

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук Ю.К. Концентрация основных растворимых ионов в ядре булгунняха на месторождении Песковое, в долине реки Евояха, юг Тазовского полуострова // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.74286 EDN: FTUSYM URL: https://nbppublish.com/library_read_article.php?id=74286

Концентрация основных растворимых ионов в ядре булгунняха на месторождении Песковое, в долине реки Евояха, юг Тазовского полуострова

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](mailto:vasilch_geo@mail.ru)

[Статья из рубрики "Многолетнемерзлые породы и подземные льды Арктики, Антарктики и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.74286

EDN:

FTUSYM

Дата направления статьи в редакцию:

30-04-2025

Дата публикации:

15-05-2025

Аннотация: Автором описано более 20 булгунняхов на месторождении Песковое, в 10-15 км севернее ст. Тундра, в 98-103 км от г.Новый Уренгой. Высота булгунняхов колеблется в основном от 15 до 20 м, диаметр составляет 150-200 м. Чаще всего в их профиле выделяется пьедестал, высотой около 5-7 м, над которым куполообразно возвышается основной бугор. На одном из бугров, высотой 17 м в 10 км севернее ст. Тундра выполнено более детальное датирование перекрывающего торфа, свидетельствующее о том, что эти булгунняхи формировались сравнительно недавно, во всяком случае не ранее 2,5 тыс. лет назад. Для определения возраста булгунняха был опробован торф, перекрывающий бугор в центральной части и близ подножия на

пьедестале. Отбор образцов льда из ядра булгунняха, производился зимой 2013 г. Измерения макрокомпонентного состава льда проводились с помощью ионного хроматографа «Стайер» (Россия), предел детектирования по хлорид-иону 0,02 мг/л. Радиоуглеродное датирование торфа, продемонстрировало относительно молодой возраст перекрывающего торфа в разных частях бугра. В центральной части булгунняха поверхностный торф датирован в 2560 ± 70 лет, торф с глубины 0,3-0,4 м датирован в 5220 ± 50 лет и торф с глубины 0,85-0,9 м имеет возраст 5080 ± 50 лет. На пьедестале торф с глубины 0,05-0,15 м датирован в 5400 ± 40 лет. Во льду ядра булгунняха были определены ионы калия, натрия, кальция, магния, хлора, сульфатов и нитратов. В растворенной форме в изученном инъекционном льду среди катионов доминируют ионы натрия (от 1,5 до 4 мг/л), на втором месте ионы калия (от 0,5 до 2,1 мг/л). Среди анионов преобладает хлор-ион (от 0,6 до 3,3 мг/л), на втором месте сульфат-ион (от 0,3 до 1 мг/л). Отношение хлор-ионов к сульфат-ионам варьирует от 0,7 до 3,7, составляя в среднем 1,7.

Ключевые слова:

растворимые ионы, анионы, катионы, макроэлементы, булгуннях, ледяное ядро, многолетнемерзлые породы, река Евояха, Песцовое, север Западной Сибири

Исследования выполнены в рамках госбюджетной темы 1.4. "Антропогенная геохимическая трансформация компонентов ландшафтов" (№ ЦИТИС 121051400083-1, при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №23-17-00082: "Палеоциклы углерода-азота в экосистемах бугристых и полигональных торфяников, едомы и в пластовых льдах на севере России").

Введение

Макроэлементный состав подземных льдов формируется при совокупном влиянии ионного состава вод, сформировавших эти льды, и макрокомпонентного состава вмещающих льды отложений. Например, подземные льды в кимберлитовых трубках западной Якутии имеют разный ионный состав благодаря тому, что вмещающие их породы содержат существенно различающееся количество анионов и катионов.[\[1,2\]](#)

Булгунняхи (сионим пинго) могут находиться под значительным давлением, приводящим к взрывным разрушениям [\[3\]](#). Н.С.Богомолов и А.Н.Скляревская [\[4\]](#) описали случай, когда крупные обломки льда размером до $0,7 \times 1,5 \times 2$ м были разбросаны на расстояние 2-8 м, а более мелкие ледяные фрагменты на расстояние до 20 м. Взрыв сопровождался на протяжении 30 минут выбросом струи воды высотой до 1,5 м. По наблюдениям Росс Маккая из некоторых пинго вместе с небольшим количеством воды выделяются негорючие газы.[\[5\]](#)

В 1825 г. Дж. Франклайн сделал самое раннее описание пинго, когда поднялся на небольшой пинго на острове Эллис в дельте Маккензи. В 1938 г. термин пинго был впервые заимствован у местного населения арктическим ботаником А.Э.Порсилдом в его статье о пинго западного арктического побережья Канады и Аляски (пинго Порсилд в Тактояктук назван в его честь). Термин пинго, который у индейцев означает конический холм, сейчас принят в качестве научного термина в англоязычной литературе.

Возраст пинго в двух районах на острове Бэнкс, Канадская Арктика, отстоящих друг от

друга на 150 км, по радиоуглеродной оценке, равен примерно от 4500 до 7000 лет. Такие датировки подтверждают точку зрения о росте пинго во время похолодания в начале голоцен. Датирование отложений в пинго на Шпицбергене, в дельте Маккензи и на Аляске дало лишь представление о максимальном возрасте, практически везде это был голоцен. Данные о минимальном возрасте пинго, за исключением самых молодых форм, в целом малочисленны, но можно принять, что он составляет первые тысячи и даже сотни лет. Наивысшая годовая скорость роста пинго, определенная Росс Маккаем, достигала 21,2 см/год. В первые год или два развития возможна скорость до 1,5 м/год, но в дальнейшем она уменьшается пропорционально корню квадратному от возраста.^[5] По наблюдениям Росс Маккая вертикальная скорость роста одного из пинго, на вершине которого была открыта дилатационная трещина шириной 0,5-1,5 см и глубиной 15-18 м, равнялась примерно 15 см/год в течение 1969-1971 гг. В дельте Маккензи известны пинго высотой около 6 м, которые образовались после 1935 г. вслед за отступанием берега, вызвавшего спуск озера. Другие пинго возникли после 1950 г.

По мнению В.Н.Сукачева, возраст ряда пинго в Сибири колеблется от 106 до 162 лет.

Э.Бибус упоминает радиоуглеродную датировку 1875 ± 470 лет назад, интерпретируемую им как минимальный возраст. Он также, указывая на Х.Свенссона, называет цифру 2400 лет, хотя у Х.Свенссона^[6] эта дата равна 2650 ± 55 лет и цитируется как максимальный возраст. В отношении самого высокого в арктической Канаде пинго Ибюк (высотой более 50 м, этот пинго отнесен к национальным достопримечательностям Канады), оценившегося Ф.Мюллером^[7] предположительно и старше 7000-10000 лет, исследования показывают, что он продолжает расти в высоту, примерно на 2 см в год, и расчеты, базирующиеся на темпах роста в 1973-1975 гг., дают основания полагать, что его возраст равен около 1000 лет.^[8]

Э.Олсон и У. Брёкер^[9] по образцу Б.Крейга, отобранному в 1955 г. из основания торфа с глубины 0,9 м на вершине пинго в долине р.Телон ($64^\circ 19' \text{ с.ш.}, 102^\circ 41' \text{ з.д.}$), Северо-Западные территории Канады получили ^{14}C датировку 5500 ± 250 (L-428).

В зоне практически сплошного распространения многолетнемерзлых пород и на севере более южной мерзлотной зоны широко распространены инъекционные бугры пучения, которые подразделяются на гидролакколиты и булгунняхи. В 1932 г. Н.И.Толстиков показал, что многолетние бугры пучения образуются в районах выхода восходящих источников и для таких форм ввел термин "гидролакколиты".^[10]

Гидролакколит представляет собой выпуклую мезоформу рельефа высотой до 25-30 и диаметром в 250-400 м, сложенную, как правило, глинистыми грунтами, возникающую при восходящем развитии многолетнемерзлых пород в результате внедрения напорных подземных вод и образования мощного инъекционного ледяного ядра. Булгунняхи чаще всего располагаются в районах новейших тектонических поднятий, в различных частях зоны сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Они установлены на юге Ямала, на севере Гыданского полуострова, детально исследованы в бассейне Ярудея (в пределах Орлиной структуры) и на юге Тазовского полуострова (Самбургская структура).^[11,12]

Якутским термином «булгуннях» обозначались небольшие изолированные естественные холмы независимо от их генезиса. Было замечено, что булгунняхи иногда постепенно вырастают среди низин, а в ядре их обнаруживается ископаемый лед. Эти дало основание считать булгунняхи результатом пучения, а отсюда применять название

«булгуннях» только для обозначения многолетних бугров пучения.[\[13\]](#)

Цель данной работы изучить состав основных растворимых ионов в ядре пинго (булгунняха) на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха, юг Тазовского полуострова для определения источника образования льда;

Объекты и методы

Автором изучен гидрохимический состав льда, вскрытого в ядре пинго (булгунняха) на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха (рис. 1), на юге Тазовского полуострова.[\[14,15,16,17,18,19\]](#) В 10-15 км севернее станции Тундра (в 29-30 км после поворота на газовое месторождение Песцовое с основного шоссе), в 98-103 км от г. Новый Уренгой ($66^{\circ}10'$ с. ш. $76^{\circ}77'$ в. д.) нами встречено более 20 булгунняхов (рис. 2). Высота исследованных булгунняхов колеблется в основном от 15 до 20 м, диаметр составляет 150-200 м.

Чаще всего в их профиле выделяется нижняя часть – пьедестал, высотой около 5-7 м, над которым куполообразно возвышается основной бугор (см. рис. 2, а).



Рис. 1. Местоположение булгунняха на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха

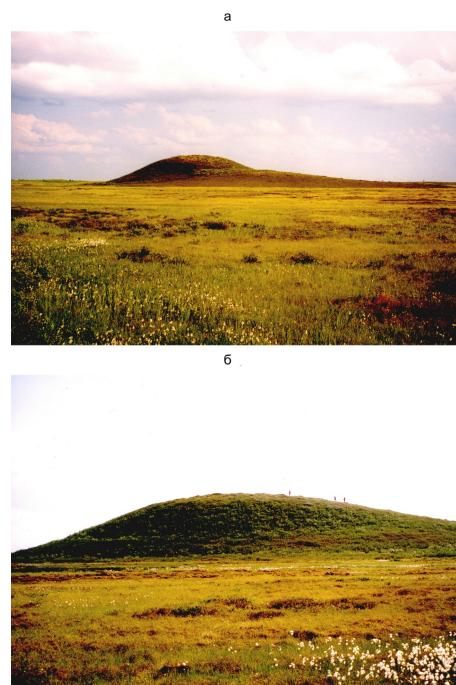


Рис. 2. Булгунняхи в районе месторождения Песцовое на юге Тазовского полуострова: а – с выраженным пьедесталом, б – высотой 17 м на вершине которого отобраны образцы для радиоуглеродных определений

На одном из бугров, высотой 17 м в 10 км севернее ст. Тундра (в 29-30 км после поворота на Песцовое с основного шоссе от г.Новый Уренгой) выполнено более детальное обследование (см. рис. 2,б). Для этого из 3 шурfov на вершине и склоне булгунняха, были отобраны образцы для радиоуглеродных определений, а зимой 2013 г. проведено бурение скважины глубиной до 30 м (рис. 3), для изучения внутреннего строения ледяного ядра и для отбора образцов на изотопно-гидрохимические определения. Мощные линзы льда в ядрах булгунняхов встречены и в других районах Тазовского п-ова (рис. 4).[\[20\]](#)



Рис. 3. Бурение булгунняха на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха

В разрезе бугра (рис. 4, а) вскрыты:

0,0-0,5 м. Торф темно-коричневый.

0,5- 0,9 м. Суглинок оторфованный темно-коричневый.

0,9- 12 м. Суглинок темно-серый плотный, с прослойми ожелезнения. Криотекстура массивная. В нижней части с глубины 10,2 м встречены мощные (до 5-7 см) горизонтальные шлиры льда.

12-12,7 м. Переслаивание суглинка и льда, толщина слоев льда 5-7 см, суглинка – 10-12 см.

12,7-27 м. Переслаивание мутного, прозрачного и молочно-белого льда (рис. 5). В интервале 20-22,5 м и 26-27 м встречены прослои суглинка толщиной 2-3 см.

27-35 м. Суглинок серый плотный, криотекстура неясно слоистая. На глубинах 27,8, 28,5 и 31,8 м встречены прослои льда толщиной 5-8 см.

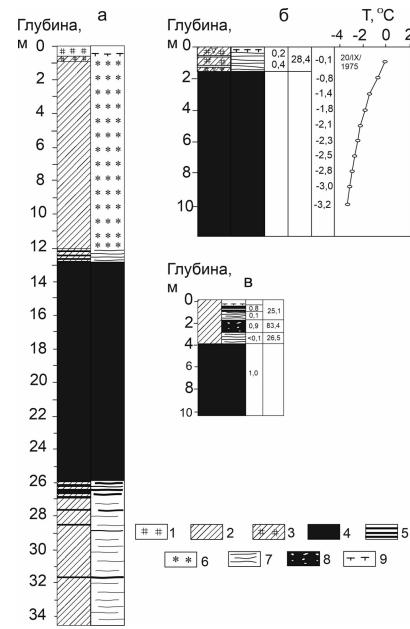


Рис. 4. Мощные линзы льда в ядрах булгунняхов на юге Тазовского п-ова: а – вершина исследованного булгунняха, высотой 17 м в районе месторождения Песцовое, в 10 км севернее ст. Тундра, б – в – из Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции [20]; в – вершина булгунняха, высотой около 15 м на левом берегу р.Паровы-Хадуттэ, б – булгуннях (высотой около 7 м) с кочковатой полигональной тундрой на междуречье рек Табъяха и Енъяха: 1 – суглинок; 2 – торф; 3 – растительные остатки; 4 – инъекционный лёд; криогенная текстура сильнольдистых отложений: 5 – линзовидная и частошлировая, 6 – базальная

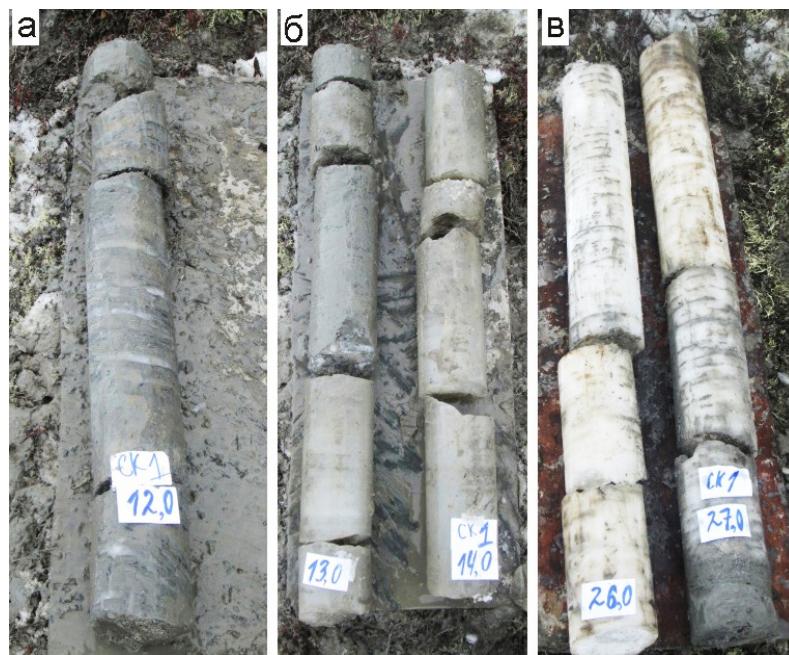


Рис. 5. Керн ледяного ядра булгунняха (с глубины от 12 до 27 м) на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха

Отбор образцов и пробоподготовка

Для определения возраста булгунняха был опробован торф, перекрывающий бугор в центральной части и близ подножия на пьедестале. Отбор образцов льда из ядра

булгунняха, производился зимой 2013 г.

Лабораторные методы

Измерения макрокомпонентного состава льда проводились с помощью ионного хроматографа «Стайер» (Россия), предел детектирования по хлорид-иону 0,02 мг/л. Ионный хроматограф «Стайер» предназначен для качественных и количественных определений неорганических соединений F^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} в водных растворах различного происхождения (природных, технических, питьевых).

Для льда из ядра булгунняха 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.

Радиоуглеродное датирование торфа, выполнено в Геологическом институте РАН с помощью Л.Д.Сулержицкого.

Результаты гидрохронологических определений

Радиоуглеродное датирование торфа, продемонстрировало относительно молодой возраст перекрывающего торфа в разных частях бугра. В центральной части булгунняха поверхностный торф датирован в 2560 ± 70 лет, торф с глубины 0,3-0,4 м датирован в 5220 ± 50 лет и торф с глубины 0,85-0,9 м имеет возраст 5080 ± 50 лет. На пьедестале торф с глубины 0,05-0,15 м датирован в 5400 ± 40 лет.[\[14\]](#)

Результаты гидрохимических определений

Во льду ядра булгунняха были определены концентрации макроэлементов: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} . (табл. 1, рис. 6). Минимальные значения ЕС голоценового инъекционного льда составляют 15 $\mu S/cm$, максимальные 47 $\mu S/cm$ и средние 26 $\mu S/cm$. Лёд инъекционного ядра в основном пресный.

Таблица 1. Гидрохимический состав ледяного ядра пинго - булгунняха (с глубины от 12 до 27 м) Песцовое, в долине реки Евояха

| Глубина, м | pH | мкСм/см | 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 | Cl^- / SO_4^{2-} |
|------------|------|---------|---------------|--------------|------------------|------------------|---------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 12 м | 6,33 | 42,4 | 4,12 | 1,85 | 0,35 | 1,00 | 3,34 | 0,25 | 0,91 | 3,67 |
| 13 м | 6,57 | 19,94 | 2,27 | 0,91 | 0,28 | 0,64 | 1,09 | 0,20 | 0,70 | 1,56 |
| 14 м | 6,02 | 15,74 | 1,96 | 0,92 | 0,27 | 0,62 | 0,79 | 0,13 | 0,64 | 1,23 |
| 15 м | 6,16 | 15,84 | 1,51 | 0,55 | 0,18 | 0,75 | 0,90 | 0,20 | 0,54 | 1,67 |
| 16 м | 6,14 | 47,1 | 2,14 | 0,97 | 0,25 | 0,61 | 0,60 | 0,11 | 0,77 | 0,78 |

| 17 м | 6,35 | 16,67 | 1,95 | 0,91 | 0,25 | 0,83 | 0,64 | 0,26 | 0,86 | 0,74 |
|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18 м | 5,96 | 21,3 | 2,31 | 1,09 | 0,19 | 0,56 | 0,73 | 0,14 | 0,97 | 0,75 |
| 20 м | 6,3 | 37,8 | 3,04 | 2,10 | 0,27 | 0,68 | 1,81 | 0,16 | 0,74 | 2,45 |
| 21 м | 6,28 | 24,6 | 2,06 | 1,04 | 0,27 | 0,58 | 0,87 | 0,31 | 0,60 | 1,45 |
| 22 м | 6,12 | 19,21 | 1,55 | 0,48 | 0,37 | 0,68 | 0,65 | 0,23 | 0,26 | 2,50 |
| 23 м | 6,13 | 37,7 | 2,91 | 1,70 | 0,34 | 0,95 | 1,77 | 0,26 | 0,85 | 2,08 |
| 24 м | 6,15 | 23,2 | 2,78 | 1,31 | 0,40 | 0,91 | 2,05 | 0,26 | 1,05 | 1,95 |
| 25 м | 6,22 | 18,93 | 1,97 | 0,64 | 0,33 | 0,49 | 0,82 | 0,22 | 0,45 | 1,82 |
| 26 м | 6,05 | 23,5 | 2,14 | 0,94 | 0,43 | 0,91 | 0,96 | 0,35 | 0,67 | 1,43 |

В растворенной форме в изученном инъекционном льду среди катионов доминирует Na^+ (от 1,5 до 4 мг/л - табл. 2), на втором месте K^+ (от 0,5 до 2,1 мг/л).

Среди анионов преобладает Cl^- (от 0,6 до 3,3 мг/л - табл. 2), на втором месте SO_4^{2-} (от 0,3 до 1 мг/л).

Отношение $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ варьирует от 0,7 до 3,7, составляя в среднем 1,7.

Таблица 2. Максимальные, средние и минимальные значения гидрохимического состава ледяного ядра пинго - булгунняха на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха

| Параметры | рН | мкСм/см | Катионы и анионы, мг/л | | | | | | $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ | |
|-----------|------|---------|------------------------|--------------|------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------------------|------|
| | | | Na^+ | K^+ | Mg^{2+} | Ca^{2+} | Cl^- | NO_3^- | | |
| максимум | 6,57 | 47,1 | 4,12 | 2,1 | 0,43 | 1 | 3,34 | 0,35 | 1,05 | 3,67 |
| среднее | 6,20 | 26,0 | 2,34 | 1,10 | 0,30 | 0,73 | 1,22 | 0,22 | 0,72 | 1,72 |
| минимум | 5,96 | 15,74 | 1,51 | 0,48 | 0,18 | 0,49 | 0,6 | 0,11 | 0,26 | 0,74 |

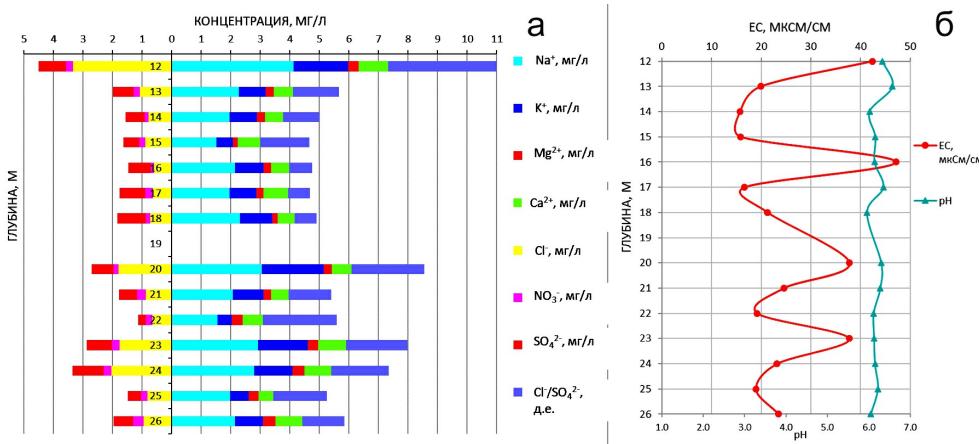


Рис. 6. Гидрохимический ледяного ядра пинго - булгунняха (с глубины от 12 до 27 м) на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха: а – вариации основных ионов и отношения $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$; б – вариации ЕС и рН

Дискуссия

Булгуннях – выпуклая мезоформа рельефа высотой до 8–10 м и диаметром в десятки, реже в сотни метров, окруженная с нескольких или со всех сторон понижениями и сложенная, как правило, грунтами супесчано-суглинистого состава с прослойками песков, возникающая при восходящем развитии многолетнемерзлых пород в результате внедрения влаги (или суспензии) при промерзании замкнутых таликов и образования

преимущественно инъекционного сильнольдонасыщенного ядра.

В строении бугров Орлиной и Самбургской структур и других районов юга Тазовского полуострова принимают участие сильнольдистые палеогеновые кремнисто-глинистые породы. В некоторых разрезах обнаружены остатки ледяных ядер в форме штоков. Лед бугров образован водами сульфатно-натриевого состава. В пробах воды, взятых из сопки Парны-Седэ (в пределах Самбургской структуры) Ю.Ф. Андреевым [21] были обнаружены микрокомпоненты йода и брома. Сравнение химического состава проб воды источников и льда из бугров с составом вод, заключенных в палеогеновых отложениях, подтверждает их сходство. Бугры этого типа в большинстве описанных случаев в настоящее время подвергаются разрушению. Однако в северных районах Гыданского полуострова и Ямала, например у пос. Лескина (северный Гыдан), описаны бугры пучения, которые возможно относятся к булгунняхам, и образование их, судя по формам бугров и их слабой степени разрушения, произошло сравнительно недавно.

Эти формы рельефа описаны во многих районах криолитозоны России в конце XX века [22,23,24,2,26,27,28,29,30] и в первое десятилетие XXI в [14,31]. Заметно вырос интерес к изучению булгунняхов во второе десятилетие XXI в [15-19, 32,33,34,35,36,37,39,40,41] и, особенно в недавнее время [42,43,44,45,46,47,48,49,50].

В булгунняхе П.А.Соловьевым [13] различаются следующие морфологические элементы.

1. Пьедестал - слабо приподнятая (0,5-1,0 м) полоса изменчивой ширины с небольшими уклонами, поднимающаяся к булгунняху и плавно сливающаяся с дном аласса (или хасырея). Изредка пьедестал ограничен невысокой выраженной ступенькой, которая, однако, не выдерживается по всему периметру. Ширина пьедестала, ограниченная собственно булгунняхом и дном аласса, колеблется от 1 до 60-80 м. Обычно пьедестал повторяет форму основания булгунняха. В таких случаях он имеет небольшую ширину и часто замаскирован делювиальным шлейфом. Иногда пьедестал бывает немного обширней булгунняха и имеет иную, обычно более вытянутую форму. В таких случаях булгуннях оказывается насаженным несимметрично, сдвинут на край пьедестала, а сам пьедестал имеет почти плоскую поверхность, ограниченную более крутыми по сравнению с ней склонами.
2. Слоны булгунняха, более или менее резко отличающиеся по крутизне от пьедестала.
3. Вершина булгунняха, выделяющаяся резким уменьшением общего уклона, по сравнению со склонами, часто представляется почти плоской, слабо выпуклой. Нередко расчленена на отдельные вершинки, а иногда как бы продавлена котловинкой.
4. Форма основания булгунняхов (вместе с пьедесталом) колеблется от почти правильного круга до сильно вытянутой каплеобразной фигуры, но преобладают эллиптические формы. Наиболее крутосклонная часть - собственно булгуннях, - имеет более правильную овальную форму основания, чем пьедестал. Невысокие плоские булгунняхи обычно имеют также правильную овальную форму. Длинную ось этого овала мы называем продольной осью продольной осью связано направление примерно параллельно ей наиболее крутого склона булгунняха, ориентированного параллельно борту аласса и почти прямолинейного в плане. Наиболее крупные и хорошо развитые трещины на вершине булгунняхов (осевые трещины) ориентированы также параллельно продольной оси. На продолжениях продольной оси часто располагаются сопряженные с булгунняхом западинки.

Наиболее обычная форма основания булгунняха вместе с пьедесталом близка к деформированному эллипсу, у которого поперечная полуось, идущая в сторону пологого склона, сильно вытянута, так что поперечная ось по общей длине равна или даже больше продольной.

Многочисленные булгунняхи встречены на высокой пойме в устьевой части долины Сабъяхи на севере Западной Сибири. Здесь они достигают высоты 8–9 м, в основании имеют форму эллипса, малая ось которого составляет 50–60, а большая – 80–100 м. Поверхность бугра обычно разбита морозобойными трещинами, в которых располагаются узкие ледяные жилы. Один из изученных бугров сверху сложен суглинком мощностью 0,3 м. Ниже (0,3–1,8 м) залегает темно-серая супесь, местами оторфованная, мерзлая. Криогенная текстура ее горизонтально-среднеслоистая, тонкошлировая. Толщина шлиров достигает 0,1–0,5 мм, общая льдистость более 50%. Ниже в разрезе прослежен суглинок легкий, темно-серый, плотный. Криогенная текстура горизонтально-среднеслоистая, тонкошлировая. С глубины 3,5 м криотекстура его неполносетчатая и вертикальнослоистая, тонкошлировая. Льдистость суглинка вниз по разрезу постепенно увеличивается, составляя на глубине 2 м 15%, на глубине 4 м 40%, на глубине 5 м около 50–60%. В интервале 5,0–5,5 м она увеличивается до 70–80% (возрастает вниз по разрезу и толщина шлиров). В интервале 5,5–6,9 м вскрыт лед, в верхней части с примесью грунта, ниже чистый. С глубины 6,9 до 9,7 м прослежен суглинок средний. Криотекстура его горизонтальнослоистая, толщина шлиров 0,5–2,0 мм. Среднегодовая температура грунта в осевой части бугра 6,6°C.

Булгунняхи встречаются также в местах осушения термокарстовых озер на террасах и междуречных равнинах. Они часто имеют несколько большие размеры, чем описанные выше булгунняхи осущенных старицких озер в пределах современных пойм рек. Большие их скопления закартированы и изучены сотрудниками МГУ^[22,25,27], ВСЕГИНГЕО^[20] и ПНИИИСа^[12] в бассейнах Надыма, Ямсовея, Евояхи, Табъяхи и Хадуттэ. Высота их в пределах Надым-Пуровского междуречья и Тазовского полуострова увеличивается от 4–5 м в районах со среднегодовой температурой –2°, –3°C до 10–12 м на севере полуострова. Диаметр основания бугров соответственно увеличивается от первых десятков до первых сотен метров. У многих крупных бугров наблюдается «пьедестал» по периферии бугров в виде террасовидной «ступеньки» высотой до 1–2 м.

В зависимости от конкретных геолого-геоморфологических условий строение булгунняхов неоднородно. Но все же в их разрезе преобладают, отложения супесчано-суглинистого состава с прослойми песков. Породы, слагающие ядро бугра, сильнольдонасыщенные, иногда в ядрах бугров фиксируются линзы и мощные прослои чистого льда. Превышение бугров над понижениями осуществляется за счет разницы содержания льда в разрезах бугров и разрезах понижений, причем высота бугра, как правило, тем больше, чем больше эта разность. Тем не менее полного совпадения высоты бугров с указанной разностью не отмечено, что может быть объяснено глубоким (глубже 12 м) залеганием льдистого горизонта под бугром. Мощные линзы льда (первые метры) характерны для крупных бугров, формирующихся при промерзании обширных таликов с большими запасами грунтовых вод (полное промерзание таких таликов осуществляется за десятки и даже сотни лет).

Интересно, что сейчас происходит не только формирование новых бугров инъекционного и инъекционно-сегрегационного генезиса, но и продолжается рост бугров, сформировавшихся в более ранние этапы голоценена.

Принципиальная возможность прироста ранее образовавшихся бугров в результате

последующих инъекций убедительно показана в работе Н.П. Анисимовой [23]. Она, на основании исследования химического состава очень крупного бугра пучения в районе пос. Мессояха (рис. 7), сделала ряд важных выводов: инъекция воды при образовании ядра бугра пучения была неоднократной; химический состав в промерзающем подозерном талике при этом изменился от гидрокарбонатно-магниево-кальциевого (на ранней стадии пучения) до гидрокарбонатного натриевого (на более поздних стадиях); верхние слои льда (глубина 2–5 м) образовались при сравнительно быстрой и полной кристаллизации воды, а глубже залегающие – при более медленной. На это указывает незначительное содержание в последних ионов кальция и магния, которые при медленной кристаллизации выпадают из раствора в осадок [23].

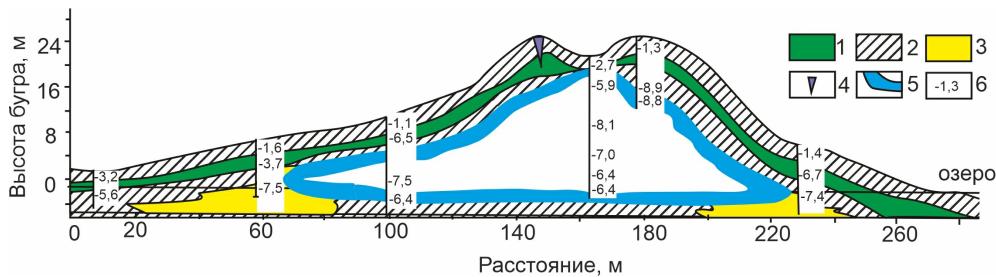


Рис. 7. Геокриологический разрез булгунняха (бугра пучения повторно-инъекционного типа) в 6 км к юго-востоку от пос. Мессояха на междуречье верховьев рек Юпаяхи и Верхняя Пендома на дне "хасырея" длиной 1,8 км шириной 1 км. По данным Н. И. Анисимовой и Е. Г. Карпова [23]: 1 – торф; 2 – суглинок; 3 – песок; 4 – повторно-жильный лед; 5 – повторно-инъекционный лёд (ядро булгунняха); 6 – температурные замеры по скважинам

В южной части зоны практически сплошного распространения мерзлых толщ и в пределах севера зоны совместного широкого распространения многолетне- и сезонномерзлых пород образование инъекционных бугров в основном произошло после климатического оптимума голоцен. В ряде районов отмечены новообразования инъекционных бугров, растущих в настоящее время.

В центральной и северной Якутии булгунняхи чаще располагаются на днищах аласов, на днищах аласных долин, и послеаласных котловинах. Подсчет количества булгунняхов, выполненный П.А.Соловьевым [13] в окрестностях оз. Абалах на площади около 100 км² показал, что 20-30% всех осмотренных аласов имеют в себе 1-2 и иногда даже 5 булгунняхов.

Булгунняхи располагаются в котловинах с затрудненным стоком, преимущественно в таких, большая часть которых представляет собой высохшие озера. Принципиальной разницы между булгунняхами в аласах и на речных террасах в этом отношении нет. Расположение булгунняха в алase согласно наблюдениям П.А.Соловьёва подчинено некоторым закономерностям. Средняя часть днища сухих аласов обычно несколько приподнята (повышение примерно 1-2 м), а пониженные участки серповидно изогнуты и прижаты к бортам аласов. Булгуннях обычно располагается на границе между повышенной частью и понижениями, выдигаясь в низину, которая отделяет его от борта аласа. Поэтому булгуннях обычно располагается эксцентрично, очень близко к одному из бортов аласа. В некоторых случаях наблюдается кажущееся исключение из этого правила - булгуннях располагается в середине сложного аласа. Это объясняется тем, что булгуннях образовался ранее слияния соседних аласов, около разделявшей их межаласной перемычки, которая впоследствии разрушилась. Булгуннях поднимается со

дна наиболее пониженной части аласа, но обычно соединяется со срединным повышением, образуя как бы полуостров. Соединение это бывает различно. В отдельных случаях наблюдается, что булгуннях только немногого более, чем на половину своего периметра выдвинут в низину и как бы насажен на повышенный участок. Иногда же он почти окружен низиной, и соединение имеет вид узкого и низкого перешейка. Часто булгунняхи поднимаются со дна небольшого озерка или, болотца.

Размеры булгунняхов в центральной Якутии колеблются в широких пределах. В районе оз. Абалах высота их изменяется от 1,5 до 12 м, длина – от 40 до 140 м, ширина от 25 до 120 м (вместе с пьедесталом) и соответственно – длина 40-100 м, ширина 25-80 м без пьедестала). Наиболее часто встречались булгунняхи длиною 50-70 м и шириной 40-50 м (без пьедестала). Встречаются булгунняхи и несколько больших размеров. На Лено-Амгинском междуречье высота их доходит до 20 м, в других районах до 40 и даже 60 м.^[13] Подошва льдистого ядра булгунняхов лежит на глубине 4-8 м ниже уровня дна аласа или хасырея.

Булгунняхи высотой до 12 м встречены Г.С.Константиновой заболоченных понижениях второй надпойменной террасы р.Пясины. Крупные бугры пучения отмечены О.Боярским также на Анабаро-Оленёкской низменности. Большое количество булгунняхов высотой до 30 м встречено в дельте р.Лены. Часто в разрезе булгунняхов имеется ледяное ядро мощностью до 10 м и более.

В.В.Бутвиловский^[29] исследовал возраст отложений в пределах поля булгунняхов в центральном Алтае (в межгорной котловине севернее Северо-Чуйского хребта). Торф на глубине 0,2 м был датирован в 1880 ± 60 лет, а гиттия в интервале глубин 0,7-2,7 м датирована 5 датами от 2100 ± 100 до 3780 ± 35 лет, растительные остатки в пылеватой глине в ядре булгунняха датированы от 4 до 15 тыс. лет. Можно предполагать, что возраст булгунняхов этого массива не более 2000 лет.

Т.А.Бляхарчук с соавторами^[31] также провела исследование возраста булгунняхов на Алтае близ оз.Джангыскол. Здесь были исследованы небольшие булгунняхи высотой 3-6 м, сложенные мёрзлыми озерными отложениями с многочисленными растительными остатками. Водоемы округлой формы в пределах массива с булгунняхами фиксируют термокарстовые понижения. С востока оз.Джангыскол окружает болото с многолетнемерзлыми отложениями, в котором прослеживаются кольцевые структуры, по форме напоминающие термокарстовые водоемы в пределах массива с булгунняхами. Подобные структуры слабо прослеживаются и под водой на дне озера.

Стратиграфические, палинологические и радиоуглеродные исследования по мнению Т.А.Бляхарчук указывают на то, что озеро осушилось в начале голоцене (около 9 тыс. лет назад) вследствие того, что р.Куркурек,^[31] берущая начало в горах и питающая озеро, сменила русло к западу от этого аллювиального болота. Началось многолетнее промерзание отложений, сопровождающееся ростом булгунняхов. Вода замерзала и происходило вслучивание с образованием небольших булгунняхов. Повторные инъекции воды могли приводить к образованию групп бугров с ледяным ядром.

Формирование булгунняхов и многолетнемёрзлых пород в болоте к югу от современного озера могло способствовать повторному наполнению озера, но уже не горными водотоками, а локальными атмосферными осадками. В позднем голоцене произошло расширение площади озера в южном направлении, и увеличение площади болота к югу и востоку от озера, где начали формироваться современные пинго.

¹⁴C датирование растительных остатков булгунняха Джангыскол показало, что орешки осок в верхней части разреза (на глубине 1,2 м) датированы 890 ± 30 лет (CURL 4836), веточки в гиттии на глубине 1,9 м – 330 ± 29 лет (Utc-8467), ниже в гиттии орешки осок на глубине 2,3 м датированы 2310 ± 30 лет (CURL 4837), а остатки риччии 7672 ± 46 лет (Utc-8355). Таким образом, булгуннях Джангыскол, скорее всего, начал формироваться несколько сотен лет назад.

Как булгунняхи, описанные В.В.Бутвиловским^[29], так и булгунняхи на оз.Джангыскол формировались как в позднем голоцене, так и сравнительно недавно. Это свидетельствует о стабильности условий формирования булгунняхов на Алтае и в голоцене, и в настоящее время.

Приведенные данные демонстрируют, что:

- 1). Булгунняхи формируются в разное время в зависимости от изменений локальных геоморфологических условий, а также региональных климатических трендов. Возраст булгунняхов сильно варьирует, что согласуется с механизмом их формирования, поскольку естественно, что дренаж озера не привязан к какому-то палеогеографическому событию и может происходить произвольно в разное время даже в пределах одного района.
- 2). Пучение нередко происходит в два этапа: вначале по периферии бугра, а затем в центральной части около 2500 лет назад.
- 3). Скорость образования булгунняхов бывает очень высока и за несколько десятков или сотен лет они достигают высоты 15-20 м и более.^[30]

Самсонов с соавторами^[31] исследовали рост большого, относительно молодого пинго в береговой зоне Тактояктак, использовав спутниковый дифференциальный интерферометрический радиолокатор и высокоразрешающие изображения RADARSAT-2 (2011–2014 гг.), и выявили рост со скоростью 2,7 см в год куполообразного поднятия пинго, расположенного в осушеннем бассейне озера. Этот пинго является одним из самых бугров в регионе, который в настоящее время растет. Анализ исторических аэрофотоснимков показал, что поднятие поверхности грунта в этом месте началось между 1935 и 1951 гг. после осушения остаточного озера. Поднятие в значительной степени обусловлено ростом инъекционного льда. Смоделированная аградация многолетнемерзлых пород с 1972 по 2014 гг. приблизительно соответствовала изменениям высоты бугра, оцененным по аэрофотоснимкам за этот период времени.^[31]

Гидрохимия льдов пинго (булгунняхов). Гидрохимический ледяного ядра во многих должен булгунняхов отражать состав водоема (озера, болота), который стал основным источником льда при промерзании, льдообразовании и пучении бугра.

Детальный изотопно-кислородный и дейтериевый анализ ледяного ядра пинго Песцовое^[15,16,17,19] позволил получить важные выводы об условиях формирования и источниках воды для ядра бугра. Начальные изотопные характеристики воды, из которой формировался лед ядра для пинго Песцовое близки к современным атмосферным осадкам региона, мы полагаем начальная вода имела значения $\delta^{18}\text{O} = -14\text{\textperthousand}$. Для пинго Песцовое отчетливо проявлена закрытая система, которая реализовывалась при промерзании сверху озерного замкнутого талика. Верхняя часть льда образовывалась при высоких скоростях, поэтому значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда этой части льда ядра пинго

сдвинуты относительно начальной воды незначительно и варьируют от $-11,6$ до -13‰ и от $-97,9$ до $-106,5\text{‰}$ соответственно. Затем скорости льдообразования упали и большая часть льда ядра образовалась в условиях Рэлеевского процесса, что обусловило выраженное понижение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ сверху вниз от -12 до $-15,8\text{‰}$ и от $-95,3$ до -120‰ , соответственно. Нижняя часть ледяного ядра возможно образовалась на подошве границы ММП при ее поднятии, т.е при промерзании снизу-вверх. При формировании верхней части ледяного ядра пинго и дополнительного роста его высоты заметную роль может играть вакуумный механизм засасывания воды из окружающего озера (подозерного талика), возникающий за счет таяния верхней части льдистого ядра из-за высокого давления, существенно снижающего температуру таяния льда. Этот механизм не противоречит условиям открытой/полу-закрытой системы, установленной по изотопному составу льда, т.к. всасывание воды из относительно большого резервуара воды (озера или обводненного талика) в вакуумную полость и последующее ее замерзание не приводило к выраженной динамике изотопных значений по Рэлеевскому типу. [19]

Этой трехчленной модели формирования ядра в определенной мере соответствует и распределение основных ионов в гидрохимическом составе ледяного булгуняха Песцовое (см. табл. 1, см. рис. 6) например максимумы ионов Na^+ ($4,12 \text{ мг/л}$), K^+ ($1,85 \text{ мг/л}$) и Cl^- ($3,34 \text{ мг/л}$), наряду с максимумом соотношения $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ($3,67$) в самой верхней части ледяного ядра - на глубине 12 м , формировавшейся в начальный этап образования ядра при высоких скоростях льдообразования, ниже располагается толща мощностью $7\text{-}9 \text{ м}$, которая соответствует этап образования ледяного ядра при небольших скоростях льдообразования, когда ионный состав был более однородный, а еще ниже - толща ледяного ядра мощностью $5\text{-}7 \text{ м}$, скорее всего, образовавшаяся близ подошвы ММП при ее промерзании снизу-вверх. Здесь опять-за счет криогенного концентрирования ионов отмечены локальные максимумы ионов Na^+ (до $3,0 \text{ мг/л}$), K^+ (до $2,1 \text{ мг/л}$) и Cl^- (до $2,1 \text{ мг/л}$), наряду с заметным соотношением $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ (от $1,4$ до $2,5$).

Одни из первых данных, полученные для Западно-Сибирского булгуняха получены Н.П. Анисимовой и Е.Н. Карповым [23,51]. Исследованный и опробованный Е. Г. Карповым в 1974 г. гигантский булгуннях (см. рис. 7) находится в 6 км к юго-востоку от пос. Мессояха на междуречье верховьев рек Юлаяха и Верхняя Пеномаяха, на дне осущеной озерной котловины, в 150 м от ее северо-западного борта. Длина котловины $1,8 \text{ км}$, ширина 1 км , глубина $4\text{-}5 \text{ м..}$ В разных частях дна котловины находятся небольшие остаточные озера с максимальной измеренной глубиной до $1,2 \text{ м}$, размерами $250 \times 150 \text{ м}$. Озера соединяются между собой заболоченными понижениями, летом почти пересыхающими. На прочих участках дно плоской котловины представляет собой сфагновое болото и мохово-кустарниковую тундру с трещинно-полигональным рельефом. На возвышенных, более дренированных участках краевой части дна котловины мощные реликтовые торфяники содержат повторно-жильные льды. [23] Булгуннях имеет продолговатую округло-овальную форму с двумя выступами – пьедесталами. Высота булгуняха $22,5 \text{ м}$, длина 285 , ширина 175 м . Его вершина разделена на две части продолговатым седловидным понижением, являющимся, по-видимому, осевой трещиной разрыва отложений, образовавшейся в период поднятия бугра. Длина понижения 50 м , ширина 20 , глубина 3 м . Вершина булгуняха раздроблена морозобойными трещинами на отдельные блоки (полигоны) со сторонами $5\text{-}6 \text{ м}$. Мощное ядро чистого инъекционного льда в разных частях булгуняха залегает на разной глубине от поверхности под слоем сильнооторфованного суглинка, льдо-насыщенного торфа и ледогрунтового горизонта. В

седловине булгунняха инъекционный лед начинается с глубины 1,1 м от поверхности, сразу под оторфованным суглинком, на других участках он залегает значительно глубже. Максимальная мощность льда под вершиной булгунняха, по-видимому, превышает 21 м. На склонах инъекционный лед выклинивается вблизи основания бугра.[\[51\]](#)

Наиболее низкая температура пород характерна для центральной части булгунняха, где на глубине 7 м от поверхности в июне она равнялась $-9,7^{\circ}\text{C}$, а в конце августа $-8,4^{\circ}\text{C}$. Пробы льда для химического анализа были отобраны Е. Г. Карповым по вертикальному разрезу линзы в процессе проходки скважины на его вершине, в седловине и на пьедестале.

Отмечены[\[51\]](#) значительные колебания величины общей минерализации льда по вертикальному разрезу инъекционного льда (рис. 8), которые обусловлены главным образом изменениям и концентрации ионов гидрокарбоната и натрия и в меньшей степени – ионов магния и кальция. Содержание хлор-иона изменяется мало. Наибольшие значения минерализации льда отмечаются на глубинах 5 и 20 м, менее значительные ее повышения – на глубинах 10 и 18 м.

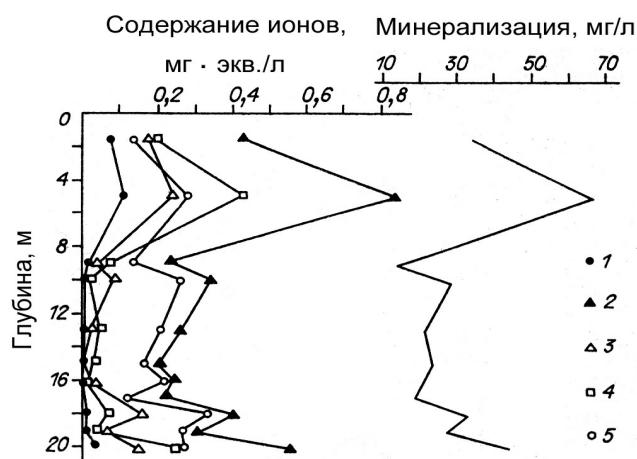


Рис. 8. Изменение содержания ионов и минерализации в вертикальном разрезе инъекционного льда булгунняха в районе пос. Мессояха. Из Н.П. Анисимовой[\[51\]](#)

Изменение химического состава и величины общей минерализации льда булгунняха и сравнение их с особенностями распределения компонентов минерализации по разрезу линзы инъекционного льда в бугре пучения позволили Н.П. Анисимовой предположить, что: "1) инъекция воды при образовании булгунняха была неоднократной; 2) химический состав воды в промерзающем подозерном талике при этом изменился от гидрокарбонатного магниево-кальциевого (на ранней стадии пучения) до гидрокарбонатного натриевого (на более поздних стадиях); 3) верхние слои льда (глубина 2–5 м) образовались при сравнительно быстрой и полной кристаллизации воды, а глубже залегающие – при более медленной; 4) незначительное содержание во льду ионов кальция и магния (начиная с глубины 7–8 м) указывает на медленную кристаллизацию воды, при которой карбонаты из раствора выпадают в осадок; 5) повышенная засоленность льда на глубине 20 м и преобладание в нем гидрокарбонатов магния и натрия свидетельствуют о возросшей минерализации воды, из которой он образовался, за счет криогенного концентрирования в исходной воде этих компонентов."[\[51, стр. 92\]](#)

Н.П. Анисимова заключила,[\[51\]](#) что использование данных химического состава льда

для интерпретации условий и характера инъекционного льдообразования возможно только при частом отборе проб (не реже чем через каждые 0,5 м) по всему разрезу линзы. Одиночные же пробы льда, взятые с одной какой-либо глубины, не могут характеризовать ни химического состава исходной воды, ни условия льдообразования.

Автор с коллегами [40] изучили булгуннях (пинго) Мессояха-1, с ледяным ядром мощностью 6,5 м, который расположен на юге Гыданского п-ова в зоне сплошного с поверхности распространения мерзлых пород, среднегодовая температура воздуха по данным ближайшей метеостанции Тазовский составляет $-9,7^{\circ}\text{C}$. Булгуннях расположен на краю хасырея рядом с озером. Абс. высота вершины составляет 42,9 м. На вершине бугра заложена параметрическая скважина с отбором керна вскрывшая ледяное ядро в интервале глубин от 4,5 до 11,0 м. Лед чистый прозрачный.

Судя по гидрохимическому составу льда (табл. 3) и весьма однородному соотношению $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$, варьирующему в основном от 2 до 3, вода, из которой сформировался лед ядра булгунняха Мессояха-1, примерно одна и та же и относится к озерным хлоридно-кальциевым водам.

Таблица 3. Гидрохимический состав льда ядра булгунняха Мессояха-1. Из [40]

| Глубина отбора, 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 |
|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|
| 7 | 1,12 | 0,72 | 0,17 | 3,41 | 1,11 | <0,1 | 0,36 |
| 7,05 | 1,73 | 0,81 | 0,20 | 4,21 | 2,65 | <0,1 | 0,90 |
| 7,1 | 1,98 | 1,52 | 0,36 | 4,88 | 2,67 | <0,1 | 0,85 |
| 7,15 | 1,42 | 1,98 | 0,30 | 4,14 | 1,74 | <0,1 | 0,54 |
| 7,2 | 1,05 | 0,65 | 0,12 | 4,03 | 1,49 | <0,1 | 0,45 |
| 8,3-8,4 | 1,82 | 1,55 | 0,49 | 5,29 | 2,74 | 0,10 | 1,10 |
| 8,4-8,5 | 1,29 | 1,24 | 0,13 | 5,68 | 1,51 | <0,1 | 0,53 |
| 8,5-8,6 | 0,72 | 0,54 | 0,18 | 5,41 | 1,14 | 0,10 | 0,41 |
| 9,2-9,3 | 0,87 | 0,61 | 0,19 | 5,40 | 1,26 | 0,10 | 0,40 |
| 9,4-9,5 | 0,78 | 0,48 | 0,10 | 4,71 | 0,94 | 0,10 | 0,41 |
| 9,5-9,6 | 1,05 | 0,62 | 0,14 | 5,40 | 1,39 | 0,17 | 0,52 |
| 10 | 0,75 | 0,47 | 0,15 | 5,20 | 0,93 | 0,13 | 0,34 |
| 10,3-10,4 | 0,47 | 0,26 | 0,10 | 3,40 | 0,57 | 0,18 | 0,27 |
| 10,5 | 0,80 | 0,38 | 0,18 | 4,15 | 1,12 | 0,17 | 0,53 |
| 10,6-10,7 | 0,42 | 0,47 | 0,12 | 4,88 | 0,98 | <0,1 | 0,44 |

Гидрохимический состав ледяного ядра пинго, высота, которого 9,5 м полностью вскрыто скв. 9 в Грёндалене, западный Шпицберген, исследован Н.Демидовым и др. [41]. Лед ядра пинго почти прозрачен и достигает мощности 20,7 м. Самая низкая измеренная температура грунта составила $2,5^{\circ}\text{C}$. Максимальная глубина пропаивания 1,5 м в сентябре 2018 г. достигла самой верхней границы льда ядра, что, вероятно указывает на продолжающуюся быструю деградацию пинго. Это также видно по кратерному озеру на вершине пинго и сильной солифлюкции, которая удаляет покровные отложения вниз по склону. Изотопная запись льда ядра указывает на два эпизода замерзания замкнутой системы и два эпизода полузамкнутого замерзания, когда исходная вода, питающая ледяное ядро, пополнялась.

Гидрохимический состав ледяного ядра представлен в основном ионами натрия (от 5 до

217 мг/л, в среднем 38-52 мг/л), хлора (от 1 до 121 мг/л, в среднем 19-27 мг/л) и гидрокарбонатов (от 1 до 336 мг/л, в среднем 59-81 мг/л) и схож с составом родниковой воды в Грёндалене. [41]

Заключение

1. В растворенной форме в изученном инъекционном льду ядра булгунняха (пинго) Песчаное среди катионов доминируют ионы натрия (от 1,5 до 4 мг/л), на втором месте ионы калия (от 0,5 до 2,1 мг/л). Среди анионов преобладает хлор-ион (от 0,6 до 3,3 мг/л), на втором месте сульфат-ион (от 0,3 до 1 мг/л). Отношение хлор-ионов к сульфат-ионам варьирует от 0,7 до 3,7, составляя в среднем 1,7.
2. Распределение основных ионов в гидрохимическом составе ледяного булгунняха (пинго) Песчаное в определенной мере соответствует трехчленной модели формирования ядра: а) максимумы ионов Na^+ (4,12 мг/л), K^+ (1,85 мг/л) и Cl^- (3,34 мг/л), наряду с максимумом соотношения $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ (3,67) отмечены в самой верхней части ледяного ядра - на глубине 12 м, формировавшейся в начальный этап образования ядра при высоких скоростях льдообразования; б) ниже располагается толща мощностью 7-9 м, которая соответствует второму этапу образования ледяного ядра при небольших скоростях льдообразования, когда ионный состав был более однородный; в) еще ниже - располагается толща ледяного ядра мощностью 5-7 м, скорее всего, образовавшаяся близ подошвы ММП при ее промерзании снизу-вверх. Здесь опять отмечены локальные максимумы ионов Na^+ (до 3,0 мг/л), K^+ (до 2,1 мг/л) и Cl^- (до 2,1 мг/л), наряду с заметным соотношением $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ (от 1,4 до 2,5).

Благодарности

Автор выражает благодарность Л. В. Добрыдневой за выполнение хроматографического анализа ионного состава льдов, Н.А. Буданцевой за помощь при проведении полевых работ, Е.Е. Подборному за помощь в организации отбора льда и Л.Б.Блудушкиной за участие в оформлении работы.

Библиография

1. Alexeev S.V., Alexeeva L.P. Ground ice in the sedimentary rocks and kimberlites of Yakutia, Russia // Permafrost and Periglacial Processes. 2002. Vol. 13. Pp. 53-59. doi:10.1002/ppp.408. EDN: LHNHZB.
2. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Kononov A.M. Trace elements and rare earth elements in ground ice in kimberlites and sedimentary rocks of Western Yakutia // Cold Regions Science and Technology. 2016. Vol. 123. Pp. 140-148. doi:10.1016/J.COLDREGIONS.2015.10.008. EDN: WPYNWX.
3. Плащев А.В. Взрыв ледяного бугра // Природа. 1956. № 9. С. 113.
4. Богомолов Н.С., Скляревская А.Н. О взрывах гидролакколитов в южной части Читинской области // Наледи Сибири. М.: Наука, 1969. С. 127-130.
5. Mackay J.R. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, Western Arctic coast, Canada: a long-term field study // Geographie Physique et Quaternaire. 1998. Vol. 52. N 3. Pp. 271-323. doi:10.7202/004847ar.
6. Svensson H. Pingos ytter delen av Adventdalen // Norsk Polarisititutt Årbok. 1969. 1970. P. 168-174.
7. Müller F. Analysis of some stratigraphic observations and radiocarbon dates from two pingos in the Mackenzie Delta area, N.W.T. // Arctic. 1962. Vol. 15. Pp. 279-288.

8. Mackay J.R. Growth of Ibyuk Pingo, Western Arctic Coast, Canada, and some implications for environmental reconstructions // Quatern. Res. 1986. Vol. 26. Iss. 1. Pp. 68-80.
9. Olson E.A., Broecker W.S. Lamont natural radiocarbon measurements V // American Journal of Science. 1959. Vol. 257. N 1. Pp. 1-11.
10. Толстыхин Н.И. Подземные воды Забайкалья и их гидролакколиты // Труды Комиссии по изучению вечной мерзлоты. Т. 1. Л.: Изд-во АН СССР, 1932. С. 29-50.
11. Андреев В.Н. Гидролакколиты (булгунняхи) в Западно-Сибирских тундрах // Известия Государственного географического общества. 1936. Т. 68. Вып. 2. С. 40-47.
12. Минаев А.Н. Крупные гидролакколиты в Западно-Сибирской низменности // Многолетнемёрзлые горные породы различных районов СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 120-125.
13. Соловьёв П.А. Булгунняхи центральной Якутии // Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике. Вып. 3. М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 226-258.
14. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А. Радиоуглеродное определение возраста булгунняха на месторождении Песцовое в северной части Западной Сибири // Инженерная геология. 2010. № 2. С. 16-23.
15. Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Yoshikawa K., Podborny Ye.Ye., Chizhova Ju.N. Isotope composition of pingo ice core in the Yeo-Yakha River valley, north-west Siberia // Earth's Cryosphere (Kriosfera Zemli). 2014. Vol. 18. N 4. Pp. 41-51.
16. Vasil'chuk Yu.K., Lawson D.E., Yoshikawa K., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N., Podborny Ye.Ye., Vasil'chuk A.C. Stable Isotopes in the closed-system Weather Pingo, Alaska and Pestsovoye Pingo, northwestern Siberia // Cold Regions Science and Technology. 2016. Vol. 128. Pp. 13-21. doi:10.1016/j.coldregions.2016.05.001. EDN: WWHCBP.
17. Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Rogov V.V., Podborny Ye., Chizhova Ju.N. New Data on Variations of Stable Isotopes in the Pingo Ice Core in the Southern Part of the Tazovsky Peninsula // Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 472, Part 2. Pp. 200-204. DOI: 10.1134/S1028334X17020064 EDN: DUYIIF.
18. Чижова Ю.Н., Васильчук Ю.К. Изотопная индикация условий образования ледяного ядра булгунняхов (пинго) // Лёд и снег. 2018. Т. 58. № 4. С. 507-523. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-4-507-523 EDN: VQLHON.
19. Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Ju.N., Budantseva N.A., Kurchatova A.N., Rogov V.V., Vasil'chuk A.C. Stable oxygen and hydrogen isotope compositions of the Messoyakha and Pestsovoye pingos as markers of ice core formation // Permafrost and Periglacial Processes. 2021. Vol. 32. N 4. Pp. 558-572.
20. Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции / Тагунова Л.Н., Мельников Е.С., Горальчук М.И., Крицук Л.Н. и др.; Отв. ред. Е.С. Мельников. Новосибирск: Наука, 1983. 193 с.
21. Андреев Ю.Ф. О связи линейно-грядового рельефа с тектоническими структурами на севере Западной Сибири (в области развития многолетней мерзлоты) // Геология и геохимия. 1960. Вып. 3 (IX). С. 76-94.
22. Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Полуостров Ямал (инженерно-геологический очерк) / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 245 с.
23. Анисимова Н.П., Карпов Е.Г. Химический состав инъекционного льда // Геокриологические и гидрогеологические исследования Якутии. Якутск, 1978. С. 125-137. EDN: VXZQMR.
24. Walker D.A., Walker M.D., Everett K.R., Weber P.J. Pingos of the Prudhoe Bay region, Alaska // Arctic and Alpine Research. 1985. Vol. 17. Pp. 321-336.
25. Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Васильчук Ю.К., Фирсов Н.Г. и др. Экзогеодинамика Западно-Сибирской плиты (пространственно-временные закономерности) / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 246 с. EDN: UTIFMZ.

26. Mackay J.R. Pingo collapse and paleoclimatic reconstruction // Canadian Journal of Earth Sciences. 1988. N 25(4). Pp. 495-511.
27. Трофимов В.Т., Васильчук Ю.К., Баулин В.В. и др. Геокриология СССР. Западная Сибирь. М.: Недра, 1989. 454 с.
28. Mackay J.R. Seasonal growth bands in pingo ice // Canadian Journal of Earth Sciences. 1990. Vol. 27. N 8. Pp. 1115-1125.
29. Бутвиловский В.В. Палеогеография последнего оледенения и голоцен Алтая: событийно-катастрофическая модель. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1993. 252 с.
30. Mackay J.R. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, Western Arctic coast, Canada: a long-term field study // Geographie Physique et Quaternaire. 1998. Vol. 52. N 3. Pp. 271-323.
31. Blyakharchuk T.A., Wright H.E., Borodavko P.S., van der Knaap W.O., Ammann B. The role of pingos in the development of the Dzhangyskol lake-pingo complex, central Altai Mountains, southern Siberia // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2008. Vol. 257. Iss. 4. Pp. 404-420. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.09.015. EDN: LLBOGL.
32. Grosse G., Jones B.M. Spatial distribution of pingos in northern Asia // The Cryosphere. 2011. Vol. 5. Pp. 13-33. DOI: 10.5194/tc-5-13-2011. EDN: RKEZCB.
33. Mackay J.R., Burn C.R. A century (1910-2008) of change in a collapsing pingo, Parry Peninsula, Arctic coast, Canada // Permafrost and Periglacial Processes. 2011. Vol. 22. Pp. 262-272.
34. Jones B.M., Grosse G., Hinkel K.M., Arp C.D., Walker S., Beck R.A., Galloway J.P. Assessment of pingo distribution and morphometry using an IfSAR derived digital surface model, western Arctic Coastal Plain, Northern Alaska // Geomorphology. 2012. Vol. 138. Iss. 1. Pp. 1-14.
35. Yoshikawa K., Lawson D., Sharkhuu N. Stable Isotope Composition of Ice Core in Open- and Closed-System Pingos // Permafrost, Tenth International Conference, Proceedings / Ed.: K.M. Hinkel. Salekhard, 25-29 June 2012. Vol. 1. Salekhard: The Northern Publisher, Russia, 2012. Pp. 473-478.
36. Yoshikawa K., Sharkhuu N., Sharkhuu A. Ground water hydrology and stable isotope analysis of an open-system pingo in Northwestern Mongolia // Permafrost and Periglacial Processes. 2013. Vol. 24. N 3. Pp. 175-183.
37. Samsonov S.V., Lantz T.C., Kokelj S.V., Zhang Y. Growth of a young pingo in the Canadian Arctic observed by RADARSAT-2 interferometric satellite radar // The Cryosphere. 2016. Vol. 10. Pp. 799-810. doi:10.5194/tc-10-799-2016.
38. Ishikawa M., Yamkhin J. Formation Chronology of Arsain Pingo, Darhad Basin, Northern Mongolia // Permafrost and Periglacial Processes. 2016. Vol. 27(3). Pp. 297-306. doi:10.1002/ppp.1877. EDN: XTRQEF.
39. Wetterich S., Schirrmeyer L., Nazarova L., Palagushkina O., Bobrov A., Pogosyan L., Savelieva L., Syrykh L., Matthes H., Fritz M., Gunther F., Opel T., Meyer H. Holocene thermokarst and pingo development in the Kolyma Lowland (NE Siberia) // Permafrost and Periglacial Processes. 2018. Vol. 29(3). Pp. 182-198. doi:10.1002/ppp.1979. EDN: YBXYTR.
40. Vasil'chuk Yu.K., Kurchatova A.N., Budantseva N.A., Rogov V.V., Chizhova Ju.N. Variations of Stable Oxygen and Hydrogen Isotopes in the Ice Core of the Pingo (Southern Part of Gydan Peninsula) // Doklady Earth Sciences. 2019. Vol. 488(1). Pp. 1137-1141. doi:10.1134/S1028334X19090319. EDN: HNBYJL.
41. Demidov N., Wetterich S., Verkulich S., Ekyakin A., Meyer H., Anisimov M., Schirrmeyer L., Demidov V., Hodson A.J. Geochemical signatures of pingo ice and its origin in Grøndalen, west Spitsbergen // The Cryosphere. 2019. Vol. 13. Pp. 3155-3169. doi:10.5194/tc-13-3155-2019. EDN: YQYJMU.
42. Demidov V., Wetterich S., Demidov N., Schirrmeyer L., Verkulich S., Koshurnikov A.,

- Gagarin V., Ekaykin A., Terechov A., Veres A., Kozachek A. Pingo drilling reveals sodium-chloride-dominated massive ice in Grøndalen, Spitsbergen // Permafrost and Periglacial Processes. 2021. Vol. 32. Pp. 572-586. doi:10.1002/ppp.2124. EDN: FTIDYM.
43. Demidov V.E., Demidov N.E., Verkulich S.R., Wetterich S. Distribution of pingos on Svalbard // Geomorphology. 2022. Vol. 412. 108326. doi:10.1016/j.geomorph.2022.108326. EDN: MIYSDX.
44. Демидов Н.Э., Гунар А.Ю., Балихин Е.И., Гагарин В.Е., Гузева А.В., Дежникова А.А., Казанцев В.С., Кошурников А.В., Нарижная А.И. Строение, газосодержание и термическое состояние многолетних бугров пучения (булгунняхов) в долине р. Вась-Юган (окрестности г. Салехард, Западная Сибирь) // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21, № 3. С. 27-38. DOI: 10.21455/GPB2022.3-4 EDN: LARSFO.
45. Wolfe S.A., Morse P.D., Parker R., Marcus R., Phillips M.R. Distribution and morphometry of pingos, western Canadian Arctic, Northwest Territories, Canada // Geomorphology. 2023. Vol. 431. 108694. doi:10.1016/j.geomorph.2023.108694. EDN: MGEOMX.
46. Гутарева О.С., Иванов Е.В., Буддо И.В., Кононов А.М., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Шеин А.Н., Краев Г.Н., Смирнов А.С. Происхождение льдов бугров пучения в районе реки Еркута-яха (п-ов Ямал) по результатам исследования изотопных соотношений δD и $\delta^{18}O$ // Geodynamics & Tectonophysics. 2024. 15 (6). 0800. doi:10.5800/GT-2024-15-6-0800. EDN: NVREKB.
47. Шарин В.В. Пинго (гидролаколиты) в долине Вудфиорддален (остров Западный Шпицберген): морфологические особенности, возраст, условия формирования // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России, выпуск 11. 2024. С. 412-424. doi:10.24412/2687-1092-2024-11-412-424. EDN: IWVVX.
48. Paull C.K., Hong J.K., Caress D.W., Gwiazda R., Kim J.-H., Lundsten E., Paduan J.B., Jin J.K., Duchene M.J., Rhee T.S., Brake V., Obelcz J., Walton M.A.L. Massive ice outcrops and thermokarst along the Arctic shelf edge: By products of ongoing groundwater freezing and thawing in the subsurface // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2024. Vol. 129, e2024JF007719. doi:10.1029/2024JF007719. EDN: EUXURP.
49. Демидов В.А. Гидролакколиты архипелага Шпицберген / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. М., 2024. 27 с.
50. Liu G., Xiao Y., Hu G., Wu T., Wu X., Wang L., Xie C., Zou D., Du E., Zhao Y., Lu Y., Zhao L. The surface features and internal structure of an integrated open system pingo in the source area of the Yangtze River on the Qinghai-Tibet Plateau // Catena. 2025. Vol. 255. 109070. doi:10.1016/j.catena.2025.109070.
51. Анисимова Н.П. Криогидрохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с. EDN: RVILON.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом исследования является изучение концентрации основных растворимых ионов в ядре булгунняха на месторождении Песчаное долины реки Евояха на юге Тазовского полуострова.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения концентраций основных растворимых ионов в ядре булгунняха - многолетнего бугра пучения, с целью более точного изучения источника образования льда. В зоне практически сплошного распространения многолетнемерзлых пород и на севере более южной мерзлотной зоны широко распространены инъекционные бугры пучения, которые подразделяются на

гидролакколиты и булгунняхи. Булгунняхи чаще всего располагаются в районах новейших тектонических поднятий, в различных частях зоны сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Подземные льды в кимберлитовых трубках западной Якутии имеют разный ионный состав благодаря тому, что вмещающие их породы содержат существенно различающееся количество анионов и катионов. Цель данной работы изучить состав основных растворимых ионов в ядре пинго (булгунняха) на месторождении Песковое в долине реки Евояха на юге Тазовского полуострова.

Методология исследования основана на методах бурения скважины глубиной до 30 м, для изучения внутреннего строения ледяного ядра с целью отбора образцов для дальнейших изотопно-гидрохимических определений. Измерения макрокомпонентного состава льда проводились с помощью ионного хроматографа «Стайер» (Россия). Для изучения состава льда из ядра булгунняха 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. Радиоуглеродное датирование торфа, выполнено в Геологическом институте РАН с помощью Л.Д.Сулержицкого.

Научная новизна заключается в том, что авторы впервые провели изучение концентраций основных растворимых ионов в ядре булгунняха на месторождении Песковое долины реки Евояха на юге Тазовского полуострова. Такие исследования ранее не выполнялись. Установлено, что гидрохимический состав ледяного ядра представлен в основном ионами натрия (от 5 до 217 мг/л, в среднем 38-52 мг/л), хлора (от 1 до 121 мг/л, в среднем 19-27 мг/л) и гидрокарбонатов (от 1 до 336 мг/л, в среднем 59-81 мг/л) и схож с составом родниковой воды в Грёндалене.

Стиль статьи - научный, соответствует установленным требованиям журнала. Структура статьи включает в себя введение, результаты и обсуждение, заключение, библиографию. Содержание научной статьи полностью раскрывает ее тему, выводы доказательны и обоснованы. Текст написан научным языком, статья соответствует объему согласно требованиям журнала. Статья очень информативная, содержит много экспериментального материала, фотографий объектов изучения, графиков, таблиц, что улучшает восприятие материала.

Библиография статьи слишком обширна и включает в себя 51 литературный источник. Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на использованные литературные источники и выражении авторского мнения по изучаемой проблеме.

Выводы в статье передают основную мысль автора по проведенным результатам исследований. В результате проведенных исследований, автор приходит к выводу, что в растворенной форме в изученном инъекционном льду ядра булгунняха (пинго) Песковое среди катионов доминируют ионы натрия (от 1,5 до 4 мг/л) и ионы калия (от 0,5 до 2,1 мг/л). Среди анионов преобладает хлор-ион (от 0,6 до 3,3 мг/л), на втором месте сульфат-ион (от 0,3 до 1 мг/л). Отношение хлор-ионов к сульфат-ионам варьирует от 0,7 до 3,7, составляя в среднем 1,7. Распределение основных ионов в гидрохимическом составе ледяного булгунняха Песковое в определенной мере соответствует трехчленной модели формирования ядра.

Реценziруемая статья несомненно будет интересна и полезна мерзлотоведам и грунтоведам. Данная статья заслуживает внимания научного сообщества, рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика». Существенных замечаний в статье не выявлено.