ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

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

Научная статья Геология

Пегматиты оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида: новые полевые геологические и геофизические данные

И.А.Бабенко✉, И.В.Таловина, Д.Е.Ушаков, Н.С.Крикун
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Бабенко И.А., Таловина И.В., Ушаков Д.Е., Крикун Н.С. Пегматиты оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида: новые полевые геологические и геофизические данные // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16727. С. 65-79. EDN QRFPEW

Аннотация
Приводятся новые данные о различных типах пегматитов оазиса Холмы Ларсеманн (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида), собранные в ходе сезонных полевых работ 70-й Российской антарктической экспедиции в 2024-2025 гг. В результате комплексных геолого-геофизических исследований были описаны, проанализированы и впервые систематизированы в едином контексте все пегматитовые образования данной территории, относящиеся к различным стадиям Пан-Африканского орогенеза. Наряду с ранее известными пегматитами, связанными с деформационными этапами $D_{2\text{-}3}$, D_4 и post-D_4, предложено их дополнительное разделение на основе минерально-геохимических признаков и по содержанию естественных радионуклидов на боросиликатные $D_{2\text{-}3}$, редкометалльные D_4, мусковитовые post-D_4, а также выделение двух дополнительных типов, ранее не описанных в данном регионе – калишпатовых D_4' и камерных редкометалльных пегматитов post-D_4', отличающихся по морфологии, минералогии и геохимическим характеристикам. Особое внимание уделено структурно-тектоническому контролю пегматитовых тел, их геологическому положению, изучению зональности, а также результатам гамма-спектрометрической и магнитной съемки. Изучены пегматитовые образования, содержащие редкие типоморфные минералы – турмалин, боралсилит, грандидьерит и хризоберилл. Результаты исследований указывают на значительное разнообразие условий формирования данных пегматитов, позволяют уточнить термобарические характеристики и возраст начальных и финальных стадий Пан-Африканского метаморфического события, а также подтвердить генетическую связь пегматитовых образований с деформационными событиями D_2-D_4 и реконструировать этапы раннепалозойского пегматитообразования в ходе анатектических процессов в контексте геодинамической эволюции Восточной Антарктиды и Гондваны.

Ключевые слова
пегматиты; Восточная Антарктида; оазис Холмы Ларсеманн; станция Прогресс; Пан-Африканский орогенез; редкометалльная минерализация; боросиликаты; гамма-спектрометрия

Финансирование
Исследования проводятся с помощью субсидии на выполнение Государственного задания в сфере научной деятельности на 2024 г. (№ FSRW-2024-0003).

Поступила: 17.04.2025 ***Принята: 05.06.2025*** ***Онлайн: 07.07.2025*** ***Опубликована: 07.07.2025***

Введение

Пегматиты представляют собой крайне дифференцированные позднемагматические образования, играющие ключевую роль в понимании финальных стадий эволюции магматических систем. Они являются естественными концентраторами редких и рассеянных элементов, служат источниками стратегически важных минералов и ценным объектом при изучении процессов фракционирования и дегазации расплава, а также тектоно-магматической эволюции земной коры. Поскольку пегматиты часто формируются в постметаморфической обстановке, они также являются информативными при реконструкции поздних этапов геодинамического развития регионов.

В Восточной Антарктиде пегматиты распространены в пределах древних метаморфических комплексов и на протяжении последних десятилетий неоднократно становились объектом локальных исследований. Однако систематическое и комплексное изучение этих образований до настоящего времени остается ограниченным.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Оазис Холмы Ларсеманн, расположенный в прибрежной части Земли Принцессы Елизаветы, представляет собой уникальный геологический объект, где на ограниченной территории обнажаются разновозрастные метаморфические и магматические образования, сохранившие следы нескольких глобальных тектоно-термальных событий. Наличие хорошо обнаженных пегматитовых тел, часто сохраняющих первичную зональность, делает этот район особенно ценным для изучения процессов пегматитообразования в условиях глубинной континентальной коры. Несмотря на то, что в течение последних тридцати лет этот район неоднократно привлекал внимание исследователей, до сих пор остаются невыясненными ключевые вопросы, касающиеся условий образования, временного положения и внутренней типизации этих образований [1-3]. Настоящая работа направлена на восполнение этого пробела путем комплексного исследования морфологических, минералого-геохимических и геофизических особенностей конкретных разностей пегматитов. Особое значение уделено комплексному описанию камерных и редкометалльных разновидностей пегматитов, ранее не фиксировавшихся в пределах данного региона.

В 2024-2025 гг. в ходе 70-й Российской антарктической экспедиции сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета были проведены комплексные геолого-геофизические исследования на территории п-ова Брокнес (оазис Холмы Ларсеманн, Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида). Работы были посвящены изучению верхнепротерозойских метаморфических комплексов, формирующих полуостров, их картированию и минерально-геохимическому опробованию. Другой блок включал исследование разрывных нарушений, их описание и фотофиксацию для составления тектонической схемы территории.

Геология

Восточная Антарктида представляет собой кратон, сложенный преимущественно архейскими и протерозойскими метаморфическими породами [4, 5]. Геологическое развитие региона связано с несколькими этапами орогенеза, наиболее значительными из которых являются события позднего архея, раннего протерозоя и позднего рифея – венда, приуроченные к формированию суперконтинентов Колумбия, Родиния и Гондвана [6-8]. Наибольшая обнаженность пород наблюдается в прибрежной полосе Восточной Антарктиды, где широко развиты гранулиты, гнейсы и мигматиты [9-11], а также более поздние относительно редкие интрузивные тела различных составов, включая пегматиты, формировавшиеся на поздних стадиях кристаллизации гранитоидных магм в раннем палеозое в условиях коллизионной обстановки [12].

В строении оазиса Холмы Ларсеманн, расположенного на побережье залива Прюдс в Восточной Антарктиде, участвуют орто- и парагнейсы амфиболитовой и гранулитовой фаций [13], образующие разнородный комплекс метаморфических формаций. Основу геологического разреза исследуемой территории составляют: верхнерифейские мафические гранулиты Нелла, лейкогнейсы Жуньшань, ортогнейсы Бланделл; среднерифейские парагнейсы формации Браттстранд, подразделяемые на несколько субформаций – метапелиты Стюве, метапелиты оз. Феррис, парагнейсы Брокнес, метапсаммиты Гентнер, лейкогнейсы Уайт-Хилл [14] (рис.1).

Мафические гранулиты Нелла состоят из орто- и клинопироксена, амфибола, плагиоклаза и биотита с незначительным содержанием кварца и магнетита. Минеральный состав остальных комплексов пород преимущественно представлен кварцем и полевым шпатом с переменным содержанием биотита, граната, силлиманита и кордиерита. Считается, что протопородами для ортогнейсов выступали мафические и кислые образования возрастом 940-1126 млн лет [15]. Время образования протолитов парапород остается предметом дискуссий – одни исследователи относят возраст осадконакопления к венду (600-575 млн лет) [16-18] и даже кембрию (515 млн лет) [19], другие же считают, что данные процессы произошли намного раньше, в среднем-верхнем рифее (1100-970 млн лет) [15, 20]. Общепринятым среди исследователей является мнение о двух масштабных высокотемпературных метаморфических процессах, затронувших данную территорию около 1000-900 млн лет назад в эпоху Гренвильского (D_1) и около 580-510 млн лет назад в эпоху Пан-Африканского орогенеза (D_{2-4}) [13, 20-22]. С последним связано широкое развитие процессов анатексиса, внедрения кембрийских гранитоидов Прогресс и образования целого ряда различных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 65-79
© И.А.Бабенко, И.В.Таловина, Д.Е.Ушаков, Н.С.Крикун, 2025

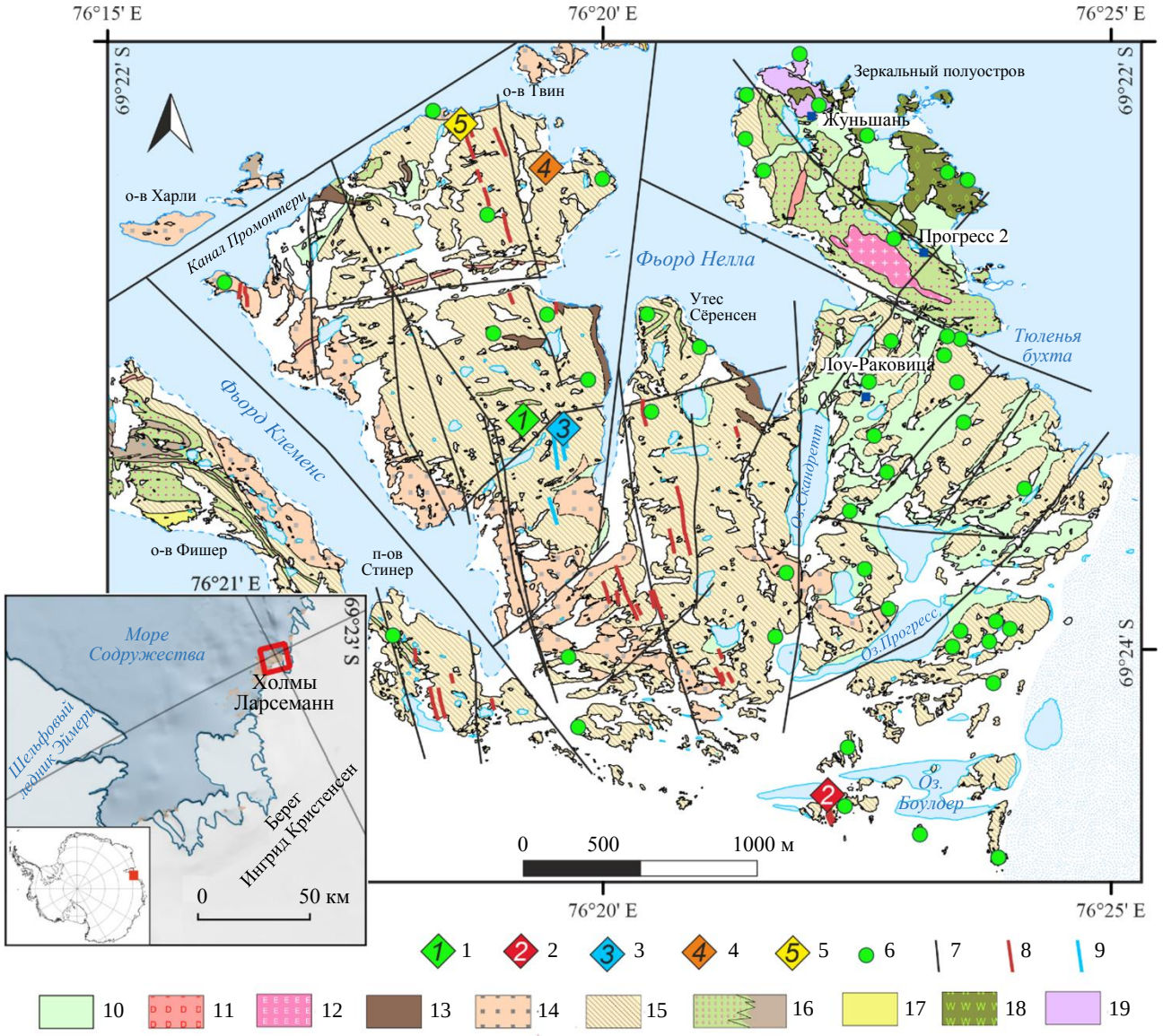


Рис.1. Положение изучаемой территории на карте Антарктиды и геологическая схема п-ова Брокнес, оазис Холмы Ларсеманн [14] (с дополнениями авторов)

Опорные обнажения 1-5: 1 – боросиликатный пегматит D_{2-3}, 2 – редкометалльный пегматит D_4; 3 – калишпатовый пегматит D_4', 4 – мусковитовый пегматит post-D_4, 5 – камерный пегматит post-D_4'; 6 – тела боросиликатных пегматитов D_{2-3}; 7 – разломы; 8 – жилы редкометалльных пегматитов D_4; 9 – жилы калишпатовых пегматитов D_4'; 10 – рыхлые осадки (Q); 11 – микрогранит Прогресс (ϵ_1); 12 – граниты Прогресс (ϵ_1); парагнейсы формации Браттстранд (R_3) 13-16: 13 – лейкогнейсы Уайт-Хилл, 14 – метапсаммиты Гентнер, 15 – парагнейсы Брокнес, 16 – метапелиты оз. Феррис / Стюве; 17 – ортогнейсы Бланделл (R_3); 18 – гнейсы Жуньшань (R_3); 19 – мафические гранулиты Нелла (R_3)

по структурно-тектоническому положению и зональности пегматитовых тел, являющихся основным объектом исследования в рамках данной статьи. На территории оазиса предшественниками выделяется два [1, 2], а по другим данным – три [3] типа пегматитов, приуроченных к различным стадиям Пан-Африканского орогенеза – D_{2-3} (578-531 млн лет) [1, 23], D_4 (526-510 млн лет) [23], post-D_4 (ок. 515 млн лет) [3].

В данной статье предлагается дополнить существующую типизацию пегматитов, учитывая новые геолого-геофизические данные по их структурно-тектонической позиции, зональности и особенностям минерального состава с выделением боросиликатных D_{2-3}, редкометалльных D_4, мусковитовых post-D_4, а также двух новых типов – калишпатовых D_4' и камерных редкометалльных пегматитов post-D_4'. Помимо указанных отличительных признаков, эти образования различаются по возрасту, составу протолита, минерально-геохимическим и структурно-текстурным особенностям.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Методы

Полевые комплексные геолого-геофизические работы в районе станции Прогресс включали проведение геологических маршрутов, описание опорных обнажений, магниторазведку и гамма-спектрометрическую съемку. В ходе работ встречено и описано 87 проявлений пегматитов. Некоторые тела пегматитов были первично выделены на основании дешифрирования аэрофотоснимков, полученных при составлении ортофотопланов местности, снятых при помощи БПЛА DJI Mavic Air 2 (DJI, КНР). Отдельные пегматитовые тела выделялись по результатам наземной магнитной съемки, проведенной в масштабе 1:10000 с помощью оверхаузеровского магнитометра MiniMag (ООО «Геодевайс», Россия). На опорных обнажениях пегматитов проводилось изучение геологического строения, связь с тектоническими ослабленными зонами, детальное изучение каждой зоны, а также гамма-спектрометрические измерения как по локальным объектам, так и вдоль профилей с использованием прибора МКСП-01 (ООО «НТЦ «РАДЭК», Россия), время экспозиции составляло от 600 до 1800 с. Отдельные образцы были оперативно доставлены в Санкт-Петербург и проанализированы в лаборатории Института геологии и геохронологии докембрия РАН с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора СПЕКТРОСКАН МАКС-GVM (ООО «НПО «СПЕКТРОН», Россия).

Результаты

Наиболее представительные пегматитовые тела разных типов описаны в опорных обнажениях: боросиликатный D_{2-3} (№ 1), редкометалльный D_4 (№ 2), калишпатовый D_4' (№ 3), мусковитовый post-D_4 (№ 4), камерный post-D_4' (№ 5) (рис.1).

Рассмотрим подробнее выделенные типы пегматитов, включая как впервые описанные разновидности, так и ранее упоминавшиеся в литературе [1-3, 23], но не изучавшиеся в едином контексте и остававшиеся недостаточно охарактеризованными.

Боросиликатные пегматиты D_{2-3}. Самые ранние пегматиты на исследуемой территории соотносятся с деформационными процессами D_2 и D_3, имевшими место в ходе Пан-Африканского орогенеза [1], и представлены боросиликатными пегматитами D_{2-3}. Считается, что они были сформированы в результате дифференциации расплавов, возникших в ходе процессов частичного плавления богатых боросиликатами парагнейсов в раннем палеозое 578-531 млн лет назад [1, 23]. В ходе последующих процессов эти образования были деформированы [2]. Пегматитовые тела D_{2-3} были встречены в 48 точках наблюдения, главным образом среди парагнейсов субформации Брокнес, и реже – метапсаммитов Гентнер. В структурном плане данные породы формируют субсогласные с вмещающими метаморфитами линзы и жильные тела протяженностью до нескольких десятков метров и мощностью до 1-2 м (рис.2), падение которых в большинстве случаев соответствует падению вмещающих пород. Контакты четкие, неровные. Эти пегматиты не обладают какой-либо явно выраженной зональностью, их породообразующими минералами являются калиевый полевой шпат и плагиоклаз, серый или молочно-белый кварц и крупночешуйчатый биотит, а их отличительная особенность заключается в значительном содержании редких боросиликатных минералов – дюмортьерита, призматина, грандидьерита, боралсилита и турмалина (табл.1) [2, 3, 24]. Особое распространение боровая минерализация получила в западной части оазиса Холмы Ларсеманн на п-ове Стурнес, что послужило причиной для создания на его территории особо охраняемой природной зоны [25].

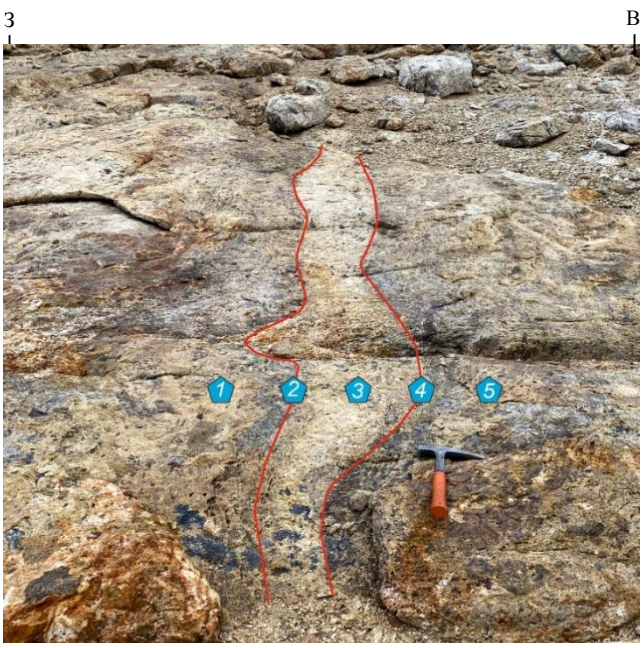


Рис.2. Жильное тело боросиликатного пегматита D_{2-3} (опорное обнажение № 1) во вмещающих парагнейсах субформации Брокнес (длина молотка для масштаба – 30 см)
1-5 – точки гамма-спектрометрических наблюдений

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 65-79
© И.А.Бабенко, И.В.Таловина, Д.Е.Ушаков, Н.С.Крикун, 2025

Таблица 1

Сравнительная геолого-минералогическая характеристика различных типов пегматитов оазиса Холмы Ларсеманн

Характеристики	Тип пегматита				
	Боросиликатные пегматиты D_{2-3}	Редкометалльные пегматиты D_4	Калишпатовые пегматиты D_4'	Мусковитовые пегматиты post-D_4	Камерные пегматиты post-D_4'
Возраст, млн лет	578-531 [1, 23]	526-510 [23]	521-517 [1]	515? [3]	?
Распространение	Повсеместное	Западная и центральная части п-ова Брокнес	Западная и центральная части п-ова Брокнес	Северо-западная часть п-ова Брокнес + острова	Северо-западная часть п-ова Брокнес
Вмещающая порода	Парагнейсы формации Браттстранд (средний рифей)				
Форма залегания	Линзы [26] / жильные тела	Жилы	Жилы	Жилы / линзы	Линзы
Зональность	Отсутствует	Ясная	Ясная	Ясная	Ясная
Температура образования, °С	750-800 [3]	>800 [3]	550-650 [27]	490-580 [3]	350-500? [28-30]
Давление, ГПа	0,4-0,7 [3]	>0,4-0,7 [3]	0,15-0,45 [27]	0,35-0,2 [3]	>0,25? [28]
Эффективная активность $A_{эф}$, Бк/кг	56,70-59,00	61,50-103,00	17,40-206,00	45,90-67,60	52,20-910,00
Преобладающий полевой шпат	Калиевый полевой шпат + плагиоклаз	Калиевый полевой шпат + плагиоклаз	Калиевый полевой шпат	Калиевый полевой шпат	Калиевый полевой шпат
Преобладающий тип слюды	Биотит	Биотит	Биотит	Мусковит	Биотит
Кварц SiO_2	Серый	Белый	Серый	Светло-серый	Серый, дымчатый
Силлиманит Al_2SiO_5	XXX	XXX			
Андалузит Al_2SiO_5	(*) [2]			(*) [3]	XXX?
Берилл $Al_2Be_3[Si_6O_{18}]$		?		XXX [3]	
Турмалин $NaR_3Al_6(OH)_{1+3}\|(BO_3)_3[Si_6O_{18}]$	X / XXX	XXX	XXX	X [3]	
Гранат (альмандин) $Fe^{2+}{}_3Al_2[SiO_4]_3$	XXX	XXX	XXX		X
Кордиерит $Al_3Mg_2[AlSi_5O_{18}]$	XXX				
Ортопироксен		X [26]			
Грандидьерит $(Mg, Fe)Al_3[O\|BO_4\|SiO_4]$	X / XXX [2, 3]				
Боралсилит $Al_{16}B_6Si_2O_{37}$	XXX [3, 24]	X [3]			
Призматин $(Mg, Na)_2Mg(Al, Fe, Mg)_6[Si_2O_7][(Al, Si)_2(Si, B)O_{10}]O_4(O, OH)$	XXX				
Дюмортьерит $Al_4[(Al_4BSi_3)O_{19}OH]$	(*) [3]	X [3]			
Вердингит $Al_8[(Mg, Fe)_2Al_4(Al, Fe)_2Si_4(B, Al)_4]O_{37}$	X [24]				
Апатит $Ca_5[(PO_4)_3\|(F, Cl, OH)]$	X [24]	X	?		XXX
Монацит $(Ce, La, Y)[PO_4]$	X [3]	X [26]	X		X
Ксенотим YPO_4	X [24]	X [24]	X		X
Циркон $(Zr, Hf, Th, U, TR, Ca, Na)[(Si, Al, P, S)(Ti, Zr, Th)_3O_7]$	X [24]	X [24]	X [1]		X
Урансодержащий минерал					XXX
Хризоберилл Al_2BeO_4		XXX			
Магнетит $Fe^{2+}Fe^{3+}{}_2O_4$	XXX	XXX	XXX		X
Шпинель $MgAl_2O_4$		XXX [26]			
Ильменит $FeTiO_2$		X [26]			
Рутил TiO_2	X [24]	X [23]			X
Корунд Al_2O_3		(*) [26]			
Диаспор $AlOOH$		(*) [26]			
Пирит FeS_2	X [24]				XXX

Примечание. XXX – минерал встречается в значительном количестве; X – минерал встречается в небольших зернах в шлифах или в шлихе; (*) – вторичный минерал; ? – требуется уточнение. Собственные полевые определения выполнены визуально или с применением рентгенофлуоресцентного анализа.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

По данным гамма-спектрометрии выявленные боросиликатные пегматиты D_{2-3} практически не отличаются от вмещающих парагнейсов содержаниями изотопов калия, урана и тория (табл.2).

Таблица 2

Средние содержания естественных радионуклидов и эффективная активность боросиликатного пегматита D_{2-3} и вмещающих парагнейсов субформации Брокнес по результатам гамма-спектрометрии (опорное обнажение № 1)

Зона	Содержание				
	^{40}K, %	U (^{226}Ra), ppm	^{232}Th, ppm	$A_{эф}$, Бк/кг	Th/U
Вмещающие парагнейсы	5,34	1,50	41,82	56,70	27,84
Контакт вмещающих парагнейсов и пегматитов	7,31	1,36	42,10	57,10	31,05
Центральная часть пегматитового тела	7,39	1,20	43,62	59,00	36,35

Редкометалльные пегматиты D_4. Внедрение более поздних редкометалльных пегматитов D_4 также связывается с Пан-Африканским орогенезом [1]. Предполагается, что они были сформированы в результате дифференциации расплава, образованного из нескольких источников в ходе процессов анатексиса [3] 526-510 млн лет назад [23]. Пегматитовые тела D_4 были зафиксированы в 35 точках наблюдения, в основном среди парагнейсов субформации Брокнес. В структурном отношении данные образования формируют протяженные (до 150-200 м) субвертикальные секущие жилы мощностью до 1 м север-северо-западного простирания, контролируемые субмеридиональными разрывными нарушениями. Данный тип пегматитов наиболее проявлен в западной части п-ова Брокнес (см. рис.1). Периодически отмечается их секущее положение по отношению к пегматитам D_{2-3}. Часто по данным телам развиваются более поздние линейные деформации, представляющие собой зоны милонитизации мощностью до 20 см и крупные протяженные трещины. В качестве породообразующих минералов данных пегматитов выступают оранжевый и розоватый до мясо-красного калиевый полевой шпат, плагиоклаз, белый кварц и крупночешуйчатый биотит. В качестве акцессорных минералов выделяются магнетит, шпинель, гранат (альмандин), силлиманит, турмалин, а также впервые описываемый на территории оазиса Холмы Ларсеманн и в целом на территории Земли Принцессы Елизаветы хризоберилл, образующий достаточно крупные (до 2-3 см) характерные двойники и тройники. Интересно, что подобные абиссальные пегматиты, описываемые в других частях Земли, никогда не характеризуются одновременным развитием боровой и бериллиевой минерализации [31].

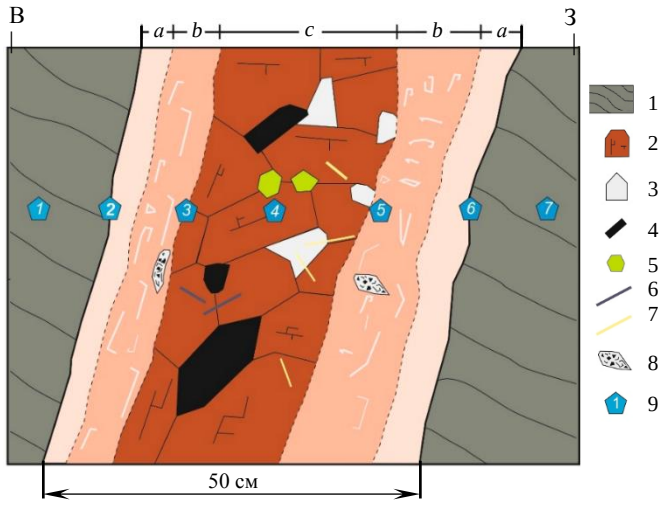


Рис.3. Схематическая зарисовка (в разрезе) зонального строения жилы редкометалльных пегматитов D_4 (опорное обнажение № 2)

Зоны: *a* – приконтактовая; *b* – графическая; *c* – блоковая
1 – парагнейсы субформации Брокнес; 2 – калиевый полевой шпат; 3 – кварц; 4 – биотит; 5 – хризоберилл; 6 – турмалин; 7 – силлиманит; 8 – графические сростки кварца и турмалина; 9 – точки гамма-спектрометрических наблюдений

Все жилы данного типа имеют явное зональное строение (рис.3) с постепенными контактами между зонами (от краев к центру, на примере калишпатового пегматита из опорного обнажения № 2):

a – приконтактовые зоны представлены мелко-среднекристаллическими полевошпат-кварцевыми агрегатами. Наблюдаются скопления магнетита в западных, как правило, лежачих приконтактовых зонах;

b – графическая зона проявлена не повсеместно, представляет собой крупные агрегаты полевого шпата с немногочисленными ихтиоглиптами кварца и редкими небольшими (1-2 см) графическими срастаниями кварца и турмалина;

c – блоковая зона представлена крупными идиоморфными кристаллами калиевого полевого шпата, часто с крупночешуйчатым биотитом и значительно реже квар-

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 65-79
© И.А.Бабенко, И.В.Таловина, Д.Е.Ушаков, Н.С.Крикун, 2025

цем. В данной зоне в некоторых редкометалльных жилах отмечаются правильные двойники и тройники хризоберилла размером до нескольких сантиметров, кристаллы силлиманита и турмалина.

Редкометалльные пегматиты D_4 отличаются незначительно повышенными по отношению к вмещающим парагнейсам содержаниями естественных радионуклидов, а также эффективной активностью (табл.3).

Таблица 3

Средние содержания естественных радионуклидов и эффективная активность редкометалльного пегматита D_4 и вмещающих парагнейсов субформации Брокнес по результатам гамма-спектрометрии (опорное обнажение № 2)

Зона	Содержание				
	^{40}K, %	U (^{226}Ra), ppm	^{232}Th, ppm	$A_{эф}$, Бк/кг	Th/U
Вмещающие парагнейсы	3,05	1,92	45,30	61,50	23,64
Контакт вмещающих парагнейсов и пегматитов	3,68	3,24	53,87	74,10	16,61
Блоковая зона пегматита	5,25	4,38	75,03	103,00	17,13

Калишпатовые пегматиты D_4' распространены на изучаемой территории значительно реже, они были встречены всего в трех точках наблюдения в западной части п-ова Брокнес. По данным уран-свинцового изотопного датирования, их возраст составляет 517-521 млн лет [1]. По своему структурному положению и приуроченности к разрывным нарушениям данные образования не отличаются от ранее описанных редкометалльных пегматитов D_4 и не выделяются другими исследователями в отдельную группу. Между тем эти пегматиты надежно выделяются по своему минеральному составу – они фактически нацело сложены крупными (до 30-40 см) белыми удлиненными кристаллами ортоклаза, часто с двойниками, различимыми макроскопически. В подчиненном количестве отмечается серый кварц, чаще всего встречающийся в зальбандах жил или в виде цепочек небольших (до 1 см) кварцевых агрегатов, формирующихся в блоковой зоне на границах кристаллов ортоклаза, и крупночешуйчатый идиоморфный биотит. В качестве акцессорных минералов отмечаются кристаллы магнетита и граната (альмандина). Данные пегматиты также характеризуются зональным строением (рис.4).

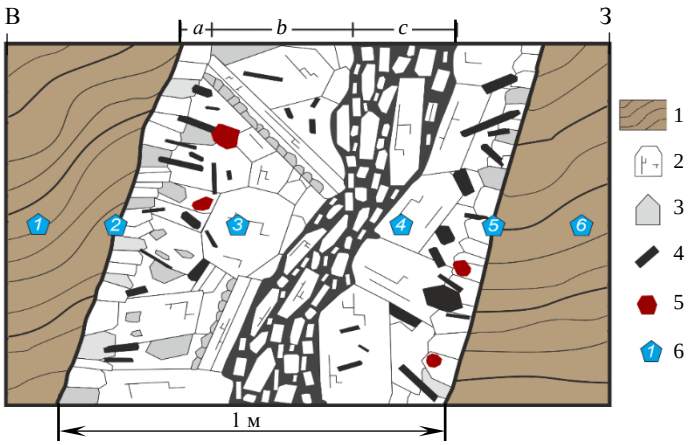


Рис.4. Схематическая зарисовка (в разрезе) строения жилы калишпатовых пегматитов D_4' (опорное обнажение № 3)
Зоны: *a* – приконтактовая (Ort-Bt-Q-(Mag); *b* – блоковая (Ort-Q); *c* – милонитизации (Pl-Bt)
Ort – ортоклаз; Bt – биотит; Q – кварц; Mag – магнетит;
1 – парагнейсы; 2 – ортоклаз; 3 – кварц; 4 – биотит; 5 – гранат;
6 – точки гамма-спектрометрических наблюдений

По данным гамма-спектрометрии калишпатовые пегматиты D_4' также отличаются от редкометалльных повышенными содержаниями изотопов тория, более высокими значениями эффективной активности и торий-уранового соотношения (табл.4).

Таблица 4

Средние содержания естественных радионуклидов и эффективная активность калишпатового пегматита D_4' и вмещающих парагнейсов субформации Брокнес по результатам гамма-спектрометрии (опорное обнажение № 3)

Зона	Содержание				
	^{40}K, %	U (^{226}Ra), ppm	^{232}Th, ppm	$A_{эф}$, Бк/кг	Th/U
Вмещающие парагнейсы	3,58	1,13	12,20	17,40	10,77
Контакт вмещающих парагнейсов и пегматитов	6,41	2,86	79,32	107,00	27,73
Блоковая зона жилы	8,00	4,65	152,80	206,00	32,83

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN QRFPEW

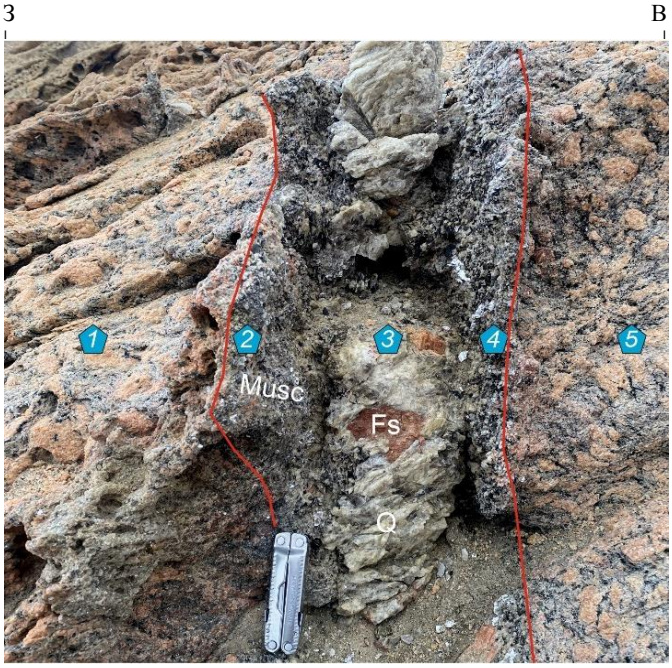


Рис.5. Жила мусковитового пегматита post-D$_4$ в парагнейсах субформации Брокнес (опорное обнажение № 4). Длина ножа 10 см
Q – кварц; Musc – мусковит; Fs – калиевый полевой шпат

Мусковитовые пегматиты post-D$_4$. Более поздние пегматитовые образования, связанные с Пан-Африканским орогенезом, выделяются некоторыми исследователями в особую группу [3]. Предполагается, что они образованы в одно время с гранитами Прогресс 515 млн лет назад из общего протолита [22]. Данные образования имеют крайне ограниченное распространение на исследуемой территории (северо-запад п-ова Брокнес); пегматитовые тела post-D$_4$ были встречены всего в двух точках наблюдения. Они представлены секущими и субсогласными с вмещающими породами жилами и линзами север-северо-западного простирания, протяженностью до 100-150 м и мощностью до 30 см, часто с явным зональным строением (рис.5). Породообразующими минералами являются калиевый полевой шпат бледно-оранжевого цвета, крупночешуйчатый идиоморфный мусковит и светло-серый кварц.

Подобные пегматиты, описываемые в работе [3], на некоторых северных островах оазиса, также могут содержать берилл. Именно наличие крупнокристаллического мусковита, не встреченного в других пегматитовых образованиях, позволяет выделить данные пегматиты в отдельную группу. Это обстоятельство, а также возможное наличие берилла позволяет говорить о том, что внедрение мусковитовых пегматитов post-D$_4$ проходило при более низких температурах, и, вероятно, об их более молодом возрасте. Данные гамма-спектрометрии указывают на относительную обедненность рассматриваемых пород радиоактивными элементами по сравнению с редкометалльными, калишпатовыми и камерными пегматитами (табл.5).

Таблица 5

Средние содержания естественных радионуклидов и эффективная активность мусковитового пегматита post-D$_4$ и вмещающих парагнейсов субформации Брокнес по результатам гамма-спектрометрии (опорное обнажение № 4)

Зона	Содержание				
	^{40}K, %	U (^{226}Ra), ppm	^{232}Th, ppm	$A_{эф}$, Бк/кг	Th/U
Вмещающие парагнейсы	5,25	2,49	32,80	45,90	13,18
Контакт вмещающих парагнейсов и пегматитов	4,09	2,04	34,78	48,00	17,07
Центральная зона жилы	5,11	3,71	48,47	67,60	13,05

Камерные пегматиты post-D$_4$'. Миароловые пегматиты – наиболее интересные геологические образования. На данный момент в общем доступе нет информации об обнаружении камерных пегматитовых тел в Антарктиде. Подобные образования являются редкими для древних глубокометаморфизованных пород, поэтому обнаружение камерного пегматита среди метаморфитов Холмов Ларсеманн представляется весьма важной находкой. Первоначально миароловый пегматит был обнаружен по многочисленным обломкам кристаллов кварца с гранями свободного роста, встречающихся среди делювиальных отложений в верхепротерозойских мигматизированных парагнейсах на западе п-ова Брокнес. Продолжение поисков привело к достаточно крупному (1×0,5×1 м^3) зональному образованию, горизонтально залегающему субсогласно среди парагнейсов Брокнес. Наличие асимметричной зональности, заполненных кристаллами миароловых пустот (рис.6), а также резкое отличие в содержании естественных изотопов и их активности позволяет выделить данный пегматит в особую группу.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 65-79
© И.А.Бабенко, И.В.Таловина, Д.Е.Ушаков, Н.С.Крикун, 2025

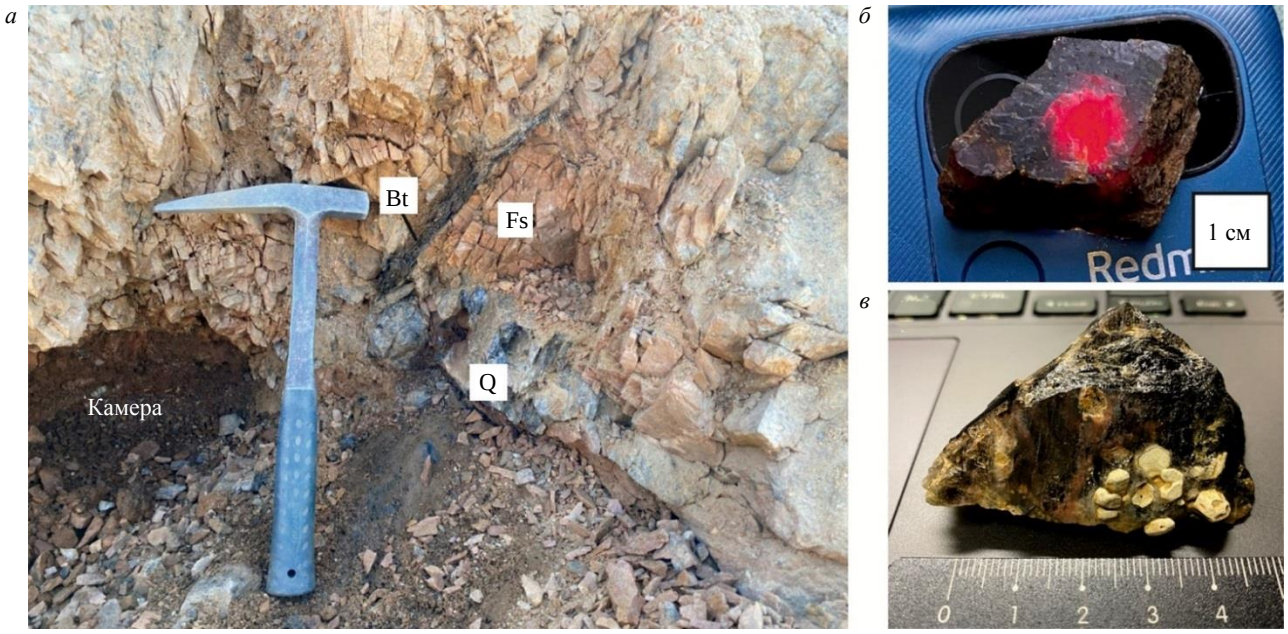


Рис.6. Строение камерного пегматита post-D$_4$' (*а*) и отдельные минералы, найденные в нем, – апатит, подсвеченный фонариком (*б*), и дымчатый кварц с включениями сильно выветрелого неизвестного минерала (*в*)

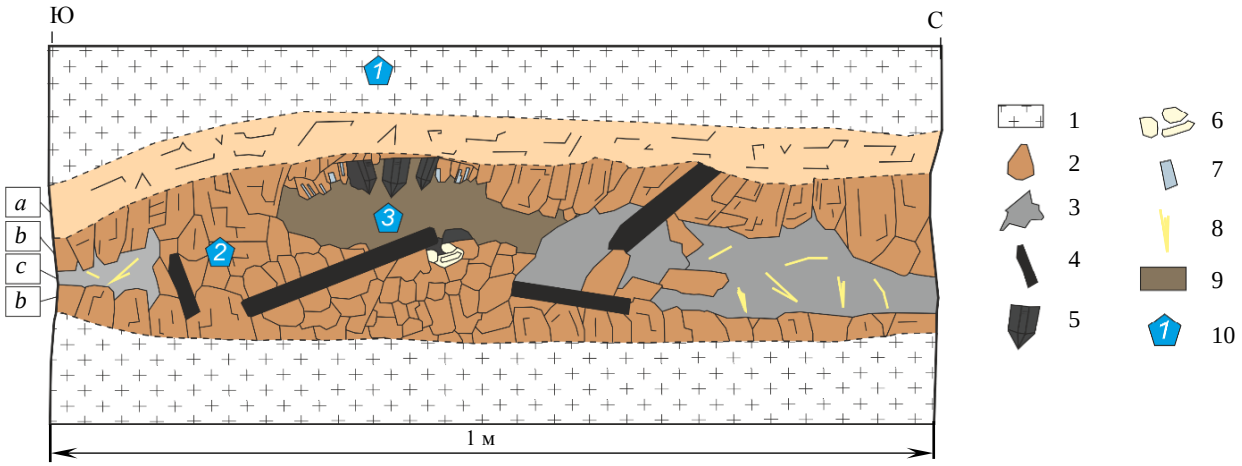


Рис.7. Схематическая зарисовка (в разрезе) строения камерного пегматита (опорное обнажение № 5)

Зоны: *а* – графическая, *b* – блоковая, *с* – кварцевое ядро

1 – парагнейсы Брокнес; 2 – калиевый полевой шпат; 3 – кварцевое ядро; 4 – биотит; 5 – кристаллы кварца; 6 – ильменит (?); 7 – плагиоклаз; 8 – андалузит (?); 9 – глина из миаролы; 10 – точки гамма-спектрометрических наблюдений

В строении описываемого камерного пегматита принимают участие несколько постепенно сменяющих друг друга зон (рис.7):

а – графическая зона, представляющая собой не всегда ясно выраженные закономерные срастания калиевого полевого шпата и кварца;

b – блоковая зона, выполненная крупными агрегатами калиевого полевого шпата с единичными крупными (до 30 см) кристаллами биотита (рис.6, *а*). В данной зоне отмечаются многочисленные миароловые пустоты размером до 15-30 см, с кристаллами дымчатого кварца (рис.6, *в*), калиевого полевого шпата, голубоватого ирризирующего плагиоклаза, рутила (в виде включений в кварце), ильменита, коричневато-красного апатита (рис.6, *б*) с включениями иттриевого монацита, а также темные радиоактивные скрытокристаллические разности и несколько не определенных на данный момент выветрелых минералов. Полости заполнены рыхлым глинистым веществом с большим количеством мелких золотистых кристаллов ксенотима и монацита;

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

с – ядро, сформированное сплошными крупными кварцевыми агрегатами серого цвета с многочисленными, часто изогнутыми зеленовато-желтыми матовыми кристаллами, вероятно, андалузита, размером до 7-10 см в длину и редкими включениями пирита.

Гамма-спектрометрические наблюдения, проведенные вдоль профиля вкрест зональности пегматитового тела, демонстрируют одни из наиболее высоких на участке работ содержания естественных радионуклидов, а также значения эффективной активности (табл.6).

Таблица 6

Средние содержания естественных радионуклидов и эффективная активность в камерном пегматите post-D_4' и вмещающих мигматизированных метаморфитов по результатам гамма-спектрометрии (опорное обнажение № 5)

Зона	Содержание				
	^{40}K, %	U (^{226}Ra), ppm	^{232}Th, ppm	$A_{эф}$, Бк/кг	Th/U
Вмещающие мигматизированные метаморфиты	5,36	0,70	39,00	52,20	55,47
Блоковая зона пегматитового тела	10,89	21,71	592,00	798,00	27,27
Миароловая полость	7,21	39,85	663,70	910,00	16, 66

Данное пегматитовое тело вместе с вмещающими мигматизированными парагнейсами выделяется также и по зафиксированной в ходе работ отрицательной линейной магнитной аномалии протяженностью около 150 м и шириной до 30 м.

Обсуждение результатов

На территории оазиса Холмы Ларсеманн выделяется несколько типов пегматитов, отождествляемых с Пан-Африканскими орогенными событиями (ок. 580-510 млн лет). Их образование приурочено к глобальному пику тектоно-магматической активности в раннем палеозое, проявившемуся на значительных площадях по всей Земле в период коллизионного орогенеза и сборки суперконтинентов [32].

В последнее время предпринималось несколько попыток систематизировать информацию о пегматитах оазиса Холмы Ларсеманн, выяснить условия и порядок их образования. Одной из главных проблем в исследовании является то, что абсолютные датировки разных типов пегматитов не всегда являются показательными, так как результаты часто могут накладываться друг на друга или различаться лишь в пределах среднеквадратичного отклонения. По калишпатовым, мусковитовым и камерным пегматитам получено крайне мало достоверных данных об их абсолютном возрасте и термобарических условиях образования, или же таковых данных нет в принципе. С этой точки зрения большую ценность представляют первичные полевые данные о взаимоотношении данных типов пегматитов.

Предполагается, что процессы внедрения первых пегматитов связаны с деформационными событиями D_2 и D_3, приведшими к образованию зон растяжения субмеридионального простирания [1]. В пегматитах D_{2-3} обильно проявлена боровая минерализация, а также были найдены очень редкие (грандидьерит, призматин) и даже новые минералы, ранее описанные только в метеоритах (боралсилит) [3, 24, 25]. На основании данных о *PT*-условиях устойчивости боралсилита предполагается, что пегматиты D_{2-3} могли быть образованы при температуре 750-800 °С и давлении 0,4-0,7 ГПа (см. табл.1) при частичном плавлении богатых бором парагнейсов [3]. Результаты определения абсолютного возраста данных образований, полученных по монациту и циркону различными авторами, неплохо соотносятся между собой – 578-531 млн лет [23] и 562-534 млн лет [1] и соответствуют времени тектоно-магматического события, приведшему к частичному плавлению вмещающих пород. Считается, что в ходе последующих процессов данные тела были смяты в складки, чаще всего согласного характера с вмещающими породами, и в отдельных случаях нарушены разрывными дислокациями, по которым происходило внедрение более поздних пегматитов.

По данным полевых наблюдений, пегматитовые образования D_{2-3} встречаются повсеместно на территории работ в виде линз и непротяженных жильных тел мощностью до первых метров с неровными контактами, залегающими, как правило, согласно с вмещающими породами.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 65-79
© И.А.Бабенко, И.В.Таловина, Д.Е.Ушаков, Н.С.Крикун, 2025

На п-ове Брокнес в пегматитах D_{2-3} практически не наблюдается боровая минерализация, ее наиболее крупные проявления сконцентрированы в западной части оазиса, на п-ове Стурнес. По данным гамма-спектрометрических наблюдений, пегматиты D_{2-3} не демонстрируют существенных отличий по содержанию радионуклидов от вмещающих парагнейсов Брокнес и метапсаммитов Гентнер, при этом характеризуясь пониженными значениями по сравнению с редкометалльными D_4, калишпатовыми D_4' и камерными post-D_4' пегматитами. Это может быть связано как с высокотемпературными условиями кристаллизации данных пегматитов, так и с усилением миграции Th и U в ходе последующих процессов метаморфизма [33].

Далее на участки, испытавшие растяжение в ходе события D_3, наложились поздние деформационные процессы D_4 [1], которые привели к дальнейшему растяжению и внедрению пегматитов D_4 в ослабленные зоны. В этих породах также были обнаружены редкие включения боралсилита, на основании чего предполагается, что пегматиты D_4 были образованы в сходных с пегматитами D_{2-3} термобарических условиях [3]. Данные датировок по монациту предполагают, что пегматиты D_4 были сформированы 526-510 млн лет назад [23] в результате частичного плавления субстрата из нескольких источников [3]. По полевым наблюдениям, пегматиты D_4 преимущественно локализованы в западной и центральной частях п-ова Брокнес в пределах полосы длиной 5 км при ширине около 2 км в зоне развития субмеридиональных разрывных нарушений, выделенных в ходе геологических маршрутов и в ходе предыдущих исследований. По данным гамма-спектрометрических наблюдений, редкометалльные пегматиты D_4 характеризуются пониженными содержаниями естественных радионуклидов по сравнению с калишпатовыми D_4' и камерными пегматитами, но демонстрируют повышенные значения относительно пегматитов D_{2-3} и мусковитовых пегматитов post-D_4. Вероятнее всего, это связано с тем, что данный тип пегматитов кристаллизовался в условиях высоких температур и давлений, когда Th и U в значительной степени оставались в расплаве. Интересным и важным является присутствие в этих образованиях развитой высокотемпературной минеральной ассоциации калиевый полевой шпат – силлиманит – хризоберилл. Согласно многочисленным исследованиям [34-36], хризобериллы в пегматитах, как правило, образуются по ранее сформированным кристаллам берилла. Тем не менее, отсутствие реликтов изначальных бериллиевых минералов и высокая степень идиоморфизма обнаруженных авторами кристаллов хризоберилла в пегматитах D_4 позволяют предполагать его первичную природу. Кроме того, наличие хризоберилла может указывать на локальное обогащение расплава глиноземом за счет вмещающих пород [37, 38]. Бериллий при этом мог быть мобилизован из метаморфических бериллиевых минералов (например, сапфирина $Mg_{2,73}Fe_{1,00}Al_{1,14}Be_{0,12}B_{0,01}Si_{2,4}O_{20}$), как это описывается в гранитных пегматитах комплекса Напьер, Антарктида [31]. Данное обстоятельство позволяет предполагать более высокотемпературный характер формирования редкометалльных пегматитов D_4 [27, 31, 38].

Редкие калишпатовые пегматиты D_4', встречающиеся локально в зоне развития редкометалльных пегматитов D_4 и не отличающиеся от них по своему структурному положению, не выделяются другими исследователями в отдельный тип. Тем не менее, по их минеральному составу (в первую очередь по преобладанию крупных (30-40 см) кристаллов калиевого полевого шпата) можно предполагать, что данные пегматиты были образованы позднее и при более низких температурах, чем редкометалльные пегматиты D_4'. Это заключение подтверждается результатами датировок цирконов из идентичных светлоокрашенных пегматитов, согласно которым возраст образования этих тел составляет 521-517 млн лет [1]. Калишпатовые пегматиты, как правило, формируются при температуре в диапазоне 550-650 °C [39]. Такие параметры характерны для позднемагматической и пневматолитово-гидротермальной стадии минералообразования, когда остаточные растворы, насыщенные летучими компонентами, кристаллизуются в трещинах вмещающих пород. Кроме того, по данным гамма-спектрометрических наблюдений, калишпатовые пегматиты D_4' характеризуются более высокими содержаниями радионуклидов, чем боросиликатные D_{2-3}, редкометалльные D_4 и мусковитовые пегматиты post-D_4. Это может объясняться тем, что калиевый полевой шпат имеет тенденцию к удержанию радионуклидов в своей структуре, а указанные температуры способствуют накоплению тория и урана в некоторых минералах [40].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Еще одним более поздним типом пегматитов, выделяемым лишь в работах [3, 23], являются мусковитовые пегматиты post-D_4. Предполагается, что данный тип наиболее удален от источника расплава и образован при более низких температурах (490-580 °С) и давлении <0,4 ГПа [3]. В настоящее время в открытом доступе отсутствуют данные о возрасте этих тел, но в работе [3] демонстрируется, что мусковитовые пегматиты по изотопным характеристикам близки к кембрийским гранитам Прогресс (см. рис.1), на основании чего предполагается, что время их образования может составлять около 515 млн лет [41]. Данные пегматиты на исследуемой территории имеют крайне ограниченное распространение. Географически они локализованы в северной части ослабленной зоны, залеченной редкометалльными и калишпатовыми пегматитами D_4. По результатам гамма-спектрометрических наблюдений данные образования обладают одними из самых низких среди зафиксированных пегматитов значениями содержания естественных изотопов – мусковит и кварц слабо аккумулируют уран и торий, и радионуклиды могут мигрировать с более поздними гидротермальными растворами, снижая их концентрацию в породе. По всей видимости, мусковитовые пегматиты должны быть связаны с завершающим этапом анатектических процессов.

Особый интерес представляет обнаружение камерных пегматитов на территории оазиса Холмы Ларсеманн. Подобные образования не были описаны ранее на исследуемой площади, и данная находка требует дальнейшего детального и комплексного изучения. Описываемое тело значительно отличается от всех остальных рассмотренных пегматитов по строению, минеральному составу и результатам гамма-спектрометрических наблюдений, демонстрирующих резкое увеличение в содержании естественных изотопов и их активности. Кроме того, в отличие от всех других пегматитов, оно отчетливо выделяется и по данным магнитной съемки, демонстрируя характеристики, сходные с телами, описанными в работах [42-44]. В настоящее время на основании первичных полевых данных можно предполагать, что формирование этого образования происходило на самых поздних стадиях пегматитового процесса при наименьших среди рассматриваемых типов пегматитов температурах, вероятно около 350-500 °С [28, 45], из алюмосиликатного расплава, обогащенного растворенной водой и летучими компонентами (например, фосфором). При этом, согласно расчетам предшественников, температуры финальных ретроградных стадий Пан-Африканского метаморфического события составляли 550-650 °С [21]. Высокие концентрации летучих компонентов и медленная кристаллизация привели к образованию минералов правильных кристаллографических форм и высоким содержаниям естественных радионуклидов в данном теле. Отсутствие четких границ с вмещающими породами и особый минеральный парагенезис позволяет первично отнести его к редкоэлементным абиссальным пегматитам, связанным с гранитоидами S-типа [46, 47].

По современным представлениям все описанные типы пегматитов относятся к абиссальным пегматитам семейства LCT, сформированным в результате частичного плавления одного или нескольких протолитов. Высокотемпературные разновидности, такие как боросиликатные и редкометалльные пегматиты, вероятно, образовались в условиях гранулитовой фации метаморфизма, ассоцирующегося с Пан-Африканским орогенезом. Другие типы пегматитов формировались при более низких температурах на последующих этапах геодинамической эволюции [23].

Заключение

На основании полученных данных комплексных геолого-геофизическогих исследований и согласно исследованиям предшественников, на территории оазиса Холмы Ларсеманн уверенно выделяется пять различных типов пегматитов (боросиликатные D_{2-3}, редкометалльные D_4, калишпатовые D_4', мусковитовые post-D_4 и камерные пегматиты post-D_4'), залегающих преимущественно в верхнепротерозойских парагнейсах субформации Брокнес. Все они связываются с различными стадиями Пан-Африканского орогенеза и соответствуют глобальному раннепалеозойскому пику пегматитообразования. По данным полевых измерений, все типы пегматитов хорошо различимы по морфологии пегматитовых тел, характеру их зональности, минеральному составу, данным гамма-спектрометрии и в отдельных случаях магнитной съемки. Так, пегматиты D_{2-3} представляют собой часто согласные с вмещающими породами жилообразные и линзовидные тела, в которых

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

находит развитие редкая боросиликатная минерализация. Секущие редкометалльные пегматиты D_4, калишпатовые пегматиты D_4' и мусковитовые пегматиты post-D_4 локализованы в пределах одной полосы максимального развития параллельных север-северо-западных разломов, интерпретируемых как ослабленная зона, которую залечивают описываемые пегматитовые образования. В пределах этой же зоны отмечается и камерный пегматит, природа и время образования которого вызывают наибольшее количество вопросов. Максимальные содержания радионуклидов наблюдаются в калишпатовых и камерных пегматитах, несколько ниже в редкометалльных пегматитах. Наименьшие значения содержания изотопов фиксируются в боросиликатных и мусковитовых пегматитах.

Информация, собранная авторами в течение полевого сезона, и находки новых, ранее не описанных, геологических тел, позволяют расширить понимание не только истории и особенностей пегматитообразования в районе оазиса Холмы Ларсеманн, но и этапов геодинамической эволюции данной территории, а также смежных регионов, например Индийского кратона и других фрагментов бывшей Гондваны. В дальнейшем планируется детальное изучение выделенных типов пегматитов с использованием тонкой геохимии сквозных и акцессорных минералов, уточнение термобарических условий их кристаллизации, определение абсолютного возраста и порядка формирования.

Авторы выражают искреннюю признательность Российской антарктической экспедиции и коллективу станции Прогресс за всестороннюю поддержку и техническую помощь в успешной реализации программы геолого-геофизических работ на п-ове Брокнес. Также авторы благодарят коллег из ИГГД РАН за активное участие в обработке и интерпретации полученных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Shi Zong, Yingchun Cui, Liudong Ren et al*. Geochemical Characteristics, Zircon U-Pb Ages and Lu-Hf Isotopes of Pan-African Pegmatites from the Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica and Their Tectonic Implications // Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 1. № 55. DOI: 10.3390/min14010055

2. *Wadoski E.R., Grew E.S., Yates M.G*. Compositional evolution of tourmaline-supergroup minerals from granitic pegmatites in the Larsemann Hills, East Antarctica // The Canadian Mineralogist. 2011. Vol. 49. № 1. P. 381-405. DOI: 10.3749/canmin.49.1.381

3. *Maas R., Grew E.S., Carson C.J*. Isotopic constraints (Pb, Rb-Sr, Sm-Nd) on the sources of early Cambrian Pegmatites with boron and beryllium minerals in the Larsemann hills, Prydz Bay, Antarctica // The Canadian Mineralogist. 2015. Vol. 53. № 2. P. 249-272. DOI: 10.3749/canmin.1400081

4. *Leitchenkov G.L., Grikurov G.E.* The Tectonic Structure of the Antarctic // Geotectonics. 2023. Vol. 57. Suppl. 1. P. S28-S33. DOI: 10.1134/S0016852123070087

5. *Горелик Г.Д., Егоров А.С., Шуклин И.А., Ушаков Д.Е*. Обоснование оптимального комплекса геофизических исследований глубинного строения района озера Восток // Горный журнал. 2024. № 9. С. 56-61. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.09

6. *Satish-Kumar M., Motoyoshi Y., Osanai Y. et al*. Geodynamic Evolution of East Antarctica: A Key to East–West Gondwana Connection. London: The Geological Society, 2008. Geological Society Special Publication № 308. 464 p.

7. *Grikurov G.E., Mikhalskii E.V*. Tectonic structure and evolution of East Antarctica in the light of knowledge about supercontinents // Russian Journal of Earth Sciences. 2002. Vol. 4. № 4. P. 247-257. DOI: 10.2205/2002ES000099

8. *Абдрахманов И.А., Гульбин Ю.Л., Гембицкая И.М*. Ассоциация Fe–Mg–Al–Ti–Zn оксидов в гранулитах оазиса Бангера, Восточная Антарктида: свидетельства метаморфизма сверхвысоких температур // Записки Российского минералогического общества. 2021. Т. 150. № 4. С. 38-76. DOI: 10.31857/S086960552104002X

9. *Sadiq M., Bhandari A., Arora D. et al*. Late Neoproterozoic metamorphic evolution of Larsemann Hills, East Antarctica: Insights from pseudosection modelling and monazite–zircon geochronology of Easther Island porphyroblastic gneiss // Journal of Earth System Science. 2024. Vol. 133. Iss. 4. № 238. DOI: 10.1007/s12040-024-02434-9

10. *Гульбин Ю.Л., Абдрахманов И.А., Гембицкая И.М., Васильев Е.А*. Ориентированные микровключения оксидов системы Al–Fe–Mg–Ti в кварце из метапелитовых гранулитов оазиса Бангера, Восточная Антарктида // Записки Российского минералогического общества. 2022. Т. 151. № 4. С. 1-17. DOI: 10.31857/S0869605522040037

11. *Mikhalsky E.V., Belyatsky B.V., Presnyakov S.L. et al*. The geological composition of the hidden Wilhelm II Land in East Antarctica: SHRIMP zircon, Nd isotopic and geochemical studies with implications for Proterozoic supercontinent reconstructions // Precambrian Research. 2015. Vol. 258. P. 171-185. DOI: 10.1016/j.precamres.2014.12.011

12. *Abdrakhmanov I.A., Gulbin Y.L., Skublov S.G., Galankina O.L*. Mineralogical Constraints on the Pressure–Temperature Evolution of Granulites in the Bunger Hills, East Antarctica // Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 5. № 488. DOI: 10.3390/min14050488

13. *Carson C.J., Dirks P.G.H.M., Hand M. et al*. Compressional and extensional tectonics in low-medium pressure granulites from the Larsemann Hills, East Antarctica // Geological Magazine. 1995. Vol. 132. Iss. 2. P. 151-170. DOI: 10.1017/S0016756800011729

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

14. Geology of the Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. 1:25 000 scale. First Edition. Canberra: Geoscience Australia, 2007.

15. *Grew E.S., Carson C.J., Christy A.G. et al*. New constraints from U–Pb, Lu–Hf and Sm–Nd isotopic data on the timing of sedimentation and felsic magmatism in the Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica // Precambrian Research. 2012. Vol. 206-207. P. 87-108. DOI: 10.1016/j.precamres.2012.02.016

16. *Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Зеликман Д.И., Букатов А.А*. Локализация зон развития опасных геологических процессов берегового клифа по данным 3D сейсмотомографического прозвучивания // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25. № 1. № ES1001. DOI: 10.2205/2025es000993

17. *Kelsey D.E., Hand M., Clark C., Wilson C.J.L*. On the application of in situ monazite chemical geochronology to constraining P–T–t histories in high-temperature (>850 °C) polymetamorphic granulites from Prydz Bay, East Antarctica // Journal of the Geological Society. 2007. Vol. 164. № 3. P. 667-683. DOI: 10.1144/0016-76492006-013

18. *Kelsey D.E., Wade B.P., Collins A.S. et al*. Discovery of a Neoproterozoic basin in the Prydz belt in East Antarctica and its implications for Gondwana assembly and ultrahigh temperature metamorphism // Precambrian Research. 2008. Vol. 161. Iss. 3-4. P. 355-388. DOI: 10.1016/j.precamres.2007.09.003

19. *Hensen B.J., Zhou B.* A Pan-African granulite facies metamorphic episode in Prydz Bay, Antarctica: Evidence from Sm-Nd garnet dating // Australian Journal of Earth Sciences. 1995. Vol. 42. Iss. 3. P. 249-258. DOI: 10.1080/08120099508728199

20. *Grew E.S., Carson C.J., Christy A.G., Boger S.D*. Boron- and phosphate-rich rocks in the Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica: tectonic implications // Antarctica and Supercontinent Evolution. London: The Geological Society, 2013. Vol. 383. P. 73-94. DOI: 10.1144/SP383.8

21. *Fitzsimons I.C.W., Harley S.L*. Geological relationships in high-grade gneiss of the Brattstrand Bluffs coastline, Prydz Bay, East Antarctica // Australian Journal of Earth Sciences. 1991. Vol. 38. Iss. 5. P. 497-519. DOI: 10.1080/08120099108727987

22. *Yanbin Wang, Dunyi Liu, Sun-Lin Chung et al*. SHRIMP Zircon Age Constraints From the Larsemann Hills Region, Prydz Bay, for a Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic Tectono-Thermal Event in East Antarctica // American Journal of Science. 2008. Vol. 308. Iss. 4. P. 573-617. DOI: 10.2475/04.2008.07

23. *Spreitzer S.K*. In Situ Dating of Multiple Events in Granulite-Facies Rocks of the Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica Using Electron Microprobe Analysis of Monazite: A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science (in Earth Science and Climate Sciences). USA, Main, 2017. № 2762. 347 p.

24. *Grew E.S., McGee J.J., Yates M.G. et al*. Boralsilite ($Al_{16}B_6Si_2O_{37}$): A new mineral related to sillimanite from pegmatites in granulite-facies rocks // American Mineralogist. 1998. Vol. 83. Iss. 5-6. P. 638-651. DOI: 10.2138/am-1998-5-623

25. *Grew E., Carson C*. A treasure trove of minerals discovered in the Larsemann Hills // Australian Antarctic Magazine. 2007. Iss. 13. P. 18-19.

26. *Bose S., Mondal A. K., Bakshi A.K., Jose J.R*. Petrogenetic re-examination of spinel + quartz assemblage in the Larsemann Hills, East Antarctica // Polar Science. 2020. Vol. 26. № 100588. DOI: 10.1016/j.polar.2020.100588

27. *London D., Evensen J.M*. Beryllium in Silicic Magmas and the Origin of Beryl-Bearing Pegmatites // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. Vol. 50. № 1. P. 445-486. DOI: 10.2138/rmg.2002.50.11

28. *London D*. Crystal-Filled Cavities in Granitic Pegmatites: Bursting the Bubble // Rocks & Minerals. 2013. Vol. 88. Iss. 6. P. 527-538. DOI: 10.1080/00357529.2013.826090

29. *Евдокимов А.Н., Юсуфзай А*. Геологическая позиция редкометалльных пегматитов гранитоидного комплекса Лагман, Афганистан // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25. № 1. № ES1002. DOI: 10.2205/2025ES000998

30. *Скублов С.Г., Юсуфзай А., Евдокимов А.Н., Галанкина О.Л*. Особенности состава цезийсодержащего анальцима в спондуменовых пегматитах Афганистана (месторождение Колатан, провинция Нуристан) // Записки Российского минералогического общества. 2024. Т. 153. № 6. С. 122-140. DOI: 10.31857/S0869605524060053

31. *Grew E.S*. Boron and beryllium minerals in granulite-facies pegmatites and implications of beryllium pegmatites for the origin and evolution of the Archean Napier Complex of East Antarctica // Memoirs of National Institute of Polar Research. 1998. Special Issue 53. P. 74-92.

32. *Кудряшов Н.М., Галеева Е.В., Удоратина О.В. и др*. Архейская эпоха редкометалльного (Li, Cs) пегматитообразования в северо-восточной части Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 68-72. DOI: 10.17076/geo1670

33. *Bea F., Montero P*. Behavior of accessory phases and redistribution of Zr, REE, Y, Th, and U during metamorphism and partial melting of metapelites in the lower crust: an example from the Kinzigite Formation of Ivrea-Verbano, NW Italy // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1999. Vol. 63. Iss. 7/8. P. 1133-1153. DOI: 10.1016/S0016-7037(98)00292-0

34. *Franz G., Morteani G*. The Formation of Chrysoberyl in Metamorphosed Pegmatites // Journal of Petrology. 1984. Vol. 25. Iss. 1. P. 27-52. DOI: 10.1093/petrology/25.1.27

35. *Rybnikova O., Uher P., Novák M. et al*. Chrysoberyl and associated beryllium minerals resulting from metamorphic overprinting of the Maršíkov–Schinderhübel III pegmatite, Czech Republic // Mineralogical Magazine. 2023. Vol. 87. Iss. 3. P. 369-381. DOI: 10.1180/mgm.2023.22

36. *Skublov S.G, Hamdard N., Ivanov M.A., Stativko V.S*. Trace element zoning of colorless beryl from spodumene pegmatites of Pashki deposit (Nuristan province, Afghanistan) // Frontiers in Earth Science. 2024. Vol. 12. № 1432222. DOI: 10.3389/feart.2024.1432222

37. *Россовский Л.Н., Шостацкий А.Н*. Пегматиты с хризобериллом в одном из районов Средней Азии // Минералы СССР. 1964. Вып. 15. С. 154-161.

38. *London D*. Reading Pegmatites: Part 1 – What Beryl Says // Rocks & Minerals. 2015. Vol. 90. Iss. 2. P. 138-153. DOI: 10.1080/00357529.2014.949173

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

39. *Пономарева Н.И., Гордиенко В.В., Шурекова Н.С.* Физико-химические условия формирования берилла в месторождении «Большой Лапоть» (Кольский п-ов) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2015. Вып. 3. С. 4-20.

40. *Gaafar I., Elbarbary M., Sayyed M.I. et al.* Assessment of Radioactive Materials in Albite Granites from Abu Rusheid and Um Naggat, Central Eastern Desert, Egypt // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 2. № 120. DOI: 10.3390/min12020120

41. *Carson C.J., Fanning C.M., Wilson C.J.L.* Timing of the progress granite, Larsemann hills: Additional evidence for early Palaeozoic orogenesis within the east Antarctic Shield and implications for Gondwana assembly // Australian Journal of Earth Sciences. 1996. Vol. 43. Iss. 5. P. 539-553. DOI: 10.1080/08120099608728275

42. *Данильев С.М., Мулев С.Н., Шнюкова О.М.* Корреляционно-регрессионный анализ активности естественной электромагнитной и акустической эмиссии в образцах горных пород Октябрьского месторождения // Горный журнал. 2024. № 9. С. 51-55. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.08

43. *Яковлева А.А., Мовчан И.Б., Мединская Д.К., Садыкова З.И.* Количественные интерпретации потенциальных полей: от параметрических пересчетов к геоструктурным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 11. С. 198-215. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4152

44. *Давыдкина Т.В., Янкилевич А.А., Наумова А.Н.* Особенности магнитотеллурических исследований в Антарктиде // Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 80-93.

45. *London D., Hunt L.E., Duval C.L.* Temperatures and duration of crystallization within gem-bearing cavities of granitic pegmatites // Lithos. 2020. Vol. 360-361. № 105417. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105417

46. *Bea F., Fershtater G., Corretgé L.G.* The geochemistry of phosphorus in granite rocks and the effect of aluminium // Lithos. 1992. Vol. 29. Iss. 1-2. P. 43-56. DOI: 10.1016/0024-4937(92)90033-U

47. *Рогова И.В., Стативко В.С., Петров Д.А., Скублов С.Г.* Редкоэлементный состав циркона из гранитов рапакиви губановской интрузии, Выборгский массив, как отражение флюидонасыщенности расплава // Геохимия. 2024. Т. 69. № 11. С 975-991. DOI: 10.31857/S0016752524110024

***Авторы*: Иван Александрович Бабенко,** *аспирант, babenko_ivan@vk.com, https://orcid.org/0009-0000-5282-3883* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Ирина Владимировна Таловина,** *д-р геол.-минерал. наук, заведующий кафедрой, https://orcid.org/0000-0003-4132-7010* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Дмитрий Евгеньевич Ушаков,** *ведущий инженер, https://orcid.org/0009-0009-6882-3955* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Никита Сергеевич Крикун,** *ведущий инженер, https://orcid.org/0000-0003-0350-4987* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0