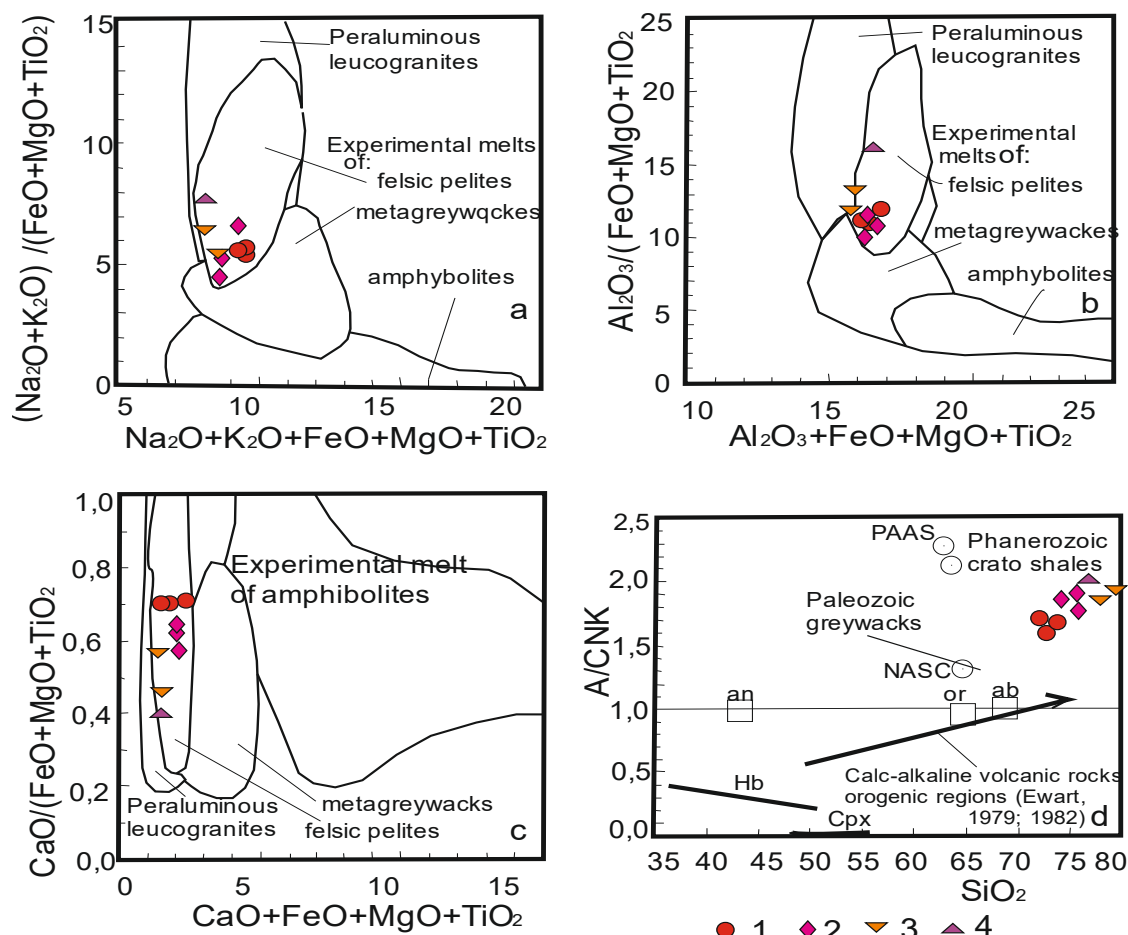


Рис. 5. Экспериментальные диаграммы: (a), (b), (c) – диаграммы композиционных экспериментальных расплавов из плавления фельзических пелитов (мусковитовых сланцев), метагреувак и амфиболитов для пород Пишишского ареала; (d) – диаграмма $\text{SiO}_2 - \text{A}/\text{CNK}$ для пород Пишишского ареала. Тренд известково-щелочного фракционирования вулканических пород орогенных регионов, по [Ewart, 1982]. A- Al_2O_3 , CNK – Сумма CaO , Na_2O , K_2O . PAAS – постархейская средняя австралийская осадочная порода; NASC – северо-американский континентальный сланец; Phanerozoic cratoshales – фанерозойские кратонные сланцы. Остальные условные обозначения на рисунке 2 /

Fig. 5. Experimental plots: (a), (b), (c) – plots of compositional experimental melts from pelites (muscovite shales), metagraywackes and amphibolites for rocks of Pschish areal; (d) – plot $\text{SiO}_2 - \text{A}/\text{CNK}$ for rocks Pschish areal. Trend of calc-alkali fractionation volcanic rocks of orogenic regions after [Ewart 1982]. A- Al_2O_3 , CNK – sum CaO , Na_2O , K_2O . PAAS – post Archean middle Australian sedimentary rock; NASC – North American shale; Phanerozoic cratoshales. Legend in fig. 2.

Также считается, что плавление источника пород, содержащих фазы Ti-обогащённых ингредиентов (рутила, ильменита) будет генерировать расплавы с высоким отношением Nb/Ta (>25), в то время как плавление источника с амфиболом приводит к формированию расплавов с более низким отношением Nb/Ta (<25) [Hoffmann et al., 2011]. В породных типах Пишишского ареала отношение Nb/Ta варьирует от 4,4 до 5,5 и не предполагает плавление титан-обогащённых источников. На серии диаграмм отчётливо видны тренды фракционирования минералов калиевого полевого шпата, плагиоклаза и роговой обманки при формировании лейкогранитоидов Пишишского участка (рис. 6a–d).

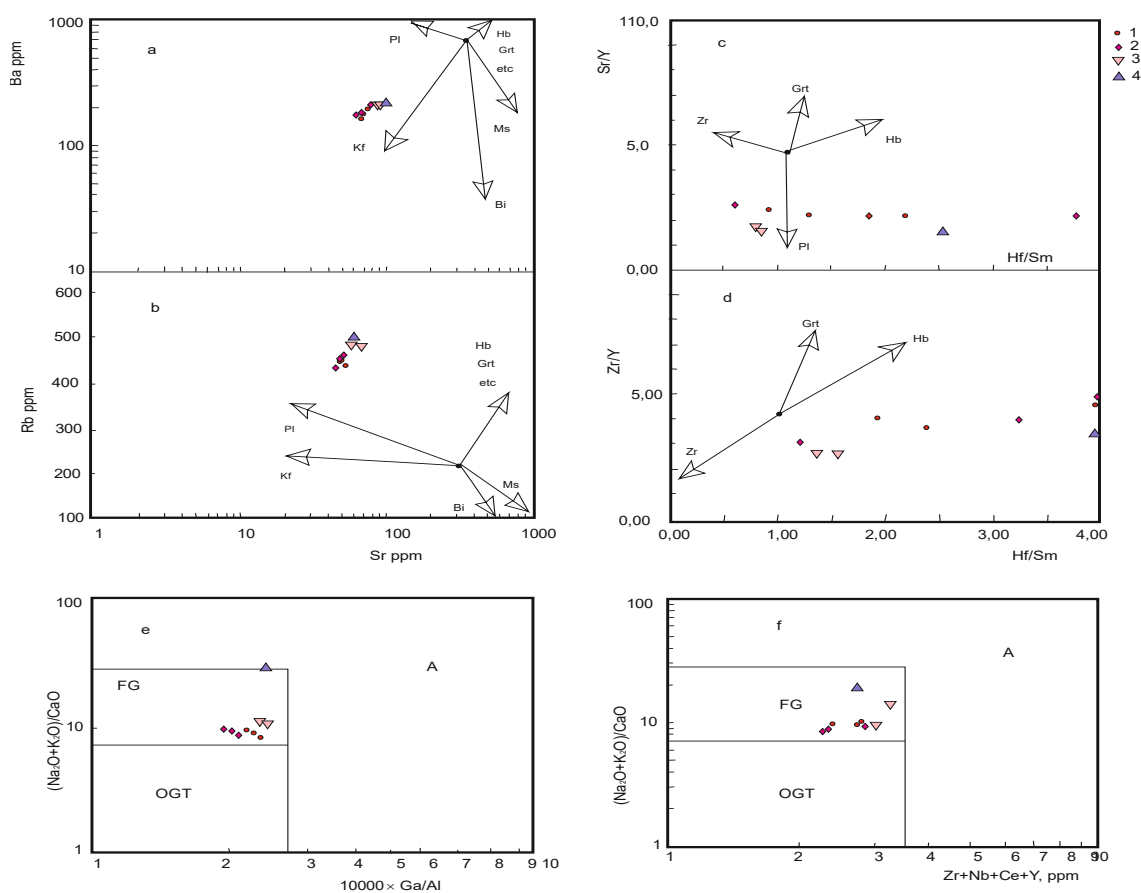


Рис. 6. Диаграммы фракционирования минералов для лейкогранитоидов Пшишского участка: а) Ba – Sr и б) Rb – Sr по [Janoušek et al., 2004]; в) Sr/Y – Hf/Sm и д) Zr/Y – Hf/Sm по [Rudnick, Gao, 2003]; е) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - 10,000/\text{Ga}/\text{Al}$ и ф) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ по [Whalen et al., 1987]. Поля гранитоидов: А – анорогенные, FG – фракционированные, OGT – нефракционированные М-, I- и S-типы гранитоидов /

Fig. 6. Plots of fractionation of minerals for leucogranites of Pschish areal: (a) Ba vs. Sr and (b) Rb vs. Sr diagrams [Janoušek et al., 2004]; (c) Sr/Y vs. Hf/Sm and (d) Zr/Y vs. Hf/Sm diagrams [Rudnick, Gao, 2003]; (e) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ vs. $10,000/\text{Ga}/\text{Al}$ and (f) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ vs. $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ diagrams [Whalen et al., 1987]. Fields of granitoids; A – anorogenic (A type), FG – fractionations, OGT – non fractionations M-, I-, S-types.

При этом на рисунках 6е и 6ф все породные типы попадают в область фракционированных гранитов.

При формировании лейкогранитоидов Пшишского ареала происходило кристалл-фракционирование не только породообразующих минералов, но и акцессориев. Наиболее заметным было фракционирование апатита, алланита и монацита, что подтверждается соотношениями $(\text{La}/\text{Yb})_N$ и La по [Fujimaki, 1986; Yurimoto et al., 1990].

В связи с такими условиями фракционирования минералов в расплаве интересно – как себя будут вести рудные компоненты? Весьма чувствительными к изменениям в расплавах являются насыщенные активными летучими компонентами магматогенные флюиды. Такую зависимость можно установить, выяснив поведение ниобия (одного из главных рудных компонентов в грейзенах Пшишского рудного поля) и проявление тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ. Для этого нами построена диаграмма зависимости концентраций ниобия в лейкогранитоидах численных ве-

личин ТЭФ РЗЭ в них. На диаграмме можно увидеть 2 тренда: при проявлении ТЭФ РЗЭ М-типа увеличение величины последнего происходит с уменьшением концентраций Nb, а в случае проявления ТЭФ РЗЭ W-типа – уменьшение величины последнего соответствует увеличению концентраций Nb (рис. 7).

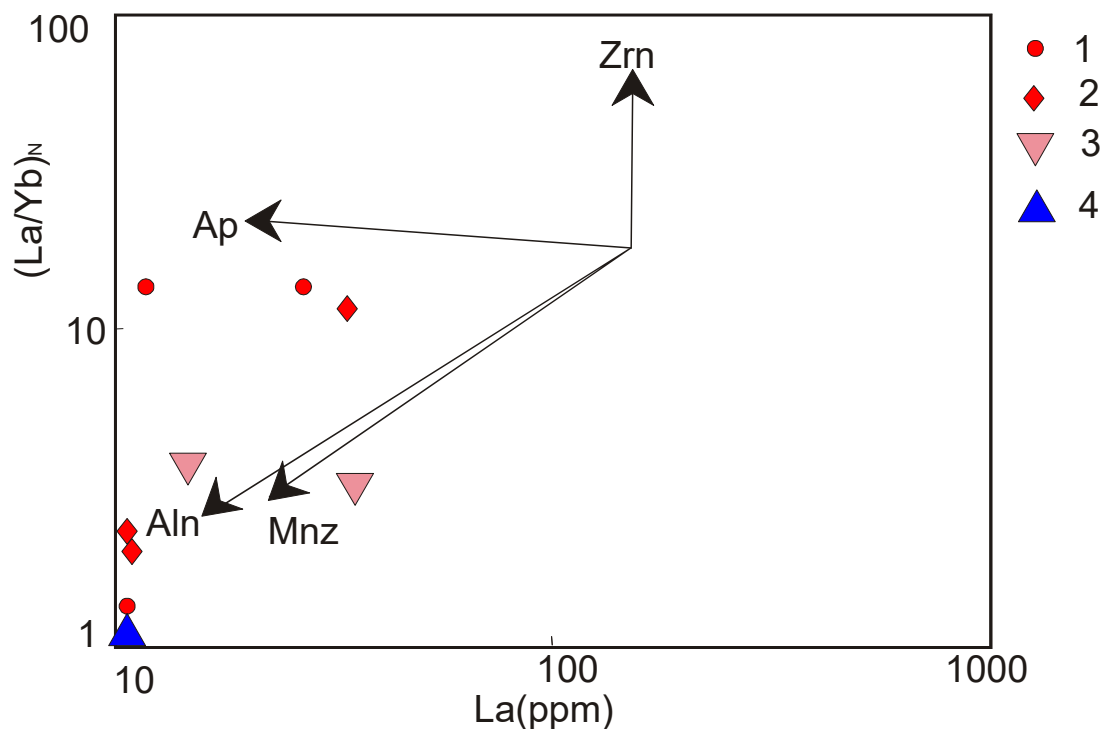


Рис. 7. Диаграмма $(La/Yb)_N - La$ по [Fujimaki, 1986; Yurimoto et al., 1990] для высокофракционированных лейкогранитов Пшишского ареала:

Тренды минералов: Zrn – циркона, Ap – апатита, Aln – алланита, Mnz – монацита /
Fig. 7. Plot $(La/Yb)_N - La$ after [Fujimaki, 1986; Yurimoto et al., 1990] for high fractionation of leucogranites of Pschish areal:

Trends of minerals: Zrn – zircon, Ap – apatite, Aln – allanite, Mnz – monazite

Установлено, что проявление ТЭФ РЗЭ W-типа в магматических породах связано с большей активностью аква-комплексов и присутствием во флюидах CO_2 , в то время как проявлению ТЭФ РЗЭ М-типа способствуют комплексы с галогенидами (F, Cl).

Проявление в лейкогранитоидах Пшишского ареала и М- и W- типов ТЭФ РЗЭ указывает на менявшийся состав и активность летучих компонентов в магматогенных флюидах, обусловленные различными физико-химическими условиями флюидной фазы. Индикатором менявшихся физико-химических условий среды во флюидах может быть отношение Eu/Eu^* , которое в анализируемых породах Пшишского ареала весьма сильно меняется (от 0,04 до 0,7). Чем больше указанное отношение, тем выше основность или щёлочность среды, согласно рядам кислотности-щёлочности А.А. Маракушева [Маракушев, 1976] для ряда элементов Sm, Gd, Eu в водно-сероводородных растворах при стандартных условиях. Следовательно, тренд изменения соотношений Eu/Eu^* и $TE_{1,3}$ для анализируемых пород указывает на то, что формирование лейкогранитов с проявлением ТЭФ РЗЭ М-типа происходило при повышенной щёлочности среды, а уменьшение величины ТЭФ РЗЭ W-типа связано с увеличением кислотности магматогенных флюидов.

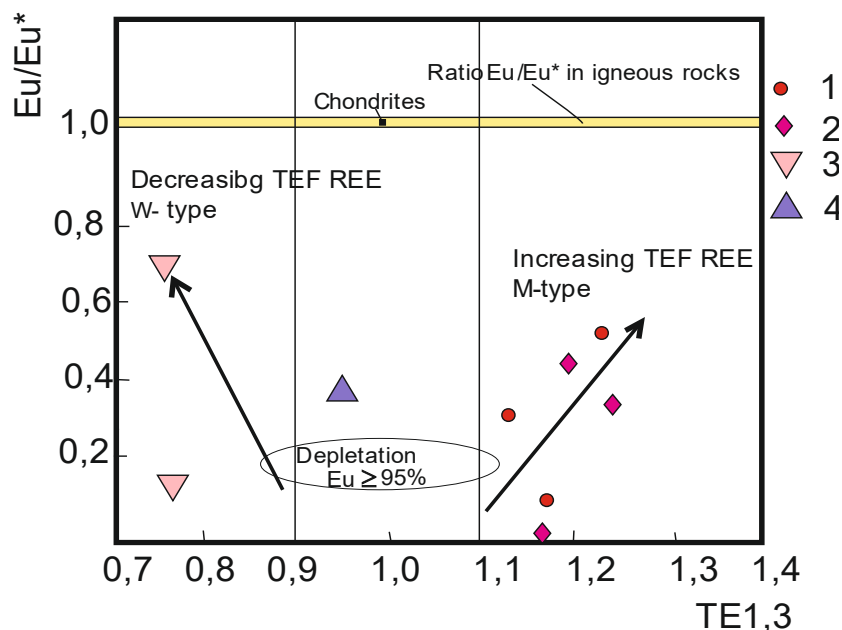


Рис. 8. Диаграмма $Eu/Eu^* - TE_{1,3}$ для породных типов Пшишского ареала:
Ratio Eu/Eu^ in igneous rocks* – отношения Eu/Eu^* в изверженных породах по [Виноградов, 1962];
Chondrites – концентрации европия в хондритах по [Wasson, Kallemeyn, 1988]; *Decreasing TEF REE W-type* – уменьшение ТЭФ РЗЭ W-типа; *Increasing TEF REE M-type* – увеличение ТЭФ РЗЭ M-типа; *Depletion $Eu \geq 95\%$* – деплетирование $Eu \geq 95\%$.

Условные обозначения представлены на рисунке 2 /

Fig. 8. Plot $Eu/Eu^* - TE_{1,3}$ for rock type of Pschish areal:
Ratio Eu/Eu^ in igneous rocks* after [Vinogradov, 1962]; *Chondrites* – ratio of Eu/Eu^* after [Wasson, Kallemeyn, 1988]. Legend on fig. 2

С увеличением ТЭФ РЗЭ М-типа происходило снижение концентраций Nb в породах и увеличение его во флюидной фазе, что благоприятно сказывалось на отложении рудных компонентов в грейзеновом процессе. Такой сценарий происходил в результате увеличения щёлочности среды при активной роли фтор-комплексов, переносивших рудные элементы.

С уменьшением ТЭФ РЗЭ W-типа происходило увеличение концентраций Nb и фиксация его в породах. Такой сценарий осуществлялся в условиях повышения кислотности и активной роли аква-комплексов.

Выводы

Лейкограниты, двуслюдяные лейкограниты, грейзенизированные лейкограниты и онгониты Пшишского ареала отнесены к пералюминиевым, железистым разновидностям высоко-калиевой известково-щелочной серии пород. Они формировались за счёт плавления фельзитических пелитов нижней коры и их генерация осуществлялась за счёт фракционирования полевых шпатов, роговой обманки и аксессуарных минералов – апатита, алланита, монацита, что и обусловило их отнесение к высоко-фракционированным образованиям. Проявление ТЭФ РЗЭ W-типа происходило в условиях активности аква-комплексов с повышением кислотности среды и фиксации рудных компонентов (Nb, Ta, Be) в породах. ТЭФ РЗЭ M-типа протекал в условиях повышения щёлочности среды при активной роли фтор-комплексов в магматогенных флюидах и отделении рудных компонентов в них, что на грейзеновом этапе приводило к формированию концентрированного оруденения редких металлов.

Литература

1. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры. // Геохимия. – 1962. – №7. – С. 555–572.
2. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Кондрашов И.А. Раннекиммерийские вулканоплутонические образования из района Садонской группы полиметаллических месторождений Северной Осетии: геодинамическая типизация и минерогения. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №2. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001
3. Гамкрелидзе И.П., Шенгелия Д.М. Докембрийско-палеозойский региональный метаморфизм, гранитоидный магматизм и геодинамика Кавказа. – М.: Научный Мир, 2005. – 464 с.
4. Маракушев А.А. Термодинамические факторы образования рудной зональности. // Термодинамические факторы образования рудной зональности скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений. – М.: Наука, 1976. – С. 36–51.
5. Парада С.Г. Рудно-магматические системы медно-порфирового типа Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 129–147. DOI: 10.46698
6. Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary – Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range. // Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks. – Chichester, 1982. – pp. 25-95.
7. Gurbanov A.G., Aretz J., Lippolt H.J. The problems of genesis and age of two-feldspar granitoids of the Moshchevaya river (Northern Caucasus, C.I.S.). // Geologica Carpathica. – 1992. – Vol. 43. No.1. – pp. 35-40.
8. Fujimaki H. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between zircon, apatite, and Liquid. // Contrib. Mineral. Petrol. – 1986. – Vol. 94. – pp. 42–44.
9. Hoffmann J.E., Münker C., Næraa T., Rosing M.T., Herwartz D., Garbe-Schönberg D., Svahnberg H. Mechanisms of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs. // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2011. – Vol. 75. – pp. 4157–4178.
10. Hu G.Y., Zeng L.S., Gao L.-E., Liu Q.P., Chen H., Guo Y.S. Diverse magmasources for the Himalayan leucogranites: evidence from B-Sr-Nd isotopes. // Lithos. – 2018. – Vol. 314–315. – pp. 88–99.
11. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. // Geochim Cosmochim Acta. – 1999. – Vol. 63. No.3/4. – pp. 489-508.
12. Janoušek V., Finger F., Roberts M., Fryda J., Pin C., Dolejš D. Deciphering the petrogenesis of deeply buried granites: whole-rock geochemical constraints on the origin of largely undepleted felsic granulites from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. // Geol. Soc. Am. Spec. Pap. – 2004. – Vol. 389. – pp. 141–159.
13. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. // Geological Soc. America Bulletin. – 1989. – Vol. 101. – pp. 635–643.
14. McDonough W.F., Sun S. The composition of the Earth. // Chem. Geol. – 1995. – Vol. 120. No.1(3-4). – pp. 223-253.
15. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. // Contrib. Mineral. Petrol. – 1976. – Vol. 58. – pp. 63-81.
16. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. // Treatise Geochem. – 2003. – Vol. 3. – pp. 1–64.
17. Vigneresse J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation. // Ore geology Reviews. – 2007. – Vol. 30. – pp. 181-216.
18. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A reexamination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. // Trans. of Royal Soc. of Edinburgh Earth Science. – 1998. – Vol. 89. – pp. 113–119.
19. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites. // Phil. Trans. R. Soc. Lond. – 1988. – Vol. 201. – pp. 535-544.

20. Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. // *Contrib. Miner. Petrol.*, 1987. – Vol. 95. – pp. 407–419.
21. Wu F.Y., Liu X.C., Ji W.Q., Wang J.M., Yang L. Highly fractionated granites: Recognition and research. // *Sci. China Earth Sci.* – 2017. – Vol. 60. – pp. 1201–1219. DOI: 10.1007/s11430-016-5139-1
22. Yurimoto H., Duke E.F., Papike J.J., Shearer C.K. Are discontinuous hondrite normalized REE patterns in pegmatitic granite systems the results of monazite fractionation? // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1990. – Vol. 54. – pp. 2141–2145.
23. Zeng L.S., Gao L.E., Xie K.J., Zeng-Liu J. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: melting thickened lower continental crust. // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2011. – Vol. 303(3-4). – pp. 251–266.
24. Zhang L.X., Wang Q., Zhu D.C., Li S.M., Zhao Z.D., Zhang L.L., Chen Y., Liu S.A., Zheng Y.C., Wang R., Liao Z.L. Generation of leucogranites via fractional crystallization: a case from the Late Triassic Luoza batholith in the Lhasa Terrane, southern Tibet. // *Gondwana Res.* – 2019. – Vol. 66. – pp. 63–76.

References

1. Vinogradov A.P. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust. *Geochemistry*. 1962. No. 7. pp. 555–572. (In Russ.)
2. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Dokuchaev A.Y., Kondrashov I.A. Early Cimmerian volcano-plutonic formations of the Sadon group of polymetallic deposits in North Ossetia: geodynamic typification and minerageny. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 6–18. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001
3. Gamkrelidze I.P., Shengelia D.M. Precambrian-Paleozoic regional metamorphism, granitoid magmatism and geodynamics of the Caucasus. Moscow. Nauchnyy Mir. 2005. 464 p. (In Russ.)
4. Marakushev A.A. Thermodynamic factors of ore zoning formation. Thermodynamic factors of formation of ore zonality of blind ore body based on zonality of hydrothermal deposits. Moscow. Nauka. 1976. pp. 36–51. (In Russ.)
5. Parada S.G. Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11 No. 3. pp. 129–147. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.011.
6. Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary – Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester, 1982. pp. 25–95.
7. Gurbanov A.G., Aretz J., Lippolt H.J. The problems of genesis and age of two-feldspar granitoids of the Moshchevaya river (Northern Caucasus, C.I.S.). *Geologica Carpathica*. 1992. Vol. 43. No.1. pp. 35–40.
8. Fujimaki H. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between zircon, apatite, and Liquid. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1986. Vol. 94. pp. 42–44.
9. Hoffmann J.E., Münker C., Næraa T., Rosing M.T., Herwartz D., Garbe-Schönberg D., Svahnberg H. Mechanisms of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011. Vol. 75. pp. 4157–4178.
10. Hu G.Y., Zeng L.S., Gao L.-E., Liu Q.P., Chen H., Guo Y.S. Diverse magmasources for the Himalayan leucogranites: evidence from B-Sr-Nd isotopes. *Lithos*. 2018. Vol. 314–315. pp. 88–99.
11. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim Cosmochim Acta*. 1999. Vol. 63. No.3/4. pp. 489–508.
12. Janoušek V., Finger F., Roberts M., Fry' da, J., Pin C., Dolejš D. Deciphering the petrogenesis of deeply buried granites: whole-rock geochemical constraints on the origin of largely undepleted felsic granulites from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 2004. Vol. 389. pp. 141–159.

13. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Soc. America Bulletin*. 1989. Vol. 101. pp. 635–643.
14. McDonough W.F., Sun S. The composition of the Earth. *Chem. Geol.* 1995. Vol. 120. Issues 3–4. pp. 223–253. DOI: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.
15. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1976. Vol. 58. pp. 63–81.
16. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise Geochem.* 2003. Vol. 3. pp. 1–64.
17. Vigneresse J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation. *Ore geology Reviews*. 2007. Vol. 30. pp. 181–216.
18. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A reexamination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Trans. of Royal Soc. of Edinburgh Earth Science*. 1998. Vol. 89. pp. 113–119.
19. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1988. Vol. 201. pp. 535–544.
20. Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Miner. Petrol.*, 1987. Vol. 95. pp. 407–419.
21. Wu F.Y., Liu X.C., Ji W.Q., Wang J.M., Yang L. Highly fractionated granites: Recognition and research. *Sci. China Earth Sci.* 2017. Vol. 60, pp. 1201–1219. DOI: 10.1007/s11430-016-5139-1.
22. Yurimoto H., Duke E.F., Papike J.J., Shearer C.K. Are discontinuous chondrite normalized REE patterns in pegmatitic granite systems the results of monazite fractionation? *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. Vol. 54. pp. 2141–2145.
23. Zeng L.S., Gao L.E., Xie K.J., Zeng-Liu J. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: melting thickened lower continental crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. Vol. 303. Issues 3–4. pp. 251–266.
24. Zhang L.X., Wang Q., Zhu D.C., Li S.M., Zhao Z.D., Zhang L.L., Chen Y., Liu S.A., Zheng Y.C., Wang R., Liao Z.L. Generation of leucogranites via fractional crystallization: a case from the Late Triassic Luoza batholith in the Lhasa Terrane, southern Tibet. *Gondwana Res.* 2019. Vol. 66. pp. 63–76.