

## ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА GEOLOGY AND GEOPHYSICS

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-3-346-358>

УДК 549.905.1



### Аутигенный барит в отложениях палеотермоцирка полуострова Ямал

А.А. Новоселов<sup>✉</sup>, Е.А. Слагода<sup>1</sup>, В.И. Бутаков<sup>1</sup>, Л.В. Леонова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт криосферы Земли, Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Тюмень, Россия*

<sup>2</sup> *Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия*

✉ [an.a.novoselov@utmn.ru](mailto:an.a.novoselov@utmn.ru)

ААН, 0000-0001-8589-2316; ЕАС, 0000-0001-7674-1081; ВИБ, 0000-0002-1165-3758

**Аннотация.** Изучение аутигенного минералообразования в криолитозоне представляет значительный научный интерес, однако до сих пор этим процессам уделяется недостаточное внимание. В данной работе впервые подробно описан и изучен аутигенный барит, обнаруженный в мерзлых синкриогенных отложениях, вскрывающихся в термоцирке полуострова Ямал, с целью оценки его потенциала как индикатора экзогенных криогенных процессов. Исследование выполнено с применением комплекса современных методов, включая сканирующую электронную микроскопию, рентгеноспектральный микроанализ и геохимические исследования. Особое внимание уделено применению оригинальной методики изготовления полимерных реплик, позволившей сохранить первичные текстурно-структурные особенности мерзлых грунтов. Результаты исследования подтверждают ключевую роль криогенных процессов в образовании барита, формирующего характерные розеточные агрегаты в микропустотах ледогрунта. Установлено, что его образование связано с процессами перераспределения и концентрирования солей при промерзании, при этом ключевую роль играют специфические геохимические условия, благоприятствующие связыванию сульфатов именно с барием. Эти условия обеспечили процессы термоденудации, в том числе таяние подземных льдов и переотложение прибрежно-морских и субаральных пород. Полученные данные позволяют рассматривать аутигенный барит как перспективный индикатор криогенных процессов в многолетнемерзлых породах и важны для понимания реакции криолитозоны на внешние воздействия, что особенно актуально в контексте современных климатических изменений, ведущих к активизации термокарста и термоденудации.

**Ключевые слова:** аутигенные минералы, барит, криолитозона, термоденудация, пластовые льды

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Для цитирования: Новоселов А.А., Слагода Е.А., Бутаков В.И., Леонова Л.В. Аутигенный барит в отложениях палеотермоцирка полуострова Ямал. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(3):346–358. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-3-346-358>

Поступила 21.05.2025

После переработки 04.07.2025

Принята 07.09.2025

## Authigenic barite in paleothermo cirque deposits of the Yamal Peninsula

Andrey A. Novoselov<sup>1</sup>✉, Elena A. Slagoda<sup>1</sup>,  
Vladislav I. Butakov<sup>1</sup>, Lyubov V. Leonova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia

<sup>2</sup> The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch (UB) of the RAS, Ekaterinburg, Russia

✉[an.a.novoselov@utmn.ru](mailto:an.a.novoselov@utmn.ru)

ORCID: AAN, 0000-0001-8589-2316; EAS, 0000-0001-7674-1081; VIB, 0000-0002-1165-3758

**Abstract.** Authigenic mineral formation in permafrost environments represents a scientifically significant yet little understood field of cryolithology. This study provides the first comprehensive documentation and analysis of authigenic barite discovered in frozen sediments of thermocirques on the Yamal Peninsula, with a particular focus on its potential as a novel indicator of cryogenic processes. The research methodology combines advanced analytical techniques including high-resolution scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and comprehensive geochemical characterization of ice-ground systems. A key methodological innovation is the development and application of specialized polymer replica techniques that enable precise preservation of primary cryogenic textures and microstructures in frozen samples, overcoming the limitations of conventional sample preparation methods. The results obtained demonstrate that authigenic barite forms distinctive rosette-shaped micro-aggregates within ice-ground micro-pores, with the crystal morphology indicating in situ growth under cryogenic conditions. Detailed geochemical analysis reveals that barite formation is fundamentally controlled by freeze-induced solute redistribution processes, where specific ionic ratios (particularly elevated  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ ) and neutral pH conditions preferentially promote barium sulfate precipitation over calcium sulfates. These findings show authigenic barite as a sensitive paleoindicator of cryogenic processes including thermodenudation, segregation ice formation, and freeze-thaw solute concentration. The study provides crucial new insights into low-temperature geochemical processes operating in permafrost environments, with important implications for understanding cryosphere evolution under contemporary climate change scenarios.

**Keywords:** authigenic minerals, barite, active layer, cryolithozone, thermokarst, segregation ice

**For citation:** Novoselov A.A., Slagoda E.A., Butakov V.I., Leonova L.V. Authigenic barite in paleothermo cirque deposits of the Yamal Peninsula. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(3):346–358. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-3-346-358>

Received 21.05.2025

Revised 04.07.2025

Accepted 07.09.2025

### Введение

Изучение процессов аутигенного минералообразования в многолетнемерзлых толщах представляет собой важную область исследований, особенно связанных с динамикой криолитозоны, в том числе в контексте глобального изменения климата. Геохимические последствия процессов промерзания-протаивания (включая аккумуляцию органического и неорганического вещества) остаются не полностью

изученным аспектом формирования многолетнемерзлых толщ, которое может происходить как при климатических колебаниях, так и при направленном похолодании. В свою очередь процессы криолитогенеза в условиях изменения климата приводят к формированию характерных форм рельефа и изменению гидрологического режима, что отражается в трансформации состава отложений и интенсификации аутигенного минералообразования. Так, исследования криогенных минералов (например, рапид-крикита) в пещерах Восточной Сибири [1] и моделирование криогенных процессов в мерзлых грунтах [2] демонстрируют сложность взаимодействия фазовых переходов и химических реакций. Работы по геокриологии [3] и изучение следов криогенных процессов в отложениях Западной Сибири [4] подчеркивают роль локальных геохимических условий, в то время как данные по криогенному минералообразованию в пещерах [5] расширяют понимание низкотемпературных механизмов.

В настоящее время исследования минеральной составляющей мерзлых грунтов сфокусированы на составе терригенных зерен, формирующих основную долю минерального вещества. Процессы аутигенного минералообразования, протекающие *in situ* в условиях криолитогенеза, остаются в меньшей степени изученными. В субаэральном синкриогенном толще и эпикриогенных аласных, таберальных комплексах широко распространены новообразованные карбонаты, сульфиды [6–8]. Единичные находки аутигенного звездчатого барита отмечены в мерзлых эпикриогенных прибрежно-морских отложениях с сегрегационными криогенными текстурами на о. Белый, Карское море [9] и в отложениях ледового комплекса в Восточной Арктике [10].

Аутигенные минералы, образующиеся в результате низкотемпературных геохимических процессов и фазовых переходов в мерзлых и оттаивающих породах, представляют особую ценность как индикаторы криогенных процессов. Они фиксируют изменения физико-химических условий среды, но данных об их структуре, составе, морфологии и распространении мало, так как эти минералы сложны для изучения, а иногда недоступны из-за неустойчивости и растворения при оттаивании грунтов.

Целью исследования является изучение аутигенного барита в мерзлых отложениях палеотермоцирка полуострова Ямал для определения его роли как индикатора криогенных экзогенных процессов.

### Район исследований

Полуостров Ямал на севере Западной Сибири — один из ключевых регионов для исследования геохимических процессов, происходящих в условиях стабильно низких среднегодовых температур воздуха от  $-11,2$  °C до  $-5,1$  °C. Здесь, в зоне распространения многолетней мерзлоты, породы сохраняют свою криогенную структуру ниже слоя сезонного протаивания, что позволяет изучать их в естественном разрезе — стенке термоцирка. Район исследований расположен в центральной части полуострова Ямал, в 25 км к юго-западу от НГКМ «Бованенково» (рис. 1а), в пределах холмисто-увалистых казанцевской и салехардской IV и V равнин [11]. Рельеф территории преимущественно равнинный, с небольшими возвышенностями, холмами, многочисленными заболоченными долинами рек, термокарстовыми котловинами с озерами, борта которых осложнены активными и заросшими и древними термоцирками [12]. Климат региона — арктический с длительной зимой и коротким летом. Почвы района представлены тундрово-глеевыми и торфяно-глеевыми типами,

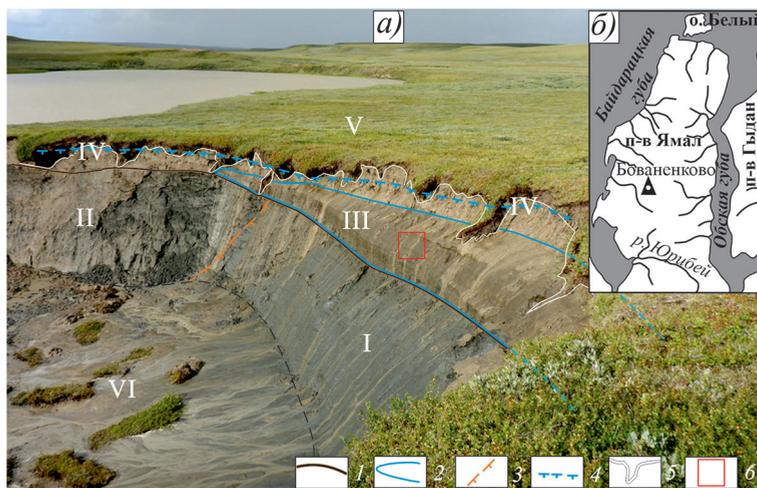


Рис. 1. Карта-схема отбора проб: *a* — фото изученного термоцирка с обозначением места отбора проб; *б* — район расположения участка исследования на п-ове Ямал.

*1* — граница протаивания и размыва залежи пластового льда (ПЛ), таберального комплекса; *2* — контур линзовидной залежи ледогрунта; *3* — реликтовая граница талика, штрих направлен в сторону ПЛ; *4* — верхняя граница мерзлоты; *5* — граница просадок, промоян покровного горизонта; *6* — место отбора монолитов, в которых обнаружен барит. I — пластовая залежь льда в прибрежно-морских суглинистых отложениях; II — таберальный комплекс по ПЛ; III — козырек — линзовидная залежь ледогрунта и IV — поверхностный слой днища древнего термоцирка; V — поверхность перекрывающих отложений; VI — днище современного активного термоцирка с тальми осадками

Fig. 1. Sampling map: location of the study area on the Yamal Peninsula (*a*); photograph of the studied thermocirque with the sampling location indicated (*b*).

*1* — Boundary of thawing and erosion of tabular ground ice (TGI) and taberal complex; *2* — Boundary of lens-shaped ice-ground deposit; *3* — Relict boundary of talik (dashed line points toward TGI); *4* — Upper permafrost boundary; *5* — Boundary of subsidence and gullies in the surface layer; *6* — Sampling location of monoliths where barite was detected. Roman numerals denote: I — Tabular ground ice in coastal-marine silty deposits; II — Taberal complex over TGI; III — Overhang (lens-shaped ice-ground deposit); IV — Cover horizon of the ancient thermocirque floor; V — overburden surface; VI — the bottom of a modern active thermocircus with melted sediments

в растительности тундры преобладают мхи, лишайники, кустарнички и кустарники, в понижениях рельефа и вокруг водоемов — осоки. Район относится к зоне распространения сплошной многолетней мерзлоты, залегание кровли многолетнемерзлых пород по глубине сезонного протаивания варьирует от 0,4 до 2 м [13].

### Материалы и методы

В 2021 г. был изучен разрез термоцирка ТЦ5 [12], который включает: прибрежно-морские суглинистые отложения с пластовым льдом; субаэральные песчаные и алевритовые отложения с линзовидным пластовым льдом; покровный торф, заторфованные супеси и пески с размывом, перекрывающие всю толщу. В основании разреза пластовый лед, видимой мощностью более 3 м, слоистый, серого цвета за счет подчиненных прослоев суглинков, глин, алевритов и тонких песков. В пластовую залежь внедряются повторно-жилные льды и грунтовые жилы, верхние части которых залегают в субаэральном толще. В сниженной стенке термоцирка залежь

льда по простиранию контактирует с плотными малольдистыми тонкослоистыми суглинистыми отложениями — вероятно, оттаявшей и вторично промерзшей в под-озерном талике частью залежи. Залежь льда и таберальный комплекс перекрыты озерными, склоновыми отложениями днища древнего термоцирка и линзовидным пластом ледогрунта в виде козырька мощностью до 1,5 м. Лед козырька слоистый параллельно поверхности, имеет желтоватый цвет за счет линз песков, супесей с линзовидно-слоистой криогенной текстурой (рис. 1а).

Для изучения аутигенных процессов в ледогрунтах проведен отбор проб из стенки термоцирка в 2021 г. Монолиты льда отобраны из пластовой залежи на глубине 2,65–2,8 м (в разрезе ТЦ5Н от абс. высоты бровки уступа 17 м), из ПЖЛ на глубине 1,9–2,0 м (в разрезе ТЦ5Н/1 от абс. высоты бровки уступа 15 м) и линзовидного пласта ледогрунта на глубине 1,1–1,25 м (в разрезе ТЦ5Н/2 от абс. высоты бровки уступа 10 м), всего было отобрано 7 монолитов. Минеральные прослои залегают в виде линз, тонких слоев из частиц и агрегатов между цепочками, поясками и слоями более крупных кристаллов льда и рассеяны между мелкими кристаллами, что, по мнению авторов, характерно для сегрегационных льдов.

Анализ ионов во льдах и водных вытяжках выполнен в Тюменском индустриальном университете методами атомной абсорбции ( $\text{Ca}^{+2}$ ), турбидиметрии ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) и ионометрии (рН). Монолиты льда были расплавлены непосредственно перед проведением анализа и профильтрованы через мембранный фильтр 0,45 мкм, что исключило присутствие твердой фазы в расплаве льда. Для элементного анализа этой воды после фильтрации пробы обрабатывали азотной кислотой для озоления органических веществ, извлечения сорбированных элементов из органической матрицы. Элементный анализ выполнен на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce в Лаборатории гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института СО РАН [12]. Элементный состав микроагрегатов определялся при помощи энерго-дисперсионных спектров (ЭДС). Этот состав получен с помощью спектрометра INCA Energy 450 X-MaxEDS и программного обеспечения AZtecOne (ИГиГ им. А.Н. Заварицкого) и рентгеноспектрального анализатора SwiftED3000 (ИКЗ ТюмНЦ СО РАН).

Для сохранения текстурно-структурных особенностей мерзлых грунтов и льдов была применена методика изготовления оттисков поверхности с использованием полиметилметакрилата (оргстекла), реплика фиксирует естественные соотношения и расположение терригенного материала, границы кристаллов льда-цемента, а также позволяет сохранить часть аутигенных минералов, которые могут раствориться в талой воде при традиционной пробоподготовке [8].

Методика включает в себя следующие этапы:

1. Приготовление расплава полиметилметакрилата в дихлорэтано. Для этого оргстекло растворяют в дихлорэтано ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ ) до получения однородного расплава, важным является сохранение температуры полученной массы, при которой производится работа с образцом.

2. Нанесение расплава на поверхность свежего скола мерзлого образца (рис. 2а). Расплав равномерно распределяется по исследуемой поверхности, обеспечивая полный контакт с минеральными включениями.

3. После полного испарения растворителя при (от  $-5$  до  $-10$  °С) образец оттаивает, а получившаяся пластиковая пленка (реплика) механически отделяется и промывается дистиллированной водой [15].

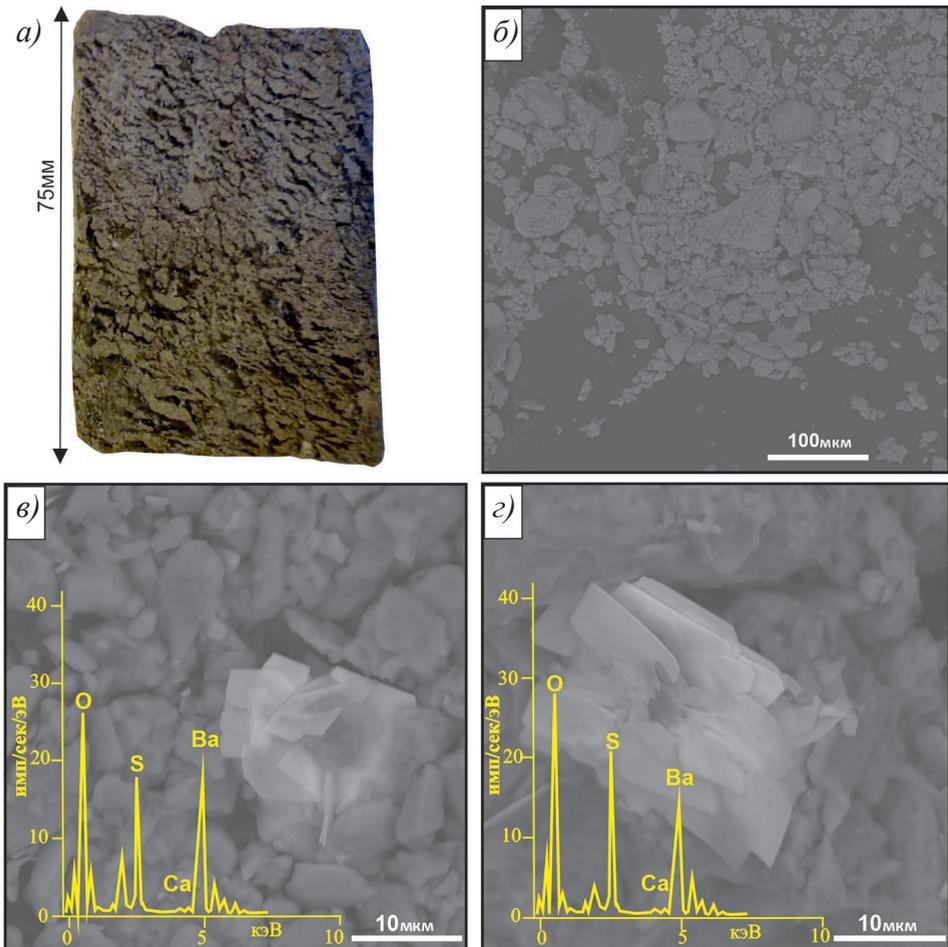


Рис. 2. Аутигенный барит в репликах монолитов отложений палеотермоцирка: *a* — монолит ледогрунта из линзовидной залежи под днищем древнего термоцирка: супесь с линзовидной криотекстурой, глубина 1,1–1,25 м (темные участки — лед); *b* — СЭМ-фото реплики с поверхности сколов ледогрунта; *v*, *z* — СЭМ-фото микроагрегатов аутигенного барита в репликах с распределением микроэлементов (EDX-спектры)

Fig. 2. Autigenic barite in replicas of paleothermocirque monoliths: *a* — ice-ground monolith from a lens-shaped deposit beneath the floor of an ancient thermocirque: loam with lens-shaped cryotexture, depth 1.1–1.25 m (dark areas — ice); *b* — SEM image of a replica from the ice-ground fracture surface; *v*, *z* — SEM images of authigenic barite microaggregates in replicas with microelement distribution (EDX spectra)

Полученная реплика представляет собой тонкий слой полимера с оставшимся на нем в неизменном состоянии тонким слоем осадка, сохранившим текстуру, целостность минеральных агрегатов и морфологию зерен. Этот метод позволяет проводить детальный анализ микростроения мерзлых грунтов без риска потери информации, связанной с оттаиванием образца. На части реплик размером 2 см<sup>2</sup> наносилось напыление золотом (на установке для магнетронного распыления Q150R Plus фирмы

Quorum), после чего они исследовались при помощи электронной микроскопии с элементным анализом. Поисковые съемки производились с использованием микроскопа TM3000 (Hitachi) с анализатором SwiftED3000 (Oxford)), детальный анализ и снимки с высоким разрешением получены с использованием микроскопа (TESCAN MIRA LMS, S6123), энерго-дисперсионные спектры получены с помощью спектрометра INCA Energy 450 X-MaxEDS и программного обеспечения AZtecOne (рис. 2б–г).

### Результаты исследований

Лабораторными исследованиями мерзлых пород, льдов и ледогрунта, собранных в термоцирке в 2021 г., были определены геохимические параметры, имеющие значение для формирования аутигенного барита (табл. 1). В изученных пробах (табл. 2) преобладали нейтральные значения pH (6,1–6,77), что создает благоприятные условия для сохранения аутигенных минералов, включая сульфаты, даже при повышении температуры грунтов почти до 0 °C и увеличении незамерзшей влаги. В редких случаях наблюдались слабокислые значения pH (4,76), связанные, вероятно, с повышенным содержанием органического вещества и активностью сульфатредуцирующих бактерий. Наиболее засоленные образцы озерных песков, с глубины 2,4 м, характеризовались высокими значениями общей минерализации (2358 мг/кг) (табл. 2), что свидетельствует о высокой концентрации растворенных солей и криогенном концентрировании, играющем важную роль в формировании аутигенных минералов [2, 3]. По типу засоления в большинстве образцов преобладает гидрокарбонатно-сульфатный тип, для наиболее засоленных образцов — сульфатный. Концентрация сульфат-ионов в образцах варьировала в широких пределах: от следовых количеств (<7 мг/кг) до высоких значений. Наибольшие концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$  зафиксированы в озерных песках, с глубины 2,4 м (1474,6 мг/кг) и озерных супесях с глубины 2,3 м (478,3 мг/кг) (табл. 2). Отсутствие прямой корреляции между глубиной залегания проб и содержанием сульфат-ионов, вероятно, связано с различной активностью сульфатредуцирующих бактерий, неодинаковой степенью криогенного концентрирования и вымывания солей [16, 17].

Соотношение  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$  в большинстве образцов превышало единицу, что указывает на преобладание сульфат-ионов над кальцием и создает условия для преимущественного связывания сульфатов с барием (табл. 2). Кристаллизация барита ( $\text{BaSO}_4$ ) стала возможной благодаря сочетанию трех ключевых факторов: (1) наличию значимых концентраций  $\text{Ba}^{2+}$  в ледогрунтовых жилах (9,9–55,7 мкг/л по данным элементного анализа); (2) нейтральным значениям pH (6,1–6,77 в большинстве проб), обеспечивающим стабильность сульфат-ионов и препятствующим их восстановлению до сульфидов; (3) криогенному концентрированию растворов в микропустотах, что приводит к локальному пересыщению относительно барита. Как показывают данные табл. 2, в образцах с максимальным соотношением  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$  (до 31,58) и высокой минерализацией (до 2358 мг/кг) создавались оптимальные условия для образования  $\text{BaSO}_4$ , тогда как гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) не формировался, несмотря на общее преобладание  $\text{Ca}^{2+}$ . Преимущественное образование барита, а не гипса обусловлено: более низкой растворимостью  $\text{BaSO}_4$ , связыванием  $\text{Ca}^{2+}$  с  $\text{HCO}_3^-$  в карбонатные ассоциации и натриево-сульфатным типом засоления основной массы породы, доминирование  $\text{Na}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  (табл. 1–2) создает геохимический фон, где  $\text{Ca}^{2+}$  связывается в карбонаты или остается в рассеянной форме, а доступные сульфаты расходуются на образование  $\text{BaSO}_4$  и растворимого  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Таблица 1

**Состав ионов подземных льдов в обнажении термоцирка**

Table 1

**Ion composition of ground ice in the thermocirque exposure**

Глубина, м	pH	Состав ионов, мг/л								
		HCO <sup>3-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ba <sup>2+</sup>
2,9 пластовый лед суглинистый	7,65	94,85	20,55	0,00	0,65	56,6	3,00	0,55	1,38	0,0119
2,65–2,8 пластовый лед песчаный	7,39	47,44	1,70	0,33	0,60	25,7	1,97	0,26	0,21	0,0011
1,9–2,0 повторно-жильный лед вертикально- полосчатый	6,42	28,19	1,67	0,03	0,31	4,35	0,79	11,1	0,58	0,00164
1,1–1,25 ледогрунт песчаный из «kozyрька» с линзовидной криотекстурой	7,92	99,94	33,54	0,00	61,88	56,0	9,87	6,44	8,74	0,00778

Таблица 2

**Литология и геохимические параметры отложений термоцирка**

Table 2

**Lithology and geochemical parameters of the thermocirque deposits**

Глубина, м	Литологический характер отложений	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/кг	Ca <sup>2+</sup> , мг/кг	Соотношение SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /Ca <sup>2+</sup>	Сумма легкорастворимых солей, мг/кг	Тип засоления
0,7	Супесь озерная	6,35	<7	23,6	<0,3	133	хлоридно-гидрокарбонатный натриево-кальциевый
1,5	Глина озерная	6,36	151,4	31,0	4,88	342	гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-натриевый
2,2	Супесь озерная	6,58	388,4	12,3	31,58	687	сульфатный натриевый
2,3	Супесь озерная	5,93	478,3	17,8	26,87	963	сульфатный натриевый
2,4	Песок озерный с малакофауной	4,76	1474,6	523,0	2,82	2358	сульфатный кальциевый
4	Песок озерно-аллювиальный Таберальный комплекс	6,77	166,7	52,0	3,21	389	гидрокарбонатно-сульфатный натриево-кальциевый
6,3	Песок озерно-аллювиальный Таберальный комплекс	6,10	68,1	7,7	8,84	181	хлоридно-сульфатный кальциево-натриевый

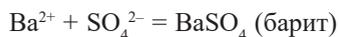
В репликах из ледогрунта и льда при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) были выявлены признаки промерзания, выраженные в микротекстуре, в том числе следы перераспределения, нарушения ориентировки минеральных частиц терригенного материала и пузырьков газа в результате роста кристаллов льда. Основная часть минерального вещества образцов имеет песчано-алевритовую структуру.

Основная часть песчано-алевритового материала (рис. 2б) имеет полевошпато-кварцевый состав. Зерна полевых шпатов имеют признаки частичного разрушения на поверхности, практически без признаков регенерации. Кварцевые обломки также с признаками растворения и инициальными тончайшими регенерационными каемками. Наблюдаются плохо кристаллизованные тонкие прерывистые пленки глинистых минералов, предположительно иллитового состава.

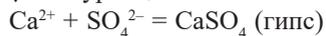
Аутигенный барит был обнаружен в виде микроагрегатов розеточной формы, образованных перекрывающимися пластинчатыми кристаллами (рис. 2в, з). Размеры агрегатов варьируются от 10 до 15 мкм. Кристаллы обладают четкой огранкой и выраженной пластинчатой формой с минимальными дефектами поверхности, что характерно для аутигенного роста в ограниченном пространстве микропустот. Грани кристаллов прямые, ребра острые. Часть агрегатов барита не имеет признаков растворения, однако на некоторых кристаллах наблюдаются незначительные неровности. Все агрегаты демонстрируют морфологию, типичную для роста в стесненных условиях: кристаллы имеют идиоморфные очертания, но их форма явно ограничена пространством микропустот. Это свидетельствует о длительном природном минералообразовании *in situ* и не соответствует морфологии вторичных фаз, которые могли бы возникнуть в ходе лабораторной пробоподготовки. Розеточная форма агрегатов указывает на медленный процесс кристаллизации в условиях пересыщенного раствора. Элементный анализ методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) подтвердил состав агрегатов как  $BaSO_4$  (рис. 2в, з).

Обнаруженные микроагрегаты аутигенного барита приурочены к участкам с признаками постседиментационного преобразования криогенными процессами: агрегатными микротекстурами и следами роста кристаллов льда.

На основании полученных данных можно предположить следующий механизм образования аутигенного барита в изученных отложениях: в многолетнемерзлой породе происходит криогенное концентрирование ионов  $Ba^{2+}$  и  $SO_4^{2-}$  в пленках незамерзшей воды. Нейтральные значения pH (6,1–6,77) в большинстве образцов создают благоприятную среду для стабильности сульфат-ионов и предотвращают их восстановление до сульфидов. Высокие концентрации сульфат-ионов (до 1474,64 мг/кг в озерных песках) в сочетании с присутствием ионов бария, подтвержденным анализом ледогрунтовых жил (9,9–55,7 мкг/л) [14], создают условия пересыщения относительно  $BaSO_4$ . При соотношении  $SO_4^{2-}/Ca^{2+} > 1$  наблюдается преимущественное связывание сульфат-ионов с барием, что препятствует значительному образованию гипса или ангидрита:



↓ конкуренция



Кристаллизация барита происходит постепенно в ограниченном пространстве микропустот, что подтверждается характерной розеткообразной морфологией агрегатов с четкой пластинчатой огранкой отдельных микрокристаллов. Сегрегационное

льдовыделение и криогенная концентрация в незамерзшей воде при промерзании осадков играют ключевую роль в создании условий для формирования барита [18]. Наличие биогенного метана и углекислого газа в газовых пузырьках [14] косвенно указывает на активные микробные процессы, включая сульфатредукцию, которые могут служить дополнительным источником сульфат-ионов. Размыв прибрежно-морских засоленных отложений и аккумуляция в мелководных озерах и пологих склонах обеспечивают поступление растворимых форм бария.

Несмотря на то, что общее содержание  $\text{Ca}^{2+}$  в изученных отложениях значительно превышает содержание  $\text{Ba}^{2+}$  (табл. 1), гипса в исследуемых образцах обнаружено не было. Это указывает на то, что минералообразование в криогенных отложениях контролируется не только общей концентрацией элементов, но и активностью ионов в растворе, а также локальными геохимическими условиями. Вероятно, образование барита происходит в микрizonaх (микроразрывы, порах, капиллярах и пленках воды), где активность  $\text{Ba}^{2+}$  выше активности  $\text{Ca}^{2+}$  из-за комплексных соединений  $\text{Ca}^{2+}$  с другими ионами или локального обогащения  $\text{Ba}^{2+}$ . Кроме того, кинетические факторы и влияние органического вещества (о чем свидетельствуют слабкокислые значения pH в некоторых образцах) могли способствовать преимущественному образованию барита. Таким образом, сочетание локальных геохимических условий, кинетических факторов и влияния органического вещества могло привести к образованию барита, несмотря на высокое общее содержание Ca. Такой механизм образования барита демонстрирует тесную связь с криогенными процессами и подчеркивает его значение как индикатора условий минералообразования при формировании мерзлых пород. Полученные данные о вариациях соотношения  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$  и неоднородном распределении  $\text{Ba}^{2+}$ : максимальное количество содержится в ледогрунтовой залежи днища палеотермоцирка, по сравнению с низким содержанием в ледяной жиле и пластовых льдах (табл. 1). В днище термоцирка в ходе термоденудации накапливались талые продукты разрушения жильных и пластовых льдов, а также вмещающих пород. Накоплению бария в этой зоне могла способствовать его умеренная и низкая миграционная способность, что привело к его относительному обогащению в этих отложениях. Синкриогенное промерзание нелигифицированного осадка, вероятно, привело к криогенному концентрированию бария в незамерзшей воде. Таким образом, аутигенный барит можно считать индикатором комплекса и сложной динамики криогенных процессов (таких как криогенное концентрирование солей, сегрегационное льдовыделение, миграция влаги и растворенных веществ в промерзающей толще, а также сопутствующих геохимических процессов). Изотопный анализ ( $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) мог бы позволить: дифференцировать источники серы [19], реконструировать температурные условия минералообразования, верифицировать выявленную связь между составом пластовых льдов и аутигенными минералами.

### **Выводы**

Обнаружение аутигенного барита в многолетнемерзлых породах палеотермоцирка полуострова Ямал расширяет представления о его распространении в криолитозоне, ранее ограниченные единичной находкой в мерзлых морских отложениях о. Белый [9]. Выявление данного минерала в новом генетическом типе отложений свидетельствует об активных и разнообразных процессах минералообразования, происходящих в современных криогенных условиях. Обнаружение аутигенного барита в ледогрунтах озерного и склонового происхождения доказывает возможность его образования при отрицательных температурах в континентальных обстановках,

в отличие от ранее известных случаев, связанных преимущественно с высокотемпературными условиями океанических гидротерм или диагенеза. Морфологические особенности кристаллов барита (розетковидные агрегаты микрокристаллов пластинчатой формы), в сочетании с их расположением в микропустотах ледогрунта, указывают на формирование *in situ* в условиях ограниченного пространства и медленной кристаллизации, обусловленной криогенным концентрированием растворов, сегрегационным льдовыделением и бактериальной сульфатредукцией, о чем свидетельствуют присутствие газовых пузырьков биогенного метана [13], локальные слабокислые значения pH (4,76) в отдельных пробах и следовые количества сульфидов в EDX-спектрах. Высокое соотношение  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$  в исследуемых образцах подтверждает преобладание сульфатов над кальцием, что благоприятствует преимущественному образованию барита ( $\text{BaSO}_4$ ) по сравнению с гипсом ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) или ангидритом ( $\text{CaSO}_4$ ), с учетом наличия ионов  $\text{Ba}^{2+}$  в ледогрунтовых жилах.

Полученные данные позволяют предположить, что аутигенный барит может являться перспективным индикатором криогенных процессов в многолетнемерзлых породах, таких как цикличное промерзание-протаивание, криогенная концентрация солей и сульфатредукция. Если дальнейшие исследования подтвердят эту связь, благодаря своей чувствительности к изменениям концентрации растворенных веществ и температуры, барит мог бы служить инструментом для мониторинга развития термокарста и термоденудации в условиях меняющегося климата.

**Конфликт интересов.** У авторов исследования нет конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FWRZ-FWRZ-2021-0012.

**Competing interests.** The authors have no conflict of interest to declare.

**Financing.** This work was conducted at the Institute of Earth's Cryosphere, Tyumen Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, and supported by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FWRZ-2021-0012).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Базарова Е.П., Кадебская О.И., Рубцова М.Н., Коротченкова О.В., Кононов А.М. Криогенный рапидкрикит из малой нижнеудинской пещеры (Восточная Сибирь). *Криосфера Земли*. 2023;27(3):3–14. <https://doi.org/10.15372/KZ20230301>  
Bazarova E.P., Kadebskaya O.I., Rubtsova M.N., Korotchenkova O.V., Kononov A.M. Cryogenic rapidcreekite from the Malaya Nizhneudinskaya Cave (Eastern Siberia). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2023;27(3):3–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/KZ20230301>
2. Thomas H.R., Cleall P., Li Y.-C., Harris C., Kern-Luetsch M. Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils. *Geotechnique*. 2009;59(3):173–184. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.173>
3. Фотиев С.М. Дискуссионные проблемы геокриологии: обзор достижений. *Криосфера Земли*. 2020;24(3):3–17. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3\(3-17\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3(3-17))  
Fotiev S.M. Controversial problems of geocryology: a review of achievements. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2020;24(3):3–17. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3\(3-17\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3(3-17))
4. Слагода Е.А., Новоселов А.А., Королева Е.С., Кузнецова А.О., Бутаков В.И., Тихонравова Я.В., Завовская Э.П. Следы криогенных процессов в позднеоплейстоценовых отложениях Пур-Тазовского междуречья Западной Сибири. *Криосфера Земли*. 2022;26(1):21–35. <https://doi.org/10.15372/KZ20220103>

- Slagoda E.A., Novoselov A.A., Koroleva E.S., Kuznetsova A.O., Butakov V.I., Tikhonravova Ya.V., Zazovskaya E.P. Traces of cryogenic processes in the Late Neopleistocene deposits of the Pur-Taz interfluvium, Western Siberia. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2022;26(1):21–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/KZ20220103>
5. Zak K., Onac B.P., Kadebskaya O.I., Filippi M., Dublyansky Y., Luetscher M. Cryogenic mineral formation in caves. In: A. Persoiu, S.-E. Lauritzen (eds.). *Ice Caves. Pt 6*. Cambridge: Elsevier Inc.; 2018. P. 123–162. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811739-2.00035-8>
  6. Зигерт Х.Г. Минералообразование в условиях вечной мерзлоты. В кн.: *Строение и тепловой режим мерзлых пород*. Новосибирск: Наука; 1981. С. 14–21.
  7. Слагода Е.А. Криолитогенные отложения Приморской равнины моря Лаптевых: литология и микроморфология. Тюмень: Экспресс; 2002. 120 с.
  8. Рогов В.В. *Основы криогенеза*. Новосибирск: ГЕО; 2009. 208 с.
  9. Слагода Е.А., Крылов А.В., Попов К.А., Опокина О.Л., Дроздов Д.С., Рогов В.В., Курчатова А.Н., Орехов П.Т., Ермак А.А., Ходжер Т.В., Томберг И.В., Суслова М.Ю., Жученко Н.А., Абрамов А.А. Криолитологическое строение первой террасы острова Белый в Карском море: микростроение и признаки криолитогенеза (Часть 2). *Кriosfera Zemli*. 2014;18(1):12–22. Slagoda E.A., Krylov A.V., Popov K.A., Opokina O.L., Drozdov D.S., Rogov V.V., Kurchatova A.N., Orekhov P.T., Ermak A.A., Khodzher T.V., Tomberg I.V., Suslova M.Yu., Zhuchenko N.A., Abramov A.A. Cryolithological structure of the first terrace of Bely Island in the Kara Sea: microstructure and signs of cryolithogenesis (Part 2). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2014;18(1):12–22. (In Russ.).
  10. Курчатова А.Н., Рогов В.В. Аутигенные карбонаты в отложениях ледового комплекса приморских равнин Восточной Арктики. *Кriosfera Zemli*. 2013;18(3):60–69. Kurchatova A.N., Rogov V.V. Authigenic carbonates in the Ice Complex deposits of the coastal lowlands of the Eastern Arctic. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2013;18(3):60–69. (In Russ.).
  11. Письменюк А.А., Семенов П.Б., Тарасевич И.И., Лейбман М.О., Бабкин Е.М., Нестерова Н.Б., Мальшев С.А., Стрелецкая И.Д., Шатрова Е.В., Хомутов А.В. Исследования четвертичных отложений и подземных льдов Центрального Ямала. *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2021;(8):173–176. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2021-8-173-176> Pismeniuk A.A., Semenov P.B., Tarasevich I.I., Leibman M.O., Babkin E.M., Nesterova N.B., Malyshev S.A., Streletskaia I.D., Shatrova E.V., Khomutov A.V. Research of quaternary sediments and ground ice in Central Yamal. *Relief i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii = Relief and Quaternary Deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2021;(8):173–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2021-8-173-176>
  12. Лейбман М.О., Хомутов А.В. Стационар «Васькины дачи» на центральном Ямале: 30 лет исследований. *Кriosfera Zemli*. 2019;23(1):91–95. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(91-95\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(91-95)) Leibman M.O., Khomutov A.V. Vaskiny Dachi research station in Central Yamal: 30 years of studies. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2019;23(1):91–95. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(91-95\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(91-95))
  13. Бабкина Е.А., Хомутов А.В., Бабкин Е.М., Лейбман М.О. Мониторинг глубины протаивания и температуры многолетнемерзлых пород на севере Ямало-Ненецкого АО. *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2022;(9):20–28. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2022-9-20-28> Babkina E.A., Khomutov A.V., Babkin E.M., Leibman M.O. Monitoring of thaw depth and permafrost temperature in the north of Yamal-Nenets Autonomous Okrug. *Relief and Quaternary Formations of the Arctic, Subarctic and Northwest Russia*. 2022;(9):20–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2022-9-20-28>

14. Бутаков В.И., Слагода Е.А., Заватский М.Д., Иванов В.И. Газовый состав и микроорганизмы в подземных льдах российской Арктики. Известия Томского политехнического университета. *Инжиниринг георесурсов*. 2023;334(9):63–75. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4084>  
Butakov V.I., Slagoda E.A., Zavatsky M.D., Ivanov V.I. Gas composition and microorganisms in ground ice of the Russian Arctic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023;334(9):63–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4084>
15. Курчатова А.Н., Рогов В.В. *Методы электронной микроскопии в геокриологии*. Москва; Тюмень: МГУ им. М.В. Ломоносова, ТИУ; 2020. 134 с.
16. Брушков А.В. *Засоленные многолетнемерзлые породы арктического побережья, их происхождение и свойства*. Москва: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; 1998. 324 с.
17. Трофимов В.Т., Красилова Н.С. Засоленные мерзлые грунтовые толщи арктического побережья России и их инженерно-геологические особенности. *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический*. 2017;92(4):49–57.  
Trofimov V.T., Krasilova N.S. Saline frozen soils of Russian Arctic coast and their engineering-geological specific. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series*. 2017;92(4):49–57. (In Russ.).
18. Killawee J.A., Fairchild I.J., Tison J.-L., Janssens L., Lorrain R. Segregation of solutes and gases in experimental freezing of dilute solutions: Implications for natural glacial systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1998;62(23–24):3637–3655. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00268-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00268-3)
19. Леин А.Ю., Лейбман М.О., Саввичев А.С., Миллер Ю.М., Пименов Н.В. Изотопно-биогеохимические особенности подземного пластового льда полуостровов Югорского и Ямала. *Геохимия*. 2003;10:1084–1104.  
Lein A.Yu., Leibman M.O., Savvichev A.S., Miller Yu.M., Pimenov N.V. Isotopic-biogeochemical features of underground tabular ice of the Yugorsky and Yamal peninsulas. *Geokhimiya*. 2003;(10):1084–1104. (In Russ.).