

Арктика и Антарктика*Правильная ссылка на статью:*

Васильчук Ю.К. Ионный состав пластовых ледяных залежей Ямала: Бованенково, Еркутаяха и Мордьяха // Арктика и Антарктика. 2024. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.2.71097 EDN: UYIDJX URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=71097

Ионный состав пластовых ледяных залежей Ямала: Бованенково, Еркутаяха и Мордьяха

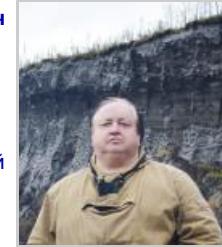
Васильчук Юрий Кириллович

ORCID: 0000-0001-5847-5568

доктор геолого-минералогических наук

профессор; кафедра геохимии ландшафтов и географии почв; Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2009

**✉ vasilch_geo@mail.ru**Статья из рубрики "Многолетнемерзлые породы и подземные льды Арктики, Антарктики и горных регионов"**DOI:**

10.7256/2453-8922.2024.2.71097

EDN:

UYIDJX

Дата направления статьи в редакцию:

22-06-2024

Аннотация: Цель статьи – определить качественный и количественный ионный состав изучаемых трех пластовых ледяных залежей в центральной и южной частях Ямала: а) Бованенково, на берегу оз.Ханикосито; б) в верховьях р. Мордьяха и в) в долине р. Еркутаяха, сравнить его с ионным составом известных пластовых льдов Ямала (Бованенково, Харасавэй, Марре-Сале, Нейто, Юрибей, Сабетта) и сопряженных территорий (Гыда, Танама, Усть-Порт, Ледяная Гора) и на основании этого выявить генетическое сходство изучаемых залежей с пластовыми льдами, природа которых более определенна. Все они относятся к ультрапресным льдам с концентрацией основных ионов от 20 до 40 мг/л. В ионном составе пластового льда Бованенково, на берегу оз. Ханикосито заметно преобладают катионы натрия, достигая 38,95 мг/л и калия до 21,76 мг/л в сильнопузырчатом прозрачном льду. В ионном составе пластового льда в верховьях р. Мордьяха заметно преобладают катионы натрия, достигая 68,51 мг/л в ледогрунте и 6,1 мг/л в чистом льду. Средняя концентрация анионов хлора в

пластовой ледяной залежи в верховьях р. Мордыяха заметно варьирует в разных типах льда и составляет 2,27 мг/л. В ионном составе пластового льда в долине р. Еркутаяха наблюдается примерно равное количество катионов натрия, достигающих 3,64 мг/л и калия и магния до 2,71 и 2,56 мг/л. Средняя концентрация анионов хлора в пластовой ледяной залежи в долине р. Еркутаяха варьирует в разных типах льда и составляет 0,76-1,48 мг/л. Ионный состав 3 изученных мощных залежей пластового льда в центральной и южной частях Ямала ближе всего к ионному составу голоценовых внутригрунтовых пластовых ледяных залежей близ пос. Сабетта и позднеплейстоценовых инфильтрационно-сегрегационных льдов у пос. Гыда. Это является основанием для вероятностного отнесения изучаемых пластовых льдов к залежам внутригрунтового типа, возникших при автохтонном промерзании межмерзлотных водоносных горизонтов.

Ключевые слова:

многолетнемерзлые попроды, пластовый лед, макроэлементы, катионы натрия, катионы калия, анионы сульфатов, анионы хлора, река Еркутаяха, река Мордыяха, Бованенково

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 23-17-00082).

Введение

Химический состав ледяных пластов чаще всего пресный или ультрапресный, что в равной мере присуще и ледникам (и погребенным ледниковым льдам), и внутригрунтовым подземным льдам. Встречаются так же пресные пласти, залегающие в засоленных породах, и редко – засоленные льды в засоленных породах, поэтому химический состав может быть только вспомогательным показателем природы ледяных залежей.[\[8\]](#)

Одним из важных критериев для оценки природы пластовых ледяных залежей является приуроченность наиболее крупных массивов к территориям низменностей, которые в позднем плейстоцене испытывали влияние морских трансгрессий. Это п-ова Югорский, Ямал, Гыданский, Таймыр, Чукотка, Новосибирские о-ва, север Юкона, дельта р.Маккензи, острова Канадского арктического архипелага. Очень редки пластовые залежи на севере, в центральной части и на юге Якутии, в пределах Магаданской области, на Аляске (вне побережий), в Монголии, Китае и т.п.

Анализ большого массива данных о минерализации подземных льдов в разных районах криолитозоны России позволил автору разработать следующую классификацию: ультрапресные льды с минерализацией (мг/л) менее 50, пресные – 50–200, опресненные – 200–400, слабосоленые – 400–1000, среднесоленые – 1000–5000, сильнозасоленные – более 5000 мг/л.[\[3\]](#)

Цель статьи - определить качественный и количественный ионный состав изучаемых трех пластовых ледяных залежей в центральной и южной частях Ямала: а) Бованенково, на берегу оз.Ханикосито; б) в верховьях р.Мордыяха и в) в долине р. Еркутаяха, сравнить его с ионным составом известных пластовых льдов Ямала (Бованенково, Харасавэй, Марре-Сале, Нейто, Юрибей, Сабетта) и сопряженных территорий (Гыда, Танама, Усть-Порт, Ледяная Гора) и на основании этого выявить генетическое сходство изучаемых

залежей с пластовыми льдами, природа которых более определена.

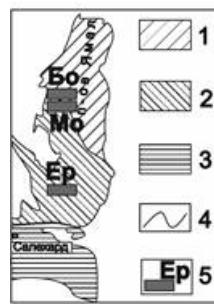


Рис. 1. Карта расположения исследованных пластовых льдов на п-ове Ямал:

1 – 2 – сплошное с поверхности распространение многолетнемёрзлых пород (северная зона), 1 – низкотемпературных сингенетических многолетнемёрзлых пород, подстилаемых эпигенетическими (тундровая подзона), 2 – высокотемпературных многолетнемёрзлых пород – преимущественно эпигенетических (лесотундровая подзона); 3 – массивно-островного и островного с поверхности распространения многолетнемёрзлых пород (северо-таежная подзона); 4 – границы мерзлотных зон и подзон; 5 – расположение изученных пластовых льдов: Бо - Бованенково, Мо - в верховьях р. Мордыяха, Ер - в долине р. Еркутаяха

Методы

Для проб из пластовых льдов использована методика выполнения измерений массовой концентрации катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01738, Диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм³, а для определения анионов – использована методика выполнения измерений массовой концентрации Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01724, Диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм³ и методика выполнения измерений массовой концентрации ионов в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии ПНД Ф 14.1:2:4. 132-98, Диапазон определяемых концентраций по катионам 0,10-150,00 мг/дм³. Средства измерения: ионный хроматограф «Стайер», предел детектирования по хлорид-иону 0,02 мг/л.

Определения изотопного состава кислорода и водорода во льду жил выполнялось в лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Delta-V Plus с использованием комплекса газ-бенч. Для калибровки измерений использовались Международные стандарты V-SMOW, GRESP, SLAP. Погрешность определений составила $\pm 1\text{ \%}$ для $\delta^2\text{H}$ и $\pm 0,4\text{ \%}$ для $\delta^{18}\text{O}$. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ выражены в промилле относительно VSMOW.

У нас появилось предположение, пока недостаточно подтвержденное экспериментально, о том, что позднеплейстоценовые подземные льды могут содержать примесь водорода постседиментационного происхождения. Известно, что обычно позднеплейстоценовые отложения с высоким содержанием органики имеют весьма специфический, отличающий их от голоценовых, сероводородный запах. Это, скорее всего, результат освобождения защемленных пузырьков сероводорода при оттаивании мерзлых толщ и льдов. Возможно, форма нахождения сероводорода в подземных льдах не совсем обычна, и

даже из расплавов позднеплейстоценовых льдов сероводород выделяется не сразу. При повторном измерении изотопного состава одних и тех же образцов позднеплейстоценовых льдов методом уравновешивания на масс-спектрометре с применением газ-бенча по измерениям значений $\delta^{18}\text{O}$ воспроизводимость результатов была практически идеальной, в то время как результаты измерений величин $\delta^2\text{H}$ различались в отдельных образцах (как правило, это 1-3 образца из 100) на несколько промилле. Повторные измерения в этих же сериях образцов стандартов SMOW-V и GISP обнаруживали идеальную сходимость для значений $\delta^2\text{H}$. Также в этих повторных измерениях хорошая сходимость и повторность результатов обнаружена для величин $\delta^2\text{H}$ других видов льдов или вод подобного явления. Поэтому при интерпретации данных мы отдавали предпочтение распределению $\delta^{18}\text{O}$ в пластовых льдах.

Результаты

Пластовые залежи у пос. Бованенково. Территория в окрестностях пос. Бованенково относится к районам с наибольшей концентрацией пластовых льдов на Земле, наравне с низовьями р. Маккензи. Гетерогенные автохтонные и аллохтонные пластовые залежи у пос. Бованенково мощностью от первых метров до нескольких десятков метров, протяженностью в горизонтальных направлениях на сотни метров (иногда более километра) встречены в скважинах и во многих естественных обнажениях Бованенковского ГКМ. Часто ледяные пласти вскрываются рядом с газодобывающими сооружениями. Пластовые льды чаще прослеживаются под останцами третьей и второй террас (с абсолютными отметками от 15-20 до 40 м), а также в пределах поймы. [\[5,7,15,16,20,22,30,31\]](#) Даже под руслом реки Сяха были отмечены пластовые льды мощностью от 7 до 9 м.

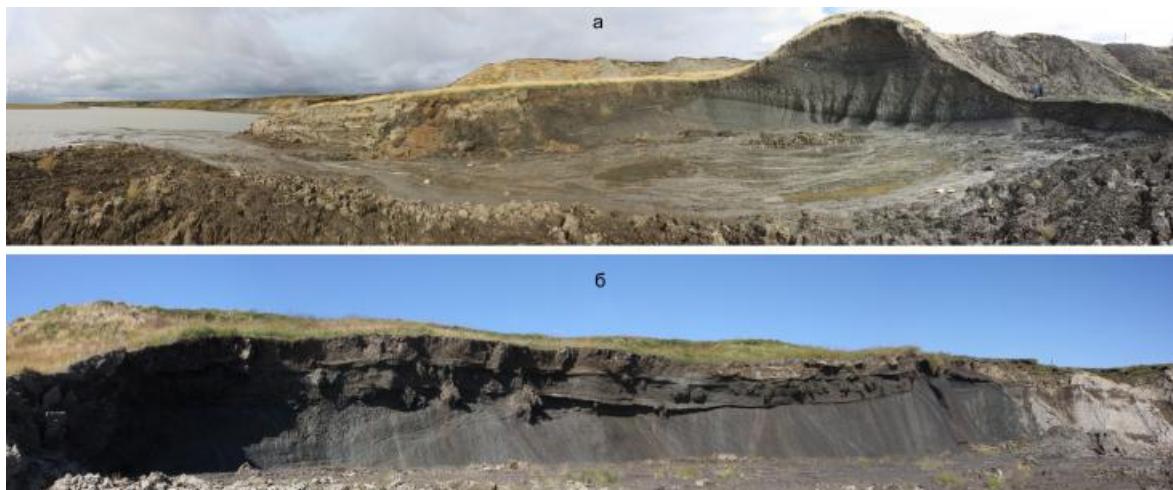


Рис. 2. Мощные пластовые льды на территории Бованенковского ГКМ. Фото Д. Ю.Некрасова

К настоящему времени удалось проанализировать данные примерно с 3 тыс. скважин глубиной от 10 до 100 м, пробуренных в пределах территории Бованенковского ГКМ на междуречье рек Надуйяха и Нгурияха, из которых в 260 были вскрыты пластовые льды. [\[5,31\]](#) Основная масса ледяных залежей размещается в позднеплейстоценовых породах прибрежно-морского генезиса, реже – в аллювиальных, склоновых или озерно-болотных осадках. Пластовые льды перекрываются либо глинистыми морскими и прибрежно-морскими осадками, либо суглинистыми делювиальными осадками.

Первые слагают цоколи террас и покрыты сверху слоем более молодых

позднеплейстоценовых песчано-суглинистых осадков.

Вторые покрывают склоны террас плащом мощностью 1-6 м. Иногда пластовые залежи перекрываются более молодыми голоценовыми озерно-болотными отложениями.

Пластовые льды, чаще всего, имеют форму линз разной толщины, выклинивающихся по простиранию. Бурение сотен скважин, вскрывших лед, показывает, что кровля залежей льда располагается как непосредственно у подошвы сезонно-талого слоя на абсолютных отметках 25-30 м, так и на глубинах более 50 м от дневной поверхности. Подошва этих залежей была встречена на глубинах от 1 до 57 м.

Вариации стабильных изотопов кислорода и водорода. Изотопно-кислородный состав (значения $\delta^{18}\text{O}$) образцов, отобранных из пластовых льдов, варьирует от $-12,49$ до $-22,95\text{\textperthousand}$. Значения $\delta^2\text{H}$ колеблются от $-91,7$ до $-177,1\text{\textperthousand}$. Дейтериевый эксцесс (d_{exs}) изменяется от 3,4 до $10,6\text{\textperthousand}$.

В ранее опубликованных работах [5,20,30] показано, что значения $\delta^{18}\text{O}$ в пластовых льдах Бованенковского месторождения варьируют от $-11,23$ до $-25,2\text{\textperthousand}$. По данным проведенных В.И. Соломатиным и М.А. Коняхиным 142 определений, более 60% значений $\delta^{18}\text{O}$ попадают в сравнительно узкий диапазон от -16 до $-20\text{\textperthousand}$.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в белесом пузырчатом льду составляют от $-18,4$ до $-22,4\text{\textperthousand}$ (в среднем равно $-20,4\text{\textperthousand}$), в "хрустальном" льду $\delta^{18}\text{O}$ варьирует от $-17,4$ до $-25,4\text{\textperthousand}$ (в среднем $-22,7\text{\textperthousand}$), в ледогрунте $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-12,5\text{\textperthousand}$.

Ю.К.Васильчук [5] также получил весьма однородный изотопный профиль по пластовым льдам, вскрытым на глубине от 28 до 32 м в скважине 34-Р, где значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от $-16,95$ до $-18,29\text{\textperthousand}$, а величины $\delta^2\text{H}$ – от $-131,7$ до $-146\text{\textperthousand}$.

Такие же однородные изотопные профили были получены и по пластам 1 и 3, где вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ не превысили 1\textperthousand , а вариации $\delta^2\text{H}$ составили менее 4\textperthousand .

В скважине 34-Р в интервале глубин от 28,5 до 32,4 м изотопный состав пластового льда достаточно однороден. Значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-16,95$ до $-18,89\text{\textperthousand}$, $\delta^2\text{H}$ – от $-131,7$ до $-146,0\text{\textperthousand}$ (таким образом, диапазон вариаций $\delta^{18}\text{O}$ составляет $1,94\text{\textperthousand}$, а $\delta^2\text{H}$ – $14,3\text{\textperthousand}$).

По средним абсолютным значениям этот лед является наиболее изотопически тяжелым по сравнению с другими изученными здесь пластовыми залежами. Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ равно $-18,1\text{\textperthousand}$, среднее значение $\delta^2\text{H} = -140,6\text{\textperthousand}$.

Изотопно-кислородная и дейтериевая кривые имеют одинаковую конфигурацию, что, скорее всего, указывает на равновесные условия фракционирования при формировании пластового льда.

В пластовой залежи № 1 изотопные значения в ледяном шестиметровом пласте очень однородны и варьируют по значениям $\delta^{18}\text{O}$ от $-21,55$ до $-22,74\text{\textperthousand}$, а по $\delta^2\text{H}$ – от $-163,1$ до $-171,3\text{\textperthousand}$. Таким образом, диапазон вариаций значений $\delta^{18}\text{O}$ составил $1,19\text{\textperthousand}$, а $\delta^2\text{H}$ – $8,2\%$. Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составило $-22,14\text{\textperthousand}$, а среднее значение $\delta^2\text{H}$ равно $-167,14\text{\textperthousand}$.

Характер изотопных кривых указывает на то, что эти незначительные изменения содержания стабильных изотопов происходят синхронно для величин $\delta^{18}\text{O}$ и для $\delta^2\text{H}$.

В пластовой залежи №3 изотопные значения в двухметровой толще льда очень однородны: значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-22,4$ до $-23,13\text{‰}$, а $\delta^2\text{H}$ – от $-173,1$ до $-177,1\text{‰}$ (т.е. изменения значений $\delta^{18}\text{O}$ не превышают 1‰ , а изменения $\delta^2\text{H}$ не больше 5‰). Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-22,78\text{‰}$, среднее значение $\delta^2\text{H}$ равно $-175,2\text{‰}$. Изменение содержаниядейтерия также происходит согласно изменению содержания стабильного кислорода.[\[5\]](#)

Вместе с тем в одном из обнажений была встречена пластовая залежь №4, содержание стабильных изотопов в которой очень значительно варьирует и составляет по величине $\delta^{18}\text{O}$ около 10‰ , а по $\delta^2\text{H}$ около 80‰ .

В верхнем образце льда с глубины 0,2 м отмечены максимальные изотопные значения ($\delta^{18}\text{O} = -12,49\text{‰}$; $\delta^2\text{H} = -91,7\text{‰}$), а минимальные значения зафиксированы на глубине 0,9 и 1,9 м ($\delta^{18}\text{O}$ менее -22‰ ; $\delta^2\text{H}$ менее -169‰). Если не брать в расчет верхний образец с аномально тяжелыми значениями, то величина $\delta^{18}\text{O}$ в интервале глубин 0,3-2,8 м варьирует от $-16,85$ до $-22,75\text{‰}$, а $\delta^2\text{H}$ – от $-129,6$ до $-171,9\text{‰}$. Таким образом, диапазон вариаций по значениям $\delta^{18}\text{O}$ составляет $5,9\text{‰}$, а по $\delta^2\text{H}$ достигает $42,3\text{‰}$. Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ равно $-19,13\text{‰}$, средняя величина $\delta^2\text{H}$ – $-146,3\text{‰}$.[\[5\]](#)

Такие существенные вариации, как было показано ранее Ю.К.Васильчуком[\[3\]](#), с большой долей достоверности свидетельствуют о льдовыделении при промерзании водонасыщенных грунтов в условиях закрытой системы (линзы сингенетических сегрегационных льдов в устье реки Гыда характеризовались экстремально большими вариациями значений $\delta^{18}\text{O}$ от -16 до -34‰).

Характер распределения стабильных изотопов в пласте 4 заставляет думать о первоначальном формировании изотопически более тяжелого льда в самой верхней и в самой нижней частях пласти, где значения $\delta^2\text{H}$ выше (-130‰), и о последующем образовании центральной части пласти, где значения $\delta^2\text{H}$ заметно ниже (-140‰).

Пластовый лед в долине р.Сеяха (Мутная) на берегу оз.Ханикосито, у пос. Бованенково.

Строение и изотопный состав ледяной залежи Бованенково, на берегу оз.Ханикосито. На территории Бованенковского НГКМ исследовано обнажение пластовых льдов в северной части озера Ханикосито (точка Л). Обнажение пластового льда вскрывается в бортах термоцирка по его периметру (рис. 5, 6). Вершина термоцирка располагается в 130 м от берега озера. Видимая часть обнажения имеет ширину около 30 м, высоту 6 м.[\[15\]](#)

В разрезе в вершине вскрываются:

0-12 см – оторфованный бурый легкий суглинок с включениями сфагновых мхов.

12-20 см – серовато-бурый средний суглинок с выраженной угловато-крупнитчатой структурой.

20-85 см – оглеенный сизоватый средний суглинок

85-200 см – серый и бурый ледогрунт (табл. 1.)

200-600 см – пластовый лёд.

Дж. Васильчук и И.Шоркуновым произведен горизонтальный отбор образцов на глубине 3 м через каждые 5-10 см, и вертикальный отбор до глубины 6 м. [\[15\]](#)



Рис. 3. Пластовый лёд на территории Бованенковского ГКМ, на берегу оз.Ханикосито. Фото Дж. Ю. Васильчук

Таблица 1. Описание отложений верхней части толщи, вмещающей позднеплейстоценовые пластовые льды в районе Бованенковского НГКМ, на берегу оз.Ханикосито. Из [\[15\]](#)

Глубина, см	Описание	Пачка
85-95	Ледогрунт мелкошлировый (мощность шлиров льда 0,5-3 мм на расстоянии 2 мм-1 см)	I (85-125 см) пласт ледогрунта прослеживающийся вдоль всего разреза. Переход к
100-110	Ледогрунт с сетчатой криотекстурой, с включениями грунта размером от 1 до 3 см	нижележащей пачке постепенный по размеру и кол-ву обломков суглинка, а также по характеру криогенной структуры.
110-125	Прозрачный лед с пузырьками воздуха и призматическими осколками суглинка	
130-150	Мелкосетчатая криогенная текстура, осколки грунта размером 1-3 мм.	II (130-170) ледогрунт, суглинок бурого цвета со
	Крупносетчатая криотекстура.	

150-170	лед прозрачный с пузырьками воздуха	льдом
170-180	III а – песчано-суглинистый ледогрунт, с сетчатой криотекстурой (размер ячеек от 2-3 мм до 2-3 см)	
180-190	III б – песок слоистый, с массивной криотекстурой и тонкими шлирами льда, наклоненных под углом 45°	
190-200	III в – наклонная линза песка во льду	
210-220	Песок сильно оглиненный, со среднешлировой криотекстурой	

По пластовому льду в долине р.Сеяха (Мутная) на берегу оз.Ханикосито получены довольно высокие значения $\delta^{18}\text{O}$, варьирующие от -17,9 до -20,5‰ и $\delta^2\text{H}$, варьирующие от -137,5 до -150,2‰. Еще более высокие значения изотопного состава получены по перекрывающему пластовый лед ледогрунту: значения $\delta^{18}\text{O}$ от -12,6 до -14‰ и величины $\delta^2\text{H}$ от -97,5 до -105,1‰. [\[15\]](#)



Рис. 4. Отбор образцов из пластового льда на территории Бованенковского ГКМ, на берегу оз.Ханикосито. Фото Дж. Ю. Васильчук

Ионный состав пластового подземного льда у пос. Бованенково. В ионном составе пластового льда Бованенково, на берегу оз.Ханикосито заметно преобладают катионы Na^+ , достигая 38,95 мг/л в мутном льду с крупными включениями суглинка и K^+ до 21,76 мг/л в сильно пузырчатом прозрачном льду с крупными кристаллами (табл. 2).

Средняя концентрация анионов хлора в пластовой ледяной залежи Бованенково, на берегу оз.Ханикосито составляет 3,13 мг/л, а разброс в разных частях залежи - от 1,73 до 27,02 мг/л. Средняя концентрация сульфатов составляет 1 мг/л, а разброс в разных частях залежи - от 0,22 до 4,1 мг/л.

Таблица 2. Ионный состав пластового подземного льда Бованенково, в долине р.Сеяха (Мутная) на берегу оз.Ханикосито точка Л, отбор образцов по горизонтали 8 сентября 2015 г.

По- ле- вой №	Глу- бина, м	Тип льда	Na ⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	NO ₃ ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л
11л	3,0	Лед, прозрачный, крупнокристаллический	3,01	1,81	1,60	2,47	1,90	0,10	0,70
12л	3,0	Лед, мутный, серовато-белесый с примесью тонких глинистых частиц и осколков грунта	5,78	2,15	1,37	2,05	4,92	0,10	1,28
13л	3,0	Лед, мутный, сероватого цвета, мощностью до 8-10 см, кристаллы до 5 см	4,42	1,47	1,84	3,52	3,06	0,10	0,74
14л	3,0	Прозрачный лед, крупнокристаллический с удлиненными пузырьками	2,97	0,91	0,74	1,44	1,89	0,10	0,44
15л	3,0	Мутный полосчатый лед с осколками суглинка от 0,1 до 5 мм с редкими пузырьками.	3,80	0,86	0,90	2,16	2,44	0,10	0,60
16л	3,0	20 см слой. Сильно мутный, контрастно-полосчатый лед серый с большим количеством включений суглинка, размером от 1 мм до 0,5-2 см, местами линзы ледогрунта шириной 3-4 см	9,20	3,16	3,44	7,66	3,76	0,10	1,56
17л	3,0	прозрачный, местами мутноватый, слабо полосчатый, крупнокристаллический лед со значительной примесью тонкодисперсного суглинка. Пузырьки по границе со следующим слоем.	3,13	1,23	1,29	2,90	1,76	0,10	0,62
18л	3,0	Мутный, светло-серый тонкополосчатый лед с мелкими до 3 мм включениями суглинка и большим количеством тонкодисперсного суглинка неравномерно дифференцированного по высоте. Местами крупные скопления пузырьков воздуха размером около 1 мм	2,87	1,03	0,91	8,97	1,63	0,10	0,48
19л	3,0	Более темный, серый тонкослоистый лед, мутный с большим количеством включений суглинка размером до 1 см.	13,07	2,90	4,09	9,41	2,90	0,10	1,32
20л	3,0	Мутный лед. Полоски неясно выражены. Крупные включения суглинка в виде призм размерами до 4 см.	9,40	2,24	3,47	6,77	4,56	0,10	1,32
21л	3,0	Тонкополосчатый лед, темно-серый, шириной 5 см слой с мелкими включениями суглинка размером до 4 мм.	16,78	3,05	4,15	11,24	7,83	0,10	1,88

Продолжение таблицы 2. Ионный состав пластового подземного льда Бованенково

22л	3,0	Крупно-полосчатый лед, светло-серый, мутный с полосами более прозрачного льда шириной 0,5 – 1 см.	3,71	1,54	1,98	4,61	1,86	0,10	0,76
23л	3,0	крупнополосчатый, мутный серый с редкими крупными включениями суглинка, местами мелкокристаллическая структура грани которой подчеркнуты пленками суглинка	3,55	1,41	1,23	3,23	1,86	0,28	1,29
24л	3,0	светло-серый лед, мутный широкополосчатый (1-3 см)	9,30	2,32	2,89	6,51	3,80	0,10	1,90
25л	3,0	Мелкopolосчатый, очень мутный, темно-серый лед с включениями суглинка 3-7 мм, ширина волнистых полос 0,5-4мм	4,35	1,20	1,15	2,67	2,14	0,13	0,75
26л	3,0	Светло-серый мутный лед с редкими мелкими пузырьками воздуха 0,5 мм и редкими включениями суглинка 0,5-4мм	12,70	2,32	2,91	6,89	4,17	0,10	1,22
27л	3,0	Полосчатый лед, мутный с ясно выраженными полосами прозрачного льда без суглинистых включений с редкими пузырьками.	5,99	2,01	1,80	4,06	2,75	0,10	0,91
28л	3,0	Прозрачный лед из замка складки, прослон шириной около 0-15 см, лед практически прозрачный с небольшими зонами мутного льда с очень тонкодисперсным суглинком.	9,74	2,17	2,74	7,51	4,33	0,10	1,52
29л	3,0	Лед прозрачный, кристаллы 2-5 см, с редкими пузырьками до 1 мм диаметром	2,86	0,76	0,78	1,60	1,76	0,10	0,57
30л	3,0	Лед, прозрачный, крупнокристаллический кристаллы до 2-5 см с редкими пузырьками до 1 мм диаметром	1,57	3,04	0,11	0,15	3,28	0,10	0,22
46л	3,0	Сильнопузырчатый прозрачный лед, крупнокристаллический 1-2-4 см, пузырьки крупные до 1 см	5,01	21,76	0,61	1,98	27,02	0,10	0,27
49л	3,0	Мутный лед, светло-серый с крупными включениями суглинка до 1 см	38,95	8,54	12,48	24,45	19,34	0,57	3,07
50л	3,0	Прозрачный лед с редкими пузырьками льда и средними кристаллами	12,90	3,83	5,32	10,38	14,89	0,51	4,10

Определение химического состава пластового льда в районе Бованенковского НГКМ показало, что в составе ионов преобладают Na^+ , Ca^{2+} и HCO_3^- . Концентрация натрия варьирует от 1,6 до 9,4 мг/л, в некоторых образцах достигая значений 12,7-16,8 мг/л, кальция – от 6,9 до 11,2 мг/л, концентрация гидрокарбонатов варьирует от 13,4 до 25,5 мг/л. Общая минерализация льда изменяется от 9,7 до 70,4 мг/л, составляя в среднем 33 мг/л. Лед, содержащий включения суглинка, как правило, характеризуется наиболее высокими значениями преобладающих ионов и минерализации, в образце льда с

крупными включениями суглинка содержание Na^+ , Ca^{2+} и HCO_3^- составило 39, 34,5 и 62 мг/л, соответственно, а минерализация достигла 168 мг/л. [15] Соотношение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ в большинстве образцов льда составило 2-4, в трех образцах достигало значений до 100. Значения соотношения $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ выше 20-40 отмечено в солоноватоводных подрусловых таликах рек бассейна Обской губы и в соленых водах крипэгов Центрального Ямала. [12]

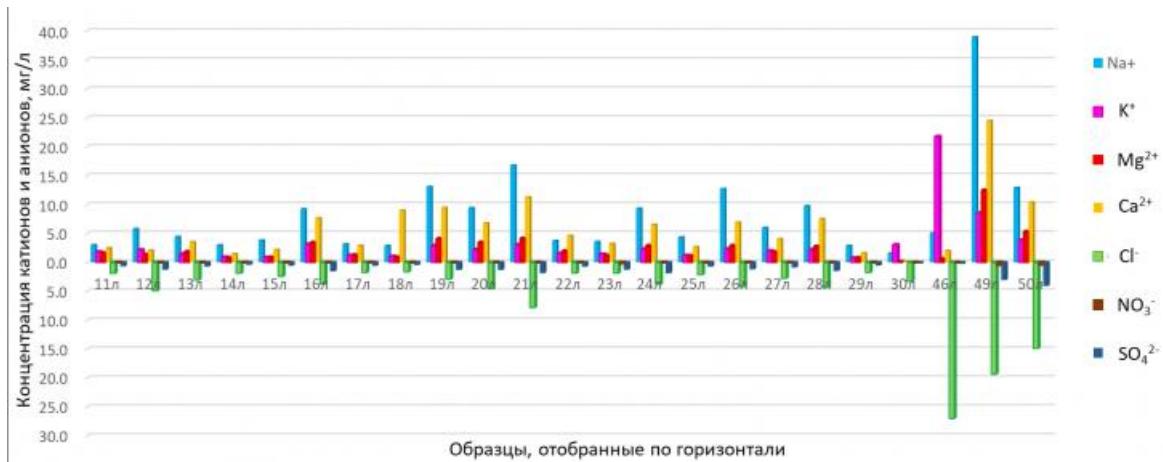


Рис. 5. Ионный состав пластового подземного льда Бованенково, в долине р.Сеяха (Мутная) на берегу оз.Ханикосито

Пластовые ледяные залежи в верховьях р.Мордыяха

Строение и изотопный состав ледяной залежи в верховьях р.Мордыяха. Гетерогенная пластовая ледяная залежь с парагенетическим сочетанием автохтонного сегрегационного ледяного пласта (рис. 6, а) и автохтонного инъекционного пластового льда (рис. 6, б) с сингенетическими повторно-жильными льдами в верховьях р.Мордыяха исследована нами в августе 2011 г. Здесь залежь мощностью более 4 м с нормальной горизонтальной слоистостью по латерали переходит в вертикально-слоистый лёд и рассекается мощными 4-5-метровыми сингенетическими повторно-жильными льдами (рис. 6, 7). Это весьма редкое сочетание в едином разрезе пластовых и сингенетических повторно-жильных льдов. Ранее на территории Российской криолитозоны такие сочетания встречались единично.

В августе 2011 г. Ю.К. Васильчуком и Н.А. Буданцевой была описана новая пластовая ледяная залежь (рис. 6), располагающаяся в верховьях р.Мордыяха на центральном Ямале, на абсолютных отметках 66-70 м. [11]

Здесь ледяная залежь мощностью более 4 м с нормальной горизонтальной слоистостью по латерали переходит в вертикально слоистый лёд (см. рис. 7).

Гетерогенная ледяная залежь рассекается мощными 4-5-метровыми сингенетическими повторно-жильными льдами (см. рис. 7, а). Ледяные жилы, сложены вертикальнослоистым желтовато-серым льдом

Слои льда вскрываются в левой части обнажения под углом 65-75°. В центральной части обнажения лед относительно чистый, и слоистость просматривается за счет прослоев льда разного цвета. Ширина этих прослоев от 1-3 до 10-15 см.

Влево этот лед постепенно переходит в ледогрунт также косо-вертикально ориентированный. Грунтовые прослои представлены серой супесью. Ближе к периферии залежи, влево, количество грунта возрастает, и примерно в 10 м от центральной

ледяной части пластовая залежь заканчивается и вмещающими отложениями здесь является серый песок.

Вправо от центральной части, где фиксируется косо-вертикальнослоистый лёд, в верхней части расположена несколько более поздняя вкладка, представленная горизонтально-слоистым льдом. Ширина этой вкладки около 10-12 м, высота – 2,5-3 м.

Распределения значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ вполне отвечает гетерогенному происхождению пластов. [11]

Изотопный состав льды и косо-вертикально ориентированного ледогрунта, расположенного в левой части обнажения демонстрирует весьма незначительные изотопные вариации: изменение значений $\delta^{18}\text{O}$ во льду составляет около 1%, – от -22,4 до -23,3‰, что указывает на сегрегационный характер льдообразования в условиях открытой системы. [11]

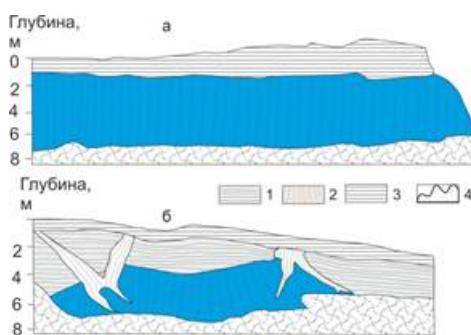


Рис. 6. Гетерогенная пластовая ледяная залежь: парагенез вертикальнослоистого (а) и горизонтальнослоистого (б) внутригрунтовых инъекционно-сегрегационных пластовых льдов, а также рассекающего их плейстоценового повторно-жильного льда в толще казанцевских отложений в верховьях р.Мордыяха, Центральный Ямал (по Ю.К.Васильчуку [7,11]): 1 – сегрегационный горизонтально- и субгоризонтальнослоистый лёд и ледогрунт; 2 – инъекционный вертикальнослоистый лёд и ледогрунт; 3 – перекрывающий суглинок; 4 – оплывина; 5 – повторно-жильный лёд



Рис. 7. Пластовый лёд в верховьях р. Мордыяха ГКМ: вертикальнослоистый (а) и горизонтальнослоистый (б). Фото Н.А. Буданцевой (а) и Ю.К. Васильчука (б)

Ионный состав пластового подземного льда в верховьях р.Мордыяха. В ионном составе пластового льда в верховьях р.Мордыяха заметно преобладают катионы Na^+ , достигая 68,51 мг/л в ледогрунте и 6,1 мг/л в хрустальном и стекловатом льду с небольшим количеством включений супеси (табл. 3).

Средняя концентрация анионов хлора в пластовой ледяной залежи в верховьях р.Мордыяха заметно варьирует в разных типах льда и составляет: в хрустальном и стекловатом льду с небольшим количеством вертикальных включений супеси 2,27 мг/л, а разброс в разных частях залежи - от 1,12 до 6,76 мг/л. Средняя концентрация сульфатов в хрустальном и стекловатом льду составляет 2,36 мг/л, а разброс в разных частях залежи - от 1,22 до 4,1 мг/л.

Средняя концентрация анионов хлора в ледогрунте составляет 7,0 мг/л, а разброс в разных частях залежи - от 2,50 до 15,96. Средняя концентрация сульфатов в ледогрунте составляет 9,76 мг/л, а разброс в разных частях залежи - от 3,03 до 20,27 мг/л.

Таблица 3. Ионный состав пластового и повторно-жильного подземного льда в верховьях р.Мордыяха

Номер образца	Тип льда	Глубина, м	Na ⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	NO ₃ ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л
<i>Пластовый лёд в термоцирке</i>									
11-YuV-2/3	Пластовый лед,	6	6,10	1,59	0,56	0,74	1,12	2,78	4,45
11-YuV-2/4	стекловатый, вертикально-слоистый, в 6 м от правого края пласти	6,5	1,44	0,96	0,55	1,30	1,72	4,42	1,57
11-YuV-2/5		7	16,33	3,10	1,71	1,95	2,50	10,60	20,27
11-YuV-2/6	Ледогрунт	7,5	68,51	4,96	3,31	2,71	15,96	8,13	5,99
11-YuV-2/7	Ледогрунт, в 1 м левее обр.2/3	6	6,20	1,52	1,65	2,26	2,54	3,55	3,03
11-YuV-2/8	Хрустальный лед с небольшим количеством вертикальных включений супеси светло-серой	6	1,69	1,46	0,66	0,87	1,71	3,49	1,73
11-YuV-2/9	Тот же лед, на 2 м левее обр.2/3	6	2,62	1,57	0,96	1,05	2,27	6,36	1,97
11-YuV-2/10	Тот же лед, на 3 м левее обр.2/3	6	3,42	1,41	0,81	0,82	1,12	4,93	2,90
11-YuV-2/11	Тот же лед, на 4 м левее обр.2/3	6	2,91	0,94	0,52	0,75	1,22	1,91	2,00
	Тот же лед.								

11-YuV-2/12	на 4 м левее обр.2/3 и на 1 м ниже	7	4,10	1,58	0,88	0,76	6,76	2,61	1,98
11-YuV-2/13	Пылеватый темно-серый льдистый вертикально-слоистый песок со льдом	9-10	144,00	7,30	5,28	2,52	80,00	14,23	16,81

Пластовые ледяные залежи в долине р.Еркутаяха

Строение и изотопный состав ледяных залежей в долине р.Еркутаяха.

Гетерогенная пластовая ледяная залежь^[6] с парагенетическим сочетанием автохтонного сегрегационного ледяного пласта и автохтонного инъекционного пластового льда на левом берегу исследована нами в июле 2010 г. на Южном Ямале, в урочище Яролабхана, близ разъезда 10 на 222 км железной дороги Обская-Бованенково, в 4 км ниже железнодорожного моста. Это самое южное из изученных на Ямале местонахождений пластовых льдов. В обнажении высотой 18-20 м, сложенном преимущественно слоистыми песками, вскрывается лёд двух типов: в центральной части вскрыт шток деформированного льда вертикального направления, а на контакте с ним по обеим сторонам – дислоцированная слоистая пластовая залежь (рис. 8, 9).

Изученное Ю.К. Васильчуком и Н.А. Буданцевой обнажение пластового льда располагается на Южном Ямале, на левом берегу р.Еркутаяха ($68^{\circ}1'18''$ с.ш., $68^{\circ} 51'39''$ в.д.).^[7,10] Это самое южное из изученных на Ямале местонахождений пластовых льдов.

В обнажении высотой 15-18 м вскрывается дислоцированная пластовая залежь общей протяженностью около 100 м, которую вмещают преимущественно слоистые пески. Наиболее полно ледяная залежь вскрыта в цирке.

В центральной части цирка пластовая залежь залегает прямо под слоем сезонного протаивания, она здесь резко задрана кверху и срезана, скорее всего, постгенетическим субаквальным протаиванием. В апикальной части цирка залежь перекрыта голоценовыми озёрно-болотными осадками мощностью около 1 м.

По обе стороны от центральной части залежи ледяные слои круто наклонно падают (см. рис. 8 и 9) и уже через 15 м кровля ледяной залежи оказывается на глубине 8 м.

Лед внутри залежи характеризуется существенно различной криотекстурой. Это преимущественно лёд четырёх типов: 1) лёд чистый матовый белый, с большим количеством газовых ксеногенных включений; 2) лёд "хрустальный" прозрачный, иногда с включениями грунта; 3) лёд серый со стальным отливом, слоистый, слоистость параллельна наклону верхней поверхности ледяной залежи; 4) лед серый блочный, залегает в виде черепицы.

В общем сложении залежи нами^[10] выделена центральная дислоцированная часть – шток с вертикально и субвертикально залегающими слоями льда (лёд здесь хрустальный и грязно-серый с большим количеством минеральных включений) и две периферийные части, сложенные горизонтальнослоистым льдом (лёд здесь преимущественно серый со стальным отливом, слоистый, матовый белый и серый блочный). Горизонтальная

слоистость этих двух частей залежи меняется на наклонную на контакте с центральным штоком. Такой контакт свидетельствует о воздействии льда центрального штока на залегание горизонтальнослоистого льда.

С востока на запад слоистый лёд общей протяженностью более 100 м крутонаклонно падает и уже через 15 м кровля этой ледяной залежи оказывается на глубине более 8 м. Лед слоистый, слоистость параллельна наклону верхней поверхности ледяной залежи.

Строение ледяного комплекса на р.Еркутаяха и исследование спорово-пыльцевых остатков во льду, продемонстрировавшее почти исключительно тундровые пыльцу и споры, позволило более определённо ответить на вопрос о генетической принадлежности изученной залежи. В апикальной части залежи лёд инъекционный, а в дистальных частях по обеим сторонам от центральной инъекции лёд сегрегационный (рис. 10), т.е. ледяная залежь гетерогенная автохтонная, образованная сочетанием сегрегационного и инъекционного пластовых льдов. [\[7,10\]](#)

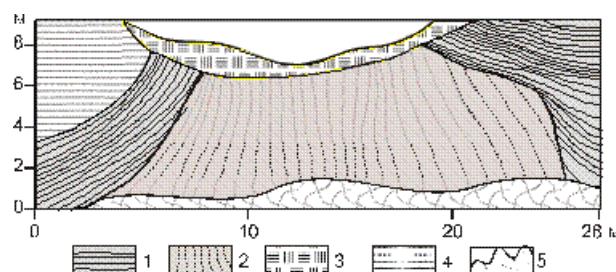


Рис. 8. Гетерогенная пластовая ледяная залежь: парагенез сегрегационного и инъекционного ледяных пластов в толще казанцевских отложений в долине р.Еркутаяха на юге Ямала (по Ю.К.Васильчуку и др.).[\[10\]](#):

1 – сегрегационный горизонтально-и субгоризонтальнослоистый лёд; 2 – инъекционный вертикальнослоистый лёд; 3 – голоценовые озёрно-болотные суглинки и супеси с торфом; 4 – пески, вмещающие ледяную залежь; 5 – оплывина

Для изотопных и гидрохимических определений было отобрано 33 образца пластового льда из разных фрагментов обнажения и изо льда разных типов.

Вариации стабильных изотопов кислорода идейтерия в залежи существенны: во льду чистом, матовом, белом значения $\delta^{18}\text{O}$ изменяются от $-19,64\text{\textperthousand}$ до $-20,54\text{\textperthousand}$, а значения $\delta^2\text{H}$ – от $-152,4\text{\textperthousand}$ до $-156,9\text{\textperthousand}$, во льду “хрустальном” прозрачном значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-19,24\text{\textperthousand}$ до $-20,24\text{\textperthousand}$, а $\delta^2\text{H}$ от $-149,6\text{\textperthousand}$ до $-160,7\text{\textperthousand}$. [\[10\]](#)

Во льду сером, прозрачном со стальным отливом значения $\delta^{18}\text{O}$ изменяются от $-19,44\text{\textperthousand}$ до $-21,33\text{\textperthousand}$, а величины $\delta^2\text{H}$ от $-150,3\text{\textperthousand}$ до $-163,8\text{\textperthousand}$, а во льду сером блочном и грязно-сером значения $\delta^{18}\text{O}$ более отрицательные и они варьируют от $-22,13\text{\textperthousand}$ до $-23,42\text{\textperthousand}$, а значения $\delta^2\text{H}$ от $-165,5\text{\textperthousand}$ до $-172,7\text{\textperthousand}$.

Оценивая весь диапазон изменчивости $\delta^{18}\text{O}$ (около 4\textperthousand) и $\delta^2\text{H}$ (около $20\text{\textperthousand}$) можно говорить о сравнительно малых колебаниях изотопного состава, следовательно, исходная вода для льда всех типов была одной и той же или близкой по изотопному составу. [\[10\]](#)

К тому же изотопные различия практически не превысили обычную изотопную разницу, возникающую вследствие фракционирования при промерзании свободной воды.

Сравнительно небольшой диапазон вариаций изотопного состава говорит скорее в пользу внутргрунтовой природы залежей, хотя существенные различия в текстуре льда заставляют думать, что деформированный и вертикально-слоистый лёд в центральной части залежи скорее имеет инъекционную природу.

Выявлены различия и в степени окатанности кварцевых частиц – во льду штока они неокатанные, а в горизонтально-слоистом периферийном льду окатанность кварцевых частиц хорошая.

Это указывает на различные источники поступления воды для питания вертикально-слоистого льда центрального штока и горизонтально-слоистого периферийного льда.



Рис. 9. Пластовый лёд в долине р. Еркутаяха Фото Ю.К. Васильчука



Рис. 10. Структура пластового льда в долине р. Еркутаяха Фото Ю.К. Васильчука

Ионный состав пластового подземного льда в долине р. Еркутаяха. В ионном составе пластового льда в долине р. Еркутаяха наблюдается примерно равное количество катионов Na^+ , достигающих 3,64 мг/л, K^+ и Mg^{2+} до 2,71 и 2,56 мг/л во льду грязно-сером с большим количеством минеральных включений (табл. 4). Среди катионов доминируют NO_3^- и сульфаты (SO_4^{2-}) до 5,61 и 6,35 мг/л, соответственно.

Средняя концентрация анионов хлора в пластовой ледяной залежи в долине р. Еркутаяха варьирует в разных типах льда и составляет: в хрустальном и молочно-белом льду 0,76 мг/л, во льду сером с большим количеством включений 1,46 мг/л, а в вертикально-слоистом льду центрального штока 1,48 мг/л.

Таблица 4. Ионный состав пластового подземного льда, располагающегося на левом

берегу р.Еркутаяха, южный Ямал, в июле 2010 г. (точка 10-YuV-Yerk)

№ образца	Тип льда	Высота над урезом р.Еркутаяха, м	Na ⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	NO ₃ ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л
Горизонтальнослойственный периферийный лёд									
10-YuV-Yerk/1	Хрустальный лед	1	1,17	0,83	1,51	2,86	1,09	0,41	4,71
10-YuV-Yerk/2	Хрустальный лед	0,7	1,53	0,73	0,24	1,21	1,80	4,29	0,82
10-YuV-Yerk/3	Хрустальный лед	0,6	1,33	0,76	0,43	1,32	1,47	4,97	1,05
10-YuV-Yerk/4	Лед молочно-белый	1	0,93	0,43	0,96	1,30	1,02	0,98	3,49
10-YuV-Yerk/5	Лед молочно-белый	0,7	1,19	0,66	0,11	0,83	1,32	4,69	0,28
10-YuV-Yerk/6	Лед молочно-белый косослоистый	0,6	0,60	0,22	0,05	0,24	0,51	1,01	0,10
10-YuV-Yerk/7	Лед стальной серый с включениями грунта	1	0,45	0,37	0,37	0,68	0,36	0,48	0,45
10-YuV-Yerk/10	Лед молочно-белый, близ верхнего контакта с прозрачно-серым	0,7	0,65	0,18	0,04	0,11	0,65	1,07	0,10
10-YuV-Yerk/11	Лед хрустальный	1	2,24	0,89	0,36	2,10	2,28	5,61	0,27
10-YuV-Yerk/12		0,9	1,08	0,74	0,87	1,79	0,83	1,19	1,53
10-YuV-Yerk/13		0,8	1,12	0,37	0,66	1,24	0,95	0,97	1,02
10-YuV-Yerk/14		0,7	1,42	0,78	0,71	1,14	1,63	2,43	0,67
Вертикальнослойственный лёд центрального штока									
10-YuV-Yerk/15	Лед хрустальный	10	2,97	1,07	0,92	0,77	0,95	1,60	0,94
10-YuV-Yerk/16	Лед хрустальный	9,5	1,39	0,11	2,02	3,95	1,46	2,29	6,35
10-YuV-Yerk/17	Лед хрустальный	9	1,54	0,38	0,06	0,41	1,55	1,43	0,36

10-YuV-Yerk/18	Лед прозрачный серый	8,5	1,08	0,23	0,22	0,90	1,52	1,14	0,19
10-YuV-Yerk/19	Лед серый	8	1,67	0,80	0,45	3,17	1,92	0,76	0,59
<i>Горизонтальнослойистый периферийный лёд</i>									
10-YuV-Yerk/20	Лед грязно-серый с большим количеством включений	8,2	3,37	1,38	1,39	2,18	0,90	3,48	2,15
10-YuV-Yerk/21		8	3,64	2,71	2,56	1,99	2,73	4,45	5,94
10-YuV-Yerk/22	Лед серый	7,5	2,02	1,32	0,99	1,87	1,35	5,36	1,64
10-YuV-Yerk/23	Лед серый прозрачный	7	0,87	0,68	0,51	0,91	0,80	1,62	0,77
10-YuV-Yerk/24	Лед серый	6,5	1,63	0,27	0,16	1,23	1,50	0,10	0,18
10-YuV-Yerk/26	Лед серый блочный, залегает в виде черепицы	1,15	0,42	0,46	0,07	2,25	0,45	1,55	0,28
10-YuV-Yerk/27	Лед серый	1,35	0,25	0,19	0,08	0,11	0,15	0,53	0,05
10-YuV-Yerk/28	Лед серый	1,5	0,41	0,24	0,05	0,11	0,28	0,56	0,07
10-YuV-Yerk/29	Лед серый	1,63	0,56	0,11	0,10	2,08	0,38	0,01	0,06
10-YuV-Yerk/30	Лед серый	1,75	0,27	0,21	0,14	0,20	0,15	0,05	0,15
10-YuV-Yerk/31	Лед серый	1,9	0,22	0,10	0,15	0,18	0,24	0,04	0,26
10-YuV-Yerk/32	Лед серый	2,05	0,40	0,10	0,05	2,41	0,26	0,04	0,25
10-YuV-Yerk/33	Лед серый	2,2	0,39	0,10	0,10	0,24	0,18	0,64	0,24
10-YuV-Yerk/34	Лед серый	2,35	0,44	0,10	0,10	0,08	0,18	0,01	0,13
10-YuV-Yerk/35	Лед серый	2,5	0,12	0,22	0,05	0,27	0,24	0,01	0,15

Совместный анализ распределения ионного состава, стабильных изотопов и спорово-пыльцевых остатков в пластовой залежи на р.Еркутаяха позволяет заключить, что это внутригрунтовая (автохтонная) гетерогенная пластовая залежь. [\[7,10\]](#)

Дискуссия

Распределение солей в подземных пластовых льдах Западной Сибири весьма различно. Это связано и с разной степенью «загрязнения» пластового льда минеральными включениями, а также с разным механизмом формирования залежей и различной

природой воды - ресурса питавшего ледяные пласти.

Голоценовые пластовые льды близ пос. Сабетта. В толще лайды пластовые льды, имеют различную мощность и глубину залегания. Как правило, пластовые залежи приурочены к песчаным отложениям и только в одном случае пластовый лед постилается маломощным супесчаным горизонтом. Пластовые залежи имеют ярусное расположение по глубине, так четырьмя скважинами вскрыты пластовые льды трех ярусов [33]: линзы льда мощностью около 1 м или чуть менее залегают на глубинах 2, 4 и 8 м от поверхности. Ледяная пластовая залежь нижнего яруса при этом может иметь протяженность более 50 м. Одной из скважин была вскрыта пластовая залежь верхнего яруса, имеющая мощность около 3 м (залегает на глубинах от 2 до 5 м от поверхности). [12]

Голоценовые пластовые льды в толще первой террасы могут быть весьма протяженными – более 50 м и мощными – более 2 м. Интересно, что в этих случаях пласти имеют продолжение в толщу лайды. В ряде случаев пластовые залежи верхних ярусов пронизаны повторно-жильными льдами.

Минерализация льда изученных залежей заметно варьирует: от 13,5 мг/л до 81,9 мг/л. [12] В белом и коричневом неслоистом льдах преобладают хлориды.

Таблица 4. Геохимический состав голоценовых пластовых ледяных залежей близ пос. Сабетта на северо-востоке п-ова Ямал

M, мг/л (TDS, мкСм)	pH	Cl ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	NO ₃ , мг/л	Na ⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	δ ¹⁸ O
скв.42 (156) 0,6-3,4 м, лед коричневый, вертикальнослоистый									
40,64 (102,5)	7,9	5,24	7,37	0,11	7,66	3,36	2,44	6,86	- 25,93
скв. 17(60) 6,9-9,2 м, Лед белый									
13,52 (13,5)	8	2,99	1,23	0,15	1,95	0,93	0,62	3,26	- 15,15
скв.12 (32) 5,5-7,0 м, Лед, коричневый, неслоистый									
81,9 (233)	7,5	24,41	3,39	0,17	23,54	3,26	4,35	9,8	- 19,61

Ультрапресный коричневый вертикально-слоистый лед (минерализация 40,64 мг/л) характеризуется хлоридно-сульфатно-магниевым составом; лед – слабощелочной (pH - 7,9), залегает в песчаной толще. Содержание карбонатов в нем 29,14 %-экв, что может быть соотнесено с постепенным промерзанием вмещающих песков. Соотношение Cl⁻/SO₄²⁻ в нём составляет 0,96. [12] По химическому составу этот лед ближе всего к химическому составу вод Обской губы, приводимому С.М.Фотиевым. [21] Соотношение Cl⁻/SO₄²⁻ в Обской губе составляет 0,84, т.е. во льду сульфат ионов несколько больше, что закономерно при промерзании песчаного водонасыщенного коллектора. [19]

Коричневый неслоистый ультрапресный лед (81,9 мг/л) имеет хлоридно-натриевый состав и слабо-щелочной pH, соотношение Cl⁻/SO₄²⁻ составляет 9,77. По данному соотношению, а также по содержанию анионов и катионов, к этому льду близки значения среднего состава пресных пластовых льдов на Ямале. [27] Заметим также, что близкие

значения имеет также вода Карского моря. Другой образец коричневого неслоистого льда (229,28 мг/л) также характеризуется хлоридно-натриевым составом, и нейтральным pH, но соотношение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ в нем существенно выше – 68,91, что связано с очень низким содержанием сульфат-ионов, что часто отмечается в криопэгах, особенно под руслами рек. Прямых аналогов среди пресных или солоноватых подземных льдов этому образцу коричневого неслоистого льда авторы не обнаружили. Наиболее близкие коричневому льду значения соотношения $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ а также состав, как анионов, так и катионов, характерен для подрусловых таликов рек бассейна Обской губы – 27,67 и для среднего состава солоноватых пластовых льдов на Ямале – 26,39. [\[27\]](#)

Белый лед – наиболее пресный из всех изученных в разрезах скважин в устье р.Сабеттаяха. Его минерализация составляет 10,92-13,52 мг/л. Хотя лед ультрапресный, но имеет хлоридно-магниевый и хлоридно-кальциевый состав, pH слабощелочной (8,00-8,01). Соотношение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ – в пределах 3,29-4,95. Похожий химический состав отмечен для среднего состава текстурообразующих льдов Ямала, [\[27\]](#), а также для речных вод [\[29\]](#) Ямала значения соотношения $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$, соответственно, – 4,30 для текстурообразующих льдов – 4,67 для речных вод бассейна рек Карского моря.

Особенности химического состава подземных пластовых льдов разного типа в устье р. Сабетта демонстрируют образование подземных льдов за счет питания грунтовыми, озерными, болотными и атмосферными водами. Анализ криогидрохимических особенностей пластовых льдов в устье р.Сабетты позволяет предположить, что вертикально слоистый коричневый лед сформировался при промерзании песков, насыщенных водами Обской губы; коричневый неслоистый лед мог сформироваться в результате промерзания вод подзерного талика, происхождение белого ультрапресного льда также можно связать с озерными и речными водами. [\[12,32\]](#)

Пластовые льды в низовьях Ямальского Юрибяя. Ледяные пласти, вскрывающиеся в низовьях р.Юрибей на Западном Ямале исследованы Ю.К.Васильчуком в 1987 г. в разрезе останца казанцевской равнины в низовьях Юрибяя. [\[3\]](#) Она залегает здесь в толще темно-серых суглинков. Криогенная текстура их в зоне контакта со льдом средне- и крупносетчатая, среднешлировая. На глубине 15 м в широком, более 20 м, полукруглом цирке вскрывается мощное ледяное тело. Строение ледяного тела сложное. В осевой части пласта располагается ледяное ядро трапециевидной формы шириной в нижней части 3, в верхней – 2,5 м. На контакте с этим ядром наблюдается ледогрунт, состоящий из прослоев льда мощностью до 0,5 м и суглинка мощностью 0,2-0,3 м, причем наклон слоев ледогрунта повторяет направление боковой поверхности ядра. Угол наклона слоев 40°.

Ледяной пласт при этом, вероятно, сформировался в результате неоднократных инъекций воды и суспензии с последующим сегрегационным разделением ее на лед и грунт.

Анализ водной вытяжки из вмещающего пласт льда суглинистого грунта и прослоев грунта в толще ледогрунта показал идентичность их состава. Общее количество водно-растворимых солей во вмещающих отложениях изменяется от 0,09 до 0,3%, в прослоях грунта – около 0,3%. И в тех, и в других наблюдается преобладание сульфатов (до 1,8 мг-экв) и хлора (до 1,4 мг-экв) и подчиненное значение гидрокарбонатов (до 0,2 мг-экв). Среди катионов резко доминируют ионы натрия (до 3,5 мг-экв), а содержание ионов кальция (не более 0,1 мг-экв) и магния (до 0,14 мг-экв) крайне невелико. Таким

образом, вмещающие отложения и прослои грунта во льду характеризуются слабым хлоридно-сульфатно-натриевым засолением, что позволяет предполагать отложение осадков в условиях неглубокого слабозасоленного морского бассейна.

В химическом составе воды из льда центрального ядра наблюдается незначительное преобладание гидрокарбонат-иона (до 1,1 мг-экв) и меньшее содержание хлор- и сульфат-ионов (до 0,3–0,8 мг-экв). Среди катионов резко преобладает натрий-ион (до 1,7 мг-экв), тогда как содержание ионов кальция и магния не более 0,1 мг-экв. Из приведенных данных следует, что ионный состав льда отличается от состава водной вытяжки вмещающей породы и прослоев грунта во льду, хотя налицо аналогия их катионных групп.

Для исследования генезиса вмещающих отложений были привлечены также данные анализа фораминифер (аналитик Г. Н. Недешева). Установлено, что в разрезе отражены два этапа осадконакопления. Нижняя часть разреза (интервал глубин 19–21 м) сформировалась в условиях мелководного бассейна с пониженной соленостью и температурами, не превышающими 2°, о чем говорит обедненный комплекс бореально-арктических форм фораминифер. Доминирующие виды *Elphidium subclavatum*, *Cassidulina subacuta*, *Cassandra teretis*. Выше по разрезу фораминиферы встречаются единично (*Elphidium subclavatum*, *Cassidulina subacuta*), содержание натрий- и хлорид-ионов уменьшается от сотых до тысячных долей процента, что указывает на формирование толщи в условиях нарастающего похолодания и понижения солености.

Промерзание отложений, слагающих массив в низовьях Юрибея, началось, судя по наличию сингенетической ледяной жилы в песках казанцевской свиты, перекрывающих среднечетвертичные суглинки, в начале верхнечетвертичного времени. Суглинки промерзали эпигенетически. После того как фронт промерзания достиг водоносного горизонта, он частично промерз; при этом в пласте значительно повысилось внутрипластовое давление. Промерзание грунта обусловило возникновение деформаций в суглинистой толще, появление в них трещин. Нарушение сплошности кровли над водоносным промерзающим горизонтом повлекло за собой интенсивный выброс воды, находящейся под большим давлением, вверх. Структурные особенности перекрывающих суглинков приводили к тому, что в верхней части разреза напорные воды проникали в толщах по контакту между плитчатыми отдельностями, формируя льдогрунт с вертикальнослоистой толстошлировой криотекстурой. После разгрузки в результате выброса вод, внутригрунтовое давление падает. В дальнейшем промерзание охватывало нижезалегающие водоносные горизонты, в результате чего происходили повторные инъекции, которые внедрялись в уже деформированную верхнюю часть разреза и замерзали в виде штока. Судя по неоднородности строения пластов, структуры, цвета льда и состава спор и пыльцы, такие инъекции происходили неоднократно. [\[23\]](#)

Пластовые льды в среднем течении Ямальского Юрибея. В 1977 г. в среднем течении этой реки по правому берегу в пределах возвышенности Хой изучен [\[3\]](#) более хорошо обнажившийся сложный по строению массив мерзлых толщ, содержащий субвертикальные слои (штоки) льда (рис. 11).

В этом массиве в верхней части обнажения вскрыты дислоцированные слоистые пески коричневые и охристо-желтые общей мощностью до 10 м. Под ними по крутопадающему (близкому к субвертикальному) контакту располагаются темно-серые тяжелые суглинки мощностью 10–11 м. В верхней части они слегка опесчаненные, имеют массивную криогенную текстуру, которая сменяется в нижней части на слоистую. В этих суглинках

залегают два «пласт» льда. Первый из них имеет видимые размеры 2,5Х4 м. Он залегает субвертикально (на рис. 11 он находится слева и имеет более светлую окраску), нижний его конец закрыт осыпью. На контакте его с вмещающими суглинками верхнего слоя наблюдается прослой тонкозернистого тонкослоистого песка темно-серого цвета; мощность прослой 0,1 м.

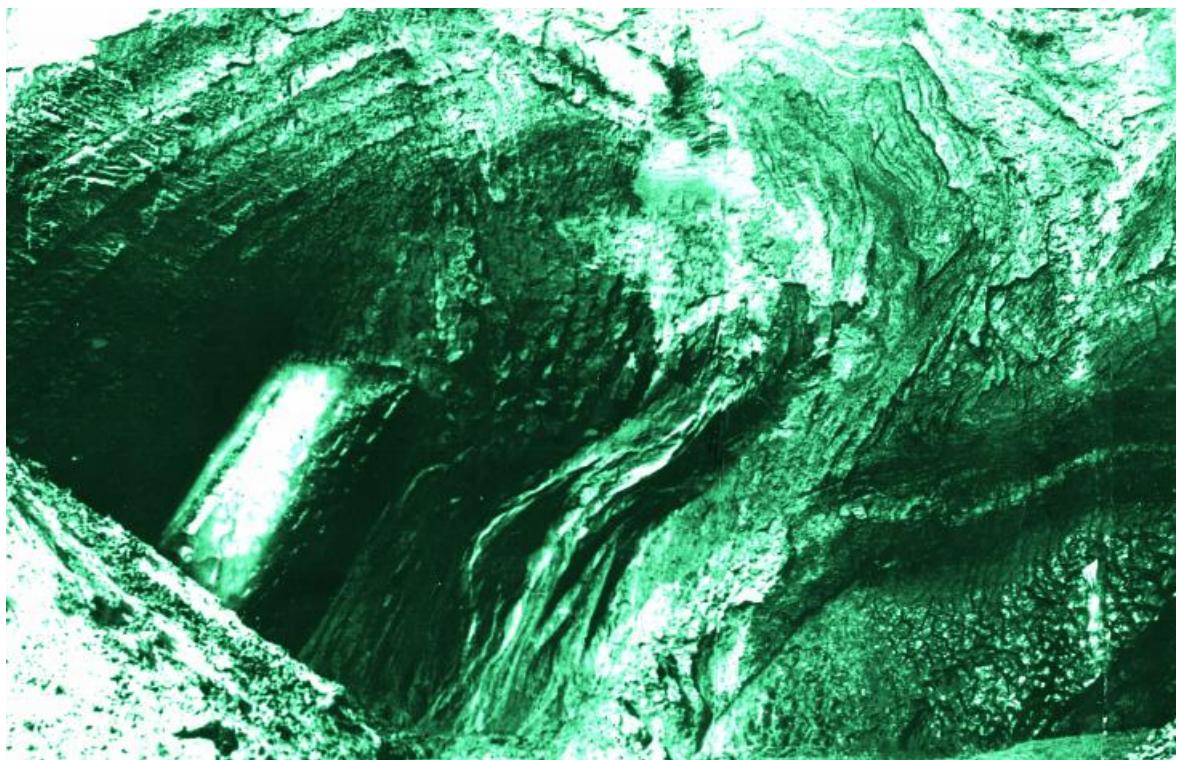


Рис. 11. Обнажение ледяных пластов погребенного седиментационного (слева) и инъекционного (справа) генезиса в среднем течении Юрибея (Ямал). Фото А. И. Спиркина

Слоистость суглинистых пород, непосредственно контактирующих с этим пластом горизонтальная, без следов деформаций и смятия, ориентирована согласно направлению длинной оси пласта. На некотором удалении от него суглинки сильно дислоцированы, смяты в антиклинальную складку (см. рис. 11). В пласте выделяется два вида текстуры льда. Верхняя часть пласта мощностью 2 м состоит из белого льда с большим количеством пузырьков воздуха, нижняя часть – из прозрачного льда. Второй «пласт» льда вскрывается в 5 м выше по течению (справа от первого) и на 0,6–0,8 м ниже первого. По форме в обнажившемся срезе он напоминает грушу. Слои вмещающей породы над ним сильно деформированы, особенно в апикальной части, где наблюдаются разрывные нарушения. Криотекстура очень сильно льдонасыщенной вмещающей породы вокруг этого «пласта» сетчатая, причем вертикальные шлиры выражены отчетливее горизонтальных. Сказанное свидетельствует о том, что это «пласт» инъекционного генезиса, причем он сформировался существенно позже первого пласта.

Но если верхний пласт осадочного (седиментационного) льда, то почему же он залегает в настоящее время не горизонтально, а субвертикально? Какие силы придали ему это неестественное для седиментационного пласта положение?

По мнению В.Т. Трофимова и Ю.К. Васильчука [23], сложное строение этот массив получил позже седиментации пласта льда и промерзания вмещающих его суглинистых отложений. Создание такого специфического строения связано с внедрением масс воды и сусpenзии из нижележащих толщ во время их эпигенетического промерзания в

верхнечетвертичное время. Их инъекция, центр которой находился около одного из концов пластового захороненного льда, обусловила сильный «разворот» пласта и вмещающих его пород и создание сложной «складки», отчетливо видной на рис. 11.

Минерализация пластовых льдов в среднем течении Ямальского Юрибя – от 20 до 300 мг/л. Таким образом, нередко даже в пределах одного массива могут встречаться пластовые льды самого различного генезиса, на первый взгляд, казалось бы, несовместимые, так как инъекционные льды, как правило, считаются показателем эпигенетического промерзания толщ, а погребенные – сингенеза.

Пластовый лед близ Марре-Сале. Дислоцированные пластовые ледяные залежи инъекционного генезиса в районе Марре-Сале были изучены И.Д.Стрелецкой с соавторами [25,26] и Е.А.Слагодой с соавторами. [24] Пластовые льды в районе Марре-Сале залегают преимущественно в нижних частях береговых уступов высотой до 20-30 м и приурочены к дислоцированным отложениям морского и прибрежно-морского генезиса. [26]. Видимая мощность этих отложений достигает 20 м, в их составе преобладают глины и суглинки с прослойками песков и супесей.

Прослои серо-желтых и бурых песков и супесей резко выделяются на фоне темно-серых глин и подчеркивают дислоцированность толщи. Толщина песчаных и супесчаных прослоев обычно не превышает 0,5-1,0 м, а их доля составляет чуть более 12% от суммарной мощности обследованных разрезов.

В интервале от 5,5 до 4,5 м над уровнем моря обнаружен пластовый лед. Проведенное геохимическое опробование разрезов, как не содержащих, так и содержащих пластовые льды, показало, что отложения засолены. Состав водно-растворимых солей в отложениях преимущественно хлоридно-натриевый, степень засоления обычно увеличивается вниз по разрезу, достигая в глинах 0,9%, в песках и супесях – 0,2%. В разрезах, содержащих пластовые льды, количество водно-растворимых солей сокращается при приближении к залежи.

Пластовый лед в разрезе является пресным (общая минерализация изменяется от 39,0 до 67,0 мг/л) и по соотношению ионов отличается от порового раствора перекрывающих и подстилающих песчано-глинистых отложений. В расплавах пластового льда отсутствуют сульфаты и существенно больше гидрокарбонатов. В отличие от атмосферных осадков льды содержат больше магния и меньше кальция и натрия. Минерализация расплавов льда, отобранных в разных частях залежи, различная: минимальная величина отмечается в центре залежи (39 мг/л), а к верхнему и нижнему kontaktам она возрастает (67 и 54 мг/л, соответственно). От центра залежи к kontaktам увеличивается содержание хлор и магний-ионов. Скорее всего, соли попадали в опресненные грунтовые воды до промерзания толщи из засоленных песков, которые играли роль водоносного горизонта, и из размываемых глин. Степень засоления песков на нижнем kontaktе льда в несколько раз выше, чем в перекрывающих залежь песках, минерализация порового раствора увеличивается здесь до 2362,4 мг/л. Вероятно, это связано с тем, что при промерзании часть солей отжималась вниз. [26]

Е.А.Слагода с соавторами [24] выявили четкое отличие нижней залежи, залегающей согласно с вмещающими морскими глинами, от других типов льда. Лед нижней залежи характеризуется относительно повышенными значениями минерализации (до 350 мг/л) за счет хлоридов натрия (более 50 % от суммы солей), пониженным содержанием гидрокарбонатов кальция и магния (менее 10 %). Проба льда из одной из расчисток

характеризуется типичным для морской воды соотношением основных ионов: $(r\text{Na}^+ + r\text{K}^+)/r\text{Cl}^-$ и $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Cl}^-$, равным 0,9 и 0,2 соответственно. Химический анализ образцов льда из верхней залежи характеризуется гидрокарбонатным натриево-кальциевым составом, что типично для пресных вод выщелачивания. Верхние части ледяных лакколитов в песчаных отложениях менее минерализованы по сравнению с нижними горизонтальными участками залежи в льдистых суглинках, в которых широко распространены грунтовые включения и ледогрунтовые прослои. С ростом минерализации во льду горизонтальных участков верхней залежи отмечено преобладание гидрокарбонатов натрия по сравнению с суммой гидрокарбонатов кальция и магния, что Н.П. Анисимова отметила как характерный признак для промерзающих замкнутых таликов в песчаных отложениях. Максимальная минерализация выявлена в линзовидных включениях прозрачного льда с крупными пузырьками воздуха, здесь отмечено высокое содержание хлоридов натрия (до 70 % от суммы солей при среднем содержании 20–40 %).^[24]

Пластовый лед верхней залежи в районе Марре-Сале, залегающей в отложениях таберального комплекса и синкриогенных озерно-аллювиальных отложениях, по данным А.Н. Бутакова^[1,2] имеет минерализацию от 33 до 274 мг/дм³ при среднем значении 94 мг/дм³, гидрокарбонатно-хлоридный, гидрокарбонатный, кальциево-магниево-натриевый и натриевый состав. Пластовый лед нижней залежи имеет минерализацию от 23 до 455 мг/дм³ при среднем значении 155 мг/дм³, гидрокарбонатно-хлоридный и хлоридный, кальциево-магниево-натриевый, кальциево-натриевый и натриевый состав.

Пластовый лед Бованенково. С.М. Фотиев проанализировал данные химического состава пластовых льдов Бованенково, приведенные в работах Ю.Б. Баду, В.В. Баулиным, Ю.К. Васильчуком, Г.И. Дубиковым, М.М. Корейшей, Л.Н. Крицук, М.О. Лейбман, И.Д. Стрелецкой, Н.А. Шполянской и др. и показал зависимость химического состава пластовых льдов от их минерализации. В ионном составе льда с минерализацией от 10 до 300 мг/л обычно превалируют ионы HCO_3^- , а в солевом составе – бикарбонаты. Такой состав льда формировался при активном участии озерных вод. В ионном составе льда с минерализацией от 300 до 1000 мг/л и особенно от 1000 до 10 000 мг/л преобладают ионы Cl^- и Na^+ , а в солевом составе – морские соли или хлориды.^[13] Такой состав льда формировался при активном участии либо морской воды, либо криометаморфизованной морской воды. С.М. Фотиев предположил, что морские воды проникали в пласт льда. Они меняли первичный гидрокарбонатный состав льда на хлоридный и повышали его ничтожную минерализацию до 300–1000 мг/л и более.

Пластовый лед в районе пос. Харасавэй. Пластовая залежь, вскрывающаяся в обнажении второй террасы вблизи пос. Харасавэй, вертикальной мощностью более 1,5–2 м, была неоднократно детально описана и опробована, поэтому интересно сравнить результаты гидрохимического опробования.^[4,16,21,28] Химический анализ льдов из второй террасы показывает, что все льды пресные, гораздо реже – слабозасоленные, минерализация их составляет от 40 до 700 мг/л, а ионный состав меняется по площади и глубине. Соотношение между различными анионами не остается постоянным: по преобладающему аниону льды могут относиться либо к гидрокарбонатному, либо к сульфатному, либо к хлоридному классу; по ведущему катиону все они объединяются в группу натрия. Лед блоков монолитного льда характеризуется меньшей минерализацией по сравнению с текстурообразующим 70–140 мг/л. Солевой состав, в целом, имеет следующую зависимость $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ и $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, что указывает

на морское происхождение воды.[\[28\]](#)

Интересные данные получены М.А.Великоцким и Ю.В.Мудровым [\[16\]](#) при изучении распределения солей во льдах различных типов. В молочно-белом льду наибольшее количество солей (143 мг/л) наблюдается в середине линзы, а в прозрачном (160 мг/л и 213 мг/л) - в верхней и нижней ее частях.

По наблюдениям В.В.Орлянского [\[21\]](#) залежи подземных льдов приурочены к контактной зоне песчаных и глинистых отложений. Он отмечает тесную связь между формами и размерами ледяных тел и характером деформаций подошвы глинистой толщи. Линзовидные залежи льдов приурочены в куполовидным деформациям на подошве глинистой толщи с расстоянием между крыльями складок на подошве в несколько десятков метров и амплитудой около 10-20 м. Химический состав подземных льдов, обнажающихся в абразионном уступе морского побережья в районе пос. Харасавэй, характеризуется преимущественно гидрокарбонатно- и сульфатно-хлоридно-натриевым составом с содержанием сухого остатка 10-80 мг/л.[\[21\]](#)

Химический анализ льдов из второй террасы показывает, что все льды пресные, гораздо реже - слабозасоленные, минерализация их составляет от 40 до 700 мг/л, а ионный состав меняется по площади и глубине. Соотношение между различными анионами не остается постоянным. Льды, относящиеся к гидрокарбонатному классу, имеют кислую реакцию, к сульфатному и хлоридному - слабокислую и нейтральную. Степень минерализации льда и степень засоления вмещающих эти льды отложений существенно различаются. Отмечается резкое снижение засоленности по мере приближения к залежи льда.

Пластовый лед на берегу озера Нейто. Пластовый лед в песчано-глинистой толще в районе оз. Ней-То образует горизонтальные или слабо наклонные сложнопостроенные залежи, в которых Г.И. Дубиков [\[17,18\]](#) выделил 3 типа льда. 1). Лед А - молочно-белого цвета, непрозрачный, с минимальным (не более 1 %) содержанием минеральных примесей и большим числом пузырьков газа диаметром 0,5-3,5 мм. Лед крупнокристаллический, неслоистый, глыбового сложения и приурочен всегда к верхним частям пластовых залежей. 2). Лед Б - стекловидный, прозрачный, крупно- и мелкокристаллический, темного цвета в обнажениях, содержит редкие включения отдельностей глин и взвеси песчаных и глинистых частиц, а также редкие пузырьки газов в зонах мелких кристаллов. Этот тип наблюдается во всех частях пластовых залежей и распространен как самостоятельно, так и в сочетании с другими типами. 3). Лед В всегда черного цвета, содержит большое количество минеральных примесей и часто именуется ледогрунтом. Примеси по составу не всегда соответствуют окружающим породам, часто встречаются чужие минеральные включения: песчанистые глины с включениями гравия. Включения имеют вид грунтовой взвеси, "плавающей" во льду, мелких отдельностей слоистой глины и сгустков глинистых частиц. В химическом составе этих трех разновидностей пластовых залежей льда выявлены существенные различия. Минерализация, содержание иона Cl^- и отношение $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ возрастает от льда А к льду В в связи с увеличением количества минеральных примесей. В этом же направлении отношение $\text{EMg}^{2+}/\text{ECI}^-$ сокращается, а преобладающий гидрокарбонатно-хлоридно-натриевый тип льда сменяется хлоридно-натриевым или хлоридно-гидрокарбонатно-натриевым. В пластовых льдах содержание ионов Na^+ значительно преобладает над содержанием ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} особенно в ледогрунте. Отношение $\text{EMg}^{2+}/\text{ECI}^-$ у всех типов льда (средние значения для льда А - 0,83; для льда Б - 0,49 и

для льда В - 0,2) типично для вод морского типа. Солевой состав льдов пластовых залежей имеет зависимость $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ (65 % случаев) и $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ (81% случаев), которая также присуща водам морского типа. [17,18]

Пластовый лед в долине р. Сеяха (Мутная). В береговых обнажениях р. Сеяха видимая мощность пластов составляет 5–10 м, реже до 20 м, а видимая протяженность – 100–150 м. [17] Горизонтально залегающие пласти льда состоят из параллельных слоев чистого льда, чередующихся с прослойми льда, загрязненного минеральными включениями (от песчаной муты до угловатых осколков плотной глины) размером 3–4 мм. Лед слабо минерализован (0,02–0,06 г/л), в ионном составе преобладают гидрокарбонаты, магний, кальций и натрий при повышенном содержании хлоридов близ контактов с вмещающей породой. [20 с. 141]

Пластовые льды в отложениях первой террасы р. Гыда. Отложения первой террасы в устье р. Гыда датируются предголоценовым временем – 10-14 тыс. лет назад [12]. У пос. Гыда пластовые линзообразные залежи встречены в парагенезе с повторно-жильными льдами. Пласти льда высотой до 0,4 м, шириной до 8 м залегают здесь в оторфованных прослоях песка, слагающих террасу.

Таблица 4. Минерализация и ионный состав пластового внутргрунтового инфильтрационно-сегрегационного льда близ пос. Гыда. Из Ю.К. Васильчука [3, том. 2. стр. 38-39]

Поле- вой №	Глубина, м	Сухой остаток, мг/л	HCO_3^- , мг/л	Cl^- , мг/л	SO_4^{2-} , мг/л	Ca^{2+} , мг/л	Mg^{2+} , мг/л	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$, мг/л	pH
303-YuV/9	2,8	44	18	4	7	8	2	1	7,2
303-YuV/8	2,9	32	12	4	6	2	1	6	7,0
303-YuV/7	3,1	48	12	5	7	2	1	8	6,8
303-YuV/6	3,5	56	12	3	8	2	1	7	6,3
303-YuV/5	3,7	68	18	7	12	4	2	9	6,55
303-YuV/4	3,8	>40	12	5	10	2	1	9	6,05
303-YuV/3	4,4	40	12	5	7	3	1	7	7,3
303-YuV/2	4,5	48	15	6	11	4	2	6	6,95
303-YuV/1	4,6	66	24	8	12	4	7	3	7,5

Отметим заметное сходство ионного состава пластового внутргрунтового инфильтрационно-сегрегационного льда близ пос. Гыда с вновь исследованными нами залежами на Ямале.

Пластовый лед в среднем течении р. Танама. Информативны данные о солености позднеплейстоценовой залежи пластового льда в среднем течении р. Танама. Здесь разные части пласта характеризуются существенно различной минерализацией.^[9] В апикальной части пласта наблюдаются колебания по степени минерализации от 90 до 390 мг/л., а дистальной она колеблется от 40 до 150 мг/л. Это дает основание думать, что либо пласт долгое время находился в морской воде (ил» из нее образовался), если он аллохтонный, либо в сложении пласта принимает участие лед, образовавшийся в результате внедрения воды из разных по степени минерализации водоносных горизонтов» если он внутригрунтовый-автохтонный (второе нам кажется менее вероятным).

На возможное морское происхождение грунтов указывает и их химический состав. Даже у песков из верхней части разреза минерализация превышает 0,2%, а у суглинков она достигает 0,6%, что указывает на засоленную среду осадконакопления. Весьма показательна и минерализация льда. Химический состав пласта сходен с составом современных припайных льдов Карского моря, величина минерализации в нем достигает 194-390 мг/л, причем преобладают в нем сульфаты (45-178 мг/л) и хлориды (36-51 мг/л), характерные для морских льдов.^[9]

Пластовый лед близ пос. Усть-Порт на Енисее. В 1965 г. Б.И.Втюриным были описаны залежи сегрегационного льда в трех обнажениях по обоим берегам р.Енисей. Первоначально к сегрегационному типу он отнес лишь 2 маломощные пластовые залежи подземного льда, встреченные в прибрежно-озёрных песчаных позднесанчуговских или казанцевских отложениях на правобережье Енисея в 6 км ниже Усть-Порта. Первый пласт, мощностью 0,4 м был пройден на глубине 5,8-6,2 м от поверхности террасы, второй, мощностью 0,75 м – на глубине 7,6-8,35 м. Разделяющий их слой разнозернистого пылеватого песка имеет ненараненную четкую горизонтальную слоистость. В кровле верхнего пласта супесь илистая и тонкозернистый пылеватый песок с заметной горизонтальной слоистостью. В подошве нижнего пласта – разнозернистый горизонтально-слоистый, с пачками косо-волнистого и волнисто-слоистого песка. Местами довольно отчетливо проявляется ленточноподобная слоистость.

Контакты пластов льда и грунта четкие, прямолинейные вверху и мелковолнистые внизу. Лед очень чистый в верхнем пласте и со значительным количеством примесей газа и пылеватых частиц и песка в нижнем. Соответственно, размер зерен льда верхнего пласта крупнее, чем нижнего. Кристаллографическая ориентировка упорядоченная, преимущественно вертикальная. Химический анализ льда обоих пластов показал гидрокарбонатно-натриевый состав и малую минерализацию (около 50 мг/л), несколько увеличивающуюся (до 90 мг/л) в нижней части второго слоя.

Пластовая залежь Ледяная Гора. Широко известная (высотой до 40 м) залежь Ледяная Гора, расположенная на широте полярного круга на Енисее, В. И. Соломатиным, Е. Г. Карповым и многими другими отнесена к погребенному глетчерному типу. Между тем, распределение солей во льду нуждается в тщательном анализе и комментариях – здесь минерализация колеблется от 10-80 мг/л в верхней части залежи до 200-340 мг/л в ее средней и нижней частях. И хотя качественный состав солей здесь не морской и преобладают гидрокарбонаты и кальций, но он отнюдь и не высокогорный, то есть глетчерное происхождение залежи из анализа химсостава отнюдь не следует. Эта обстоятельство сторонниками гляциалистской версии не замечается, пожалуй, лишь Н. Н. Романовский (устное замечание) дал интересную трактовку этого: повышенная минерализация может быть следствием насыщения солями в результате циркулирования

подземных вод под телом теплого ледника и последующего их замерзания в виде наледей на контакте с глетчерным льдом, то есть в данной интерпретации Ледяная Гора не глетчерный лед, а парагенез глетчерного и наледного ледяных тел.

Для понимания природы льда в залежи Ледяная Гора для нас самым важным является, что она скорее всего позднеплейстоценового возраста (причем даже вероятно старше 40 тысяч лет [\[7\]](#)) и так же как расположенная вблизи – в районе оз. Маковское – залежь, описанная Ю. А. Лаврушиным, пережила период голоценового «оптимума», свидетельствуя о непрерывности существования многолетнемерзлых пород и в этих, сравнительно южных районах Западно-Сибирской криолитозоны.

С.М.Фотиев [\[27\]](#) сопоставив химический состав большинства пластовых льдов с химическим составом поверхностных и подземных вод и обнаружив большое сходство химического состава пластовых залежей с озёрными водами пришел в выводу, что озерные воды – единственный источник пресных вод, способный обеспечить регулярное поступление в толщу мерзлых морских засоленных отложений огромных объемов пресной воды и формирование мощных (до 30–50 м), выдержаных по простирации пластов льда. В этом наши выводы с выводами С.М.Фотиева во многом совпадают, во всяком случае, по нашим данным, озёрные воды если не единственный, то важнейший источник питания пластовых льдов. [\[3\]](#)

По соотношению $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ три изученные залежи пластового льда в центральной и южной частях Ямала близки к составу снежника в долине р.Сеяха (Мутная) и сегрегационному льду на первой террасе о.Белый (табл. 5).

Таблица 5 . Соотношение хлоридов и сульфатов в пластовых льдах и возможных источниках поступления воды в них, север Западной Сибири

Объект	Концентра- ция анионов, мг/л		Соот- ношение Cl^- $/ \text{SO}_4^{2-}$	Источник
	Cl^-	SO_4^{2-}		
Пластовый подземный лед Бованенково, в долине р.Сеяха (Мутная) на берегу оз.Ханикосито	3,13	1,0	3,13	Данная работа
Пластовый подземный лед в верховьях р.Мордыяха, хрустальный и стекловатый лед с небольшим количеством вертикальных включений супеси	2,27	2,36	0,96	Данная работа
Пластовый подземный лед в верховьях р.Мордыяха, ледогрунт	7,0	9,76	0,72	Данная работа
Пластовый подземный лед на левом берегу р.Еркутаяха, горизонтальнослоистый периферийный лёд, хрустальный и молочно-белый	0,76	0,75	1,01	Данная работа

Пластовый подземный лед на левом берегу р.Еркутаяха, горизонтальнослоистый периферийный лёд , серый с большим количеством включений	1,46	2,14	0,68	Данная работа
Пластовый подземный лед на левом берегу р.Еркутаяха, вертикальнослоистый лёд центрального штока	1,48	1,69	0,88	Данная работа
Лед коричневый, скв. 12, обр 8	70,61	7,23	9,77	Васильчук и др. [12]
Лед коричневый, скв. 12, обр 9	75,8	1,1	68,91	
Лед белый, скв. 17, обр. 38	55,67	11,25	4,95	
Лед белый, скв. 17, обр.39	55,61	16,92	3,29	
Лед коричневый вертикальнослоистый, скв. 42	34,53	35,92	0,96	
Сегрегационный лед на первой террасе о.Белый	14,2	13,2	1,08	
Пластовый лед третья морская терраса, р.Надуйяха	24	17	1,41	Стрелецкая, Лейбман [25]
Атмосферные осадки на севере Ямала	7	9	0,78	
Речная вода, р. Сеяха Мутная	12	10	1,2	
Снежник на севере Ямала - долина р.Сеяха (Мутная)	7	13	0,54	
Криопэг в долине р.Надуйяха	37778	764	49,45	
Пресный пластовый лед на Ямале, средний состав	62,4	6,2	10,06	Фотиев [27]
Вода Карское море	89	10	8,9	
Солоноватый пластовый лед на Ямале, средний состав	95,0	3,6	26,39	
Подрусловые талики рек бассейна Обской губы	83	3	27,67	
Ультрапресный пластовый лед на Ямале, средний состав	36,9	12,6	2,93	
Снег на Ямале	45,5	6,8	6,69	
Озерные воды	39,8	5,3	7,51	
Текстурообразующие льды	54,2	12,6	4,30	
Речные воды бассейна рек Карского моря	64,4	13,8	4,67	
Речные воды	25,6	11,8	2,17	
Дождь на Ямале	32,6	18,7	1,74	
Вода, Обская губа	27	32	0,84	
Инъекционные льды	31,4	20,2	1,55	
Дождевые осадки на Ямале	32,6	18,7	1,74	

Выводы

1 . Исследован ионный состав 3 мощных залежей пластового льда в центральной и

южной частях Ямала: а) Бованенково, на берегу оз.Ханикосито; б) в верховьях р.Мордьяха и в) в долине р. Еркутаяха. Все они относятся к ультрапресным льдам с концентрацией основных ионов от 20 до 40 мг/л.

2. В ионном составе пластового льда Бованенково, на берегу оз.Ханикосито заметно преобладают катионы Na^+ , достигая 38,95 мг/л в мутном льду и K^+ до 21,76 мг/л в сильнопузырчатом прозрачном льду. Средняя концентрация анионов хлора составляет 3,13 мг/л, а сульфатов - 1 мг/л.

3. В ионном составе пластового льда в верховьях р.Мордьяха заметно преобладают катионы Na^+ , достигая 68,51 мг/л в ледогрунте и 6,1 мг/л в хрустальном и стекловатом. Средняя концентрация анионов хлора в пластовой ледяной залежи в верховьях р.Мордьяха заметно варьирует в разных типах льда и составляет 2,27 мг/л, а сульфатов - 2,36 мг/л.

4. В ионном составе пластового льда в долине р. Еркутаяха наблюдается примерно равное количество катионов Na^+ , достигающих 3,64 мг/л, K^+ и Mg^{2+} до 2,71 и 2,56 мг/л. Среди катионов доминируют NO_3^- и сульфаты (SO_4^{2-}) до 5,61 и 6,35 мг/л, соответственно. Средняя концентрация анионов хлора в пластовой ледяной залежи в долине р. Еркутаяха варьирует в разных типах льда и составляет: в хрустальном и молочно-белом льду 0,76 мг/л, во льду сером горизонтальных прослоев 1,46 мг/л, а в вертикальнослоистом льду центрального штока 1,48 мг/л. В ионном составе пластового льда в долине р. Еркутаяха наблюдается примерно равное количество катионов Na^+ до 3,64 мг/л, а также K^+ и Mg^{2+} до 2,71 и 2,56 мг/л. Среди катионов доминируют NO_3^- и сульфаты (SO_4^{2-}) до 5,61 и 6,35 мг/л, соответственно.

6. Ионный состав 3 изученных мощных залежей пластового льда в центральной и южной частях Ямала ближе всего к ионному составу голоценовых внутригрунтовых пластовых ледяных залежей близ пос. Сабетта и позднеплейстоценовых инфильтрационно-сегрегационных льдов у пос. Гыда. Это является основанием для вероятностного отнесения изучаемых пластовых льдов к залежам внутригрунтового типа, возникших при автохтонном промерзании межмерзлотных водоносных горизонтов.

Благодарности

Автор благодарен Н.А. Буданцевой, Д.Ю.Некрасову, Дж.Ю.Васильчук, И.Г.Шоркунову и Л.Б. Блудушкиной за предоставленные материалы и помощь в полевых исследованиях.

Библиография

1. Бутаков В.И. Особенности формирования геохимического состава подземных льдов Карского региона // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Тюмень, 2022. 25 с.
2. 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. Том XXIV. № 5. С. 29–44. doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5(29-44).
3. Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). М.: Изд. Отдел. Теоретических проблем РАН. МГУ, ПНИИС, 1992. В 2-х томах. Т. 1. – 420 с. Т. 2 – 264 с.
4. Васильчук Ю.К. Пластовые ледяные залежи // Криосфера нефтегазокоденсатных

- месторождений полуострова Ямал. Том 1. Криосфера Харасавейского газоконденсатного месторождения. Тюмень–СПб.: Недра, 2006. С. 160–193.
5. Васильчук Ю.К. Пластовые ледяные залежи в пределах Бованенковского ГКМ (Центральный Ямал) // Инженерная геология. 2010. №3. С. 50–67.
6. Васильчук Ю.К. Гомогенные и гетерогенные пластовые ледяные залежи в многолетнемёрзлых породах // Криосфера Земли. 2011. Том 15. №1. С. 40–51.
7. Васильчук Ю.К. Изотопные методы в географии. Часть 2: Геохимия стабильных изотопов пластовых льдов. В 2-х томах. – М.: Издательство Московского университета, 2012. Том I. – 472 с.
8. Васильчук Ю.К. Геохимический состав подземных льдов севера Российской Арктики // Арктика и Антарктика. 2016. № 2. С. 99–115. DOI: 10.7256/2453-8922.2016.2.21378 URL: https://e-notabene.ru/arctic/article_21378.html
9. Васильчук Ю.К., Петров О.М., Васильчук А.К. Некоторые замечания о стратиграфическом значении залежи пластового льда в казанцевских отложениях центрального Гыдана // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. Вып. 55. М.: Наука, 1986. С. 111–117.
10. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К. Вариации $\delta^{18}\text{O}$, δD и содержание пыльцы и спор в автохтонной гетерогенной пластовой ледяной залежи на реке Еркутаяха на Южном Ямале // Доклады Российской Академии Наук. 2011. Том 438. №3. С. 400–405.
11. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А. Изотопный и спорово-пыльцевой состав пластовой ледяной залежи на реке Мордыяха, Центральный Ямал // Доклады Российской Академии Наук. 2012. Том 446. №2. С. 204–208.
12. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Подборный Е.Е., Суллина А.Н., Чижова Ю.Н. Голоценовые многоярусные пластовые льды в устье реки Сабеттаяха, полуостров Ямал // Криосфера Земли. 2015. №4. С. 39–53.
13. Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Инженерно-геологические и геохимические условия полигональных ландшафтов острова Белый (Карское море) // Инженерная геология. 2015. №1. С. 50–65.
14. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Подборный Е.Е., Чижова Ю.Н. Пластовые льды в голоценовых отложениях Западной Сибири // Криосфера Земли. 2016. №1. С. 36–50.
15. 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://e-notabene.ru/arctic/article_25833.html
16. Великоцкий М.А., Мудров Ю.В. К истории развития многолетнемёрзлых пород на севере Западной Сибири // Развитие криолитозоны Евразии в верхнем кайнозое. М.: Наука, 1985. С. 29–42.
17. Дубиков Г.И. Парагенез пластовых льдов и мерзлых пород Западной Сибири // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1982. С. 24–42.
18. Дубиков Г. И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М.: Изд-во "Геос", 2002. – 246 с.
19. Кореновская И.М., Тарасов М.Н. К вопросу о формировании ионного состава и минерализации льда пресных вод при различных условиях // Гидрохимические материалы. 1968. Том XLVII. С. 77–87.
20. Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Науч. мир. 2010, 352 с.
21. Орлянский В.В. Формирование и пространственное размещение залежей подземных льдов на Ямале // Криогенные процессы и явления в Сибири. Якутск: изд. ИМ СО АН СССР, 1984. С. 22–31.

22. Пармузин С.Ю., Суходольский С.Е. Пластовые льды Среднего Ямала и их роль в формировании рельефа // *Пластовые льды криолитозоны*. Под ред. проф. А.И.Попова. Якутск: Изд. ИМ СО АН СССР, 1982. С. 51–61.
23. Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Васильчук Ю.К., Фирсов Н.Г. и др. *Экзогеодинамика Западно-Сибирской плиты (пространственно-временные закономерности)* / Под ред. проф. В.Т. Трофимова М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 246 с.
24. Слагода Е.А., Опокина О.Л., Рогов В.В., Курчатова А.Н. Строение и генезис подземных льдов в верхненеоплейстоцен-голоценовых отложениях мыса Марре-Сале (Западный Ямал) // *Криосфера Земли*. 2012. Том XVI. №2. С. 9–22.
25. Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений Центрального Ямала // *Криосфера Земли*. 2002. Том VI. №3. С. 15–24.
26. Стрелецкая И.Д., Каневский М.З., Васильев А.А. Пластовые льды в дислоцированных четвертичных отложениях Западного Ямала // *Криосфера Земли*. 2006. Том X. №2. С. 68–78.
27. Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // *Криосфера Земли*. 1999. Том 3. № 2. С. 40–65.
28. Хименков А.Н. *Формирование криогенного строения морских отложений* / Автореф.дисс. на соиск.уч.ст.канд. геол.-мин. наук. М.: ПНИИИС, 1985. 23 с.
29. Ji X., Abakumov E., Polyakov V., & Xie X. Mobilization of geochemical elements to surface water in the active layer of permafrost in the Russian Arctic // *Water Resources Research*. 2021. 57. e2020WR028269. <https://doi.org/10.1029/2020WR028269>
30. Michel F.A. The relationship of massive ground ice and the Late Pleistocene history of Northwest Siberia // *Quaternary International*. 1998. Vol. 45/46. P. 43–48.
31. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N. Papesch W., Podborny Ye.Ye. 14C age, stable isotope composition and pollen analysis of massive ice, Bovanenkovo gas field, Central Yamal Peninsula // *Geography, Environment, Sustainability*. 2014. Vol. 7. N2. P. 49–70. doi: 10.24057/2071-9388-2014-7-2-49-70
32. Vasil'chuk Yu.K., Murton J.B. Stable isotope geochemistry of massive ice // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. N3(9). P. 4–24. doi: 10.15356/2071-9388_03v09_2016_01
33. Vasil'chuk Yu., Budantseva N., Vasil'chuk A., Chizhova Ju., Podborny Ye., Vasil'chuk J. Holocene multistage massive ice, Sabetayakha river mouth, Yamal Peninsula, northernwest Siberia // *GeoRes J*. 2016. Vol. 9. P. 54–66. doi: 10.1016/j.grj.2016.09.00.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предмет исследования являются, по мнению автора, обследование и анализ ионного состава пластовых ледяных залежей в условиях эксплуатации холодного климата Ямала: Бованенково, Еркутаяха и Мордыяха.

Методология исследования исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании проб из пластовых льдов использована методика выполнения измерений массовой концентрации катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01738, Диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм³, для определения анионов - использована методика выполнения измерений массовой концентрации Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной

воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01724, диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм³ и методика выполнения измерений массовой концентрации ионов в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии ПНД Ф 14.1:2:4. 132-98, Диапазон определяемых концентраций по катионам 0,10-150,00 мг/дм³ на ионном хроматографе «Стайер», предел детектирования по хлорид-иону 0,02 мг/л. В лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова проводилось определения изотопного состава кислорода и водорода во льду жил выполнялось на масс-спектрометре Delta-V Plus с использованием комплекса газ-бенч.

Автором также использовался метод литературного анализа, сравнительных характеристик географических объектов и процессов, метод построения диаграмм.

Актуальность затронутой темы связано с тем, что химический состав ледяных пластов чаще всего пресный или ультрапресный, что в равной мере присуще и ледникам, и погребенным ледниковым льдам, и внутригрунтовым подземным льдам. Одним из важных критериев для оценки природы пластовых ледяных залежей является приуроченность наиболее крупных массивов к территориям низменностей, которые в позднем плейстоцене испытывали влияние морских трансгрессий. Исследования автора статьи на основе анализа большого массива данных о минерализации подземных льдов в разных районах криолитозоны России позволили разработать классификацию, помогают понять механизм в холодном российском климате и дает возможность проанализировать систему и ее компоненты.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований исследован ионный состав трех мощных залежей пластового льда в центральной и южной частях Ямала ближе всего к ионному составу голоценовых внутригрунтовых пластовых ледяных залежей и позднеплейстоценовых инфильтрационно-сегрегационных льдов, что является основанием для вероятностного отнесения изучаемых пластовых льдов к залежам внутригрунтового типа, возникших при автохтонном промерзании межмерзлотных водоносных горизонтов.

Стиль, структура, содержание стиля изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс создания системы фасадной теплоизоляционной композитной с наружными штукатурными слоями. Таблицы, фотографии и схемы, и графики иллюстративны.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволяющие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.