

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук Ю.К. Ионный состав повторно-жильных льдов №17 и №20 Батагайской едомы // Арктика и Антарктика. 2024. № 3. С. 65-90. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.3.71272 EDN: QWEIZV URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=71272](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=71272)

## Ионный состав повторно-жильных льдов №17 и №20 Батагайской едомы

Васильчук Юрий Кириллович

ORCID: 0000-0001-5847-5568

доктор геолого-минералогических наук

профессор; кафедра геохимии ландшафтов и географии почв; Московский государственный университет имени МВ. 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:

10.7256/2453-8922.2024.3.71272

### EDN:

QWEIZV

### Дата направления статьи в редакцию:

17-07-2024

**Аннотация:** Предметом исследования является ионный состав сингенетических позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов IW-17 и IW-20, располагающихся в едином разрезе Батагайской едомы. Обе жилы относятся к ультрапресным льдам с концентрацией основных ионов от 20 до 40 мг/л. Для проб из повторно-жильных льдов использована методика выполнения измерений массовой концентрации катионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{NH}_4^{+}$  в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01738. Диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм<sup>3</sup>, а для определения анионов – использована методика выполнения измерений массовой концентрации  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$  в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01724. Диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм<sup>3</sup> 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/дм<sup>3</sup>. Средства измерения: ионный хроматограф «Стайер», предел детектирования по хлорид-иону 0,02 мг/л. Основными результатами проведенного исследования являются: В ионном составе повторно-жильного льда IW-17 заметно преобладают катионы натрия и кальция, достигая в одном из образцов 24,15 и 53,16 мг/л соответственно. В этом же образце анионы хлора достигают 34,51 мг/л. Средняя концентрация анионов сульфатов составляет – 2-3 мг/л. В ионном составе повторно-жильного льда IW-20 заметно преобладают катионы натрия и кальция, достигая в одном из образцов 7,27 и 50,0 мг/л соответственно. В этом же образце анионы хлора достигают 13,72 мг/л. Средняя концентрация анионов сульфатов составляет – 2-4 мг/л, достигая 22,24 мг/л. Содержание катионов кальция составляет 6-20 мг/л (редко достигая 42-53 мг/л), концентрация катионов калия составляет 0,7-3 мг/л.

### **Ключевые слова:**

многолетнемерзлые породы, повторно-жильные льды, поздний плейстоцен, радиоуглеродный возраст, криогеохимия, ионный состав, макроэлементный состав, едома, Батагай, север Якутии

*Исследования выполнены 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**

Химический состав синкриогенных подземных льдов, по мнению подавляющего большинства исследователей, отражает особенности гидрохимической обстановки времени их образования и служит надёжным критерием для палеогеокриологических построений. К настоящему времени накоплены немногочисленные данные по химическому составу повторно-жильных льдов (ПЖЛ) некоторых регионов России<sup>[1-9]</sup> и Северной Америки.<sup>[10-13]</sup> Для Батагайской едомы ионный состав исследован в нескольких обнажениях.<sup>[8,9]</sup>

Цель данной работы - проанализировать ионный состав повторно-жильных льдов №17 и №20 Батагайской едомы, сравнить его с позднеплейстоценовыми ПЖЛ других едом и некоторыми голоценовыми толщами.

### **Результаты**

#### ***Полевое описание и опробование***

В сентябре 2019 г. на обнажении в устьевой части термоэрозионного оврага, вскрывающего в юго-восточную часть Батагайского кратера, выполнено детальное геохимическое и изотопное опробование двух протяженных ледяных жил: IW-17-VV - и IW-20-VV параллельно до глубины 13,1 м (рис. 1), ниже - только по жиле IW-17-VV.

Ледяные жилы IW-17-VV и IW-20-VV Батагайской едомы, располагаются параллельно друг другу на расстоянии от 5 до 10 м и рассекают едомную толщу до глубины более 20 м. Отбор образцов льда из повторно-жильных льдов №17 и №20, вскрываемых обнажением Батагайского оврага, производился в августе 2019 г. (рис. 2)



Рис. 1. Параллельный одновременный отбор образцов повторно-жильного льда из двух соседних ледяных жил IW-17 (слева) и IW-20 (справа) Батагайской едомной толщи

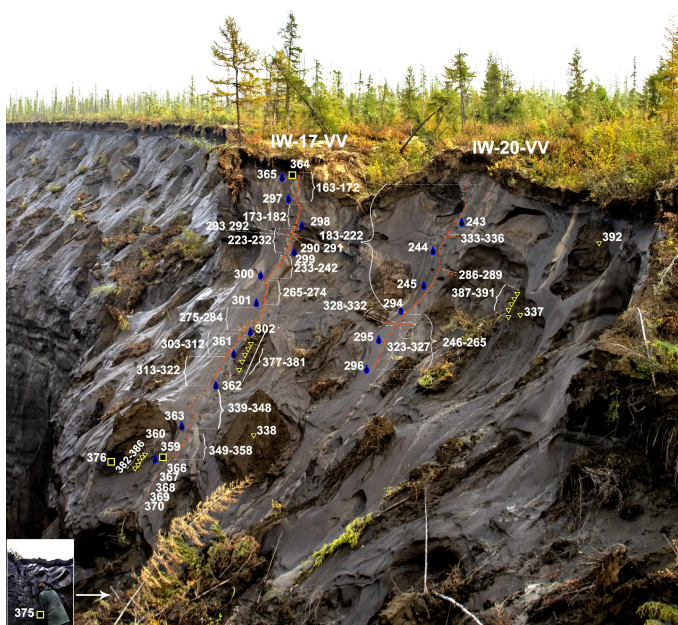


Рис. 2. Схема отбора образцов из повторно-жильных льдов IW-17 (слева) и IW-20 (справа) Батагайской едомной толщи, выполненного в 2019 г.: на изотопный и гидрохимический анализы: красные точки – из жил, желтые треугольники – из текстурных льдов; на радиоуглеродный анализ – желтые квадраты



Рис. 3. Отбор образцов повторно-жильного льда с помощью электродрели из ПЖЛ IW-17 Батагайской едомы



Рис. 4. Образцы повторно-жильного льда, разной степени обогащенные минеральными и органогенными примесями из IW-17 Батагайской едомы: а – чистый верхний образец №163 с глубины 1,3 м ( $\text{Na}^+$  – 2,57 мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$  – 16,02,  $\text{Cl}^-$  – 3,15 мг/л); б – наиболее засоленный образец повторно-жильного льда №17 – №172 с глубины 3,1 м, сильно обогащенный минеральными и органогенными примесями ( $\text{Na}^+$  – 24,15 мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$  – 53,16,  $\text{Cl}^-$  – 34,51 мг/л)





Рис. 5. Отбор образцов повторно-жильного льда IW-17 в интервале глубин 1,3-21,7 м Батагайской едомы



Рис. 6. Отбор образцов повторно-жильного льда Батагайской едомы: IW-20 в интервале глубин 1,3-9,1 м, IW-17 - до глубины 22,1 м.

### **Описание повторно-жильных льдов**

*Ледяная жила IW-17.* Ширина ПЖЛ IW-17 составляет 2,5 м. Сверху-вниз вскрываются: 1,3-2,95 м - лед преимущественно прозрачный с большим количеством вертикально вытянутых пузырьков размером 3-4 мм и низкой концентрацией грунтовых включений; 2,95-4,10 м - лед мутный коричневого цвета, высокая концентрация грунтовых включений черного и коричневого цвета в виде вертикальных жилок, пузырьки не превышают 1 мм; 4,10-5,15 м - лед мутный серо-коричневый с вытянутыми вдоль оси жилы 3-5 мм пузырьками с высокой концентрацией грунтовых включений; 5,15-5,95 м - лед прозрачный мало пузырьков и грунтовых включений; 5,95-7,7 м - лед мутный коричневый с грунтовыми жилками 8-9 см; 7,7-8,1 м - лед коричневый вертикально полосчатый с высокой концентрацией грунтовых включений; 8,1-9,35 м - лед серый прозрачный с пузырьками и вертикальными включениями грунта; 9,35-11,7 м - лед мутный серо-коричневый с вертикальными включениями грунта коричневого и светло-серого цвета; 11,7-13,1 м - лед прозрачный темно-серый с высокой концентрацией вертикальных включений грунта коричневого и светло-серого цвета; 13,1-15,7 м - лед прозрачный коричнево-серый с высокой концентрацией пузырьков и вертикальных включений грунта серого цвета; 15,7-17,3 м - лед коричневый мутный с высокой концентрацией вертикальных грунтовых включений и пузырьков.

*Ледяная жила IW-20.* Ширина ПЖЛ IW-20 составляет 2,3 м. Сверху вниз вскрываются: 1,3- 4,10 м - лед серый преимущественно прозрачный с большим количеством вертикально вытянутых 3-4 мм пузырьков и низкой концентрацией грунтовых включений; 4,10-5,70 м лед мутный серо-коричневый, высокая концентрация грунтовых включений

черного и коричневого цвета в виде вертикальных жилок, пузырьки не превышают 1 мм расположены хаотично; 5,70-6,90 м - лед мутный серо-желтый, высокая концентрация грунтовых включений серого и желтовато-серого цвета; 6,90-9,30 м - лед мутный серый, высокая концентрация пузырьков, вертикальные грунтовые включения серого цвета, 9,30-11,70 м - лед прозрачный серо-коричневый, вертикальные грунтовые включения серого цвета; 11,70-13,10 м - лед мутный вертикальные грунтовые включения темно-серого цвета скопления пузырьков вдоль включений.

Как следует из описания льда жил только лед из интервала 1,3-5,15 м в IW-17 близок по внешним признакам ко льду из интервала 1,3-5,70 м в IW-20; при этом фрагмент льда в интервале 2,95-4,10 м в IW-17 отличается от льда IW-20 на этой же глубине. Ниже лед жил существенно различается по цвету, по цвету и размерам вертикальных включений, а также по форме пузырьков.

## **Методы**

### ***Полевые методы***

Образцы льда отбирались из ледяных жил по вертикали, примерно через каждые 10 см с помощью дрелей Makita DDF481rte 18B и Bosch GSR 36 VE-2-LI со стальными коронками для льда диаметром 51 мм (рис. 3), затем также был выполнен отбор в ряде горизонтальных профилей. Выполнение вертикального и горизонтального опробования повторно-жильных льдов позволяет точнее сравнивать пространственные изотопные вариации внутри разных жильных льдов. Для зачистки места отбора приповерхностные 2 см льда снимались с помощью бура и далее отбирались более глубокие образцы из той же лунки. Образец льда диаметром 5 см. высверливался из жил при этом масса каждого образца составляла около 150 г и упаковывался в полиэтиленовые пакеты. Отбор льда сопровождался подробным описанием цвета, прозрачности, структуры, толщины ледяных и грунтовых прожилок, включений, формы и размера ксенолитов, пузырьков воздуха (рис. 4). Координаты разрезов регистрировались с помощью GPS.

С высокой степенью детальности на одних и тех же глубинах по 2 вертикальным трансектам отобраны до глубины 13,10 м. Это дало возможность выполнить сопоставление гидрохимических характеристик в интервале глубин от 1 до 13,1 м. Образцы также отобраны из нижней части жилы IW-17 в интервале глубин от 13,3 до 22,1 м. Кроме того, были отобраны дополнительные образцы по 4 горизонтальным профилям, результаты определений которых были использованы для контроля.

### ***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, в том числе, бутилированных).

Его устройство включает изократический насос, кондуктометрический детектор, разделительную колонку, систему подавления фоновой проводимости и компьютерный комплект для сбора, обработки и хранения хроматографических данных.

Для проб из повторно-жильных 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/дм<sup>3</sup>, а для определения анионов - использована методика выполнения измерений массовой концентрации  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01724, Диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм<sup>3</sup> 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/дм<sup>3</sup>.

## Результаты

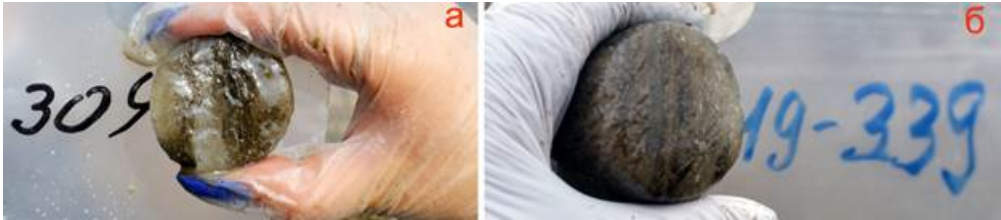
### Радиоуглеродный возраст

По не идентифицированным органическим микроостаткам во льду IW-17 с применением AMS, получены 4 радиоуглеродные датировки [14]: из супеси с органическими включениями непосредственно над жилой на глубине 1,30 м получена голоценовая дата 10510 тыс. кал. лет, на глубине 3,3 м из осевой части ледяной жилы получена дата 26140 тыс. кал. лет, на глубине 12,3 м (из-за изменения угла вскрытия ледяной жилы, образец отобран в 0,5 м слева от оси жилы), его <sup>14</sup>C возраст составил 29100 тыс. кал. лет, на глубине 21,1 м в нижней части IW образец отобран из осевой части, его <sup>14</sup>C возраст - 42,220 тыс. кал. лет. Полученные новые AMS радиоуглеродные датировки, позволяют с большой долей вероятности заключить, что обследованные мощные сингенетические повторно-жильные льды, вскрывающиеся в верхней 20-метровой части обнажения Батагайской едомы, начали накапливаться не позже 42 тыс. кал. лет назад, а закончили формирование около 11,7 тыс. кал. лет назад. Таким образом, ледяные жилы в верхнем ледовом комплексе Батагая в центральной части обнажения накопились в течение 30 тыс. лет. На противоположной стенке оврага довольно подробно датирована IW-3 [15].



{рисунок7}

Рис. 7. Наименее засоленные образцы повторно-жильного льда IW-17 Батагайской едомы: а – В-VV/2019-165 ( $\text{Na}^+$  – 1,91 мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$  – 8,72,  $\text{Cl}^-$  – 2,45 мг/л) с глубины 1,7 м; б – В-VV/2019-227 ( $\text{Na}^+$  – 0,93 мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$  – 17,19,  $\text{Cl}^-$  – 1,32 мг/л) с глубины 6,1 м; в – В-VV/2019-242 ( $\text{Na}^+$  – 0,93 мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$  – 13,01 мг/л,  $\text{Cl}^-$  – 0,90 мг/л) с глубины 9,1 м (см. также рис. 4,а)



{рисунок8}

Рис. 8. Наиболее засоленные образцы повторно-жильного льда IW-17 Батагайской едомы: а – В-VV/2019-304 ( $\text{Na}^+$  – 4,94 мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$  – 53,05,  $\text{Cl}^-$  – 2,15 мг/л) с глубины 13,5 м; б – В-VV/2019-339 ( $\text{Na}^+$  – 5,07 мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$  – 40,96 мг/л,  $\text{Cl}^-$  – 6,14 мг/л) с глубины 16,9 м (см. также рис. 4,6)

**Ионный состав ПЖЛ**

Обе ледяные жилы относятся к ультрапресным льдам с концентрацией основных ионов от 20 до 40 мг/л.

В ионном составе повторно-жильного льда IW-17 заметно преобладают катионы натрия и кальция, достигая в одном из образцов 24,15 и 53,16 мг/л соответственно. В этом же образце анионы хлора достигают 34,51 мг/л. Средняя концентрация анионов сульфатов составляет - 2-3 мг/л (табл. 1, рис. 9). Заметно присутствие нитрат анионов в составе IW-17, составляя в основном 4-7 мг/л в экстремуме  $\text{NO}_3^-$  достигает 16 и даже 26 мг/л на глубине 12,5 м.

В ионном составе повторно-жильного льда IW-20 заметно преобладают катионы натрия и кальция, достигая в одном из образцов 7,27 и 50,0 мг/л соответственно. В этом же образце анионы хлора достигают 13,72 мг/л. Средняя концентрация анионов сульфатов составляет - 2-4 мг/л, достигая 22,24 мг/л (табл. 2, рис. 10). Обращает на себя внимание заметное присутствие нитрат анионов в составе IW-20, они составляют в основном 6-8 мг/л и достигают на глубине 7-8 м - 13 мг/л.

Содержание катионов кальция составляет 6-20 мг/л (редко достигая 42-53 мг/л), концентрация катионов калия составляет 0,7-3 мг/л (см. табл. 1,2; см. рис. 9,10).

**Таблица 1.** Ионный состав позднеплейстоценового повторно-жильного льда IW-17, Батагайская едома

Полевой номер образца	Гл., м	ЕС, мсм	$\text{Na}^+$ , мг/л	$\text{K}^+$ , мг/л	$\text{Mg}^{2+}$ , мг/л	$\text{Ca}^{2+}$ , мг/л	F, мг/л	$\text{Cl}^-$ , мг/л	$\text{NO}_3^-$ , мг/л	$\text{SO}_4^{2-}$ , мг/л
В-VV/2019-163	1,3	102	2,57	1,72	2,95	16,02	0,42	3,15	5,26	2,68
В-VV/2019-164	1,5	84	1,20	1,27	2,32	12,56	0,28	2,20	5,50	1,14
В-VV/2019-165	1,7	73	1,91	1,25	1,74	8,72	0,17	2,45	8,05	1,06



B-VV/ 2019- 166	1,9	108								
			3,57	2,83	3,59	28,90	0,35	4,60	7,87	4,30
B-VV/ 2019- 167	2,1	110								
			4,16	1,17	4,45	22,66	0,30	4,30	6,18	3,87
B-VV/ 2019- 168	2,3	129								
			2,86	1,36	4,64	27,66	0,25	2,26	5,05	7,01
B-VV/ 2019- 169	2,5	100								
			2,35	1,24	3,28	17,00	0,26	2,15	5,68	3,84
B-VV/ 2019- 171	2,9	136								
			3,90	1,93	8,02	42,24	0,47	3,88	7,06	4,20
B-VV/ 2019- 172	3,1	390								
			24,15	1,38	17,64	53,16	1,10	34,51	8,48	30,47
B-VV/ 2019- 297	3,2	-								
			2,72	1,75	3,56	20,48	0,32	2,41	0,16	4,18
B-VV/ 2019- 173	3,3	116								
			3,59	0,91	4,57	40,16	0,43	3,92	5,78	4,80
B-VV/ 2019- 174	3,5	133								
			4,10	1,09	6,55	39,52	0,62	2,11	6,39	4,68
B-VV/ 2019- 175	3,7	130								
			2,48	0,92	5,46	27,98	0,34	1,86	14,24	3,88
B-VV/ 2019- 176	3,9	96								
			1,63	1,40	4,08	28,47	0,36	1,92	6,09	2,43
B-VV/ 2019- 177	4,1	93								
			2,02	1,39	3,27	20,95	0,17	1,35	4,80	2,62
B-VV/ 2019- 178	4,3	109								
			1,86	1,34	3,47	24,80	0,22	1,40	3,92	3,17
B-VV/ 2019-	4,5	143								

179			2,36	2,40	5,39	38,74	0,34	1,48	4,75	3,07
B-VV/ 2019- 180	4,7	122								
			2,09	2,67	4,49	29,01	0,22	1,51	4,32	2,43
B-VV/ 2019- 181	4,9	129								
			2,36	1,13	5,62	42,30	0,44	1,56	6,75	3,10
B-VV/ 2019- 182	5,1	118								
			2,53	1,94	3,95	32,71	0,32	2,03	6,41	2,62
B-VV/ 2019- 298	5,2	-								
			2,17	1,87	4,23	18,42	0,44	2,87	0,25	2,26
B-VV/ 2019- 223	5,3	113								
			1,70	1,38	4,18	30,51	0,24	1,33	4,07	2,94
B-VV/ 2019- 224	5,5	89								
			1,37	0,90	2,77	18,21	0,20	1,70	4,10	2,01
B-VV/ 2019- 225	5,7	92								
			1,08	1,33	3,21	20,78	0,21	1,42	4,60	1,81
B-VV/ 2019- 226	5,9	80								
			1,12	1,60	2,15	13,54	0,10	1,20	3,49	1,42
B-VV/ 2019- 227	6,1	83								
			0,93	1,56	2,94	17,19	0,13	1,32	4,32	2,26
B-VV/ 2019- 228	6,3	100								
			1,42	1,40	4,41	28,81	0,17	1,27	4,50	2,61
B-VV/ 2019- 229	6,5	96								
			1,16	1,34	3,63	25,08	0,18	1,11	5,35	2,53
B-VV/ 2019- 230	6,7	72								
			1,43	1,57	2,41	13,90	0,12	1,08	3,63	1,63
B-VV/ 2019- 231	6,9	88								
			1,26	1,32	2,60	17,14	0,14	1,21	5,14	1,81
B-VV/										

2019-232	7,1	88	1,06	2,20	2,82	17,29	0,13	1,50	2,09	1,97
B-VV/ 2019-299	7,2	-	1,90	2,00	2,81	20,42	0,24	2,57	0,23	2,71
B-VV/ 2019-233	7,3	91	1,80	1,46	2,88	21,07	0,19	2,48	7,50	2,23
B-VV/ 2019-234	7,5	102	0,62	1,17	2,71	21,48	0,17	1,27	14,32	1,83
B-VV/ 2019-235	7,7	245	1,29	1,48	3,53	22,88	0,22	1,77	15,13	2,32
B-VV/ 2019-236	7,9	132	1,10	1,33	3,70	22,30	0,17	1,57	15,63	2,08
B-VV/ 2019-237	8,1	111	1,17	1,30	3,38	22,90	0,12	1,57	9,18	2,63
B-VV/ 2019-238	8,3	116	1,67	1,57	4,08	21,16	0,19	1,14	3,75	2,34
B-VV/ 2019-239	8,5	116	2,20	2,76	4,41	19,74	0,18	2,27	4,23	2,51
B-VV/ 2019-240	8,7	101	1,05	1,68	3,15	17,11	0,15	1,26	4,32	1,76
B-VV/ 2019-241	8,9	95	1,31	1,02	3,30	17,30	0,17	0,97	3,01	2,01
B-VV/ 2019-242	9,1	71	0,73	1,18	2,60	13,01	0,10	0,90	2,71	1,20
B-VV/ 2019-266	9,3	95	1,26	1,79	3,01	18,18	0,17	1,10	3,33	2,36
B-VV/ 2019-267	9,5	131								
B-VV/			2,37	1,76	5,06	37,09	0,24	1,44	4,53	4,61

B-VV/ 2019- 268	9,7	84								
			0,66	1,38	2,41	15,80	0,13	1,06	3,91	1,61
B-VV/ 2019- 269	9,9	86								
			0,77	1,67	2,76	18,67	0,10	1,05	3,57	2,08
B-VV/ 2019- 270	10,1	119								
			1,90	2,43	4,57	31,97	0,19	2,18	4,61	3,18
B-VV/ 2019- 271	10,3	142								
			2,55	1,67	5,75	38,64	0,22	2,01	4,63	4,80
B-VV/ 2019- 272	10,5	148								
			3,65	1,61	6,78	47,60	0,24	2,32	4,78	9,71
B-VV/ 2019- 301	10,6	-								
			1,39	1,57	5,57	28,78	0,31	1,70	0,10	3,94
B-VV/ 2019- 273	10,7	107								
			1,33	1,25	4,64	35,03	0,22	1,51	4,32	2,43
B-VV/ 2019- 274	10,9	118								
			2,57	1,09	4,73	27,11	0,24	1,12	3,47	2,15
B-VV/ 2019- 275	11,1	108								
			1,03	1,31	3,72	29,57	0,19	0,94	3,46	2,43
B-VV/ 2019- 276	11,3	92								
			0,87	1,85	3,22	18,91	0,13	1,21	1,70	2,14
B-VV/ 2019- 277	11,5	82								
			2,02	1,32	3,13	17,40	0,17	2,73	3,95	3,04
B-VV/ 2019- 278	11,7	92								
			1,70	1,66	2,86	19,80	0,16	1,60	3,03	2,52
B-VV/ 2019- 279	11,9	98								
			1,04	1,27	4,13	28,08	0,17	1,65	3,50	4,58
B-VV/ 2019-										
	12,1	142								

280			2,76	1,55	6,45	47,56	0,23	1,07	8,46	4,98
B-VV/ 2019- 281	12,3	91	1,23	1,23	3,01	18,90	0,16	1,62	6,36	2,55
B-VV/ 2019- 282	12,5	169	2,27	7,42	5,26	48,41	0,33	2,56	25,26	4,85
B-VV/ 2019- 283	12,7	240	12,53	1,38	8,83	50,92	0,72	5,13	16,58	22,00
B-VV/ 2019- 284	12,9	125	2,78	0,96	4,86	39,29	0,32	2,00	7,25	6,25
B-VV/ 2019- 285	13,1	102	1,37	1,66	3,86	27,64	0,26	1,61	6,48	3,20
B-VV/ 2019- 303	13,3	99	1,48	1,27	3,15	19,90	0,24	1,26	5,84	2,72
B-VV/ 2019- 304	13,5	185	4,94	3,32	8,23	53,05	0,31	2,15	14,28	9,06
B-VV/ 2019- 305	13,7	88	1,85	0,76	3,85	28,60	0,30	1,43	4,96	2,81
B-VV/ 2019- 308	13,9	106	2,05	1,11	4,91	31,66	0,30	1,38	4,98	4,02
B-VV/ 2019- 309	14,1	127	3,22	0,74	5,79	44,10	0,56	1,54	5,40	6,09
B-VV/ 2019- 310	14,3	85	2,24	1,29	3,70	24,77	0,18	2,78	4,51	2,97
B-VV/ 2019- 312	14,7	85	1,99	3,80	4,47	31,47	0,19	1,54	3,41	4,09
B-VV/ 2019- 313	14,9	94	1,08	0,77	3,39	24,58	0,14	1,15	3,38	3,18
R-VV/										



2019-315	15,3	78	1,26	0,77	3,01	24,63	0,11	1,33	2,56	3,53
B-VV/ 2019-316	15,5	148	3,05	1,79	7,02	44,44	0,26	1,67	2,06	7,98
B-VV/ 2019-317	15,7	86	1,57	1,62	5,25	47,36	0,31	0,92	5,04	5,01
B-VV/ 2019-318	15,9	113	1,76	1,28	4,15	39,64	0,27	1,11	4,48	5,14
B-VV/ 2019-319	16,1	114	2,00	1,13	4,46	45,30	0,26	1,74	4,24	4,72
B-VV/ 2019-320	16,3	129	2,90	1,14	5,24	44,08	0,26	1,60	5,41	5,86
B-VV/ 2019-321	16,5	165	3,94	2,84	6,01	46,22	0,36	2,07	8,21	8,68
B-VV/ 2019-339	16,9	158	5,07	3,51	5,66	40,96	0,34	6,14	17,18	6,70
B-VV/ 2019-340	17,1	101	1,14	1,14	3,03	27,24	0,15	1,35	1,82	5,66
B-VV/ 2019-341	17,3	145	4,38	1,51	4,74	42,24	0,43	2,38	1,62	10,02
B-VV/ 2019-342	17,5	125	3,49	0,94	5,60	39,44	0,24	1,74	4,10	6,34
B-VV/ 2019-343	17,7	129	2,83	2,74	4,98	43,14	0,22	1,80	6,27	9,06
B-VV/ 2019-344	17,9	110	2,27	1,42	4,00	34,90	0,19	2,02	0,16	5,11
B-VV/ 2019-	18,1	86	1,47	1,11	3,43	27,43	0,13	1,84	3,63	4,60

345 B-VV/ 2019- 346	18,3	124	1,98	0,75	4,30	32,31	0,23	1,18	6,15	5,85
B-VV/ 2019- 348	18,7	138	2,38	1,31	6,07	41,23	0,36	1,62	6,55	5,73
B-VV/ 2019- 349	18,9	93	1,52	1,46	3,70	26,60	0,19	1,44	4,14	3,88
B-VV/ 2019- 350	19,1	98	1,22	1,47	3,78	24,34	0,24	1,37	6,35	3,22
B-VV/ 2019- 351	19,3	82	0,97	1,42	2,74	19,25	0,15	1,18	4,81	2,30
B-VV/ 2019- 353	19,7	85	2,03	2,28	5,57	37,09	0,30	1,92	5,70	4,27
B-VV/ 2019- 354	19,9	122	2,49	1,55	6,25	43,37	0,30	1,95	6,80	4,78
B-VV/ 2019- 355	20,1	89	1,20	1,32	3,63	22,94	0,22	1,26	5,85	2,22
B-VV/ 2019- 356	20,3	107	1,30	1,52	3,95	27,77	0,30	1,40	4,92	2,70
B-VV/ 2019- 357	20,5	37	1,14	2,71	4,27	26,00	0,20	1,60	5,82	2,64
B-VV/ 2019- 358	20,7	118	1,25	3,63	4,53	24,47	0,19	1,50	8,28	3,16
B-VV/ 2019- 366	20,9	105	1,33	1,43	4,19	28,05	0,28	1,23	4,64	3,03
B-VV/ 2019- 368	21,3	99	1,33	1,46	4,55	29,95	0,21	1,32	4,62	4,91
B-VV/										

2019-369	21,5	73	1,73	1,97	3,42	18,25	0,17	1,14	6,30	1,94
B-VV/										
2019-370	21,7	73	1,04	2,25	4,34	20,11	0,17	1,37	6,40	2,98

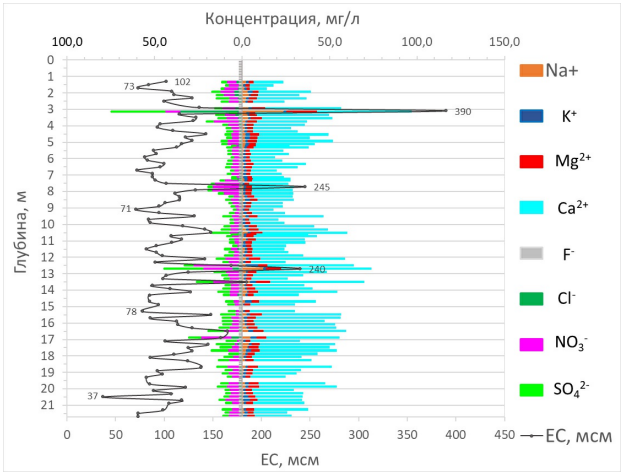


Рис. 9. Ионный состав позднеплейстоценового повторно-жильного льда IW-17, Батагайская едома

**Таблица 2.** Ионный состав позднеплейстоценового повторно-жильного льда IW-20, Батагайская едома

Полевой номер образца	Гл., м	ЕС, мсм	Na <sup>+</sup> , мг/л	K <sup>+</sup> , мг/л	Mg <sup>2+</sup> , мг/л	Ca <sup>2+</sup> , мг/л	F, мг/л	Cl <sup>-</sup> , мг/л	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л
B-VV/										
2019-183	1,3	141	3,43	1,22	4,90	24,70	0,42	4,13	11,74	5,77
B-VV/										
2019-185	1,7	262	7,27	2,68	13,07	50,00	0,67	13,72	16,50	22,24
B-VV/										
2019-187	2,1	114	3,40	1,26	3,32	20,54	0,32	2,03	8,30	4,47
B-VV/										
2019-189	2,5	93	2,78	1,27	3,61	13,00	0,21	1,71	8,01	2,95
B-VV/										
2019-191	2,9	121	4,11	2,64	4,41	25,46	0,31	3,25	10,82	4,23
B-VV/										
2019-193	3,3	103	2,71	2,50	4,01	17,00	0,29	2,01	8,96	2,57
B-VV/										

2019-195	3,7	104	2,50	1,24	4,27	23,22	0,27	1,75	7,96	2,47
B-VV/ 2019-197	4,1	111	2,75	1,70	4,88	30,20	0,36	1,71	7,33	3,45
B-VV/ 2019-199	4,5	118	2,82	1,62	5,55	36,80	0,35	1,95	7,98	3,10
B-VV/ 2019-203	5,3	159	4,40	1,25	8,06	47,20	0,67	2,86	8,88	5,48
B-VV/ 2019-205	5,7	252	2,11	2,16	3,40	16,27	0,26	2,17	6,85	3,74
B-VV/ 2019-207	6,1	100	2,58	1,10	3,71	17,68	0,29	2,60	6,51	3,40
B-VV/ 2019-209	6,5	89	1,67	1,13	3,25	16,07	0,15	1,44	6,47	2,07
B-VV/ 2019-211	6,9	101	2,50	1,56	3,19	16,95	0,22	1,72	8,65	2,61
B-VV/ 2019-213	7,3	117	2,02	1,36	4,05	22,35	0,16	1,64	13,35	3,53
B-VV/ 2019-215	7,7	109	1,63	1,65	3,16	19,05	0,18	1,65	8,83	3,70
B-VV/ 2019-217	8,1	109	1,60	2,28	3,90	23,80	0,18	2,80	13,17	3,00
B-VV/ 2019-219	8,5	110	2,00	1,50	3,90	17,40	0,24	1,18	4,85	2,48
B-VV/ 2019-221	8,9	85	1,80	1,00	3,22	16,60	0,11	2,19	3,68	3,82
B-VV/ 2019-	9,1	94		1,00						

222		1,53	3,38	18,48	0,13	1,44	5,03	2,83
-----	--	------	------	-------	------	------	------	------

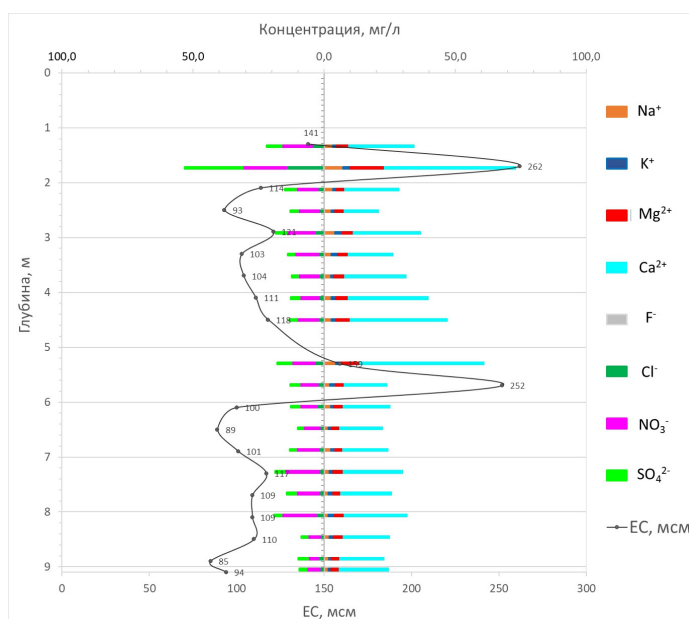


Рис. 10. Ионный состав позднеплейстоценового повторно-жильного льда IW-20, Батагайская едома

### Дискуссия

Макроэлементный состав повторно-жильных льдов формируется при совокупном влиянии ионного состава вод, сформировавших эти льды, и макрокомпонентного состава вмещающих льды отложений. Макроэлементный состав может быть использован в качестве индикатора смены геохимических условий миграции-аккумуляции химических элементов, происходящей в результате смены ландшафтных условий льдообразования. Так, хлоридно-натриевый состав сообщает о влиянии морских аэрозолей на засоление повторно-жильных льдов, уменьшение Cl-Na засоления подземных льдов говорит о почти полной потере связи этих льдов с морем. Ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  могут свидетельствовать о воздействии вмещающих льды грунтов на химический состав льда. В континентальных условиях макроэлементы в составе повторно-жильных льдов также индицируют смену условий льдообразования со слабощелочных глеевых на кислые глеевые в голоцене. Общая минерализация северо-якутских льдов крайне невысока (до 90 мг/л), однако встречаются аномалии солёности (от менее чем 30 мг/л до 400-430 мг/л).<sup>[16]</sup>

Более половины образцов из жил Чукотки имеют минерализацию менее 0,05 г/л (рис. 12,а), тогда как жилы с такой минерализацией в Западной Сибири встречены лишь в 16%, а на Севере Якутии – в 147 случаев. Но если взять более широкий диапазон – менее 0,15 г/л, то сходство ближе – на Чукотке это почти 100% всех проанализированных образцов, в Западной Сибири – 89%, а на севере Якутии – 80%. Эти данные говорят о том, что хотя в составе солей в полигонально-жильных толщах различных регионов Евразийской криолитозоны и имеются региональные различия (вызванные прежде всего неодинаковым характером переноса воздушных масс в зимнее время и разным влиянием близ расположенных океанов), но гораздо выразительнее их сходство, которое проявляется в низкой минерализации и доминировании гидрокарбонатов, что, скорее всего, свидетельствует об атмосферной природе воды, в основном питавшей жилы в позднем плейстоцене, так же как и позднее – в голоцене и в настоящее время.



*Повторно-жильные льды в других фрагментах Батагайской едомы.* Ранее нами рассмотрен ионный состав повторно-жильных льдов и вмещающих их отложений в других фрагментах Батагайской едомы (в основном, в жилах №№1-7). Минерализация позднеплейстоценового жильного льда составила от 66,56 до 424,8 мг/л, от ультрапресной до опресненной, по ионному составу лёд гидрокарбонатно-кальциевый и соответствуют снегу, сформированному под воздействием континентальных солей. [\[17-19\]](#) Большой разброс содержания Na, Mg, Al, Ca, Fe в грунтовых включениях во льду говорит о смене геохимической обстановки образования льдов.

*Едомные толщи Северной Якутии.* Разнообразна минерализация позднеплейстоценовых жил в едомных толщах Северной Якутии. Общий диапазон в содержании сухого остатка – 60–478 мг/л. Различно среднее содержание воднорастворимых солей в едомах, расположенных на побережье и вдали от него. Так, в едоме Быковского полуострова среднее содержание сухого остатка превышает 200 мг/л, причем ни в одном образце не отмечена его величина, менее 140 мг/л, а в толщах «внутренних» едом минерализация заметно меньше – они все пресные: едома Плахинского яра – 110 мг/л, Дуванского Яра – 120 мг/л, Зеленого Мыса – 110 мг/л, Усть-Омолонского Яра – 130 мг/л, низовий Омолона – 120 мг/л. Еще меньше минерализация едом междуречий – здесь лёд жил чаще ультрапресный: в Куларской котловине в среднем 70 мг/л, в центре Омолон-Анъюйской едомы (верховья реки Тимкинской) – 50–60 мг/л (в каждом из упомянутых выше разрезов едом проанализировано от 30 до 50 образцов жильного льда). Отличительной чертой всех сингенетических жил в едомах является доминирование гидрокарбонатов, составляющих часто более половины от общего содержания солей, причем Это характерно и для более, и для менее минерализованных льдов. Из остальных компонентов обращает на себя внимание кальций, во многих случаях превышающий 25% от общего содержания солей; в толщах едом из внутренних районов междуречий заметны сульфаты, содержание которых, нередко достигает 25%.

Этими данными дополняются систематизированными ранее в 1979 г. О. В. Гриненко с коллегами и в 1981 г. А. А. Архангеловым с сотрудниками (устные сообщения) сведениями по минерализации повторно-жильных льдов в разрезах, располагающихся в низовьях р. Колымы, по которым также обособляются толщи, в которых повторно-жильные льды в едомных толщах имеют минерализацию менее 100 м/л, к ним относится разрез Станчиковского Яра, большая часть разрезов, расположенных в среднем течении р. Чукочьа и вблизи озер Мавринское и Якутское, основная часть комплекса Молотковский Камень и обнажение в долине р. Алазеи и те, в которых жилы характеризуются минерализацией от 100 до 200 мг/л, достигающей в отдельных горизонтах 250–400 мг/л. К ним относятся льды Антохинского Яра, обнажений в устье р. Чукочьа, р. Крестовка. Особенно большие значения минерализации отмечены в нижних частях обнажений. В скважинах пробуренных под урез озера Якутское и под урез реки Чукочьа близ устья, встречены среднесолёные жильные льды, минерализация их здесь достигает 2400–3400 мг/л. Значение 3073 мг/л отмечено в нижней части погребенной ледяной жилы обнажения Морское в устье р. Чукочьей: 1330 мг/л и 514 мг/л – в погребенной ледяной жиле в устье р. Крестовка. Почти во всех случаях засоление хлоридно-натриевого и хлоридно-гидрокарбонатно-натриевого типа, кроме жильного льда с минерализацией 1330 мг/л, где засоление сульфатно-гидрокарбонатное.

В приморской части имеются результаты исследований К. А. Кондратьевой и др. [\[20\]](#) жил в обнажении Мус-Хая в низовьях Яны. Сухой остаток в жилах составляет 60–160 мг/л (и только в одном из образцов из средней части разреза – до 400 мг/л).

Результаты работ В. П. Волковой и Н. Н. Романовского в Уянинской впадине<sup>[2]</sup> и в южной части Яно-Индибирской низменности<sup>[3]</sup> показали, что химический состав позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов здесь достаточно однороден: минерализация жил в аллювии Уядинской впадины колеблется от 30 до 100 мг/л; лед жил всегда гидрокарбонатный. Такой же ультрапресный лед в аллювии Хромы – минерализация от 20 до 100 мг/л. По мнению В. П. Волковой и Н. Н. Романовского<sup>[2,3]</sup>, результаты проведенного ими анализа химического состава повторно-жильных льдов показывают, что в формировании жил участвуют поверхностные воды, имеющие меньшую минерализацию и более однообразный состав, чем воды слоя сезонного оттаивания.

Пресные и ультрапресные жилы, залегающие в толщах аллювиальных террас Лены, изучены Н. П. Анисимовой<sup>[4]</sup> – здесь минерализация жил изменяется от 28 до 90 мг/л, засоление также преимущественно гидрокарбонатное. Несколько более высокая концентрация солей отмечается здесь иногда в верхних оплавленных частях жил. Н. П. Анисимова связывает это с миграцией легкорастворимых солей из сезонноталого слоя, минерализация отдельных частей которого может заметно увеличиваться в процессе промерзания. Согласно ее исследованиям, более засоленным оказывается слой, промерзший в последнюю очередь, в нем в большей степени увеличивается содержание ионов гидрокарбоната и натрия<sup>[4]</sup>. Можно представить себе ситуацию, когда растрескивание происходит при неполном промерзании сезонно-талого слоя и когда повышено минерализованная вода из непромерзшей линзы может попасть в морозобойную трещину и, следовательно, в залегающую ниже ледяную жилу. Такой процесс чрезвычайно редок, Встречается лишь в исключительных случаях, на что указывает и крайне редкая встречаемость сильно минерализованного повторно-жильного льда.

В процентном отношении от общего числа проанализированных образцов жильных льдов из едом встречаемость среднесоленых льдов ничтожна,<sup>[6]</sup> однако игнорировать их нельзя, поскольку такие образцы могут указывать на возможность субаквального формирования ледяных жил в позднем плейстоцене под морским мелководьем (подчеркиваем, редко, но все же вероятно). Конечно, в отдельных случаях, как например, в нижней части берегового морского обнажения близ устья р. Чукочья повышенную минерализацию можно было бы попытаться объяснить затеканием морской воды уже в процессе современного термоабразионного вскрытия жил, а в других случаях – миграцией солей в жилы из вмещающих отложений. Однако этому имеются контраргументы: А. Н. Толстов<sup>[1]</sup> приводит данные П. Ф. Швецова, обнаружившего в обнажении озера Овальное, располагающегося на севере Яно-Индибирской низменности в 120 км от моря, лед с хлоридно-натриевым засолением, содержание сухого остатка в котором составило 2910 мг/л. Этот образец оказался единичным. При повторном опробовании жил в этом районе получены значения минерализации 60–160 мг/л. А. Н. Толстов<sup>[1]</sup> объясняет наличие сильно минерализованного жильного льда ветровым переносом солей от морского побережья. Маловероятно существенное постгенетическое засоление жил солями, мигрирующими из вмещающей мерзлой толщи. Практически во всех случаях, когда были встречены сильно минерализованные жильные льды, вмещающие их отложения не отличались аномально высокой минерализацией ей, и наоборот, там, где сухой остаток в водной вытяжке из вмещающих толщ превышал 0,2–0,4%, залегали жильные льды с минерализацией не выше 200 мг/л.

Имеются сведения, что перенос морских солей атмосферными осадками возможен на расстояние 1000–4000 км, причем интересно, что даже вблизи морских побережий в них

не всегда преобладает хлор (хотя часто его содержание составляет до половины общего количества солей), часто заметно участие других компонентов.

Мы склонны полагать, что повышенная минерализация в каждом конкретном случае объясняется различными причинами. Если жилы в устье р. Чукочьа и на берегу озера Овальное (а также ранее описанные автором жильные льды острова Белый и п-ова Явай<sup>[6,21]</sup> в отдельных своих частях сильно минерализованы за счет участия морской воды (сохраняющейся в некоторых озерах, после сильных приливов), затекавшей по трещинам в тело жил при их формировании, то жилы в обнажениях Крестовка (как и жилы Мамонтовой Горы и Ленских террас), имеющие континентальный тип засоления, повышенно минерализованы, видимо, в основном, за счет затекания по трещинам в жильный лед застойных болотных вод.

Сопоставление химического состава голоценовых и позднеплейстоценовых жил Северной Якутии<sup>[6]</sup> указывает на их различие, проявляющееся, прежде всего, в частой встречаемости более минерализованных жил позднеплейстоценового возраста (например, лед с минерализацией 0,05–0,15 г/л в них встречается в 68% случаев, а в голоценовых – в 47%), Однако основной тип засоления подземных льдов никак нельзя отнести не только к морскому, но даже и редко к распресненному лагунному. Доминирование карбонатов в едомных жилах, вероятно, указывает на более холодные условия их формирования. Вместе с тем, метеорный характер подавляющей части воды, питавшей жилы, не вызывает сомнений.

*Едомные толщи севера Западной и Средней Сибири.* Полигонально-жильный лед близ Марре-Сале ультрапресный и пресный (21–88 мг/л), имеет гидрокарбонатно-хлоридный, хлоридный, натриевый состав.<sup>[22]</sup>

В районе п. Диксон в ПЖЛ, изученных на склоне долины высотой 7 м над уровнем моря, преобладают ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$ , источником которых были континентальные аэрозоли; в жилах, вскрытых в днище долины, преобладают ионы  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ , поступавшие с морскими водами при залипании низин.<sup>[23]</sup> Минерализация этих жил составляет около 50 мг/л.<sup>[24]</sup>

Лёд жил нижнего и верхнего ярусов на о. Сибирякова – расположенного в акватории Енисейского залива, имеет низкую минерализацию – около 40 мг/л; преобладают  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ . По химическому составу жилы обоих ярусов схожи с жилами разреза Диксон, расположенными в днище долины), т.е. они также подверглись влиянию морских вод. Однако лёд жил верхнего яруса отличается от льда жил нижнего яруса повышенным содержанием органического вещества и  $\text{NH}_4^+$ , V, Fe, Zn, Mo, Cd, Sn, что указывает на наличие геохимического восстановительного барьера при торфонакоплении.<sup>[24]</sup>

Площади, занятые полигонально-жильными льдами, вскрытыми в разрезе Кареповский, в устье р. Енисей – небольшие. Расплавы льда с минерализацией около 90 мг/л характеризуются хлоридно-кальциево-магниевым составом. Соотношение основных ионов и обогащение льда B, Br, I и Ba указывают на участие морских аэрозолей в их формировании в замкнутой термокарстовой котловине.<sup>[24]</sup>

*Повторно-жильные льды Северной Америки.* К. Кэмпбелл-Хитон<sup>[10,11]</sup> удостоверяется, что молярное соотношение основных ионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ ) подтверждает то, что талая вода снега является основным источником растворенных веществ в жилах

льда. Исследования снежного покрова на полуострове Фосхайм и острове Аксель-Хейберг показали, что химический состав таяния снега очень похож на химический состав снежного покрова и что в первоначальном снежном покрове преобладают  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . Соотношения  $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  в жилах льда аналогичны пробе снега и ниже, чем в деятельном слое, а в некоторых случаях существенно ниже. Однако в ледяных жилах на берегу фьорда Мокка соотношение  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  выше, чем в активном слое. Большинство образцов повторно-жильных льдов имеют соотношение  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ , близкое к таковому на уровне моря. Соотношение  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  в большинстве ледяных жил выше, чем в образцах как снега, так и сезонно-талого слоя. В целом молярные соотношения основных ионов ( $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ), больше похожи на снег, чем на выщелоченный активный слой, что позволяет предположить, что жилы льда заполнены в основном талой снеговой водой с незначительным вкладом выщелоченной поверхностной органики. Этот вывод согласуется с данными Дж. Баттла и К. Фрейзера<sup>[25]</sup>, которые использовали аналогичные молярные соотношения во время весеннего таяния 1990 г. в небольшом болотистом бассейне на острове Аксель-Хейберг, и обнаружили, что стоки талой воды особенно активно обогащаются кальцием, магнием и натрием, когда талая вода вступает в контакт с почвой. Разница в соотношении  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  в жилах льда по сравнению с образцами снега и активного слоя, вероятно, связана с сильным присутствием морских аэрозолей в период формирования этих жил.<sup>[10]</sup>

К.Холланд с соавторами<sup>[13]</sup> предположили, что поскольку, как известно, ледяные жилы питаются в основном талыми водами зимнего снежного покрова, их геохимия может сохранять состав примесей исходного снега. И, хотя ледяные жилы могут подвергаться другим источникам загрязнения с поверхности земли и окружающих осадков, повторно-жильные льды в прибрежных регионах, где концентрации ионов в снежном покрове главным образом определяются осаждением морской соли, могут представлять большой потенциал как архив морского аэрозоля. В их исследовании голоценовых повторно-жильных льдов использована ионная геохимия прибрежных ледяных жил в сочетании с изотопным составом для изучения возможности сохранения морских аэрозолей в повторно-жильных льдах плейстоценового возраста. Это исследование<sup>[13]</sup> показало, что морские аэрозоли хорошо сохраняются, и в ионно-геохимической записи можно выделить морской сигнал. Но, ледяные жилы подвергаются значительным изменениям, происходящим на поверхности земли и в сезонно-талом слое в процессе заполнения морозобойных трещин, в процессе таяния снега, который потенциально промывает ежегодно накапливаемую морскую соль на поверхности тундры, а также минералы, происходящие из почвы. К.Холланд с соавторами<sup>[13]</sup> исследовали ионно-геохимическую запись в ледяной жиле на побережье моря Бофорта близ Тактояктака. Ими исследовано морское и литогенное происхождение ионов, характерных для основных компонентов морской соли. Исследовательская площадка располагалась на полигонально-жильном массиве на побережье Тактояктака (69,409° с.ш., 133,124° з.д.). Детально изученная ледяная жила располагалась примерно на расстоянии 70 метров от береговой линии.

Откалиброванный радиоуглеродный возраст по растворенному органическому углероду, экстрагированному непосредственно из ледяных жил, указывает на медленный рост повторно-жильных льдов от 4700 до 1600 лет назад, за которым следует быстрый рост до 640 лет назад. По данным К.Холланд с соавторами<sup>[12,13]</sup> 118 образцов из льда жил концентрации  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  наиболее высоки, что ожидаемо из-за морского влияния, при этом  $\text{Cl}^-$  (от 3,65 до 26,64 мг/л, в среднем 9,63 мг/л) имеет в среднем более высокую

концентрацию, чем  $\text{Na}^+$  (от 1,99 до 13,39 мг/л, в среднем 5,29 мг/л). В порядке убывания располагаются:  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{K}^+$  (соответственно в среднем 1,14, 0,83 и 0,63 мг/л). Ионные концентрации в голоценовой ледяной жиле продемонстрировали замечательное сходство значений с аналогичными ионами в снежном покрове. Средние соотношения, рассчитанные как арифметическое среднее отношений в выборке, составляют 1,80 для  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$ , 0,005 для  $\text{Br}/\text{Na}^+$ , 0,13 для  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ , 0,25 для  $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ , 0,17 для  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  и 0,15 для  $\text{K}^+/\text{Na}^+$ . [\[12,13\]](#)

Важно отметить, что недавно полученные корейскими исследователями [\[26, suppl. table S2\]](#) данные по ионному составу ледяных жил в Батагайской едоме хорошо коррелируют с приводимыми в настоящей статье: содержание анионов хлора в основном варьирует от 2 до 6 мг/л (а в единичных образцах достигая 22 мг/л; средняя концентрация анионов сульфатов составляет - 1-2 мг/л. (в одном из образцов 5 мг/л); содержание катионов кальция составляет 10-15 мг/л (редко достигая 49-50 мг/л); концентрация катионов калия составляет 3-7 мг/л (иногда достигая 19-21 мг/л). [\[26, suppl. table S2\]](#)

### Выводы

1. Исследованные в Батагайской едоме две рядом расположенные ледяные жилы относятся к ультрапресным льдам с концентрацией основных ионов от 20 до 40 мг/л.
2. В ионном составе повторно-жильного льда IW-17 заметно преобладают катионы натрия и кальция, достигая в одном из образцов 24,15 и 53,16 мг/л соответственно. В этом же образце анионы хлора достигают 34,51 мг/л. Средняя концентрация анионов сульфатов составляет - 2-3 мг/л.
3. В ионном составе повторно-жильного льда IW-20 заметно преобладают катионы натрия и кальция, достигая в одном из образцов 7,27 и 50,0 мг/л соответственно. В этом же образце анионы хлора достигают 13,72 мг/л. Средняя концентрация анионов сульфатов составляет - 2-4 мг/л, достигая 22,24 мг/л.
4. Содержание катионов кальция составляет 6-20 мг/л (редко достигая 42-53 мг/л);
5. Концентрация катионов калия составляет 0,7-3 мг/л.
6. Заметно присутствие нитрат анионов в составе IW-17, составляя в основном 4-7 мг/л в экстремуме  $\text{NO}_3^-$  достигает 16 и даже 26 мг/л на глубине 12,5 м. В составе IW-20, нитрат анионы составляют в основном 6-8 мг/л и достигают на глубине 7-8 м - 13 мг/л.

### Благодарности

Автор благодарен Л.Б. Блудушкиной, Н.А. Буданцевой, А.П. Гинзбургу, Л.В. Добрыдневой, Е.С. Слышкиной и А.Ю. Тришину и за помощь в полевых и лабораторных исследованиях и в оформлении работы.

### Библиография

1. Толстов А.Н. Случаи наличия в тундре жильного льда по химическому составу близкого к морской воде // *Проблемы палеогеографии и морфогенеза в полярных странах и высокогорье*. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1964. С. 182-184.
2. Волкова В. П., Романовский Н. Н. Некоторые особенности химического состава подземных льдов Уяндинской впадины и прилегающих частей Селенняхского хребта // *Мерзлотные исследования*, вып. 10. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1970. С. 114-128.
3. Волкова В. П., Романовский Н. Н. О химическом составе подземных льдов в



четвертичных отложениях южной части Яно-Индибирской низменности // *Проблемы криолитологии*, вып. 4. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1974. С. 199-208.

4. Анисимова Н.П. *Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны*. Новосибирск: Наука, 1981. 151 с.

5. Vasil'chuk Yu.K., Trofimov V.T. Cryohydrochemical peculiarities of ice-wedge complexes in the north of Western Siberia // *Permafrost. Fourth International Conference, Proceedings*. Fairbanks. Alaska. National Academy Press. Washington. 1983. P. 1303-1308.

6. Васильчук Ю.К. *Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций)*. М.: Изд. Отдел. Теоретических проблем РАН. МГУ, ПНИИИС. 1992. В 2-х томах. Т. 1. – 420 с. Т. 2. – 264 с.

7. Savoskul O.S. Ion content of polygonal wedge ice on Bolshoi Lyakhov: a source of palaeoenvironmental information. *Ann Glaciol.* 1995. Vol. 21. P. 394-398. DOI: 10.1017/s026030550001612827.

8. Котов А. Н., Бражник С.Н. Химический состав повторно-жильных льдов Чукотки // *Комплексные геокриологические исследования Чукотки*. Магадан: изд. СВК НИИ. 1991. С. 39-48.

9. Лахтина О. В. Физические и химические свойства грунтов Колымской низменности // *Труды ПНИИИС*. Вып. 54. М.: Стройиздат. 1978. С. 13-54.

10. Campbell-Heaton K. *Ice wedge activity in the Eureka Sound Lowlands, Canadian High Arctic*. A thesis submitted to the University of Ottawa in partial fulfillment of the requirements for the Master of Science in Geography. Department of Geography, Environment and Geomatics. Faculty of Arts. CryoLab for Arctic, Antarctic and Planetary Studies (CLAAPS). University of Ottawa. 2020. 103 p.

11. Campbell-Heaton K., Lacelle D., Fisher D., Pollard W. Holocene ice wedge formation in the Eureka Sound Lowlands, high Arctic Canada. *Quaternary Research*. 2021. Vol. 102. P. 175-187. DOI: 10.1017/qua.2020.126.

12. Holland K.M. *Ice-Wedge Archives in the Northwestern Canadian Arctic*. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Science. Department of Geography and Planning. University of Toronto. 2020. 85 p.

13. Holland K.M., Porter T.J., Criscitiello A.S., Froese D.G. Ion geochemistry of a coastal ice wedge in Northwestern Canada: Contributions from marine aerosols and implications for ice-wedge paleoclimate interpretations. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2023. Vol. 34(2). P. 180-193. DOI: 10.1002/ppp.2184.

14. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N. A., Vasil'chuk J.Yu., Ginzburg A.P. Synchronous isotopic curves in Ice Wedges of the Batagay Yedoma: Precision Matching and Similarity Scoring. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2024. DOI: 10.1002/ppp.2243.

15. Vasil'chuk Yu K., Vasil'chuk J.Yu, Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C. MIS 3-2 paleo-winter temperature reconstructions obtained from stable water isotope records of radiocarbon-dated ice wedges of the Batagay Ice Complex (Yana Upland, eastern Siberia). *Radiocarbon*. 2022. Vol. 64. № 6. P. 1403-1417. DOI: 10.1017/RDC.2022.60.

16. 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](https://e-notabene.ru/arctic/article_21378.html)

17. Васильчук Ю.К., Васильчук Д.Ю., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Тришин А.Ю. Изотопно-геохимические особенности Батагайской едомы (предварительные результаты) // *Арктика и Антарктика*. 2017. № 3. С. 69-98. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.3.24433 URL: [https://e-notabene.ru/arctic/article\\_24433.html](https://e-notabene.ru/arctic/article_24433.html)

18. Васильчук Ю.К., Васильчук Д.Ю., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Гинзбург А.П. Геохимический состав повторно-жильных льдов в Батагайской едоме // *Арктика и Антарктика*. 2021. № 2. С. 70-92. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.2.35962 URL: [https://e-notabene.ru/arctic/article\\_35962.html](https://e-notabene.ru/arctic/article_35962.html)

notabene.ru/arctic/article\_35962.html

19. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk J.Yu., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Belik A.D., Bludushkina L.B., Ginzburg A.P., Krechetov P.P., Terskaya E.V. Major and trace elements,  $\delta^{13}\text{C}$ , and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Late Pleistocene ice wedges: A case-study of Batagay yedoma, Central Yakutia // *Applied Geochemistry*. 2020. Vol. 120. 104669. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104669.
20. Кондратьева К.А., Труш Н.И., Чижова Н.И., Рыбакова Н.О. К характеристике плейстоценовых отложений в обнажении Мус-Хая на р.Яне // *Мерзлотные исследования*. Вып. 15. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1976. С. 60-93.
21. Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Инженерно-геологические и геохимические условия полигональных ландшафтов острова Белый (Карское море) // *Инженерная геология*. 2015. № 1. С. 50-65.
22. 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: 10.21782/KZ1560-7496-2020-5(29-44).
23. 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.
24. Опокина О.Л., Слагода Е.А., Томберг И.В., Суслова М.Ю., Фирсова А.Д., Ходжер Т.В., Жученко Н.А. колебания уровня моря и их отражение в составе и строении полигонально-жильных льдов в низовьях Енисея // *Лёд и Снег*. 2014. Том 54(2). С. 82-90. DOI: 10.15356/2076-6734-2014-2-82-90.
25. Buttle J. M., Fraser K. E. Hydrochemical fluxes in a high arctic wetland basin during spring snowmelt // *Arctic & Alpine Research*. 1992. Vol. 24(2). P. 153-164. DOI: 10.2307/1551535.
26. Park P., Ko N.-Y., Kim J.E., Opel T., Meyer H., Wetterich S., Fedorov A., Shepelev A.G., Jung H., Ahn J. A Biogeochemical Study of Greenhouse Gas Formation From Two Ice Complexes of Batagay Megaslump, East Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2024. DOI: 10.1002/ppp.2234

## 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 исследование ионного состава повторно-жильных льдов Батагайской едомы для сравнения с позднеплейстоценовыми повторно-жильного льда других едом и некоторыми голоценовыми толщами.

Методология исследования состояла в параллельном одновременном отборе образцов повторно-жильного льда из двух соседних ледяных жил IW-17 (слева) и IW-20 (справа) Батагайской едомной толщи, с последующим анализом текстуры льдов и изотопным радиоуглеродным анализом. Образцы льда отбирались из ледяных жил по вертикали через каждые 10 см затем с помощью дрелей Makita DDF481rte 18B и Bosch GSR 36 VE-2-LI со стальными коронками для льда диаметром 51 мм, также был выполнен отбор в ряде горизонтальных профилей. Измерения макрокомпонентного состава льда проводились с помощью ионного хроматографа «Стайер», предел детектирования по хлорид-иону 0,02 мг/л. который предназначен для качественных и количественных определений неорганических соединений в водных растворах различного происхождения. Для проб из повторно-жильных льдов использована методика выполнения измерений массовой

концентрации катионов в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01738. Диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм<sup>3</sup>, а для определения анионов - использована методика выполнения измерений массовой концентрации Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01724,

Актуальность исследования состоит в исследовании химического ионного состава синкриогенных подземных льдов Батагайской едомы, что отражает особенности гидрохимической обстановки времени их образования и служит надёжным критерием для палеогеокриологических построений.

Статья, имея научное значение, может выполнить и большую практическую полезную службу, так как она имеет большое и прикладное методическое значение и будет полезна студентам и аспирантам.

Научный результат состоит в исследовании в Батагайской едоме две рядом расположенные ледяные жилы, относящейся к ультрапресным льдам с концентрацией основных ионов от 20 до 40 мг/л. В ионном составе повторно-жильного льда IW-17 заметно преобладают катионы натрия и кальция, достигая в одном из образцов 24,15 и 53,16 мг/л соответственно. В этом же образце анионы хлора достигают 34,51 мг/л. Средняя концентрация анионов сульфатов составляет - 2-3 мг/л.

Практическая значимость определяется усовершенствованием существующих или разработкой новых данных, что позволит более обоснованно подойти к оценке будущего термического состояния засоленных мерзлых пород. Полученные данные могут найти применение в практике на объектах оценки термодинамических процессов.

Стиль, структура, содержание Стиль изложения - хороший, не требует правки, сокращения. Фотографии, схема, таблица - приемлемы. Автором статьи использование многочисленной иллюстрации в виде фотографии, графика, таблицы отражают научные зависимости.

Библиография обширна и исчерпывающая. Использован адекватный современный список литературы. Ссылки на литературные источники по тексту присутствуют.

Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на использованные литературные источники. Выводы, интерес читательской аудитории несомненны. Выводы достаточной степени аргументированы, обоснованы, исчерпывающи. Может быть полезна практикам для внедрения, а также студентам и аспирантам.