ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья
УДК 551.71:552.4 (470.22)

Проблема генезиса мезоархейских алюмокремнистых пород Карельского кратона и возможность их использования в качестве кварц-полевошпатового сырья

Н.И.КОНДРАШОВА[1,2], **Т.П.БУБНОВА**[1], **П.В.МЕДВЕДЕВ**[1]✉
[1] *Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия*
[2] *Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия*

Как цитировать эту статью: Кондрашова Н.И., Бубнова Т.П., Медведев П.В. Проблема генезиса мезоархейских алюмокремнистых пород Карельского кратона и возможность их использования в качестве кварц-полевошпатового сырья // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 720-731. DOI: 10.31897/PMI.2022.65

Аннотация. Представлены оригинальные данные, полученные при исследовании химического и минерального составов позднеархейских алюмокремнистых пород (ранее называвшихся силицитами) Койкарской и Эльмусской структур Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Карельского кратона (Центральная Карелия). Комплексное исследование этих образований позволило установить их сложный генезис как результат позднего наложения на осадочные и вулканогенно-осадочные породы полевошпат-кварцевого состава гидротермально-метасоматического воздействия, метаморфических преобразований. Благодаря наложенным процессам метасоматического (температурного?) воздействия на полевошпат-кварцевые алевролиты происходил вынос Fe из микровключений в кварце и полевом шпате и концентрирование его оксидов по границам зерен. Такие минералы, как монацит, паризит, алланит, также размещаются либо по границам зерен кварца и полевых шпатов, либо совместно с кальцитом заполняют микротрещины, что позволяет избавляться от них при подготовке кварц-полевошпатовых концентратов, используя различные технологии обогащения. По большинству лимитируемых ГОСТами показателей отдельные пробы в естественном виде соответствуют требованиям, предъявляемым к кварц-полевошпатовому сырью для использования его в составе шихт при производстве различных видов стекла. Дополнительное обогащение исходного сырья (измельчение, рассев на узкие классы и дальнейшая магнитная сепарация) приводит к снижению содержания Fe_2O_3 до нормируемых значений. Получаемые кварц-полевошпатовые концентраты различной крупности могут использоваться в производстве строительной и тонкой керамики (санитарно-керамических изделий, облицовочных и отделочных плиток, художественного, хозяйственного фарфора и фаянса). Однородность минерального и химического состава, возможность компактной добычи и обогащения (в том числе на передвижных малогабаритных установках) повышает перспективность и конкурентоспособность данного нетрадиционного полевошпатового сырья Центральной Карелии.

Ключевые слова: полевошпат-кварцевые, алюмокремнистые породы; кварц-полевошпатовый концентрат; Эльмусская и Койкарская структуры; Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс; Карельский кратон

Благодарность. Исследования выполнены в рамках государственного задания Института геологии КарНЦ РАН (АААА-А18-118020290085-4 и АААА-А18-118020290175-2).

Поступила: ***22.02.2022*** ***Принята***: ***15.09.2022*** ***Онлайн***: ***19.10.2022*** ***Опубликована: 10.11.2022***

Введение. В настоящее время растет интерес к поиску новых источников сырья для промышленности Российской Федерации [1-3]. В качестве примера альтернативного источника для получения кварц-полевошпатовых концентратов предлагают вулканогенно-осадочные и вулканогенно-хемогенные образования позднеархейских зеленокаменных поясов Карелии [4-6]. Авторы работ [7, 8] признают их гидротермально-метасоматический генезис, считая, что формирование данных пород, в минеральном составе которых преобладают кварц и полевые шпаты, было приурочено к деятельности подводных гидротермальных систем, существовавших в областях мезоархейского активного вулканизма. В работах [3, 4, 9] их гидротермальный генезис не подвергается сомнению. Авторы исследований [10, 11], признавая гидротермально-осадочный генезис силицитов, считают, что последние формировались в задуговых бассейнах при химическом осаждении кремнезема из коллоидных растворов, поставлявшихся подводными гидротермальными системами.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.65

Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 720-731
© Н.И.Кондрашова, Т.П.Бубнова, П.В.Медведев, 2022

Учитывая, что места возможной разгрузки гидротерм на геохимических барьерах представляют интерес при металлогеническом районировании, были изучены петрогеохимические характеристики пород, позиционируемых как силициты из двух локальных структур Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. Цель работы заключалась в уточнении генезиса этих образований, а также установлении их геохимической специализации для оценки возможности их использования в качестве источника алюмокремнистого сырья.

В работах сотрудников ИГ КарНЦ РАН [4-6, 8] термин «силициты» используется как тождественный для описания пород, состоящих из кварца и полевых шпатов и содержащих 71-77 % SiO_2 и 13-16 % Al_2O_3. Согласно определению, приведенному в геологическом словаре (Геологический словарь. 2011. Т.2), «силицит – горная порода, сложенная очень тонкими минеральными агрегатами свободного или водного кремнезема …», породы, о которых пойдет речь далее, к силицитам относить нельзя. Учитывая некорректность отождествления описываемых пород с силицитами, основываясь на их химическом составе, авторы статьи используют для их обозначения термин «алюмокремнистая или высококремнистая/кремнистая порода», либо, учитывая преобладание в их минеральном составе кварца и полевого шпата, – «полевошпат-кварцевая порода».

Геологическая характеристика. Мезо- и неоархейские зеленокаменные пояса, заложившиеся на палеоархейском гранитоидном основании, занимают порядка 20 % площади Карельского кратона (рис.1). На уровне современного эрозионного среза они представлены локальными

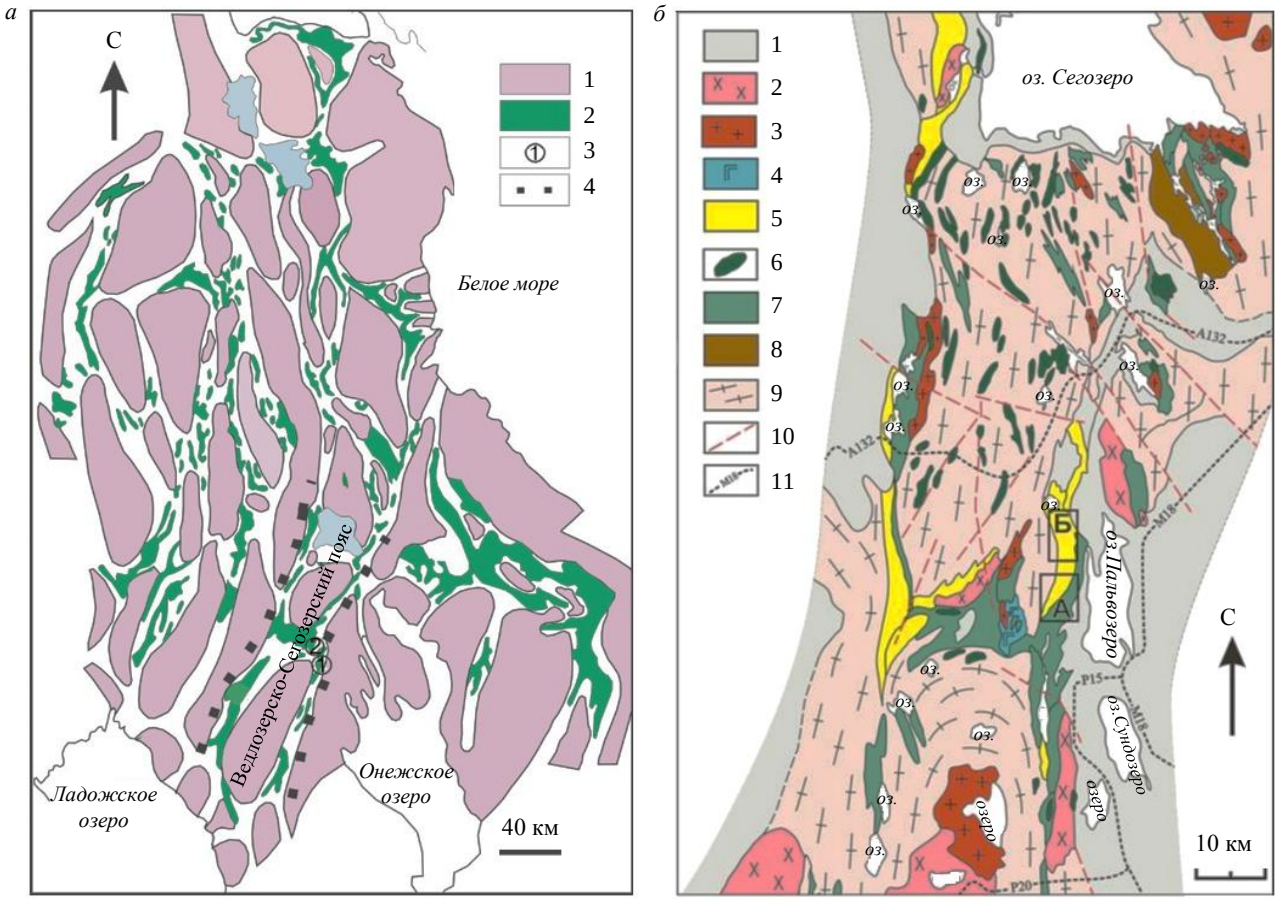


Рис.1. Схема архейских зеленокаменных поясов Карельского кратона (*а*), геологического строения центральной части Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (*б*) [4, 7, 12]

а: 1 – блоки фундамента; 2 – зеленокаменные пояса; 3 – локальные структуры: Койкарская (1), Эльмусская (2); 4 – границы Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса;

б: Койкарская (А), Эльмусская (Б) структуры. Палеопротерозой: 1 – супракрустальные комплексы; архей: 2 – диориты, гранодиориты, санукитоиды с возрастом 2,74 млрд лет; 3 – граниты; 4 – габбро-диориты; 5 – андезит-риолитовая ассоциация с внутриформационными осадочными породами (туфами, алюмокремнистыми породами, песчаниками, доломитами); 6 – амфиболиты, габброиды; 7 – коматиит-базальтовые ассоциации и внутриформационные осадочные породы; 8 – андезибазальт-дацитовая ассоциация с внутриформационными осадочными породами (туфами, туффитами, алевролитами); 9 – гнейсо-граниты и мигматит-граниты; 10 – крупные разломы; 11 – автомобильные дороги

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 720-731
DOI: 10.31897/PMI.2022.65
© Н.И.Кондрашова, Т.П.Бубнова, П.В.Медведев, 2022

структурами, в разрезах большинства которых отмечено присутствие горизонтов высококремнистых пород [12].

Ведлозерско-Сегозерский пояс, протягивающийся в субмеридиональном направлении от оз. Ведлозеро до оз. Сегозеро в Центральной Карелии, состоит из ряда отдельных структур (рис.1, *а*), в числе которых Эльмусская и Койкарская (рис.1) [4, 13].

В Койкарской структуре алюмокремнистые породы встречаются на двух уровнях. В нижней части разреза – в составе коматиит-базальтовой ассоциации, залегая среди тонкослоистых туфов коматиитов. Их образование связывают с газо-гидротермальной деятельностью, вызывавшей высокую степень гидротермальной проработки отдельных частей лавовых потоков и одновременным поступлением в бассейн кремнезема [4]. Изученные нами алюмокремнистые породы относятся к вышезалегающей дацит-риолитовой ассоциации (рис.2). Они приурочены к вулканотерригенной толще, состоящей из туфопесчаников, граувакк, кварцевых песчаников, туфов дацитов, колчеданных руд, карбонатных пород и графитистых сланцев. Эта толща сменяет средние и кислые вулканиты как вверх по разрезу, так и по латерали. Мощность алюмокремнистых пород до 60 м. Завершается разрез толщей кварц-серицитовых сланцев. Алюмокремнистые породы этого уровня разреза традиционно относят к хемогенно-пирокластическим отложениям, связывая их образование с фумарольной деятельностью, вызвавшей поступление в бассейн кремнезема и алюминия вслед за ослаблением вулканических эксплозий [4].

В разрезе Эльмусской структуры высококремнистые породы входят в состав андезит-дацитовой, риолитовой ассоциаций (рис.2). Они формируют горизонты в верхних частях вулканогенно-осадочного разреза мощностью около 100 м, представленного переслаиванием полимиктовых конгломератов, песчаников, туфов дацитового состава, туффитов; полевошпатовых граувакк; доломитов с прослоями углеродсодержащих алевролитов. Мощность кремнистых пород в разрезе составляет от 1-2 до 30-50 м, при этом их массивные разновидности образуют выдержанные по простиранию слои мощностью до 30 м.

Возраст вмещающих пород в обеих структурах соответствует интервалу 3,0-2,84 млрд лет [7, 8]. Породы метаморфизованы в условиях хлорит-серицитовой субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма [14].

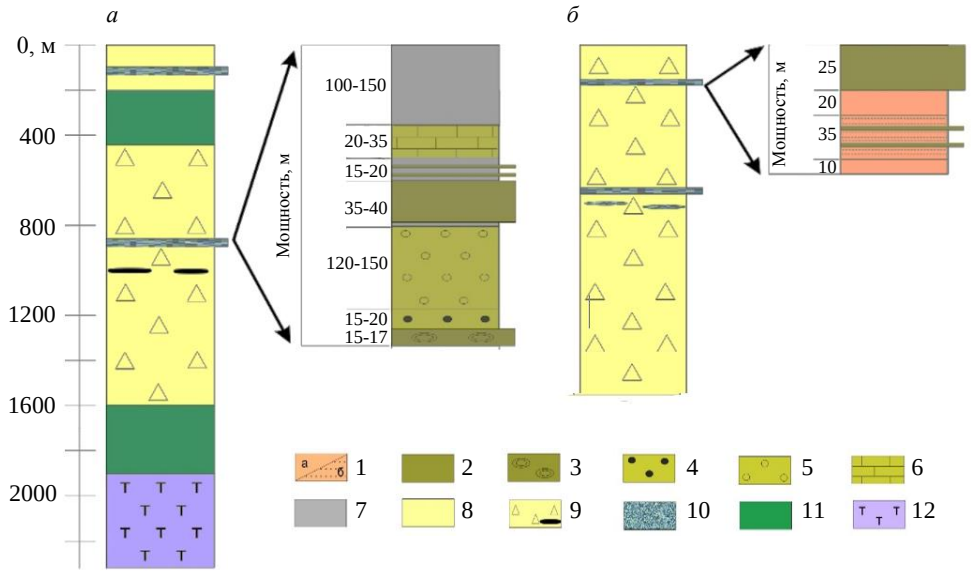


Рис.2. Алюмокремнистые породы в разрезах Койкарской (*а*) и Эльмусской (*б*) структур Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Карельского кратона

1 – массивные красные алюмокремнистые породы (а), слоистые розовые алюмокремнистые породы с прослоями серых разновидностей (б); 2 – массивные серые кремнистые породы; 3 – хемогенные конкреционные силициты; 4 – полимиктовые конгломераты; 5 – граувакки; 6 – карбонатные породы; 7 – углеродсодержащие сланцы; 8 – кварц-серицитовые сланцы; 9 – лавы, лавобрекчии, туфы андезидацитов, туффиты дацитов, полимиктовые конгломераты, песчаники, граувакки, доломиты, прослои углеродсодержащих алевролитов и серно-колчеданных руд; 10 – кварц-полевошпатовые алевролиты, кремнистые туффиты, хемогенные кварциты; 11 – базальты подушечные и массивные; 12 – коматиитовые базальты, коматииты, туфы-туффиты основного и коматиитового составов

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Методология. Образцы алюмокремнистых пород были отобраны из разрезов Койкарской и Эльмусской структур Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. Исследовались лабораторные пробы весом 5 кг каждая, отобранные из трех обнажений в каждой структуре: 6 проб из Койкарской и 12 проб из Эльмусской структур. Были изучены 18 шлифов и 10 аншлифов. Петрографическое описание пород в шлифах выполнено с использованием оптического микроскопа ПОЛАМ Р-211 (О.В.Букчина). Все аналитические работы проведены на базе комплекса оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ КарНЦ РАН. Содержание петрогенных элементов и полуколичественное определение микропримесей выполнены на рентгенофлюоресцентном спектрометре Thermo Scientific ARL Advant'X (С.В.Бурдюх) по стандартной методике. Точность определения составила 0,0005 % для MnO, 0,0034 % для TiO_2, 0,025-0,035 % для окислов магния и кальция, 0,10-0,11 % для Na_2O-K_2O. Ошибка в определении концентрации Al_2O_3 – 0,17 % и для SiO_2 – 0,22 %. Изучение химического состава проб осуществлялось с использованием квадрупольного масс-спектрометра X-SERIES 2 Terhmo (А.С.Парамонов). Пределы обнаружения составляют, мг/кг (ppm): Pr, Sm-Lu, U – 0,03, Nb, Nd, Cs – 0,04, Y, Hf, La – 0,05, Ce, Pb, Th, Co – 0,06, Mo – 0,12, Zr – 0,81, Li – 0,30, Rb – 0,52, Sr, Ni, Cu – 1,01-1,44, Mn – 2,26, Sc – 2,61, V и Cr – 5,94-5,96, Ba – 24,12 и Zn – 25,06. Морфология и особенности химического состава минералов определялись на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments).

Минералого-петрографическая характеристика. Исследуемые породы обеих структур характеризуются тонкослоистой текстурой (рис.3, *а*, *б*). В разрезах встречаются также массивные разновидности с элементами линзовидно-полосчатых и брекчированных текстур (рис.3, *в*-*е*).

В Койкарской структуре в минеральном составе исследуемых пород отмечаются кварц (20-42 %), серицит (до 15 %) и полевые шпаты (20-34 %), иногда присутствуют обломки калиевого полевого шпата (КПШ), плагиоклаза, чешуйки биотита, мусковита и пластинчатого и тонкочешуйчатого хлорита. Породы – тонкозернистые, часто сложены чередующимися светлыми и темными полосами разного минерального состава. Преобладающим минералом светлой части породы является кварц с четкими ровными границами и размерами зерен от 0,005×0,01 до 0,05×0,07 мм; 0,04×0,11 мм, с ровным погасанием. В темных полосах преобладают серицит, хлорит и вытянутые по сланцеватости мелкие зерна кварца. Структура пород – алевритовая, алевропсаммитовая,

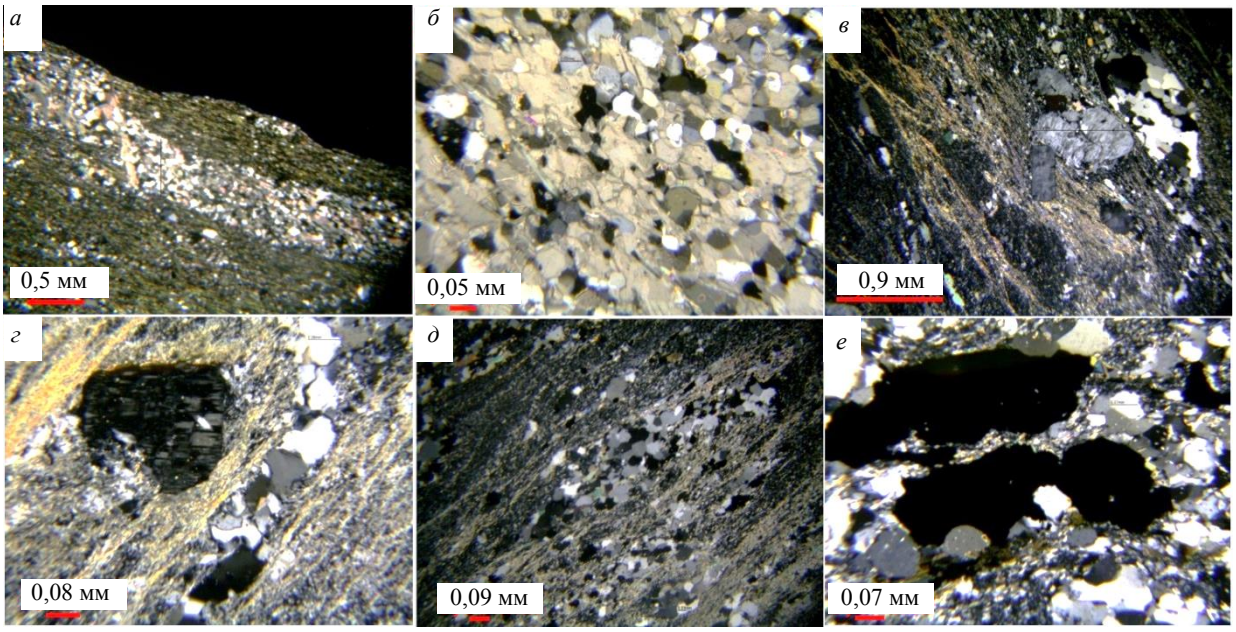


Рис.3. Алюмокремнистые породы Койкарской и Эльмусской структур. Оптический микроскоп, поляризованный свет
Койкарская структура: *а* – общий вид породы; *б* – светлые «полосы», сложенные кварцем, полевым шпатом, кальцитом; *в* – кремнистая порода брекчированной текстуры с обломками КПШ;
Эльмусская структура: *г* – тонкозернистая порода кварц-микроклин-серицитового состава с обломком полевого шпата; *д* – линзовидно-полосчатая текстура; *е* – окислы железа (темное) в кварц-полевошпатовом матриксе

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 720-731
DOI: 10.31897/PMI.2022.65
© Н.И.Кондрашова, Т.П.Бубнова, П.В.Медведев, 2022

участками гранобластовая, лепидогранобластовая, что позволяет отнести их к метаморфизованным алевролитам, частично к алевропесчаникам (рис.3, *а, б, е*).

В брекчированных разновидностях фиксируются обломки КПШ, округлые выделения перекристаллизованного кварца, обломки кремнистых конкреций, которые цементируются мелкокристаллическим агрегатом, состоящим из кварца, серицита и кальцита. Общий облик массивных алюмокремнистых пород обусловлен тонким срастанием альбита, кварца и микроклина (рис.4, *а-в*). По границам зерен кварца и микроклина, кварца и альбита, в микротрещинах этих минералов встречаются мусковит, рутил, кальцит, монацит, алланит, паризит и циркон (рис.4, *г-е*).

Основными породообразующими минералами исследуемых пород Эльмусской структуры являются кварц (29-49 %), микроклин (8-14 %) и альбит (9-45 %), с размерностью зерен от 0,1 до 0,01 мм. Структура пород – бластоалевритовая, что позволяет отнести их к метаалевролитам. Встречаются участки с псаммитовой структурой, что не исключает присутствия среди алюмокремнистых пород включений алевропесчаников. Мусковит, содержание которого варьируется от 1-2 до 14 %, как правило, представлен тонкими чешуйками 0,02-0,01 мм, расположенными параллельно общей сланцеватости породы (рис.5, *а-в*). Присутствует кварц двух генераций. Преобладает тонкозернистый кварц размытых очертаний, развитый в тесном срастании с полевыми шпатами (рис.5, *б*). Кварц второй генерации представлен перекристаллизованными крупными зернами четких форм с размерами до 0,18×0,14 мм и образует прожилки и линзовидные гнезда, ориентированные параллельно сланцеватости породы. Форма отдельных зерен микроклина указывает на их развитие по пепловому материалу кислого состава (рис.5, *в*).

В виде единичных пластинок черно-бурого и зеленовато-бурого цветов встречается биотит и редкие зерна апатита, стильпномелана, магнетита, ильменита, циркона. Частично биотит замещается тонкопластинчатым светло-зеленым хлоритом. В алюмокремнистых породах Эльмусской структуры установлена редкоземельная минерализация, связанная с мелкими, рассеянными зернами алланита, паризита, монацита, располагающимися по границам зерен кварца, микроклина и альбита либо встречающимися совместно с кальцитом в микротрещинах (рис.5, *г-е*).

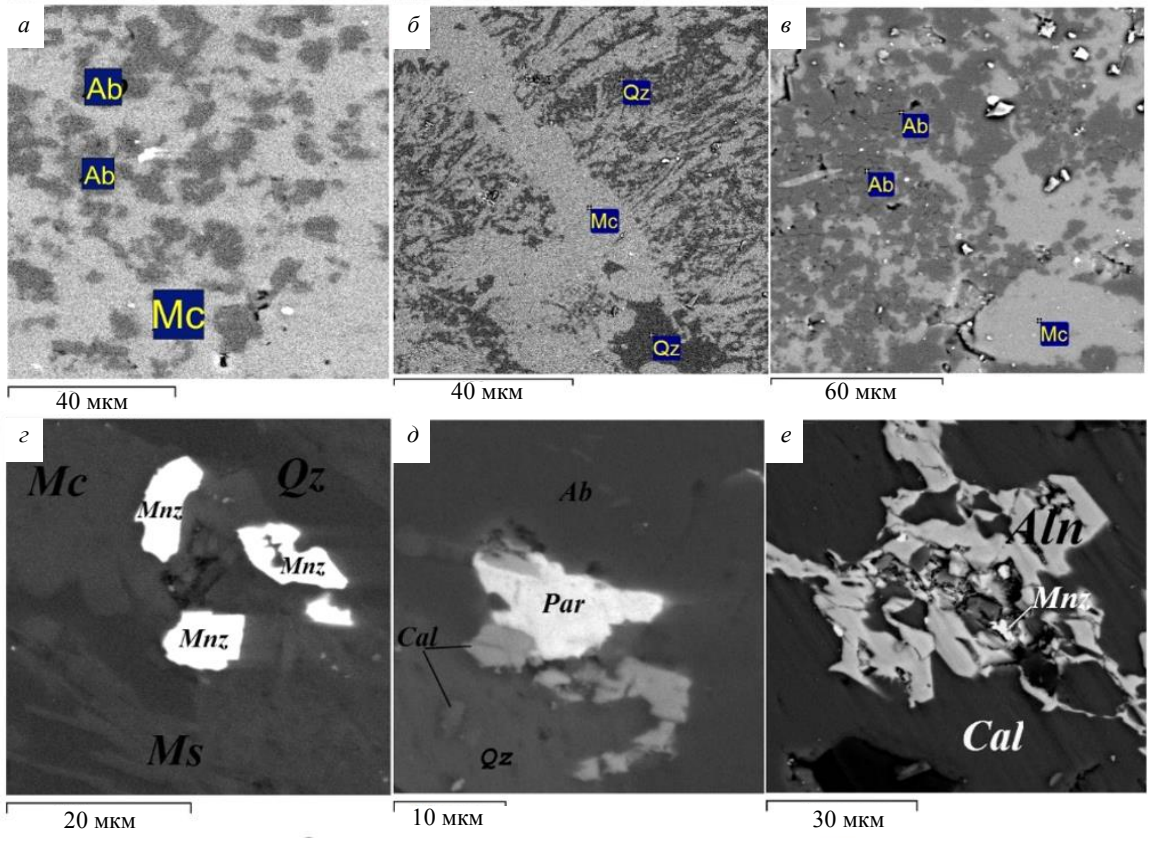


Рис.4. Алюмокремнистые породы Койкарской структуры. Изображение СЭМ VEGA II LSH, BSE-детектор
Qz – кварц, Mc – микроклин, Ab – альбит, Ms – мусковит, Cal – кальцит, Mnz – монацит, Par – паризит, Aln – алланит

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.65

Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 720-731
© Н.И.Кондрашова, Т.П.Бубнова, П.В.Медведев, 2022

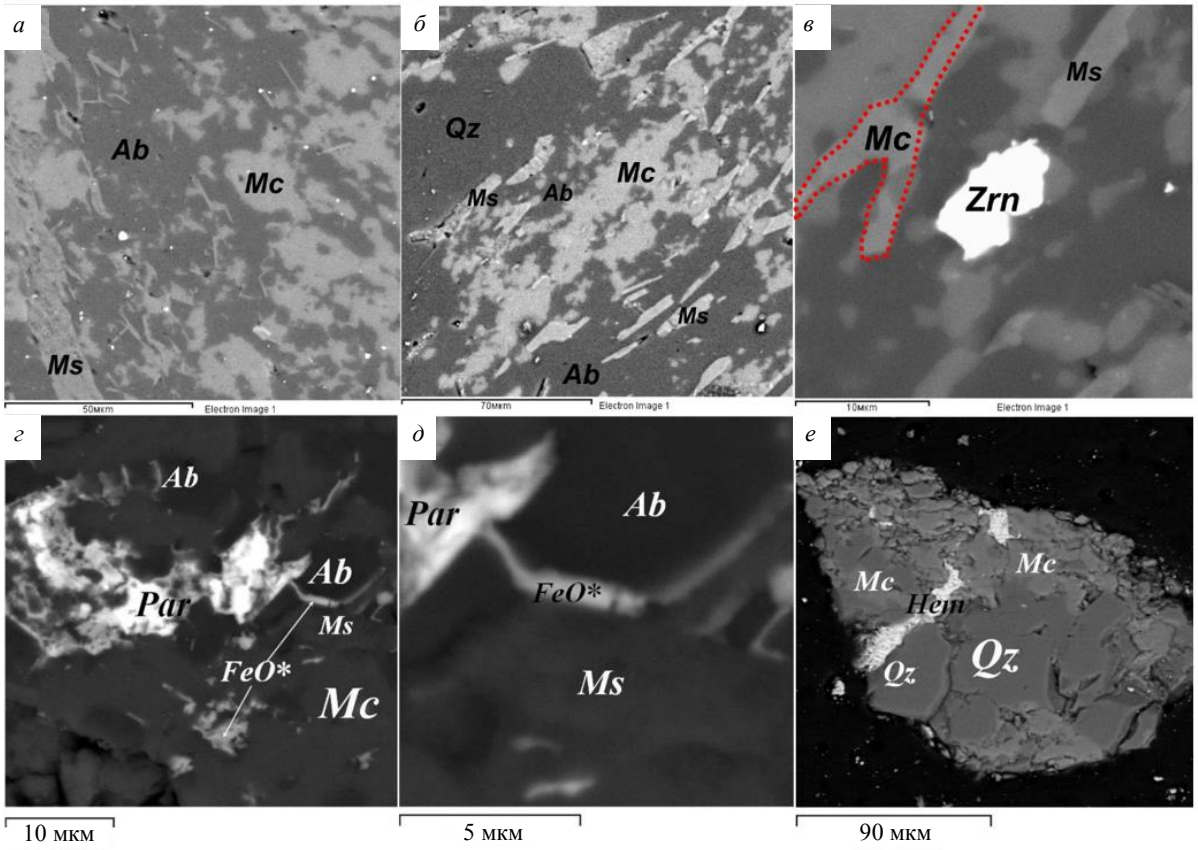


Рис.5. Текстурно-структурные особенности алюмокремнистых пород Эльмусской структуры (*а-д*), кварц-полевошпатовый концентрат (*е*). Изображение СЭМ VEGA II LSH, BSE-детектор

Zrn – циркон, Hem – гематит, FeO* – окислы железа неясного минерального состава

В алюмокремнистых породах обеих структур отмечены зерна кварца и полевых шпатов, заполненные мельчайшими чешуйками серицита и цепочками газово-жидких включений, которые фиксируют микротрещиноватость. В отдельных микротрещинах присутствует тонкораспыленное неопределяемое рудное вещество железистого состава.

Не исключена возможность образования части исследуемых пород по лавам дацитов. В разрезах структур описаны дациты с миндалинами кварца, вкрапленниками плагиоклаза (15-30 % An) и основной массой, сложенной кристалликами кварца и полевого шпата [4]. Среди алюмокремнистых пород Койкарской структуры встречаются прослои с подобными миндалинами (?) кварца, которые нами были определены как измененные лавы кислого состава.

В минеральном составе высококремнистых пород обеих структур присутствуют вторичные кальцит и эпидот, отмечаются поздние микропрожилки кварцевого состава.

Петрогеохимический состав. Отличающийся минеральный состав определяет различия химического состава исследуемых пород обеих структур прежде всего в содержании глинозема, оксидов титана, железа, магния и натрия (см. таблицу).

Вариации содержаний кремнезема довольно изменчивы как для алюмокремнистых пород Эльмусской (71,14-79,59 %), так и образований Койкарской структур (52,79-75,21 %). Значительные колебания отмечаются и в концентрациях других окислов. Подобный разброс значений петрогенных компонентов не противоречит выводу об отнесении данных образований к алевролитам и не подтверждает предположения о преимущественном поступлении кремнезема с гидротермами при формировании исследуемых алюмокремнистых пород [11]. При преобладающей поставке кремнезема гидротермами должно наблюдаться обогащение образующихся пород Fe, Mn [15], Mo, чего в действительности не происходит. Показано [16], что механизм и скорость осаждения гидротермального кремнезема контролируется скоростью формирования гидроксидов Fe, так как железо не только осаждает кремнезем, но и защищает его от последующего растворения.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 720-731
DOI: 10.31897/PMI.2022.65
© Н.И.Кондрашова, Т.П.Бубнова, П.В.Медведев, 2022

Химический (вес. %) и микроэлементный (мг/кг или ppm) состав алюмокремнистых пород Эльмусской и Койкарской структур

Оксид (элемент)	Койкарская структура						Эльмусская структура											
	Номера образцов																	
	К1-1	К1-2	К2-1	К2-2	К3-1	К3-2	Э-4-1	Э-4-2	Э-4-3	Э-4-4	Э-5-1	Э-5-2	Э-5-3	Э-5-4	Э-6-1	Э-6-2	Э-6-3	Э-6-4
SiO_2	70,24	75,21	74,42	59,58	52,79	70,71	75,5	73,76	73,94	75,21	79,59	76,81	75,87	75,51	74,35	75,11	74,07	71,14
TiO_2	0,099	0,082	0,07	0,89	0,91	0,1	0,07	0,07	0,07	0,09	0,06	0,07	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,06
Al_2O_3	13,89	13,28	13,81	22,41	19,75	12,96	13,15	13,48	13,53	12,38	11,02	11,82	13,26	12,06	13,9	13,64	14,3	11,68
Fe_2O_3	1,42	0,853	0,87	2,81	6,86	1,51	0,69	1,12	1,26	0,69	0,87	0,42	0,66	1,41	1,18	1,08	0,93	1,07
CaO	0,35	0,09	0,98	0,12	3,58	4,47	0,71	1,01	1,02	0,96	0,45	0,25	0,33	0,75	0,95	6,4	0,09	6,71
MgO	5,44	2,03	2	5,12	10,48	3,66	0,51	0,87	0,67	1,04	1,56	0,78	0,59	1,23	1,06	13,64	0,55	1,86
Na_2O	0,96	1,16	1,91	0	1,73	1,48	4,79	3,97	3,27	1,07	1,84	1,47	5,2	4,26	2,83	2,58	3,19	4,22
K_2O	7,26	7,06	5,68	8,66	3,08	4,69	4,29	5,38	5,9	8,22	4,3	8,07	3,83	4,29	5,34	6,4	6,53	2,94
Li	11	7,699	16,76	65,25	53,55	21,21	6,256	11,82	18,88	7,098	14,03	3,722	5,809	7,152	14,33	13,28	11,26	4,304
P	207,9	152,3	191,2	240,9	1184	228	165,8	178	173,5	163,8	155,4	159,9	172,5	193,2	145,5	172,5	155,8	158,4
Sc	7,474	5,053	5,217	20,55	24,28	6,854	4,101	6,573	10,64	4,944	1,737	2,6	2,804	2,997	3,472	7,25	3,445	2,712
V	0,863	<PO	<PO	89,09	120,5	7,305	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO
Cr	221,2	17,49	16,49	164,3	303,6	54,54	28,08	23,22	20,56	66,86	32,06	18,41	37,48	48,95	44,27	120,2	66,74	56,55
Mn	148,6	34,96	403,5	132,5	1690	1342	66,08	250,3	150,4	84,79	116,6	40,57	52,04	117	213,9	259,8	93,87	553,2
Co	8,38	0,481	1,3	3,406	26,41	4,071	<PO	<PO	<PO	1,275	0,479	0,761	<PO	1,823	0,392	4,634	2,131	1,909
Ni	129,7	10,23	8,216	36,09	145,3	30,82	5,684	8,487	4,156	11,45	9,932	7,129	7,804	25,13	10,22	70,96	34,88	27,58
Cu	12,82	8,037	5,075	9,442	12,69	8,093	6,054	5,878	3,987	8,647	4,976	10,08	5,429	14,8	5,046	7,43	10,28	7,907
Zn	20,69	21,45	40	40,83	310,6	62,26	26,79	78,03	165,4	21,74	22,49	12,42	188,2	992,4	52,73	69,33	48,78	355,1
As	<PO	<PO	<PO	<PO	27,82	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO	<PO
Rb	142,4	125,6	116,5	283,2	69,7	103,9	104,9	136,9	170,3	119,2	84,41	106	86,17	95,57	138,5	134,3	136,1	63,47
Sr	28,69	22,62	43,5	9,672	61,37	80,79	38,04	35,04	32,86	28,55	21,84	29,62	37,81	42,67	45,62	39,39	40,97	113,6
Y	18,25	13,99	20,86	77,5	17,33	24,8	27,45	28,84	33,94	15,54	13,65	12,22	27,48	33,15	24,3	25,22	15,94	23,14
Zr	32,35	25,08	25,15	52,99	38,38	25,01	24,97	24,82	25,16	25,44	19,23	23,87	22,31	21,41	26,16	23,91	23,31	18,61
Nb	13,33	10,91	9,978	21,08	7,235	8,919	12,19	11,79	10,17	10,24	7,279	8,918	11,14	11,99	12,55	12,17	12,47	9,75
Mo	0,357	0,464	0,476	0,364	0,38	1,355	0,23	0,44	0,47	0,79	0,3	0,61	0,39	0,37	0,21	0,34	0,17	0,239
Cs	4,28	3,34	3,78	7,61	2,98	3,77	1,87	1,83	2,17	2,91	2,30	2,25	2,34	2,76	1,32	1,3	1,26	0,58
Ba	1719	1385	1506	1805	936,60	1163	846,20	1036	1207	1490	981,70	1387	629,30	697,10	869,20	829,90	796	381,70
La	21,64	20,32	38,84	83,04	29,68	37,13	64,73	21,83	21,50	36,93	33,67	27,52	22,42	45,31	13,18	24,11	15,48	42,71
Ce	38,09	34,39	62,35	130,60	42,68	60,12	108,98	39,75	34,22	58,44	51,78	43,42	38,92	75,43	16,44	25,53	28,24	60,97
Pr	6,49	5,95	10,34	22,38	6,79	10,38	18,81	7,09	6,36	10,13	8,44	7,34	6,65	11,90	3,27	5,46	4,07	11,29
Nd	22,33	20,08	35,45	76,40	22,88	35,00	67,01	26,24	23,26	33,23	29,04	23,97	23,78	43,68	11,49	20,15	14,12	39,92
Sm	6,09	5,24	8,74	18,67	5,24	8,64	16,45	7,98	7,10	7,63	6,81	5,58	6,35	10,80	4,09	5,61	3,60	10,17
Eu	0,71	0,64	0,91	1,51	1,23	0,77	0,89	0,49	0,51	0,70	0,62	0,59	0,46	0,64	0,35	0,45	0,30	0,70
Gd	5,82	4,95	7,88	18,12	5,25	8,01	14,59	8,50	7,92	6,52	6,20	4,97	6,49	10,36	5,07	6,49	3,72	9,11
Tb	0,89	0,65	1,03	2,43	0,72	1,14	1,85	1,27	1,23	0,84	0,70	0,68	1,02	1,35	0,86	1,02	0,56	1,16
Dy	4,72	3,63	5,09	14,02	3,95	5,72	8,51	7,19	7,35	4,20	3,26	3,78	5,87	7,45	5,30	5,61	3,57	5,77
Ho	0,91	0,68	0,95	2,77	0,78	1,06	1,33	1,35	1,46	0,75	0,57	0,65	1,14	1,40	1,02	1,06	0,71	1,02
Er	2,89	2,09	2,85	8,71	2,40	3,22	3,55	3,94	4,25	2,22	1,79	1,92	3,49	4,11	3,02	3,01	2,26	3,04
Tm	0,42	0,32	0,42	1,35	0,35	0,47	0,50	0,56	0,59	0,31	0,26	0,29	0,52	0,60	0,43	0,42	0,31	0,43
Yb	3,10	2,44	3,01	9,04	2,52	3,53	3,63	3,99	4,12	2,36	2,02	2,01	3,78	4,26	2,94	2,80	2,40	3,25
Lu	0,45	0,35	0,44	1,39	0,37	0,51	0,55	0,56	0,60	0,35	0,29	0,29	0,54	0,61	0,43	0,40	0,35	0,45
Hf	5,66	4,51	4,29	6,34	4,43	4,28	4,74	4,85	4,98	4,28	3,20	3,86	4,10	3,94	4,82	4,30	4,34	3,66
Pb	5,13	4,03	7,59	5,41	56,09	14,95	20,82	14,97	35,44	8,10	3,42	4,89	9,55	10,66	4,45	4,86	4,63	6,21
Th	18,45	14,60	14,93	10,54	7,34	16,16	11,95	11,71	11,40	15,42	11,22	13,28	9,69	11,07	13,20	13,80	10,34	12,62
U	3,12	2,50	4,63	11,56	1,47	4,92	2,56	3,15	2,96	3,52	2,13	3,01	2,50	2,61	2,59	3,23	2,44	2,24

Примечание. < PO – меньше пределов обнаружения.

При петрографическом изучении высококремнистых пород были обнаружены следы пепловых частиц кислого состава. Литохимические данные подтверждают как присутствие кислой пирокластики, так и не исключают пирокластику основного состава.

Исследуемые породы обеих структур характеризуются аномально низкой величиной титанового модуля (ТМ) – TiO_2/Al_2O_3, пределы изменений которого составляют 0,005-0,008. Подобные значения ТМ можно связать с присутствием в них кислой пирокластики. У двух образцов Койкарской структуры величина ТМ равна 0,04 и 0,046. Такие величины характерны для глубоководных осадочных отложений [17]. Кроме того, для алюмокремнистых пород этой структуры отмечена положительная корреляция TiO_2-Al_2O_3 с достоверностью 0,94, что также характерно наряду с отрицательной корреляцией TiO_2-SiO_2 (коэффициент достоверности 0,91) для осадочных образований.

Аномально высокие значения гидролизатного модуля (ГМ = Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + + MnO/SiO_2) для части образцов из разреза Койкарской структуры (0,44 и 0,53) однозначно указывают на присутствие в их составе пирокластики основного состава, что подтверждается и повышенным содержанием в этих образцах MgO [18].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.65

Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 720-731
© Н.И.Кондрашова, Т.П.Бубнова, П.В.Медведев, 2022

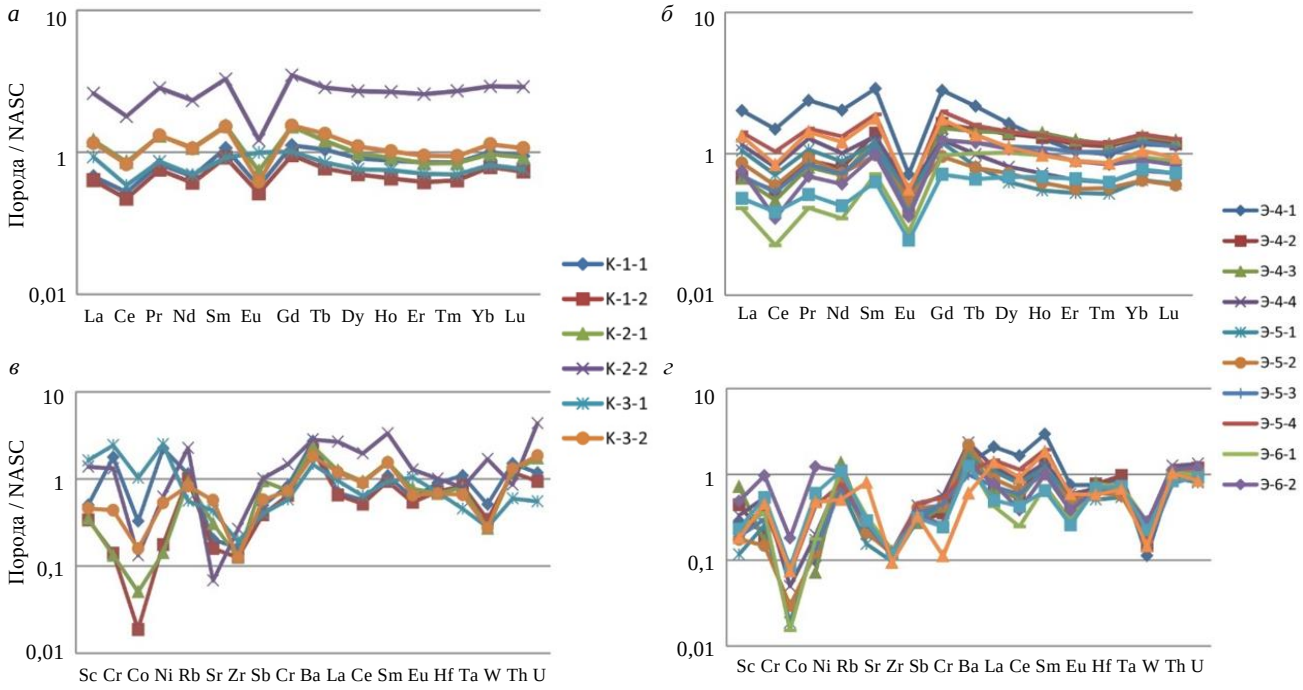


Рис.6. Спектры распределения РЗЭ в алюмокремнистых породах Койкарской (*а*) и Эльмусской (*б*) структур и спайдердиаграммы распределения микроэлементов в тех же породах Койкарской (*в*) и Эльмусской (*г*) структур. Нормализовано по североамериканскому сланцу (NASC) [19]

Редкие земли. По содержанию редкоземельных элементов (РЗЭ) кремнистые породы двух районов практически тождественны (см. таблицу, рис.6, *а*, *б*). Суммарное содержание лантаноидов в образованиях Эльмусской структуры составляет 67,86-311,34 г/т, в сходных породах Койкарской структуры изменяется от 101,73 до 390,41 г/т. Учитывая, что в кремнистых образованиях концентрация РЗЭ незначительна [20, 21], а в глинах и глинистых сланцах суммарное содержание лантаноидов составляет порядка 195,42 ppm, можно связать наблюдаемые повышенные значения РЗЭ с присутствием пирокластики, фиксируемой также в шлифах и по литохимическим показателям, а также акцессорных редкоземельных минералов по границам зерен кварца, микроклина, альбита и в микротрещинах совместно с кальцитом.

По величине Eu-аномалии высококремнистые породы Койкарской структуры ($Eu/Eu^* = 0,35-0,55$) отличаются от подобных образований Эльмусской структуры ($Eu/Eu^* = 0,25-0,49$). Исследуемые образования двух районов характеризуются отрицательной аномалией Ce. Для кремнистых образований Эльмусской структуры Ce-аномалия попадает в интервал 0,48-0,78, для подобных пород Койкарской структуры она не выходит за пределы 0,65-0,70. В образованиях гидротерм отмечаются положительные аномалии Eu, Y, Ho [22, 23]. В исследуемых образованиях содержание гольмия – на уровне его концентрации в NASC, а иттрия – в постархейских сланцах. Отрицательные аномалии Ce, Eu можно рассматривать в этом случае как указание на взаимодействие фоновых кремнистых осадков осадочного генезиса с морской водой.

Если рассматривать показатель Ce/La как доказательство присутствия в образованиях эксгаляционного материала [24], то для алюмокремнистых пород обеих структур Ce/La >1. Для образований Койкарской структуры величина этого показателя попадает в интервал 1,44-1,76 и для пород Эльмусской структуры изменяется в пределах 1,06-1,82, что не подтверждает формирования исследуемых пород исключительно за счет активного привноса кремнезема гидротермами.

Суммарное содержание легких редких земель (La-Pr) превышает содержание TREE (Nd-Lu), что также не позволяет предполагать существенный вклад эксгаляционной компоненты при образовании рассматриваемых пород. Общее суммарное содержание лантаноидов либо меньше, либо совпадает с их содержанием в сланцах NASC, за исключением трех проб: 390,4(К-2-2), 311,34 (Э-4-1) и 217,89 ppm (Э-5-4), что обусловлено присутствием в этих образцах акцессорных минералов и пирокластики.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Микроэлементный состав. В исследуемых породах обеих структур содержания Rb, Cs, Hf, Ta, Sb, Th, La-Sm, а также U в образованиях Эльмусской структуры близки к их концентрациям в североамериканском сланце. В высококремнистых породах Койкарской структуры отмечаются пониженные концентрации Co, Ni, Cr, Sr, Zr и повышенные U (см. таблицу, рис.6, *в*, *г*). Рисунок спайдердиаграмм алюмокремнистых образований Койкарской структуры отличается от такового для сходных образований Эльмусской по причине больших интервалов изменения концентраций отдельных элементов. Во всех алюмокремнистых породах Койкарской структуры отмечается повышенное содержание бария от 936 до 1805 ppm, при его содержании в сланце NASC – 636 ppm. В отдельных образцах повышено содержание Fe, Mg, Mn, P.

Обсуждение. Образование алюмокремнистых пород можно объяснить привносом кремнезема и глинозема гидротермами [21, 25, 26], генетически связанными с вулканическими постройками, т.е. признавая их исключительно гидротермально-метасоматический генезис [27-29]. Именно эта точка зрения была впервые высказана А.И.Световой в 1988 г. [4] и позднее продублирована в работах [3, 6, 7]. Однако петрографические и химические особенности рассматриваемых алюмокремнистых пород не подтверждают эту точку зрения. Все указывает на то, что эти образования могли быть сформированы седиментогенно-диагенетическим путем, без связи с поступлением эксгаляционного материала в момент их формирования, что означает отсутствие генетической связи с вулканами, подтверждая только их парагенетическую связь. Гидротермальные растворы, содержащие значительное количество кремнекислоты, обладают высокой адсорбционной емкостью по отношению к катионам различных металлов, в особенности тяжелых [16, 30]. Однако концентрации этих элементов в рассматриваемых образованиях находятся на уровне их содержания в сланцах NASC (рис.6, *в*, *г*). Отсутствие гидротермальных минералов, образующихся совместно с осаждением кремнезема, также не позволяет утверждать исключительно гидротермальный источник кремнезема и глинозема при формировании рассматриваемых алюмокремнистых пород.

При изучении современных долгоживущих гидротермальных систем [31-33] отмечается рост концентраций в осадках, подверженных воздействию гидротерм Cu, Zn, Cd, Fe, Mn, Mo, обогащение редкими землями. Для рассматриваемых образований это не характерно. Поствулканическое гидротермальное воздействие оказывалось на исходные породы, но из-за отсутствия вблизи или непосредственно в районах работ разрывных нарушений, которые можно считать флюидопроводниками, не сопровождалось значительным привносом-выносом элементов. Воздействие могло быть обусловлено повышением температуры, что, конечно, требует дополнительных исследований.

В исследуемых породах наблюдается тонкое срастание полевых шпатов и кварца, встречаются участки с гранобластовой структурой, что возможно как при метасоматозе уже существовавшей в разрезе кварц-полевошпатовой осадочной (и/или вулканической, вулканогенно-осадочной) породы, так и при региональном метаморфизме. В алюмокремнистых породах Эльмусской структуры присутствуют слюды с повышенной железистостью: мусковит с содержанием Fe_2O_3 в количестве 4,24-6,8 % и биотит с Fe_2O_3 от 15 до 30 %. Такое высокое содержание окислов железа характерно обычно для мусковитов из глинистых сланцев и для биотитов из гранитов, претерпевших метаморфические преобразования. Вулканические породы кислого состава при метаморфизме могут образовать мусковит-кварц-полевошпатовые породы [34].

Авторы работы [35], изучив распределение редкоземельных элементов и микроэлементов в кварце из алюмокремнистых пород Койкарской и Эльмусской структур, пришли к выводу о его исключительно осадочно-хемогенном генезисе. Указания на возможное присутствие фоновых кремнистых осадков с хемогенным осаждением кремнезема в водном бассейне присутствуют (рис.7). Редко встречающиеся глобулы кремнезема и нитчатые микрофоссилии [11] в шлифах можно как раз связать с условиями накопления кремнистого материала в фоновом режиме морского бассейна. В доказательство этого можно привести также отрицательные аномалии церия и европия, как наследуемые от морской воды, а присутствующий в минеральном составе изучаемых пород хлорит рассматривать как перекристаллизованное глинистое вещество. Объемы кремнистых хемогенных осадков были незначительны, на что указывает отсутствие четкой вертикальной стратификации отложений в разрезе структур и значительное поступление силикокластического материала.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.65

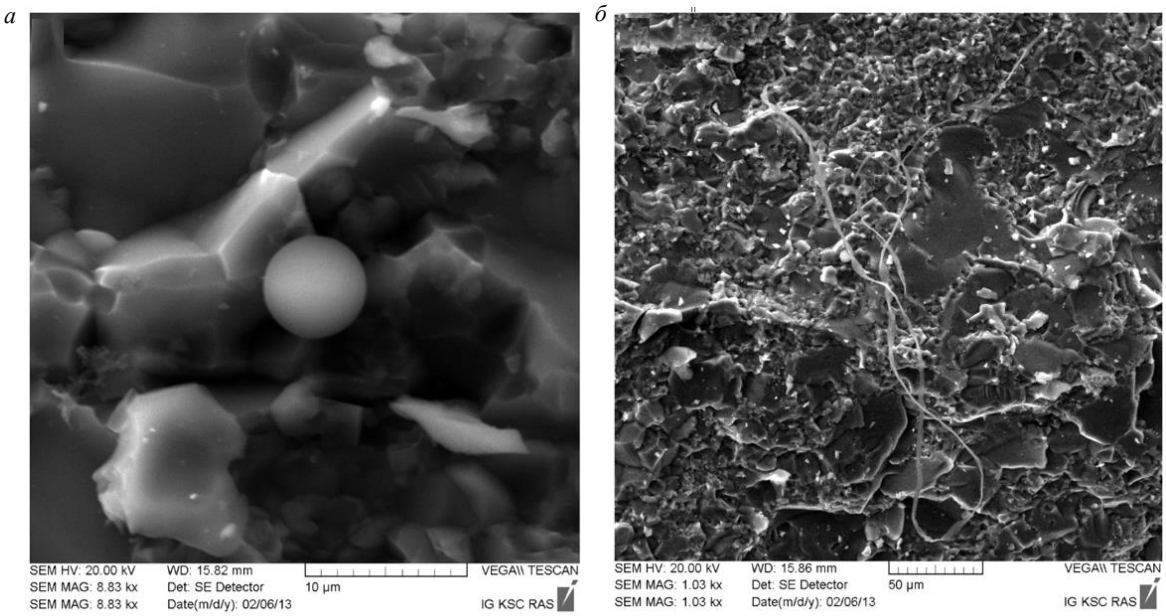


Рис.7. Глобула кремнезема (*а*) и нитчатые микрофоссилии мезоархейского (?) возраста (*б*)

Возможно, что наблюдаемые особенности исследуемых пород являются результатом наложения нескольких процессов, приведших в итоге к «очищению» алюмокремнистых пород от примесей, которые считаются вредными при изготовлении кварц-полевошпатовых концентратов [3, 5, 6]. Благодаря наложенным процессам метасоматического (температурного?) воздействия на кварц-полевошпатовые алевролиты происходит вынос Fe из микровключений в кварце и полевом шпате и концентрирование его оксидов по границам зерен (см. рис.5, *г*, *д*). Такие минералы, как монацит, паризит, алланит, также размещаются либо по границам зерен кварца и полевых шпатов, либо совместно с кальцитом заполняют микротрещины (см. рис.4, *г-е*; рис.5, *г*, *д*), что упрощает их извлечение в случае обогащения исходного сырья.

По большинству лимитируемых показателей (см. таблицу) отдельные пробы в естественном виде соответствуют требованиям к кварц-полевошпатовому сырью для использования в составе шихт при производстве различных видов стекла (ГОСТ 13451-77: $Fe_2O_3 \leq 0{,}20$-$0{,}70$ % для марки КПШС-Н-11,5 – не нормируется; Al_2O_3 – 11,5-14 %; $K_2O + Na_2O$ – 7-9 %; $Si_2O \leq 75$-80 %). В соответствии с требованиями к кварц-полевошпатовому сырью для производства строительной и тонкой керамики, только содержание оксида железа во всех пробах превышает нормируемые значения (ГОСТ 15045-78, ГОСТ 7030-75: $Fe_2O_3 \leq 0{,}20$-$0{,}30$ %). А такие показатели, как массовая доля суммы оксидов кальция и магния ($CaO + MgO \leq 1{,}5$-$2{,}5$ %), калия и натрия ($K_2O + Na_2O$ – 7-9 %), соотношение окислов щелочных металлов (K_2O/Na_2O – 0,7-0,9 или 2-3 %), массовая доля кварца (не более 30-40 %) для большинства проб находятся в пределах допустимых значений. Повышенные содержания железа связаны с присутствием породообразующего мусковита, содержание Fe_2O_3 в котором, по данным СЭМ, достигает 4,24-6,8, а также второстепенных биотита, хлорита, магнетита. Авторы работы [3] показали, что доизмельчение, рассев на узкие классы в соответствии с требованиями ГОСТов и дальнейшая магнитная сепарация узкоклассифицированного материала приводят к снижению содержания Fe_2O_3 (до 0,19 %) и позволяет рассматривать возможность использования кварц-полевошпатового концентрата для производства санитарно-керамических изделий, облицовочных и отделочных плиток, художественного, хозяйственного фарфора и фаянса. Альтернативными вариантами применения кварц-полевошпатовых пород Центральной Карелии может быть производство высокопрочного щебня, заполнителя тяжелых бетонов и наполнителя различных строительных материалов [6]. Их возможное использование в качестве сырья для производства стеклокристаллических материалов – ситаллов – представляется перспективным направлением.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Выводы. Наблюдаемые химические характеристики исследуемых алюмокремнистых пород возникли при позднем воздействии (метасоматоз – метаморфизм) на терригенные осадки со значительным присутствием сиалического материала, а также, возможно, на туфы и лавы кислого состава (?). Свой вклад в их генезис внесла и пирокластика, фиксируемая как в шлифах, так и по величинам литохимических индикаторных показателей. Процессы последующего температурного (?) метасоматоза, а позднее и регионального метаморфизма привели к наблюдаемому нами химическому составу исследуемых образований и не всегда однозначным геохимическим характеристикам.

Рассматриваемые породы образовались в результате наложения нескольких процессов, что привело в итоге к появлению алюмокремнистых пород с минимальным содержанием примесей, вредных при производстве кварц-полевошпатовых концентратов. В России типы, параметры и области применения кварц-полевошпатового и полевошпатового сырья в различных отраслях промышленности регламентируются ГОСТ 23034-78. Рассматриваемые алюмокремнистые образования в разрезах Эльмусской и Койкарской структур полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ, предъявляемым для производства фарфора и фаянса, а также отделочной и облицовочной плитки. Результаты исследований алюмокремнистых пород Центральной Карелии показывают потенциальную возможность их использования в естественном виде и для получения кварц-полевошпатовых продуктов различного назначения.

Учитывая сходство петрогеохимического состава рассматриваемых нами образований с терригенными и вулканогенно-осадочными образованиями из разрезов палеопротерозоя, а также парагенетическую связь с вулканитами, можно увеличить масштабы находок альтернативного полевошпатового сырья. Подобные кварц-полевошпатовые образования присутствуют и в других разрезах палеопротерозоя Карельского кратона, где нет вулканических построек, но картируется большое количество силлов долеритов.

Однородность минерального и химического состава, возможность компактной добычи и обогащения (в том числе на передвижных малогабаритных установках) повышает перспективность и конкурентоспособность данного нетрадиционного полевошпатового сырья. На территории Карелии возможно нахождение потенциально перспективных объектов, пригодных для получения высококачественных кварц-полевошпатовых (или кварцевых) концентратов, что в будущем позволит существенно расширить минерально-сырьевую базу Республики Карелия и Северо-Запада России.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Березинская О.Б., Ведеев А.А.* Производственная зависимость российской промышленности от импорта и механизм стратегического импортозамещения // Вопросы экономики. 2015. № 1. С. 103-115.

2. *Петров И.М.* Критические виды минерального сырья России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2016. № 4. С. 27-30.

3. *Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П., Светов С.А.* Технологическая минералогия высококремнистых осадочных пород Карелии – нетрадиционного кварц-полевошпатового сырья // Обогащение руд. 2016. № 4. С. 22-28. DOI: 10.17580/or.2016.04.06

4. *Светова А.И.* Архейский вулканизм Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1988. 147 с.

5. *Светова Е.Н., Бубнова Т.П., Букчина О.В.* Высококремнистые породы центральной Карелии – потенциальный источник кварцевого сырья // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 6. С.106-116. DOI: 10.17076/them1247

6. *Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П., Светов С.А.* Перспективы использования архейских силицитов Центральной Карелии (Эльмусская и Койкарская структуры) для производства строительных материалов // Стройматериалы. 2017. С. 62-66.

7. *Светов С.А.* Магматические системы зоны перехода океан-континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. 230 с.

8. *Светов С.А.* Древнейшие адакиты Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2009. 115 с.

9. *Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П.* Полевошпатовое сырье Республики Карелия: состояние и перспективы освоения // Горный журнал. 2012. № 5. С. 23-26.

10. *Медведев П.В., Светов С.А., Светова А.И.* Реликты термофильной хемолитотрофной микробиоты в кремнистых породах архейского возраста (Центральная Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. № 1. С. 135-147.

11. *Светов С.А., Медведев П.В.* Мезоархейские силициты – уникальная среда сохранности ранней жизни // Литосфера. 2013. № 6. С. 3-13.

12. Металлогения Карелии / Отв. ред. С.И.Рыбаков, А.И.Голубев. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. 340 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

13. Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. 431с.

14. Стратиграфия докембрия Карелии. Опорные разрезы верхнеархейских отложений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. 190 с.

15. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Основные закономерности геохимии марганца. Сыктывкар: Коми научный центр Уральского отделения РАН, 2013. 40 с.

16. *Русаков В.Ю.* Механизмы формирования морских гидротермально-осадочных отложений (на примере четвертичных гидротермальных полей Срединно-Атлантического хребта и гидротермально-осадочных отложений среднего палеозоя Южного Урала: Автореф. дис. … д-ра геол.-минерал. наук. М.: Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского, 2014. 55 с.

17. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В.* Геохимия титана. Сыктывкар: Геопринт, 2018. 432 с.

18. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 732 с.

19. *Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L.* The «North American shale composite»: Its compilations, major and trace element characteristics // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1984. Vol. 48. Iss. 12. P. 2469-2482. DOI: 10.1016/0016-7037(84)90298-9

20. *Sugitani K., Yamamoto K., Adachi M. et al.* Archean cherts derived from chemical, biogenic and clastic sedimentation in a shallow restricted basin: examples from the Gorge Creek Group in the Pilbara Block // Sedimentology. 1998. Vol. 45. Iss. 6. P. 1045-1062. DOI: 10.1046/J.1365-3091.1998.00198.x

21. *Sugitani K.* Geochemical characteristics of Archean cherts and other sedimentary rocks in the Pilbara Block, Western Australia: evidence for Archean seawater enriched in hydrothermally-derived iron and silica // Precambrian Research. 1992. Vol. 57. Iss.1-2. P. 21-47. DOI: 10.1016/0301-9268(92)90093-4

22. *Brengman L.A., Fedo C.M., Whitehouse M.J.* Evaluating the geochemistry and paired silicon and oxygen isotope record of quartz in siliceous rocks from the ~3 Ga Buhwa Greenstone Belt, Zimbabwe, a critical link to deciphering the Mesoarchean silica cycle // Chemical Geology. 2021. Vol. 577. № 120300. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2021.12030

23. *Ledevin M.* Archean Cherts: Formation Processes and Paleoenvironments // Earth's Oldest Rocks. Second Edition. Elsevier, 2019. P. 913-938.

24. *Стрекопытов С.В., Дубинин А.В., Волков И.И.* Поведение РЗЭ, циркония и гафния в осадках и конкрециях трансти-хоокеанского профиля // Геохимия. 1995. № 7. С. 985-996.

25. *Abraham K., Hofmann A., Foley S.F. et al.* Coupled silicon-oxygen isotope fractionation traces Archaean silicification // Earth and Planetary Science Letters. 2011. Vol. 301. Iss. 1-2. P. 222-230. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.11.002

26. *Deutschmann C., Hopp J., Trieloff M., Ott U.* Entrapment history of aqueous Ÿuids in Archean cherts from the Barberton Greenstone Belt, South Africa // Precambrian Research. 2022. Vol. 368. № 106502. P. 1-14. DOI: 10.1016/j.precamres.2021.106502

27. *Boorn van den S.H.J.M., Bergen van M.J., Nijman W., Vroon P.Z.* Dual role of seawater and hydrothermal fluids in Early Archean chert formation: Evidence from silicon isotopes // Geology. 2007. Vol. 35. № 10. P. 939-942. DOI: 10.1130/G24096A.1

28. *Marin-Carbonne J., Chaussidon M., Robert F.* Micrometer-scale chemical and isotopic criteria (O and Si) on the origin and history of Precambrian cherts: implications for paleo-temperature reconstructions // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2012. Vol. 92. P. 129-147. DOI: 10.1016/j.GCA.2012.05.040

29. *Rouchon V., Orberger B.* Origin and mechanisms of K-Si-metasomatism of ca. 3.4-3.3 Ga volcaniclastic deposits and implications for Archean seawater evolution: Examples from cherts of Kittys Gap (Pilbara craton, Australia) and Msauli (Barberton Greenstone Belt, South Africa) // Precambrian Research. 2008. Vol. 165. Iss. 3-4. P. 169-189. DOI: 10.1016/j.precamres.2008.06.003

30. *Белоусов В.И., Рычагов С.Н., Сугробов В.М.* Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая конвективная система: геологическое строение, концептуальная модель, геотермальные ресурсы // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 34-50.

31. *Qiannan Hu, Xin Zhang, Fuqing Jiang et al.* Geochemical characteristics of hydrothermal sediments from Iheya North Knoll in the Okinawa Trough // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2017. Vol. 35. P. 947-955. DOI: 10.1007/s00343-017-6035-3

32. *Xiaoyu Zhang, Chunhui Tao, Xuefa Shi et al.* Geochemical characteristics of REY-rich pelagic sediments from the GC02 in central Indian Ocean Basin // Journal of Rare Earths. 2017. Vol. 35. Iss. 10. P. 1047-1058. DOI: 10.1016/S1002-0721(17)61012-3

33. *Shili Liao, Chunhui Tao, Huaiming Li et al.* Surface sediment geochemistry and hydrothermal activity indicators in the Dragon Horn area on the Southwest Indian Ridge // Marine Geology. 2018. Vol. 398. P. 22-34. DOI: /10.1016/j.margeo.2017.12.005

34. *Ledevin M., Arndt N., Simionovici A. et al.* Silica precipitation triggered by clastic sedimentation in the Archean: new petrographic evidence from cherts of the Kromberg type section, South Africa // Precambrian Research. 2014. Vol. 255. Part 1. P. 316-334. DOI: /10.1016/j.precamres.2014.10.009

35. *Светова Е.Н., Светов С.А., Данилевская Л.А.* Редкие и редкоземельные элементы в кварце как индикаторы условий минералообразования // Труды Карельского научного центра РАН. 2012. № 3. С. 137-145.

***Авторы*: Н.И.Кондрашова,** *канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник, доцент, https://orcid.org/0000-0002-2323-231X* (*Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия*; *Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия*), **Т.П.Бубнова,** *научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0003-3513-8520* (*Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия*), **П.В.Медведев,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, pmedved@krc.Karelia.ru, https://orcid.org/0000-0002-4098-5321* (*Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0