

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Бутаков В.И., Слагода Е.А., Белова Н.Г., Жученко Н.А. Геохимические методы идентификации генезиса подземных льдов Центрального Ямала // Арктика и Антарктика. 2025. № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.3.74967 EDN: UNTGGG URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74967

Геохимические методы идентификации генезиса подземных льдов Центрального Ямала

Бутаков Владислав Игоревич

ORCID: 0000-0002-1165-3758

кандидат геолого-минералогических наук

Научный сотрудник; ИКЗ ТюмНЦ СО РАН

Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. Малыгина, д. 86



✉ vladbutakov@yahoo.com

Слагода Елена Адольфовна

ORCID: 0000-0001-7674-1081

доктор геолого-минералогических наук

Главный научный сотрудник; Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН

Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. Малыгина, д. 86



✉ eslagoda@ikz.ru

Белова Наталия Геннадьевна

ORCID: 0000-0003-1252-7486

кандидат географических наук

Научный сотрудник; ИКЗ ТюмНЦ СО РАН

625026, Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. Малыгина, д. 86



✉ nataliya-belova@ya.ru

Жученко Наталья Альбертовна

ORCID: 0000-0002-9966-9040

Научный сотрудник; Лимнологический институт СО РАН

664033, Россия, Иркутская обл., г. Иркутск, Свердловский р-н, ул. Улан-Баторская, д. 3



✉ zhna@lin.irk.ru

Статья из рубрики "Многолетнемерзлые породы и подземные льды Арктики, Антарктики и горных регионов"

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.3.74967

EDN:

UNTGGG

Дата направления статьи в редакцию:

24-06-2025

Аннотация: Снижение кровли мерзлоты и повышение температуры грунтов приводят к риску газопроявлений из многолетнемерзлых пород. Потенциальную опасность эмиссии парниковых газов в атмосферу представляют газонасыщенные эпикриогенные морские мерзлые отложения, а также некоторые типы подземных льдов Ямала. Проведено исследование генезиса подземных льдов в пределах стационара «Васькины Дачи» в 2019–2021 гг. В строении III равнины на Центральном Ямале изучены четыре группы подземных льдов – повторно-жильные льды, псевдоморфоза, пластовые льды. Целью работы является исследование генезиса подземных льдов и их взаимосвязи с вмещающими отложениями в условиях изменения климата. На основе данных об особенностях залегания льдов в естественных обнажениях, литологическом составе вмещающих отложений, петрографических особенностях льдов в шлифах авторы статьи предлагают выделить геохимические маркеры, указывающие на генезис льдов. Установлено криолитологическое строение, определен литологический состав отложений на лазерном гранулометре, определен ионный состав льдов и отложений методами ионометрического титрования, титриметрии, атомной абсорбции, атомной эмиссии, турбидиметрии и ионометрии. Проведено исследование структуры и текстуры льда, ионного, элементного состава методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Установлена взаимосвязь химического состава, текстуры и структуры повторно-жильных, линзовидных, пластовых льдов и вмещающих отложений. В верхней части разреза на границе слоя озерных отложений установлено континентальное засоление, а в нижней части разреза химический состав указывает на прибрежно-морские условия. По ионному составу подтвержден прибрежно-морской генезис пластовых льдов; выделена засоленная псевдоморфоза, отличающаяся по структуре и текстуре льда и химическому составу от повторно-жильных льдов. Распределения редкоземельных элементов позволили определить условия льдообразования. Линзовидный лед и псевдоморфоза имеют отрицательную цериевую и положительную европиевую аномалии в отличии от повторно-жильных льдов. Установлено промерзание в обводненных условиях для пластового, линзовидного льда и псевдоморфозы. Обоснована применимость геохимических маркеров для уточнения условий при формировании подземных льдов и генезиса отложений с учетом криолитологического строения разрезов.

Ключевые слова:

подземный лед, геохимия подземных льдов, геокриологические условия, лантаноиды, криогенное концентрирование, структура льда, редкоземельные элементы, интенсивность водной миграции, микроэлементный состав льда, петрография льда

Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской

Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

Авторы благодарят Тихонравову Я.В. и Хомутова А.В. за организацию и проведение полевых работ.

Введение

По данным Гидрометцентра России 2024 год стал вторым самым теплым годом за период наблюдения с 1891 г. Снижение кровли мерзлоты, повышение температуры грунтов приводят к риску газопроявлений из многолетнемерзлых пород (ММП) [1]. Потенциальную опасность эмиссии парниковых газов в атмосферу представляют газонасыщенные эпикриогенные морские мерзлые отложения, а также некоторые типы подземных льдов Ямала, которые имеют высокие содержания CO₂, CH₄ [2].

Для оценки газонасыщенности подземных льдов важное значение имеют их генезис и распространение на равнинах Севера Западной Сибири, Севера Канады и Аляски. Однако генезис пластовых льдов (ПЛ) остается дискуссионным: ледниковым [3–11], морским или внутргрунтовым [12–17]. Различия в интерпретации результатов исследований связано с тем, что термин «пластовый лед» носит собирательный характер и не отражает их генезис [14]. Идентификация механизма и условий формирования льдов часто осложнена парагенезисом ПЛ с повторно-жильными (ПЖЛ) и линзовидными, трещинными и клиновидными льдами [15, 18–20].

Пластовые льды Центрального Ямала большинство современных авторов относят к внутргрунтовому типу. Одни считают, что формирование ПЛ связано с промерзанием вод подозерных таликов в морских отложениях в субаэральной обстановке [15–16]; другие – с промерзанием прибрежно-морских осадков с участием морских вод, разбавленных поверхностными водами в субаквальных условиях [13, 17] или за счет инъекций и промерзания сеноманских вод [21].

На основе данных об особенностях залегания льдов в естественных обнажениях, литологическом составе вмещающих отложений, петрографических особенностях льдов в шлифах авторы статьи предлагают выделить геохимические маркеры, указывающие на генезис льдов.

Методы исследований

На Центральном Ямале в 2019 г. установлено криолитологическое строение разрезов стенок термоцирков (ТЦ) №№ 1, 2, 4, 5 и 5н, собраны образцы отложений и монолитов льда. Определены суммарная влажность, гранулометрический состав (31 проба), состав основных ионов водных вытяжек из отложений (17 проб), ионный и микроэлементный состав ПЛ (3), ПЖЛ (4), псевдоморфозы по ПЖЛ (1) и линзовидного льда (2).

Поскольку генезис льда также определяется генезисом вмещающей четвертичной толщи, для корреляции разрезов определен состав пород на гранулометре Mastersizer 3000 с ультразвуковой диспергацией в Институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН.

Количество и соотношение ионов во льдах и отложениях отражают условия их формирования и источник вод [13, 21, 22]. Для определения морского типа исходных вод используют соотношения ионов Cl⁻ >> SO₄²⁻ > HCO₃⁻ и Na⁺ >> Mg²⁺ > Ca²⁺ [14, 22]. Для этого монолиты льда были сохранены в мёрзлом состоянии до проведения анализа в Тюменском индустриальном университете методами ионометрического титрования

(HCO_3^-), титриметрии (Cl^-), атомной абсорбции (Ca^{+2} , Mg^{+2}), атомной эмиссии (Na^+ , K^+), турбидиметрии (SO_4^{2-}) и ионометрии (рН). Часть расплава льда отфильтрована и заморожена до минус 17 °С и отправлена вместе с монолитами льда для анализа по методике [20] в Лабораторию гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института СО РАН. После повторного замораживания минерализация проб уменьшилась на 30 %, увеличилось значение рН на 0,3–0,5 ед. и, незначительно, изменился состав ионов.

Для установления связи между количеством грунта во льдах и количеством растворенных солей определено массовое содержание грунта. Для оценки засоленности льдов использована количественная классификация [23]. Термин «степень засоленности» или «засоленность» отложений использован по ГОСТ Р 59540-2021, а интерпретация проведена по ГОСТ 25100-2020.

Распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в отложениях зависит от состава пород и от фракционирования лантаноидов в зоне гипергенеза [24]. Выполнено определение общего количества РЗЭ во всех типах льда и проведена оценка по величинам цериевой (Ce_{an}) и европиевой (Eu_{an}) аномалий [20 25, 26]. Значения Ce_{an} и Eu_{an} менее 1 называют отрицательной аномалией, а более 1 – положительной.

Для осадочных пород показатель $\Sigma \text{Ce}/\Sigma Y$, где $\Sigma \text{Ce}:(\text{La}-\text{Eu})$, $\Sigma Y:(\text{Gd}-\text{Lu}, Y)$ используют как индикатор климата. При гумидном литогенезе интенсивнее разрушаются полевые шпаты, акцессорные минералы, содержащие церий, что приводит к увеличению соотношения. Значение $\Sigma \text{Ce}/\Sigma Y=3$ рассматривают как границу между гумидными и аридными обстановками, а для криолитозоны этот показатель может возрастать [24].

Изучены нормированные соотношения La/Sm , La/Yb , являющиеся индикаторами физико-химических и фациальных условий диагенеза – мелководно-морских или глубоководных [24, 27].

Текстура и структура льда изучена в проходящем и поляризованном свете, в шлифах [28]. Для оценки расположения, размеров, формы и ориентировки кристаллов рассчитаны параметры: S_{mid} – площадь сечения осредненного кристалла (cm^2); C_{diff} – коэффициент различия (отношение максимальной площади кристалла к минимальной); C_{el} – коэффициент удлиненности (отношение максимальной диагонали к среднему поперечнику кристалла).

Район исследования

Исследования проведены на научно-исследовательском стационаре «Васькины Дачи» ИКЗ ТюмНЦ СО РАН на Центральном Ямале [29]. Он расположен в пределах геоморфологических уровней с высотами 13–40 м – холмисто-увалистых казанцевской и салехардской III, IV равнин [30]. В долинах ограниченно распространены низкие аллювиальные поймы с высотами 3–12 м [31]. Поверхность равнин преобразована термоденудацией и термокарстом, за счет вытаивания ПЖЛ и ПЛ [18].

На Центральном Ямале четвертичную толщу с ПЛ по генезису относят, как к ледниковой [8–11], так и к морской, содержащей фауну каргинского периода [12–14, 32]. Авторы, придерживаются более обоснованной современными фактами версии, что верхняя часть

разреза равнин состоит из двух пачек: нижней – морской, верхней континентальной [14]. Возраст морских и прибрежно-морских отложений с абсолютными отметками 25–35 м оценивают, как зырянско-каргинский; с отметками 12–20 м – как сартанский [20, 33].

В районе исследований паралельно-слоистые ПЛ имеют внутригрунтовый сегрегационный генезис, сформированы при эпигенетическом промерзании, отличаются более крупными кристаллами, чем ПЖЛ. ПЛ в разрезах приурочены к морским, прибрежно-морским или субаэральным отложениям. Время формирования ПЛ оценивают по-разному от 90–50 до 34–25 т.л.н. [14, 34]; ПЖЛ, секущие ПЛ, сформированы в сартанский период 29–11,7 т.л.н. [34, 35] и позднее до 5.т.л н [36]; линзовидные в кровле ММП и клиновидные льды сформированы, предположительно, в голоцене [2, 20].

Отложения ТЦ1

Термоцирк развивается на останце III равнине с полигональным микрорельефом на берегу озера LK-031 (рис. 1А). Отложения ТЦ1 незасоленные суммой ионов 0,09–0,11 г/кг. В слоях 2 и 3 преобладают ионы кальция, натрия и гидрокарбонат-ионы (рис. 1Б). Слой 2 по текстуре, гранулометрическому и химическому составам отнесен к континентальным аллювиальным отложениям. Ионный состав и наличие псевдоморфозы в слое 3 свидетельствуют о его протаивании и преобразовании. Слой 3 по гранулометрическому составу, аналогичен прослоям грунта в слое 4. Слоистый ледогрунт слоя 4 отнесен к ПЛ с корковой, микролинзовидной и ячеистой текстурами. Слой 4 отличается преобладанием хлоридов и натрия и повышенной суммой ионов 0,36–0,47 г/кг.

Подземные льды ТЦ1

Ледогрунтовые ПЖЛ (табл. 1) толщиной 15–25 см вскрыты вкрест простирания ПЛ. Контакт жил пропитан гидроокислами железа, что указывает на их эпигенетичность по отношению к ПЛ. Льды пресные 0,07–0,10 г/л. В составе ионов преобладают гидрокарбонаты и натрий (рис. 2). Лед содержит плёнки мути и мелкие пузырьки воздуха. Текстура вертикально-полосчатая за счет минеральных частиц супесей. В структуре установлены элементарные жилки с осевыми швами и зажатыми удлиненными включениями грунта. Структура представлена, преимущественно, мелкими $S_{mid} \sim 0,03\text{--}0,04 \text{ см}^2$ удлиненными кристаллами, создающими полосчатость и более крупными $S_{mid} \sim 0,04\text{--}0,07 \text{ см}^2$ между элементарными жилками (рис. 3А).

Линзовидное ледяное тело, вложенное в понижение кровли ПЛ и ПЖЛ, образует козырек. Лед имеет пресный 0,12 г/л гидрокарбонатно-хлоридный, натриевый состав. Во льду хаотично распределены пузырьки газа. В структуре отсутствуют элементарные жилки и осевые швы. Вогнутая параллельная слоистая текстура, образованная удлиненными $C_{el}=1,5$ обжатыми включениями песчаного грунта, соответствует контурам линзы и подчеркивает затек вниз вдоль клиновидного тела, что характерно для оплавленного контакта (рис. 3Б). Структура представлена, преимущественно, мелкими кристаллами $S_{mid} \sim 0,02 \text{ см}^2$, неоднородными по размеру $C_{diff}=47$; и более крупными $S_{mid}=0,09 \text{ см}^2$ однородными $C_{diff}=9$ (рис. 3В).

Отложения ТЦ2

Термоцирк расположен на склоне III равнины на берегу озера LK-015. Слои 3, 4 и 6

имеют незасоленный континентальный сульфатно-кальциевый состав суммой ионов 0,06–0,19 г/кг (рис. 1В). Супеси слоя 5 отличаются повышенной суммой ионов 0,27–0,77 г/кг с преобладанием гидрокарбонатов и кальция (рис. 2А), что может указывать на накопление солей при вторичном промерзании толщи. Ледогрунт слоя 7 образован супесью с частой линзовидно-слоистой криогенной текстурой со шлирами льда толщиной 0,2–2 см. Псевдоморфозы по ледяным жилам и ожелезнение указывает на протаивание всей видимой толщи и переработку склоновыми процессами.

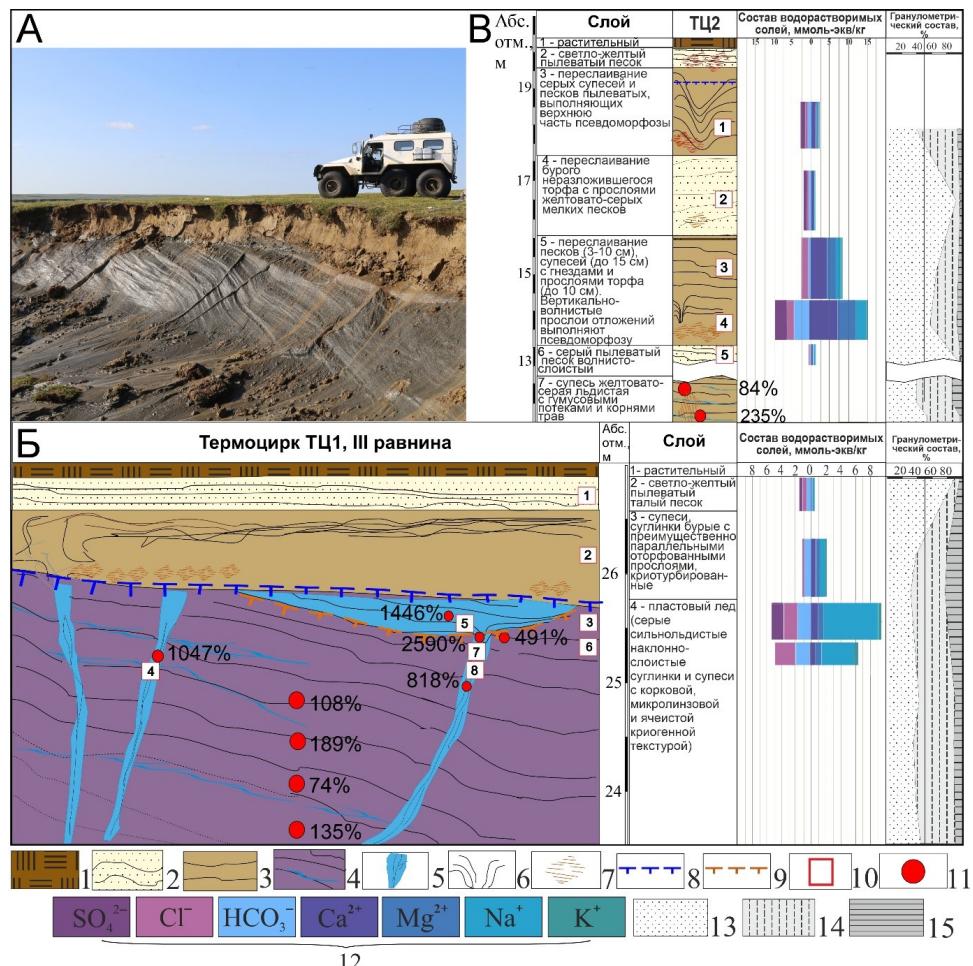


Рис. 1. Естественное обнажение ТЦ1 (70.280895, 69.179702) (А); строение отложений и условия залегания подземных льдов ТЦ1 (Б) и ТЦ2 (70.267702, 68.923545) (В): 1 – мохово-растительный слой; 2 – пески мелкие и пылеватые; 3 – Супеси и пески с оторfovанными прослойками; 4 – ПЛ, серые суглинки и супеси сильнольдистые; 5 – ПЖЛ; 6 – псевдоморфозы; 7 – ожелезнение; 8 – глубина сезонно-талого слоя (СТС) [37]; 9 – реликтовая глубина СТС; 10 – места отбора проб для определения химического состава; 11 – суммарная влажность; 12 – состав водорастворимых ионов; 13–15 – гранулометрические фракции: 13 – песков (0,25–0,05 мм), 14 – пыли (0,05–0,005 мм), 15 – глины (> 0,005 мм)

Fig. 1. Outcrop in the TC1 thermocirque (70.280895, 69.179702) (A); structure of deposits and conditions of occurrence of ground ice of TC1 (B) and TC2 (70.267702, 68.923545) (C): 1 – moss; 2 – fine sands; 3 – sandy loam and sand with peaty interlayers; 4 – massive ice, gray loams and sandy loams with high ice content; 5 – ice wedge; 6 – pseudomorphs; 7 – iron hydroxide; 8 – recent base of active layer [37]; 9 – relict base of active layer; 10 – chemical composition sampling points; 11 – total moisture; 12 – composition of water-soluble ions; 13–15 – granulometric fractions: 13 – sand (0.25–0.05 mm), 14 – dust (0.05–0.005 mm), 15 – clay (> 0.005 mm)

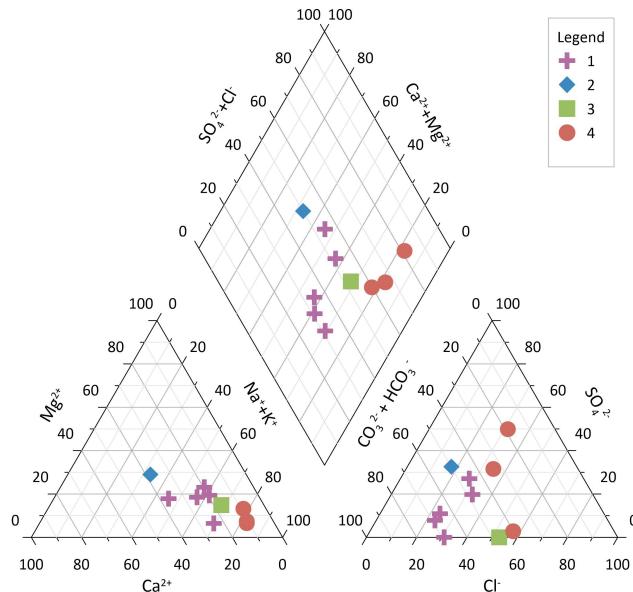


Рис. 2. Диаграмма состава основных ионов в %-эквивалентах в расплавах подземных льдов ТЦ1, ТЦ4, ТЦ5 и ТЦ5н: 1 – ПЖЛ; 2 – псевдоморфоза; 3 – линзовидный лед; 4 – ПЛ

Fig. 2. Diagram of the composition of the main ions in % equivalents in the melts of ground ice of the thermocirques TC1, TC4, TC5 and TC5n: 1 – wedge ice; 2 – pseudomorphs; 3 – ice lens; 4 – massive ice

Таблица 1. Редкоземельные элементы в подземных льдах в районе НИС Васькины Дачи

Table 1. Rare earth elements in ground ice, Vaskiny Dachi

Термо-цирк	Тип льда	Образец	% грунта	$\Sigma(\text{РЗЭ}+\text{Y})$, ppb	$\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$	Ce_{an}	Eu_{an}	La/Sm	La/Yt
ТЦ1	ПЖЛ	Рис 1Б, обр. 4	8,7	0,31	1,3	0,93	1,10	2,7	7,0
	ПЖЛ	Рис 1Б, обр. 8	10,9	0,54	2,0	0,91	1,26	3,9	5,3
	Линзовидный	Рис 1Б, обр. 5	6,5	0,78	5,3	0,08	1,19	23,7	67,2
	Линзовидный на контакте с ПЖЛ	Рис 1Б, обр. 7	3,7	0,45	1,2	0,89	1,63	2,3	4,0
	ПЛ	Рис 1Б, обр. 6	16,9	3,41	3,0	0,85	0,89	5,9	16,1
ТЦ4	ПЖЛ – кайма жилы	Рис 4	0,8	0,80	2,3	0,44	2,11	9,2	13,7
	ПЖЛ – центральная часть	Рис 4	3,0	0,60	1,4	0,77	1,90	2,6	4,0
ТЦ5	Псевдоморфоза	Рис 4	48,1	0,36	3,6	0,09	2,07	27,9	20,2

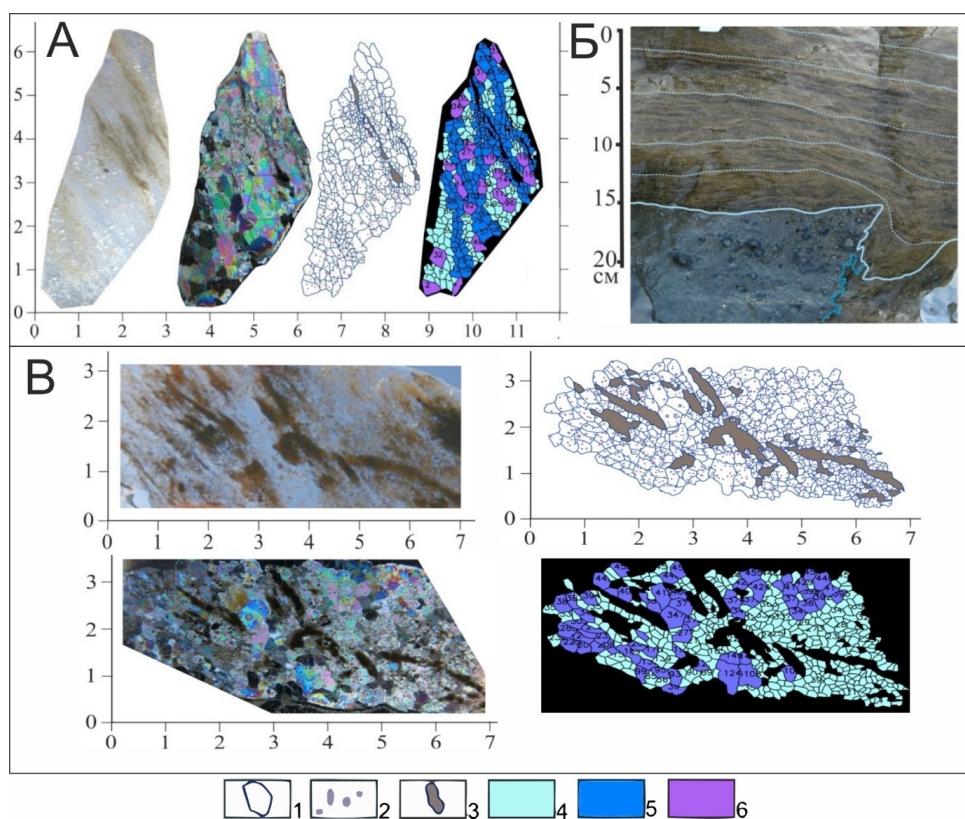


Рис 3. Текстура и структура ПЖЛ (А) и линзовидного льда (В) в шлифах; параллельная слоистая текстура линзовидного льда в монолите с оплавленным контактом (Б): 1 – контуры кристаллов; 2 – пузырьки воздуха; 3 – включения грунта; 4–6 – группы кристаллов

Fig 3. Texture and structure of wedge ice (A) and ice lense (B) in thin sections; parallel layered texture of lense ice in a monolith with a melted contact (Б): 1 – contours of crystals; 2 – air bubbles; 3 – soil inclusions; 4–6 – groups of crystals

Отложения ТЦ4, ТЦ5 и ТЦ5н

ТЦ5 и ТЦ4 вскрывают с разных сторон останец III равнины с абс. отметками до 25 м, расположенный между двумя озерами. ТЦ5н расположен в 35 м севернее ТЦ5 на пологом термоденудационном склоне, бровка термоцирка снижена до абс. отметки 14 м. В сводном разрезе отложений выделено 5 слоев (рис. 4). Во вложенных отложениях слоя 2 увеличивается количество ионов с глубиной от 0,13 до 0,96 г/кг при неизменном континентальном сульфатно-натриевом составе. На подошве слоя 2 засоленный песок имеет сульфатно-кальциевый состав и сумму ионов 2,36 г/кг. В незасоленных отложениях слоя 3 преобладают гидрокарбонаты, сульфаты, натрий и кальций суммой 0,13–0,39 г/кг. Таберированные отложения слоя 4 имеют несогласный срезающий контакт с льдистыми подстилающими отложениями, отличаются линзовидно-ломанными криогенными текстурами согласными со слоистостью. Слой 5 слоистого суглинистого ледогрунта отнесен к ПЛ и имеет хлоридно-сульфатный, натриевый состав и сумму ионов 0,62 г/кг.

Химических состав отложений разреза имеет сходство с составом отложений в районе м. Марре-Сале [20] – в верхней части разреза на границе слоя в озерных отложениях установлено континентальное засоление, а в нижней части разреза химический состав указывает на прибрежно-морские условия. Засоленность на контакте глин и песков – результат промерзания, отжиманием солей в остаточный раствор и преобразованием

химического состава [\[22\]](#).

Льды ТЦ4, ТЦ5 и ТЦ5н

В ТЦ4 вскрыты ПЖЛ шириной 1 м через каждые ~12 м и линзовидный лед, фиксирующий чашу протаивания в кровле ПЛ под СТС. ПЖЛ пресные 0,10-0,11 г/л в составе преобладают гидрокарбонаты и натрий. Лед содержит незначительное количество минеральных пылеватых частиц (табл. 1). Текстура вертикально-полосчатая, за счет фрагментов элементарных жилок с четкими осевыми швами в которых зажаты мелкие круглые пузырьки воздуха и минеральные примеси. Кристаллы льда расположены симметрично от шва имеют изометричную форму и ровные границы.

На вершине останца равнины в ТЦ5 вскрыта ледогрунтовая жила, состоящая из клиновидных вертикально вытянутых затеков разного состава (рис. 5А). Жила представлена: ледогрунтом с вертикально-волнистой прожилковой, линзовидной, микролинзовидной текстурой сегрегационного льда (рис. 5Б), клиновидными внедрениями вертикально-полосчатого льда; прожилками белёсого пузырчатого льда и стекловидного льда.

Ледогрунтовая часть жилы (табл. 1) имеет слабосолёный сульфатно-гидрокарбонатный, магниево-натриево-кальциевый состав и сумму ионов 0,46 г/л.

Вертикально-полосчатый лед выполнен чередованием минеральных прослоев с льдом-цементом и льдом с песчаными примесями, вытянутыми пузырьками воздуха, пересечен наклонными трещинами с грунтом (рис. 5В). Структура льда представлена крупными S_{mid} ~0,04–0,33 см² вытянутыми кристаллами $C_{el}=1,6$, и мелкими локализованными в области сгущения минеральных примесей (рис. 6А).

Белесый пузырчатый лед имеет текстуру льда, выполненную множеством трубчатых пузырьков и между удлиненными кристаллами зажаты рассеянные минеральных частицы. Вертикально-полосчатый и белесый полосчатый сложены вертикально и наклонно ориентированными удлиненными изометричными кристаллами, с многочисленными пузырьками воздуха, вытянутыми вверх, что указывает на их миграцию в свободной воде. Структура стекловидного льда представлена крупными $S_{mid} \sim 0,02–0,42$ см² слабо вытянутыми вертикально $C_{el}= 1,4$ кристаллами, а мелкие локализованы в скоплении примесей грунта (рис. 6Б).

Жила отнесена к ледогрунтовой псевдоморфозе, т.е. в ее строении участвуют прослои грунта с сегрегационными текстурами и отсутствуют элементарные жилки.

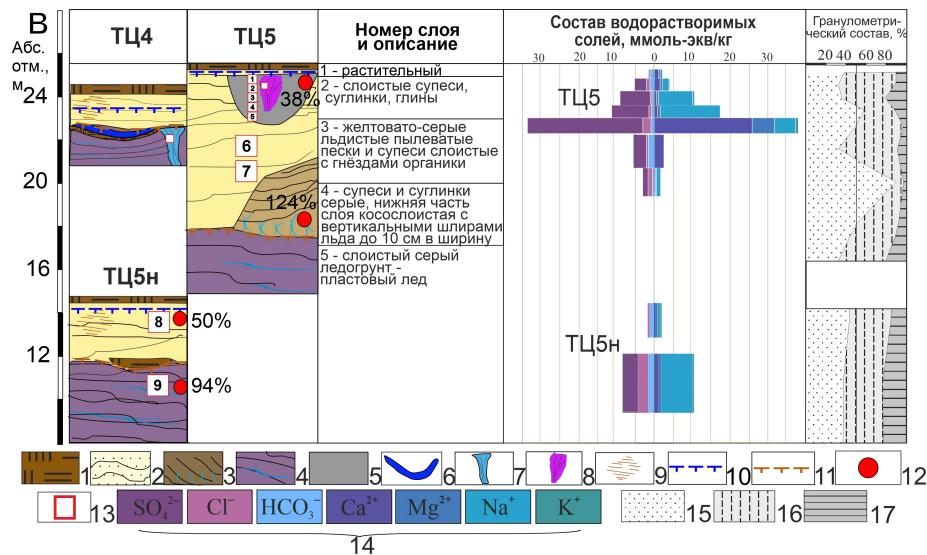
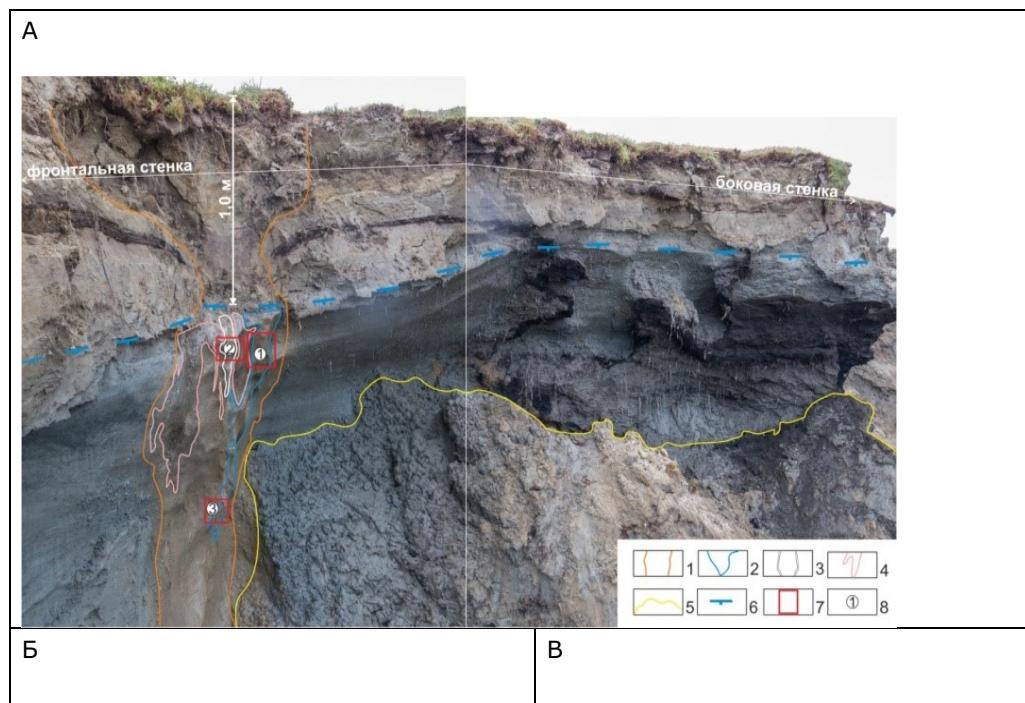


Рис. 4. Строение отложений и условия залегания подземных льдов ТЦ4, ТЦ5н и ТЦ5 (70.231805, 69.014393): 1 – мохово-растительный слой, торф; 2 – пески мелкие и пылеватые; 3 – супеси и суглинки слоистые с оторfovанными прослойками, таберальный комплекс; 4 – серые суглинки и супеси сильнольдистые; 5 – вложенные озерные отложения; 6 – линза льда; 7 – повторно-жильный лед; 8 – ледогрунтовая-жила; 9 – ожелезнение; 10 – современная глубина СТС [37]; 11 – реликтовая глубина СТС; 12 – суммарная влажность 13 – места отбора проб для определения химического состава; 14 – состав водорастворимых ионов; 15–17 – гранулометрические фракции: 15 – песков (0,25–0,05 мм), 16 – пыли (0,05–0,005 мм), 17 – глины (> 0,005 мм)

Fig. 4. Structure of deposits and the conditions of occurrence of ground ice TC4, TC5n and TC5 (70.231805, 69.014393): 1 – moss; 2 – fine sands; 3 – layered sandy loams and loams with peat interlayers, taberall complex; 4 – gray loams and sandy loams with high ice content; 5 – embedded lacustrine deposits; 6 – ice lens; 7 – wedge ice; 8 – ice-soil vein; 9 – iron hydroxide; 10 – recent base of active layer [37]; 11 – relict base of active layer; 12 – total moisture; 13 – chemical composition sampling points; 14 – composition of water-soluble ions; 15–17 – granulometric fractions: 15 – sand (0.25–0.05 mm), 16 – dust (0.05–0.005 mm), 17 – clay (> 0.005 mm)



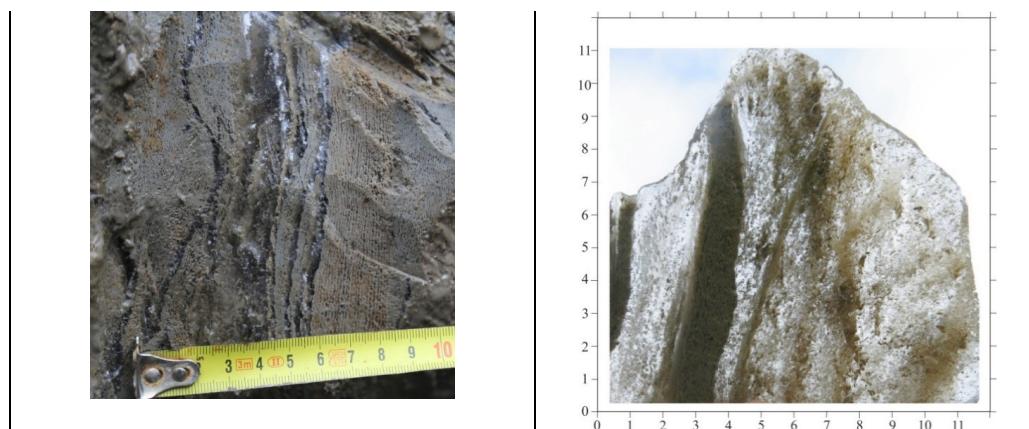


Рис. 5. Вертикально-полосчатое строение ледогрунтовой псевдоморфозы ТЦ5 (А); вертикальная шлировая текстура ледогрунтовой части (Б); вертикально-полосчатый лед с элементарной жилкой (В): 1 – границы псевдоморфозы; 2 – границы вертикально-полосчатого льда (обр.1) и стекловидного льда (обр. 3); 3 – белёсый пузырчатый лед (обр. 2); 4 – граница ледогрунта; 5 – осыпь; 6 – граница СТС; 7 – места отбора проб; 8 – номер монолита

Fig. 5. Vertically banded ice-soil pseudomorph TC5 – detail of Fig. 3A (A); vertical layered cryostructure of the sandy part (B); vertically wavy texture of the icy sediments with an ice vein indicated (B): 1 – pseudomorph boundaries; 2 – boundary of “clean” ice (sample 1) and glassy ice (sample 3); 3 – bubbly ice (sample 2); 4 – icy sediments boundary; 5 – scree; 6 – active layer; 7 – sampling sites; 8 – monolith number

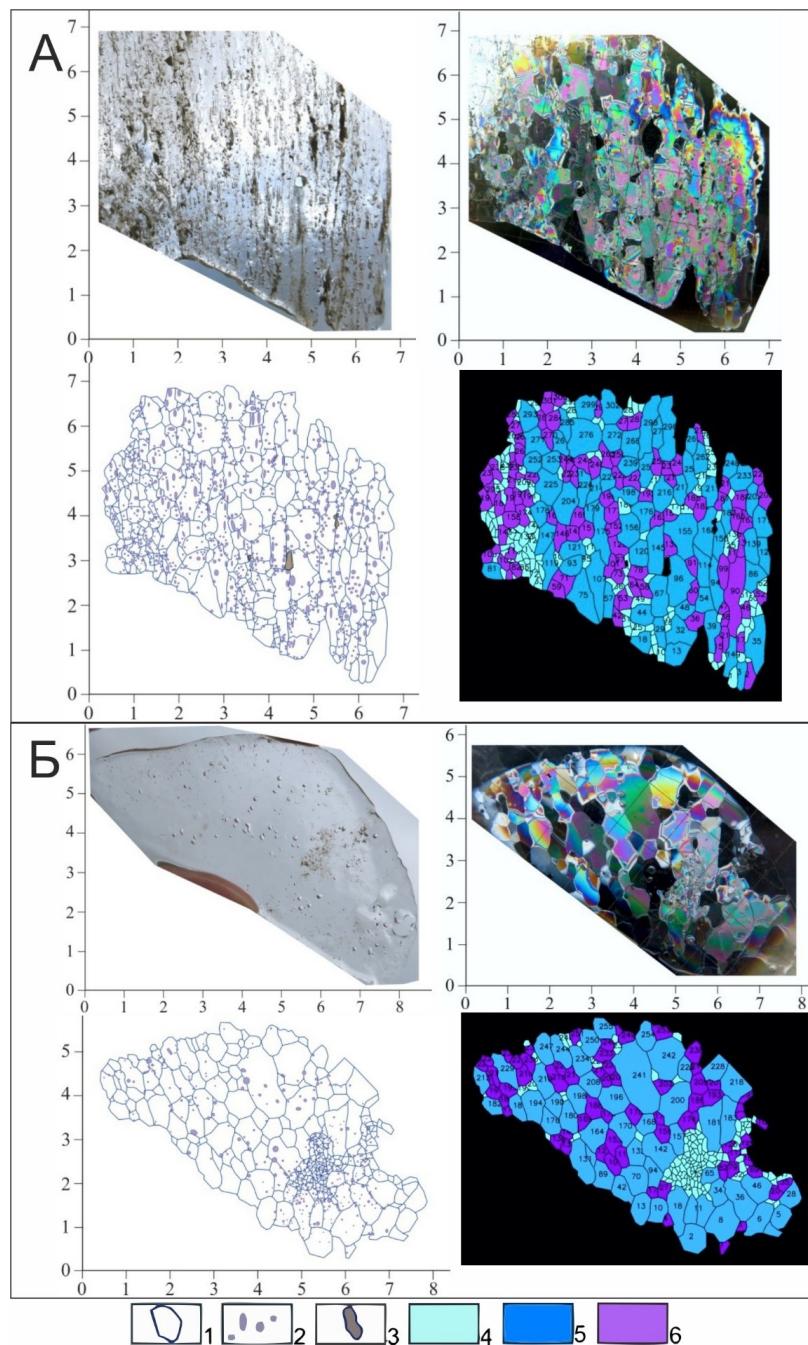


Рис. 6. Текстура и структура в шлифах вертикально-полосчатого (А) и стекловидного (Б) льдов псевдоморфозы в термоцирке ТЦ5: 1 – контуры кристаллов; 2 – пузырьки воздуха; 3 – включения грунта; 4–6 – группы кристаллов

Fig. 6. Ice structure in thin sections of vertically layered (A) and glassy (B) ice of pseudomorphs in the TC5 thermocirque: 1 – crystal contours; 2 – air bubbles; 3 – soil inclusions; 4–6 – crystal groups

Обсуждение результатов исследований подземных льдов

В строении III равнины выделены четыре группы подземных льдов – ПЖЛ, ледогрунтовая псевдоморфоза, ПЛ, и линзовидные льды над кровлей ММП.

Один из критериев сегрегационного генезиса ПЛ является изменение ионного состава воды с глубиной. Погребенный ледниковый лед, должен иметь резкие разрывы между ионным составом ПЛ и вмещающей толщи [38], а также малое содержание ионов [25]. Состав ионов и минерализация ПЛ Центрального Ямала меняется по разрезу с глубиной

от 10 до 250 мг/л [16, 39, 40]. При этом минерализация текстурообразующих льдов вмещающих отложений выше, чем у чистого ПЛ [40]. В составе ионов преобладают хлориды, гидрокарбонаты и натрий, реже – сульфаты и магний [21, 22]. Преобладание морских ионов в ПЛ связывают с сегрегационным генезисом льда в прибрежно-морских отложениях [3].

Ледогрунтовая ПЛ в ТЦ1 имеет слабозасоленный состав, соответствующий прибрежно-морским условиям – близка по составу ионов к ПЛ центрального и западного Ямала [14, 21]. По криолитологическим особенностям разреза ТЦ1 и ионному составу отложений установлено протаивание верхней части ПЛ с прослойками грунта, просадка и уплотнение отложений, их опреснение и смена химического состава с прибрежно-морского на континентальный. При последующем промерзании над сниженной кровлей ПЛ происходило отжиманием солей в остаточный раствор с образованием засоленных прослоев грунта в таберальных отложениях и был образован линзовидный лёд.

Структура и текстура линзовидного ледяного тела в разрезе ТЦ1 отличается от ПЖЛ хаотичным распределением пузырьков газа, отсутствием элементарных жилок (рис. 3в). Линзовидный лед по составу ионов близок к составу ПЛ и отличается от состава ПЖЛ (рис. 2). Лед сформирован при вторичном промерзании чаши протаивания в кровле пластового льда за счет оттаивания ПЛ с ПЖЛ и фильтрации воды через перекрывающие отложения. Следовательно, лед имеет инфильтрационно-сегрегационный генезис.

ПЛ ТЦ5н на глубине 1 м от кровли отличается преобладанием континентальных ионов – сульфатов. Вероятно, прибрежно-морские отложения ПЛ были опреснены или при частичном протаивании на дне термоцирка, или за счет миграции внутргрунтовых таликовых вод в не полностью оттаявший ПЛ. Изотопные данные подтверждают возможность процесса обмена влагой между ПЛ и СТС [33].

ПЖЛ в ТЦ1 и ТЦ4 имеют четко выраженную вертикальную полосчатость, элементарные жилки с осевыми швами, в которых зажаты удлиненные включения грунта, что является признаком повторно-жильного генезиса льда, а их ожелезненные контакты указывают на эпигенетический тип по отношению к ПЛ (рис. 4).

ПЖЛ Центрального и Западного Ямала, преимущественно, имеют минерализацию около 30 мг/л и гидрокарбонатно-хлоридный, натриевый состав. В некоторых ПЖЛ отмечена повышенная минерализация 70–200 мг/л, что может быть связано с миграцией солей из отложений или попаданием грунта в состав льда [16, 25]. Состав ПЖЛ в ТЦ1 и ТЦ4 пресный и соответствуют континентальному источнику воды; их состав близок к составу отложений слоя 3 в ТЦ1 и отличается от состава ПЛ.

Строение ледогрунтовой псевдоморфозы в разрезе ТЦ5 (рис. 6), обусловлено наличием затеков: песчаных с сегрегационными текстурами, сегрегационных и конжеляционных льдов, с более крупными кристаллами льда, чем в ПЖЛ. Она сформирована после протаивания ПЖЛ, в результате неоднократного возникновения полостей протаивания, затекания в них разжиженного грунта или свободной воды сверху, со стенок и всестороннего промерзании заполнителя, что привело к сочетанию в жиле сегрегационных, конжеляционных льдов и грунтов с сегрегационными шлирами.

Псевдоморфоза ТЦ5 засолена за счет большого количества включений грунта, однако соотношения ионов близки к составу ПЖЛ изученных разрезов (рис. 2), поскольку источником формирования псевдоморфозы были воды вытаивающей жилы.

На химических состав ПЖЛ влияют атмосферные аэрозоли, поверхностные воды и химический состав ионов в поровых растворах вмещающих отложений. Для ПЖЛ, источником которых являются атмосферные осадки, содержащие континентальные аэрозоли $Ce_{an} \sim 0,7\text{--}0,8$ и $Eu_{an} \sim 0,7\text{--}1,1$ [25]. В узких ПЖЛ ТЦ1 Ce_{an} и Eu_{an} аномалии ~ 1 , что соответствуют континентальному источнику воды и попаданию в состав жил поверхностных вод [25].

В ПЖЛ ТЦ4 в центральной части жила имеет Ce_{an} соответствующую атмосферным осадкам с континентальными аэрозолями, а на контакте грунтом и ПЛ отличается отрицательной Ce_{an} и положительной Eu_{an} из-за влияния прибрежно-морского генезиса толщи [26].

Линзовидный лед ТЦ1 имеет сильно отрицательную Ce_{an} , что отличает его от ПЖЛ. Такие значения характерны для льдов сегрегационного генезиса в прибрежно-морских отложениях [26].

Псевдоморфоза ТЦ5 имеет сильно отрицательную Ce_{an} и положительную Eu_{an} , что является показателем полного вытаивания льда ПЖЛ и преобразованием талых вод при контакте со вмещающими отложениями, и последующим промерзанием.

Наибольшими значениями общего количества редкоземельных элементов отличаются внутригрунтовые залежи ПЛ, а в ПЖЛ значения ниже (табл. 1).

Наибольшие значения соотношений $\Sigma Ce/\Sigma Y$ и La/Sm , La/Yb имеют ПЛ, линзовидный лед и ледогрунтовая псевдоморфоза, которые промерзали в обводненном состоянии [41]. Значения $\Sigma Ce/\Sigma Y$ в ПЛ соответствуют прибрежно-морским криогумидным условиям; в линзовидном льду – криогумидным условиям болот и озер; в псевдоморфозе – криогумидным условиям и локальным обводнением, в ПЖЛ – криоаридным условиям.

Заключение

В строении III равнины на Центральном Ямале выделены и изучены четыре группы подземных льдов – ПЖЛ, псевдоморфоза по ПЖЛ, ПЛ, и линзовидные льды.

Комплекс криолитологических и геохимических методов позволил уточнить синкриогенный и эпикриогенный типы вмещающих толщ, сегрегационный, конжеляционный и повторно-жильный генезис подземных льдов, их геохимический и микроэлементный состав, необходимые для установления условий их формирования.

Ионный состав и распределение редкоземельных элементов в расплавах льда показали, что льды формировались из разных источников вод: атмосферных осадков, поверхностных континентальных вод, растворов прибрежно-морских осадков, внутригрунтовых вод из оттаявших отложений.

В верхней части разреза на границе слоя озерных отложений установлено континентальное засоление, а в нижней части разреза химический состав указывает на прибрежно-морские условия. По ионному составу подтвержден прибрежно-морской генезис ПЛ; выделена засоленная псевдоморфоза, отличающаяся по структуре и текстуре льда и химическому составу от ПЖЛ.

Распределения РЭЭ позволяют четко определять условия льдообразования: по отрицательной Ce_{an} и положительной Eu_{an} установлено отличие линзовидного льда в ТЦ1 и псевдоморфозы в ТЦ5 от льдов ПЖЛ; по соотношению $\Sigma Ce/\Sigma Y$ установлено

промерзание в обводненных условиях для пластового, линзовидного льда и псевдоморфозы. Обоснована применимость геохимических маркеров для уточнения условий при формировании подземных льдов и генезиса отложений с учетом криолитологического строения разрезов.

Библиография

1. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Взрывная дегазация Земли на полуострове Ямал и прилегающей акватории Карского моря // Арктика: экология и экономика. – 2024. – № 2 (14). – С. 177-191. – DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-177-191. EDN: ZOTKLE
2. 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. Инженеринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 9. – С. 63-75. – DOI: 10.18799/24131830/2023/9/4084. EDN: LWRFKR
3. Fritz M., Wetterich S., Meyer H., Schirrmeister L., Lantuit H., Pollard W. H. Origin and characteristics of massive ground ice on Herschel Island (western Canadian Arctic) as revealed by stable water isotope and Hydrochemical signatures // Permafrost and Periglacial Processes. – 2011. – Vol. 22. – P. 26-38. – DOI: 10.1002/ppp.714. EDN: OKTWVX
4. Murton J. B. Ground-ice stratigraphy and formation at North Head, Tuktoyaktuk Coastlands, western Arctic Canada: a product of glacier-permafrost interactions // Permafrost and Periglacial Processes. – 2005. – Vol. 16. – P. 31-50. – DOI: 10.1002/ppp.513. EDN: LNBZUJ
5. Waller R., Murton J. Basal glacier ice and massive ground ice: Different scientists, same science? // Geological Society, London, Special Publications. – 2009. – Vol. 320. – P. 57-69. – DOI: 10.1144/SP320.5. EDN: NBZDQL
6. Wetterich S., Kizyakov A. I., Opel T., Grotheer H., Mollenhauer G., Fritz M. Ground-ice origin and age on Herschel Island (Qikiqtauruk), Yukon, Canada // Quaternary Science Advances. – 2023. – No. 10. – DOI: 10.1016/j.qsa.2023.100077. EDN: YWOTII
7. Svendsen J. I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. – 2004. – Vol. 23. – P. 1229–1271. – DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008. EDN: LISIVD
8. Соломатин В. И. Подземное оледенение Евразии: макроструктура и история развития // Криосфера Земли. – 2018. – Т. 22. – № 1. – С. 94-100. (In Russian)
9. Ingólfsson Ó., Lokrantz H. Massive Ground Ice Body of Glacial Origin at Yugorski Peninsula, Arctic Russia // Permafrost and Periglacial Processes. – 2003. – Vol. 14. – P. 199-215. – DOI: 10.1002/ppp.455. EDN: MCFXLB
10. Lokrantz H., Ingólfsson Ó., Forman S. L. Glaciotectonised Quaternary sediments at Cape Shpindler, Yugorski Peninsula, Arctic Russia: implications for glacial history, ice movements and Kara Sea Ice Sheet configuration // Journal of Quaternary Science. – 2003. – Vol. 18. – P. 527-543. – DOI: 10.1002/jqs.771. EDN: MCFXKR
11. Астахов В. И. Средний и поздний неоплейстоцен ледниковой зоны Западной Сибири: проблемы стратиграфии и палеогеографии // БКИЧП. – 2009. – № 69. – С. 8-24. EDN: WFLOIJ
12. Баду Ю. Б. Полвека в поисках следов волн морских трансгрессий. Воспоминания о будущем // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. – 2021. – № 8. – С. 13-17. – DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-13-17. EDN: IXMHXNK
13. Стрелецкая И. Д., Лейбман М. О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений Центрального Ямала // Криосфера Земли. – 2002. – Т. VI. – № 3. – С. 15-24. EDN: PWYRFB

14. Дубиков Г. И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. – М.: ГЕОС, 2002. – 246 с. (In Russian)
15. Васильчук Ю.К. Парагенетические ансамбли повторно-жильных льдов со льдами различного генезиса // Арктика и Антарктика. 2018. № 2. С. 71-112. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.2.26673 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=26673
16. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Д.Ю., Васильчук А.К., Гаранкина Е.В., Чижова Ю.Н., Шоркунов И.Г. Изотопно-геохимический состав пластовых ледяных залежей на междуречье рек Мордыяха и Сеяха (Мутная), Центральный Ямал // Арктика и Антарктика. 2018. № 1. С. 50-75. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.1.25833 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=25833
17. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. – М.: Институт криосферы Земли СО РАН, 2007. – 206 с. EDN: PWRDGV
18. Подборный Е. Е., Познанин В. Л. Рельеф и криогенные процессы // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: В 3 т. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю. Б. Баду, Н. А. Гафарова, Е. Е. Подборного. – М.: ООО "Газпром Экспо", 2013. – С. 49-62.
19. Стрелецкая И. Д., Гусев Е. А., Васильев А. А., Облогов Г. Е., Аникина Н. Ю., Арсланов Х. А., Деревянко Л. Г., Пушкина З. В. Геокриологическое строение четвертичных отложений берегов западного Таймыра // Криосфера Земли. – 2013. – Т. XVII. – № 3. – С. 17-26. EDN: QZAXHD
20. Бутаков В. И., Слагода Е. А., Опокина О. Л., Томберг И. В., Жученко Н. А. Особенности формирования гидрохимического и микроэлементного состава разных типов подземных льдов мыса Марре-Сале // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 24. – № 5. – С. 29-44. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-5(29-44). EDN: HABOXX
21. Крицук Л. Н. Подземные льды Западной Сибири. – М.: Научный мир, 2010. – 352 с. EDN: QKJNAB
22. Фотиев С. М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты) / науч. ред. В. П. Мельников. – Новосибирск: Гео, 2009. – 277 с. EDN: QKITFL
23. Васильчук Ю. К. Геохимический состав подземных льдов севера Российской Арктики // Арктика и Антарктика. – 2016. – № 2. – С. 99-115. EDN: YGJBVN
24. Балашов Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1976. – 268 с.
25. Бутаков В. И., Слагода Е. А., Тихонравова Я. В., Опокина О. Л., Томберг И. В., Жученко Н. А. Гидрохимический состав и редкоземельные элементы в полигонально-жильных льдах ключевых районов криолитозоны Карского региона // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 78-91. – DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2483. EDN: NGEVFE
26. Бутаков В. И., Тихонравова Я. В., Слагода Е. А. Взаимосвязь строения и химического состава прибрежно-морского и озёрного льда в районе мыса Марре-Сале, Западный Ямал // Лёд и Снег. – 2022. – Т. 62. – № 2. – С. 262-274. – DOI: 10.31857/S2076673422020131. EDN: EPFOSX
27. Шатров В. А., Войцеховский Г. В. Микроэлементы как индикаторы обстановок образования курской серии // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2008. – № 2. – С. 31-43. EDN: KAJUUF
28. Tikhonravova Y. V., Rogov V. V., Slagoda E. A. Genetic identification of ground ice by petrographic method // Geography, Environment, Sustainability. – 2021. – Vol. 14. – P. 20-32. DOI: 10.24057/2071-9388-2021-063. EDN: ICEBJB
29. Лейбман М. О., Хомутов А. В. Стационар "Васькины Дачи" на Центральном Ямале: 30 лет исследований // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII. – № 1. – С. 91-95. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(91-95). EDN: YVJHON

30. Пояснительная записка к карте природных комплексов Севера Западной Сибири для целей геокриологического прогноза и планирования природоохранных мероприятий при массовом строительстве / Отв. ред. Е. С. Мельников. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1991. – 36 с.
31. Карта генерального штаба масштаб 1:200 000 – 1982–1984 гг.
32. Гуськов С. А. Средне-поздненеоплейстоценовые морские трансгрессии на Севере Западной Сибири // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – 2009. – № 69. – С. 40–47. EDN: WFLOJN
33. Данилов И. Д., Парунин О. Б., Марьенко В. А., Чугунов А. Б. Возраст мерзлых отложений и изотопный состав залежей подземных льдов полуострова Ямал (север Западной Сибири) // Геохронология четвертичного периода. – М.: Наука, 1992. – С. 118–124.
34. Чижова Ю. Н., Бабкин Е. М., Хомутов А. В. Изотопный состав кислорода и водорода повторно-жильных льдов Центрального Ямала // Лёд и Снег. – 2021. – Т. 61. – № 1. – С. 137–148. – DOI: 10.31857/S2076673421010077. EDN: OQFCSJ
35. Письменюк А. А., Семенов П. Б., Таракевич И. И. и др. Исследования четвертичных отложений и подземных льдов Центрального Ямала // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и северо-запада России. – 2021. – Вып. 8. – С. 173–176. – DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-173-176. EDN: JEHIUF
36. Опокина О. Л., Слагода Е. А., Курчатова А. Н. Стратиграфия разреза "Марре-Сале" (Западный Ямал) с учётом новых данных радиоуглеродного анализа // Лёд и Снег. – 2015. – Т. 55. – № 4. – С. 87–94. EDN: VCHACH
37. Факашук Н. Ю., Дворников Ю. А., Опокина О. Л., Хомутов А. В. Термоденудация как фактор формирования гидрохимии малых Тундровых озёр // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. – 2022. – Вып. 9. – С. 279. – DOI: 10.24412/2687-1092-2022-9-279-284. EDN: NNSBAK
38. French H. M., Harry D. G. Observations on buried glacier ice and massive segregated ice, western arctic coast, Canada // Permafrost and Periglacial Processes. – 1990. – Vol. 1. – P. 31–43. – DOI: 10.1002/ppp.3430010105. EDN: VLQDXN
39. Дубиков Г. И., Корейша М. М. Ископаемые инъекционные льды на полуострове Ямал // Известия АН СССР. Серия географическая. – 1964. – № 5. – С. 58–65.
40. Leibman M. O. Results of chemical testing for various types of water and ice, Yamal Peninsula, Russia // Permafrost and Periglacial Processes. – 1996. – Vol. 7. – No. 4. – P. 287–296. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1530(199609)7:33.0.CO;2-A. EDN: LDUQSV
41. Конищев В. Н., Рогов В. В. Методы криолитологических исследований. Учебное пособие. – 1994. – 136 с.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом изучения в статье являются геохимические методы идентификации генезиса подземных льдов Центрального Ямала.

Тема исследования актуальна. Автор отмечает, что для оценки газонасыщенности подземных льдов важное значение имеют их генезис и распространение на равнинах Севера Западной Сибири, Севера Канады и Аляски. Однако генезис пластовых льдов остается дискуссионным, является ли он ледниковым, морским или внутри грунтовым. Термин «пластовый лед» носит собирательный характер и не отражает их генезис, поэтому оценка и изучение геохимических методов идентификации генезиса подземных льдов Центрального Ямала является актуальным. Исследования проведены на научно-

исследовательском стационаре «Васькины Дачи» ИКЗ ТюмНЦ СО РАН на Центральном Ямале, он расположен в пределах геоморфологических уровней с высотами 13–40 м – холмисто-увалистых казанцевской и салехардской III, IV равнин.

Методология исследования основана на применении метода монолитов льда для оценки криолитологического строения разрезов стенок термоцирков и геохимических методов идентификации генезиса подземных льдов. Состав пород на гранулометре Mastersizer 3000 с ультразвуковой диспергацией в Институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН. Монолиты льда сохранены в мёрзлом состоянии до проведения анализа методами ионометрического титрования (HCO_3^-), титриметрии (Cl^-), атомной абсорбции (Ca^{+2} , Mg^{+2}), атомной эмиссии (Na^+ , K^+), турбидиметрии (SO_4^{2-}) и ионометрии (pH). Для оценки засоленности льдов использована количественная классификация по ГОСТ Р 59540-2021, интерпретация проведена по ГОСТ 25100-2020.

Научная новизна исследований в статье заключается в том, что авторы впервые предлагают выделить геохимические маркеры, указывающие на генезис льдов на основе данных об особенностях залегания льдов в естественных обнажениях, литологическом составе вмещающих отложений, петрографических особенностях льдов в шлифах.

Стиль статьи – научный. Стиль статьи, ее структура и объём соответствуют требованиям журнала «Арктика и Антарктика». Результаты исследований широко представлены в таблицах и рисунках. Комплекс криолитологических и геохимических методов позволил авторам уточнить синкриогенный и эпикриогенный типы вмещающих толщ, сегрегационный, конжеляционный и повторно-жильный генезис подземных льдов, их геохимический и микроэлементный состав, необходимые для установления условий их формирования. Установлено, что льды формировались из разных источников вод: атмосферных осадков, поверхностных континентальных вод, растворов прибрежно-морских осадков, внутригрунтовых вод из оттаивших отложений.

Библиография статьи слишком обширна и включает в себя 41 литературный источник, в том числе 10 -на иностранном языке. Считаем, что источники под номерами 39 и 41 следует исключить из библиографии. Поскольку это очень старые издания (более 30-летней давности), а методы из источника номер 41, на которые ссылаются авторы, в настоящее время также актуализированы в более новых изданиях.

Выводы в статье достаточно обоснованы. Авторами установлено, что по ионному составу подтвержден прибрежно-морской генезис подземных льдов; выделена засоленная псевдоморфоза, отличающаяся по структуре и текстуре льда и химическому составу от ПЖЛ. Обоснована применимость геохимических маркеров для уточнения условий при формирования подземных льдов и генезиса отложений с учетом криолитологического строения разрезов.

Данная статья может быть полезна широкому кругу ученых. Рецензуемая статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после устранения незначительных замечаний.