

Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю., Маслаков А.А., Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Геохимический состав голоценовых повторно-жильных льдов северо-востока Чукотки // Арктика и Антарктика. — 2017. - № 2. - С.34-53. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.2.22980. URL: [http://e-notabene.ru/arctic/article\\_22980.html](http://e-notabene.ru/arctic/article_22980.html)

## Геохимический состав голоценовых повторно-жильных льдов северо-востока Чукотки

**Буданцева Надежда Аркадьевна**

кандидат географических наук

старший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)

119992, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, стр. 19

**Budantseva Nadezda**

PhD in Geography

Senior Research Fellow at the Faculty of Geography of Moscow State University

119992, Russia, Moscow, ul. Leninskie Gory, 1, building 19

✉ [nadin.budanceva@mail.ru](mailto:nadin.budanceva@mail.ru)



**Васильчук Джессика Юрьевна**

магистр, Московский государственный университет

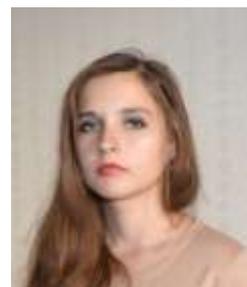
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2012

**Vasil'chuk Jessica Yur'evna**

Master at Moscow State University

119991, Russia, Moscow, ul. Leninskie Gory, 1, of. 2012

✉ [young-krishna@yandex.ru](mailto:young-krishna@yandex.ru)



**Маслаков Алексей Алексеевич**

аспирант, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 1920

**Maslakov Aleksei Alekseevich**

Postgraduate at Lomonosov Moscow State University

119991, Russia, Moscow, ul. Leninskie Gory, 1, of. 1920

✉ [alekseymaslakov@yandex.ru](mailto:alekseymaslakov@yandex.ru)



**Васильчук Алла Константиновна**

доктор географических наук

ведущий научный сотрудник, лаборатория геоэкологии Севера, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

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

**Vasil'chuk Alla Constantinovna**

Doctor of Geography

Leading Research Fellow at the Laboratory of Geoecology of the Northern Territories of Lomonosov Moscow State University

119991, Russia, Moscow, ul. Leninskie Gory, 1

✉ [alla-vasilch@yandex.ru](mailto:alla-vasilch@yandex.ru)



Васильчук Юрий Кириллович

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. 2012

Vasil'chuk Yuriy Kirillovich

Doctor of Geology and Mineralogy

Professor at the Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography of Lomonosov Moscow State University

119991, Russia, Moscow, ul. Leninskie Gory, 1, of. 2012



✉ vasilch\_geo@mail.ru

**Аннотация.** Чукотский полуостров (около 66 ° с.ш., 172 ° з.д.) является самым восточным полуостровом Азии. Его восточный край находится у мыса Дежнева у пос. Уэлен. Он омывается Чукотским морем на севере, Беринговым морем на юге и Беринговым проливом на востоке. Большая часть Чукотского полуострова занята нагорьями высотой до 1000 м. Низменности встречаются, как правило, вблизи крупных лагун. Основные черты района (от г. Анадырь до пос. Лаврентия) представлены слабоволнисто-бугристым рельефом, сформированным флювиальной эрозией и морской абразией мезозойских блоков. Для определений ионного состава повторно-жильного льда был произведен отбор проб льда как по горизонтали с интервалом 10-12 см, так и по вертикали с интервалом 10-15 см. Ионный состав льда определялся методом ионной хроматографии в лаборатории Эколого-геохимического научно-образовательного центра кафедры геохимии ландшафтов и географии почв Географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова на ионном хроматографе «Стайер». Предел детектирования по хлорид-иону составил 0,02 мг/л. Гидрохимический состав снега, вод рек и озер, сегрегационного льда проводились в гидрохимической лаборатории ПНИИИС методом кислотно-щелочного титрования. Повсеместно распространены многолетнемерзлые породы. Несквозные (мощностью до 30-40 м) талики встречаются только в нижнем течении крупных рек и под самыми крупными термокарстовыми озёрами. Температура мёрзлых пород составляет в среднем -10 °С в осевых частях горных хребтов и -4...-6 °С в долинах рек и на побережьях. Мощность мерзлых толщ меняется от 500-700 м в самых высоких частях хребтов до 200-300 м во внутренних долинах.

**Ключевые слова:** сегрегационный лед, засоление, морское побережье, озерная пойма, ионы, минерализация, голоцен, повторно-жильные льды, торфяники, радиоуглеродный возраст

**УДК:** 551.345

**DOI:** 10.7256/2453-8922.2017.2.22980

**Дата направления в редакцию:** 04-06-2017

**Дата публикации:** 24-06-2017

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 17-05-00794 (геохимические расчеты) и №17-05-00793 (обобщение), изотопные исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта №14-27-00083 и бюджетного финансирования Московского университета имени М.В. Ломоносова с использованием масс-спектрометрического оборудования, приобретенного на средства Программы развития МГУ.*

**Abstract.** The Chukchi Peninsula or Chukotka Peninsula at about 66° N 172° W, is the eastmost peninsula of Asia. Its eastern end is at Cape Dezhnev near the village of Uelen. It is bordered by the Chukchi Sea to the north, the Bering Sea to the south, and the Bering Strait to the east. Most of the Chukchi Peninsula is occupied by highlands up to 1000 m a.s.l height. Lowlands are found, as a rule, near large lagoons. The main features of the area (from Anadyr' town to Lavrentiya) are represented by a slightly hilly relief formed by fluvial erosion and marine abrasion of the Mesozoic blocks. For the determination of the ion composition of ice wedges, ice samples were taken both horizontally with an interval of 10-12 cm and vertically with an interval of 10-15 cm. The ion composition of the ice was analyzed by ion chromatography method in the geochemistry laboratory of the Department

of Landscape Geochemistry and Soil Geography of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University on the ion chromatograph "Stayer". The detection limit for chloride ion was 0.02 mg /l. The hydrochemical composition of snow, rivers and lakes water, segregated ice and partly of ice wedges was carried out in the hydrochemical laboratory of PNIIS by acid-base titration. Continuous permafrost occurs everywhere beneath the ground surface. Taliks (up to 30-40 m thick) often occur underneath the largest thermokarst lakes and in the and under the lower reaches of large rivers. The temperature of the permafrost averages  $-10^{\circ}\text{C}$  in the axial parts of the mountain ridges and  $-4 \dots -6^{\circ}\text{C}$  in river valleys and on the coasts. The thickness of the permafrost varies from 500-700 m in the highest parts of the ridges to 200-300 m in the interior valleys.

**Keywords:** peatbogs, segregated ice, salinity, marine coast, lake floodplaine, ions, mineralization, the Holocene, ice wedge, radiocarbon age

## Введение

Химический состав повторно-жильных льдов лишь отчасти отражает особенности гидрохимической обстановки времени их образования так как образование повторно-жильного льда происходит в морозобойных трещинах, чаще всего в результате их заполнения талой снеговой водой. Однако в отдельных случаях в трещины может попадать и вода иного генезиса – озерная, речная и даже морская. Это происходит тогда, когда к весеннему половодью трещины не полностью еще закрыты, а также редких случаях, когда трещины продолжают под неглубокими водоемами. Выявлению этих ситуаций в основном и способствует изучение гидрохимического состава ледяных жил.

## Районы исследований и методы измерений

Чукотский полуостров расположен на крайнем северо-востоке Евразии. Чукотка омывается Чукотским морем Северного Ледовитого океана с севера и Беринговым морем Тихого океана с юга. Большая часть Чукотского полуострова занята нагорьями высотой до 1000 м. Низменности встречаются, как правило, вблизи крупных лагун.

Основные черты района (от Анадыря до Лаврентия) представлены слабоволнисто-бугристым рельефом, сформированным преимущественно флювиальной эрозией и морской абразией мезозойских блоков [\[1\]](#).

Климат полуострова суровый, на побережьях – морской, во внутренних районах – резко континентальный. Зима длится до 10 месяцев в году. Средние температуры января от  $-15$  до  $-40^{\circ}\text{C}$ , июля – от  $+5$  до  $+10^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовое количество осадков 200–500 мм.

Повсеместно распространены многолетнемерзлые породы. Несквозные (мощностью до 30-40 м) талики встречаются только в нижнем течении крупных рек и под самыми крупными термокарстовыми озёрами. Температура мёрзлых пород составляет в среднем  $-10^{\circ}\text{C}$  в осевых частях горных хребтов и  $-4\dots-6^{\circ}\text{C}$  в долинах рек и на побережьях. Мощность мерзлых толщ меняется от 500–700 м в самых высоких частях хребтов до 200–300 м во внутренних долинах.

Голоценовые повторно-жильные льды практически повсеместно распространены, особенно в северных и восточных районах [\[2\]](#). Детально исследованы голоценовые повторно-жильные льды (ПЖЛ) в трех районах северо-востока Чукотского п-ова: а) в окрестностях оз.Коолень; б) близ пос. Лаврентия; в) близ с. Лорино (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения изученных голоценовых полигональных массивов с повторно-жильными льдами на северо-востоке Чукотского полуострова

**Голоценовые ПЖЛ на оз. Коолень.** Олиготрофное озеро Коолень расположено в отрогах хребта Айнан на востоке Чукотского полуострова, в 13 км от побережья Чукотского моря. На южном берегу оз.Коолень, в 1,2 км от истока реки Кооленьваам (65°59'04" с.ш., 170°58'47" з.д.), на озерной пойме был заложен шурф глубиной 2 м. В шурфе вскрыты: торф рыже-коричневый, слабоопесчаненный, талый (глубина 0-0,4 м), под ним залегает торф коричневый, мерзлый, среднелдыстый, криотекстура сетчатая (0,4-0,7 м), ниже – супесь серая (0,7-2 м). В толще залегает повторно-жильный лед с современным ростком (рис. 2). Лед жилы прозрачный, вертикально-слоистый, состоит из элементарных жилок шириной 0,4-0,6 см с воздушными пузырьками, вертикально ориентированными.



Рис. 2. Голоценовые повторно-жильные льды на побережье оз.Коолень. Фото Ю.Васильчука

$^{14}\text{C}$  датирование угля из культурного слоя из отложений поймы в районе древней стоянки охотников в восточной части котловины оз.Коолень [3] позволило определить примерный период формирования повторно-жильных льдов в этом районе – от 6 до 2 тыс. лет назад.

**Голоценовые ПЖЛ у пос. Лаврентия.** В 5 км к югу от пос. Лаврентия (65°35'02" с.ш., 170°59'20" з.д.) на морском побережье (высота 40 м над уровнем моря) в заросшем термоцирке описана ледяная жила (рис. 3).



Рис. 3. Ледяная жила в районе пос. Лаврентия. Фото А.Маслакова

Жила залегает в сильнольдистых суглинках с включениями гнезд и линз торфа мощностью 0,2 м, гальки и валунов. Криотекстура сетчатая, с линзами льда мощностью 2-3 см. Голова жилы залегает под сезонно-талым слоем (СТС) на глубине 50-80 см от поверхности. Вертикальная мощность обнажившегося фрагмента жилы 80-90 см, ширина 3,5 метра. Жила вытаяла снизу, на что указывает глубокая каверна под ней. Лёд жилы в основном чистый, иногда мутный серый, вертикально-слоистый, с вертикально ориентированными пузырьками воздуха длиной до 15 мм.

**Голоценовые ПЖЛ у с. Лорино.** Село Лорино расположено на берегу Мечигменского залива Берингова моря, в 40,5 км к западу от пос. Лаврентия (65°30'00" с.ш., 171°43'00" з.д.). В обнажении останца морской террасы высотой до 25 м вскрыт голоценовый торфяник видимой мощностью до 3 м, подстилаемый серой супесью с включениями гальки.

В 2015 г. были исследованы 3 фрагмента жил (рис. 4, а-в). Высота жил варьирует от 1 до 3 м, ширина – от 1,5 до 3,5 м. В следующем году исследовано соседнее обнажение. На глубине 0,5 м обнаружены ледяные жилы шириной в верхней части до 1,7-2 м. Одна из жил была вскрыта нефронтально и имела ширину в верхней части около 6 м и высоту более 3 м (рис. 4, г). Лёд жилы чистый, пузырчатый, с вертикальной структурой за счет пузырьков воздуха.

Из вмещающего жилы торфяника выполнены радиоуглеродные определения. По торфу, вмещающему жилу №1 (см. рис. 4, а), с глубины 1,2 м получена  $^{14}\text{C}$  датировка  $11230 \pm 100$  лет (Ле-11262); торф, вмещающий жилу №2 (см. рис. 4, б), на глубине 0,9 м датирован в  $9550 \pm 170$  лет (Ле-11260), на глубине 1,5 м –  $8800 \pm 80$  (Ле-11259). Полученные датировки позволяют установить, что период наиболее активного роста торфяника и, скорее всего, интенсивного роста жил в нем приходится на начало голоцена, 11-8 тыс. лет назад.

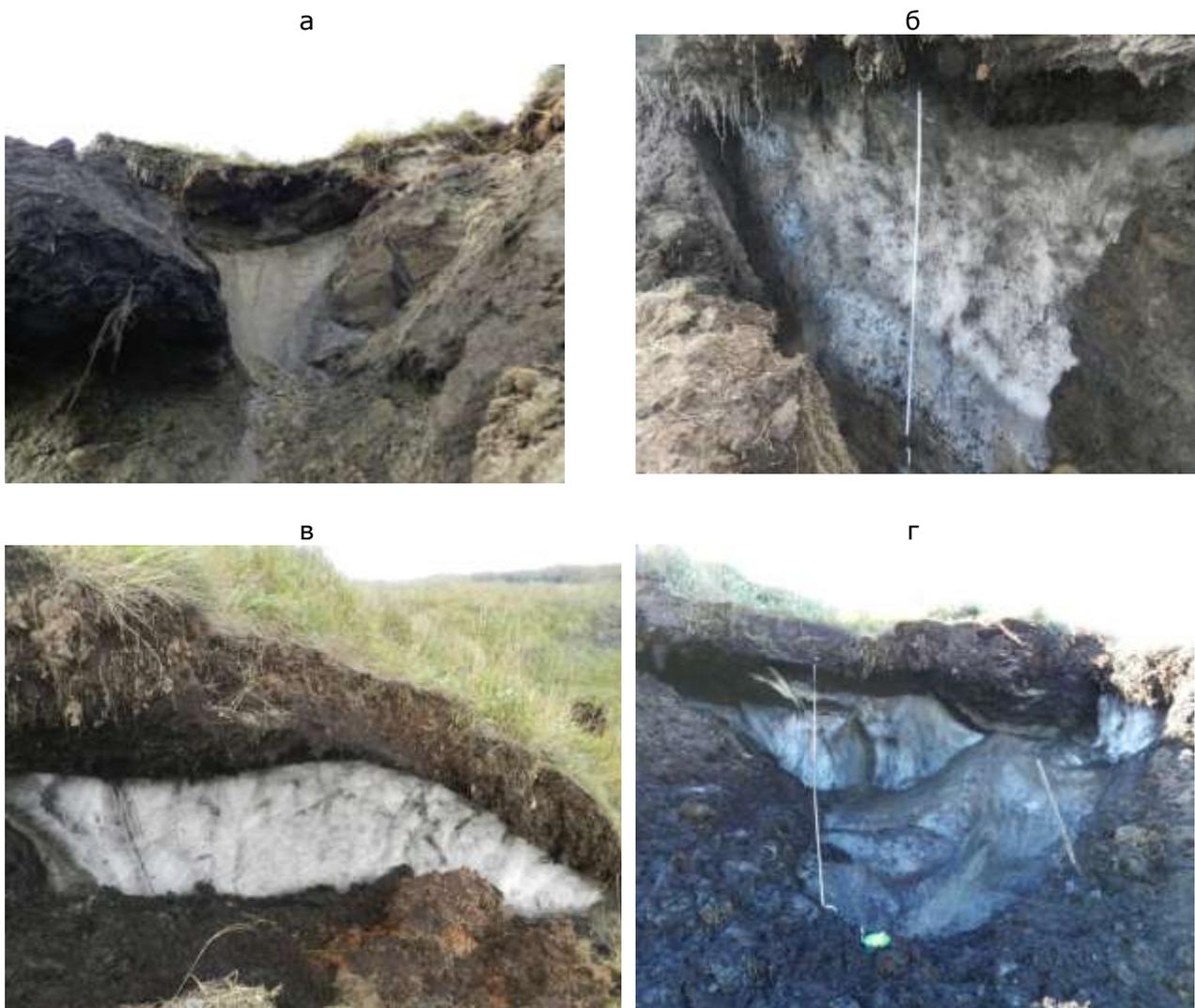


Рис. 4. Повторно-жильные льды в районе с. Лорино, исследованные в 2015 (а-в) и 2016 (г) гг. Фото А.Маслакова

Для определений ионного состава повторно-жильного льда был произведен отбор проб льда как по горизонтали с интервалом 10-12 см, так и по вертикали с интервалом 10-15 см. Ионный состав льда определялся методом ионной хроматографии в лаборатории геохимии ландшафтов кафедры геохимии ландшафтов и географии почв Географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова на ионном хроматографе «Стайер». Предел детектирования по хлорид-иону составил 0,02 мг/л. Гидрохимический состав снега, вод рек и озер, сегрегационного льда проводились в гидрохимической лаборатории ПНИИИС методом кислотно-щелочного титрования.

### Результаты и обсуждение

Определение минерализации и содержания основных ионов в ледяной жиле на пойме оз.Коолень показало, что в составе анионов преобладает  $\text{Cl}^-$ , в составе катионов –  $\text{Na}^+$  (табл. 1, рис. 5), что может свидетельствовать об импульверизации солей с близ расположенных морских акваторий Берингова пролива и Чукотского моря. Минерализация льда не более 35 мг/л, рН нейтральный. По составу лед жилы близок к воде оз. Коолень (табл. 2).

Таблица 1. Минерализация (мг/л) и содержание основных ионов (мг-экв/л) во льду жилы в районе оз.Коолень (среднее по 6 образцам)

| Минерализация, мг/л | Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | pH |
|---------------------|---------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--|----|
| 35                  | 0.61                            | 0.17             | 0.45             | 0.56            | 0.48                          | 0.43                          | 1.17   | 6  |

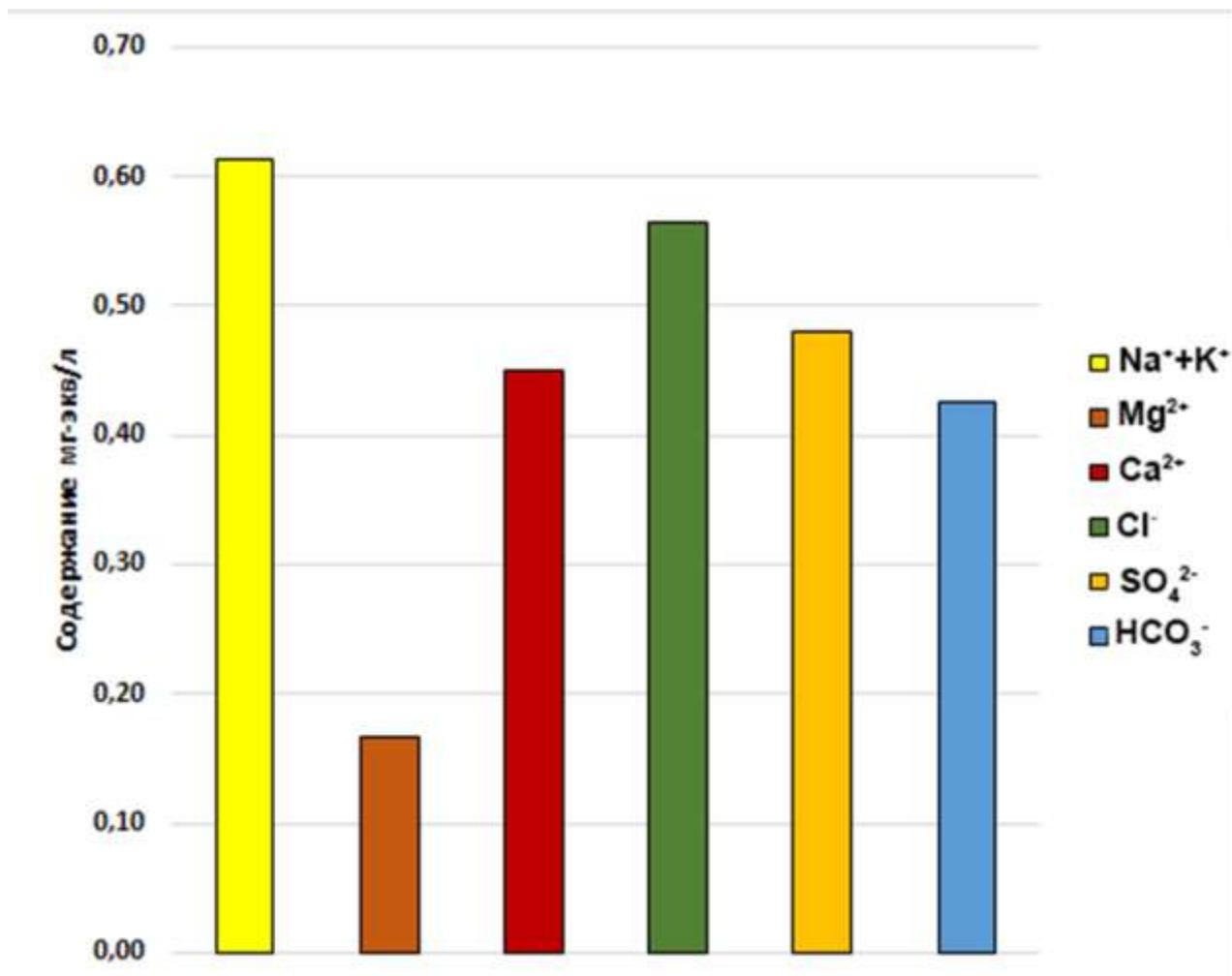


Рис. 5. Содержание основных ионов во льду жилы на пойме оз.Коолень

Минерализация льда жилы в районе пос. Лаврентия варьирует от 33 до 111 мг/л, pH изменяется в диапазоне от кислых (4.8) до нейтральных значений (6.4). Максимальные значения минерализации (84 и 111 мг/л), вероятно, свидетельствуют об участии речных вод в формировании жильного льда во время высокого половодья. В составе ионов доминируют гидрокарбонаты и кальций (табл. 3, рис. 6). Минерализация небольшого ручья в районе пос.Лаврентия составляет в среднем 120 мг/л, в составе ионов также преобладают гидрокарбонаты и кальций; соотношение Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> во льду жилы варьирует от 0.38 до 2.29, что близко к значениям в снеге и речной воде в этом районе (см. табл. 2), что говорит об их континентальном происхождении и минимальном влиянии воздушных масс со стороны моря. Концентрация иона NO<sub>3</sub><sup>-</sup> во льду жилы варьировала от 0.05 до 0.25 мг-экв/л, составляя в среднем 0.08 мг-экв/л, что говорит об участии в формировании жилы вод, содержащих органические вещества, т.е. о возможном поступлении воды из заболоченной полигональной ванны.

Таблица 2. Минерализация (М., мг/л) и содержание основных ионов (мг-экв/л) в снеге, поверхностных водах и морской воде в районе пос. Лаврентия и оз. Коолень

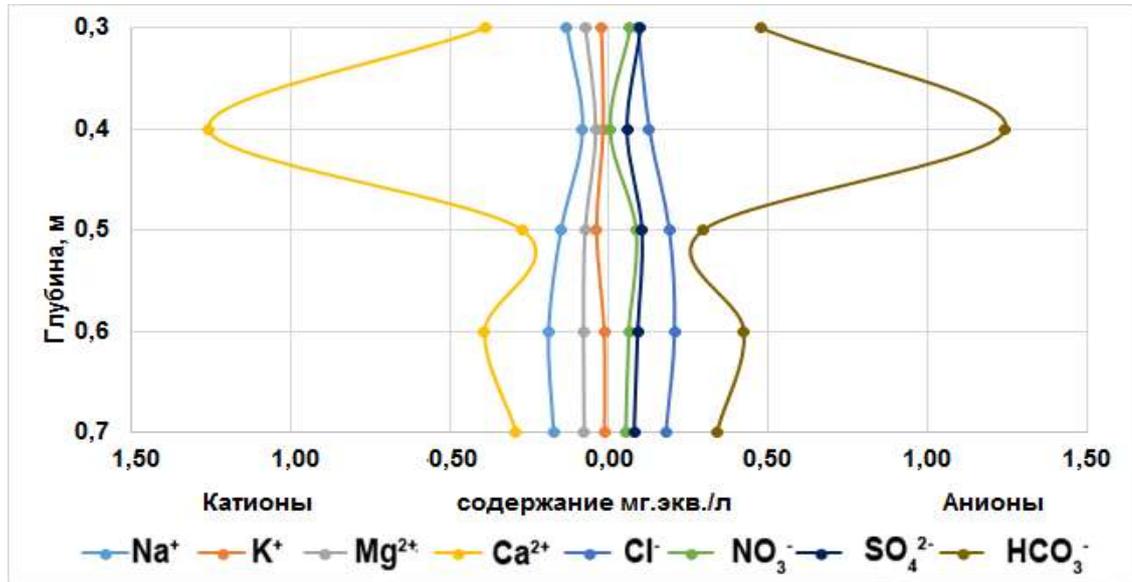
| № образца             | Тип воды                                   | М., мг/л  | Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | F <sup>-</sup> | pH      | Cl <sup>-</sup> /<br>SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |
|-----------------------|--|-----------|----------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|---------|--|
| <i>оз. Коолень</i>    |  |           |                                  |                  |                  |                 |                               |                               |                |         |  |
| 343-<br>YuV/14        | Вода оз.Ко-<br>олень у<br>бугра<br>пучения | 38        | 0.44                             | 0.10             | 0.10             | 0.30            | 0.19                          | 0.15                          | 0.00<br>4      | 5.<br>8 | 1.60   |
| 343-<br>YuV/41        |  | 60        | 0.70                             | 0.15             | 0.15             | 0.70            | 0.15                          | 0.15                          | 0.00<br>7      | 5.<br>7 | 4.55   |
| 343-<br>YuV/18        | Вода оз.Ко-<br>олень                       | 50        | 0.47                             | 0.15             | 0.20             | 0.32            | 0.20                          | 0.30                          | 0.00<br>2      | 6.<br>8 | 1.63   |
| <i>пос. Лаврентия</i> |  |           |                                  |                  |                  |                 |                               |                               |                |         |  |
| 342-<br>YuV/2         | Снег из<br>снежн<br>ика                    | 40        | 0.18                             | 0.20             | 0.20             | 0.20            | 0.14                          | 0.25                          | -              | 6.<br>2 | 1.46   |
| 342-<br>YuV/5         |  | 36        | 0.10                             | 0.41             | 0.10             | 0.20            | 0.15                          | 0.25                          | -              | 5.<br>5 | 1.30   |
| 342-<br>YuV/1         | Вода<br>ручья                              | 120       | 0.41                             | 0.41             | 1.30             | 0.56            | 0.36                          | 1.20                          | -              | 7.<br>3 | 1.56   |
| 342-<br>YuV/3         | Вода<br>залива                             | 3280<br>0 | 438.<br>5                        | 101.<br>3        | 20.0<br>4        | 503.<br>5       | 53.3<br>2                     | 3.00                          | 0.00<br>3      | 7.<br>5 | 9.44   |

Таблица 3. Минерализация (мг/л) и содержание основных ионов (мг-экв/л) во льду жилы в районе пос. Лаврентия

| № образца  | Глубина отбора от поверхности/расстояние от левого края жилы, м | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Минерализация, мг/л | Cl <sup>-</sup> /<br>SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | pH   |
|--|---|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|--|------|
| <i>Отбор вдоль горизонтальной оси на глубине 0.15 м от кровли жилы</i> |   |                 |                |                  |                  |                 |                               |                               |                     |  |      |
| 16-М-01  | 0.05  | 0.12            | 0.02           | 0.12             | 0.55             | 0.16            | 0.42                          | 0.44                          | 84.7                | 0.38   | 4.80 |
| 16-М-04  | 0.42  | 0.20            | 0.03           | 0.05             | 0.18             | 0.10            | 0.10                          | 0.31                          | 41.5                | 1.04   | 5.32 |
| 16-М-06  | 0.68  | 0.08            | 0.02           | 0.06             | 0.30             | 0.08            | 0.06                          | 0.34                          | 40                  | 0.50   | 6.43 |
| 16-М-08  | 0.92  | 0.09            | 0.03           | 0.08             | 0.44             | 0.12            | 0.10                          | 0.46                          | 57.3                | 1.32   | 5.60 |
| 16-М-09  | 1.04  | 0.09            | 0.03           | 0.06             | 0.28             | 0.09            | 0.06                          | 0.34                          | 40.3                | 1.21   | -    |
| 16-М-11  | 1.3   | 0.10            | 0.02           | 0.04             | 0.22             | 0.13            | 0.06                          | 0.22                          | 33.3                | 1.52   | 5.40 |
| 16-М-14  | 1.66  | 0.11            | 0.04           | 0.07             | 0.28             | 0.12            | 0.10                          | 0.34                          | 44.2                | 2.29   | 5.44 |
| 16-М-17  | 2.02  | 0.10            | 0.03           | 0.09             | 0.31             | 0.09            | 0.07                          | 0.40                          | 45                  | 1.20   | -    |
| 16-М-21  | 2.56  | 0.09            | 0.02           | 0.10             | 0.42             | 0.12            | 0.13                          | 0.45                          | 53.2                | 1.36   | 5.40 |
| 16-М-24  | 2.92  | 0.07            | 0.02           | 0.06             | 0.40             | 0.08            | 0.07                          | 0.44                          | 48.1                | 0.93   | 5.67 |
| 16-М-26  | 3.16  | 0.10            | 0.01           | 0.05             | 0.25             | 0.10            | 0.07                          | 0.28                          | 35.9                | 1.08   | -    |
| 16-М-29  | 3.5   | 0.07            | 0.02           | 0.08             | 0.30             | 0.08            | 0.19                          | 0.29                          | 45.2                | 1.42   | 5.16 |

| Отбор вдоль вертикальной оси в центре жилы |     |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |
|--|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| 16-M-30                                    | 0.3 | 0.13 | 0.02 | 0.07 | 0.39 | 0.09 | 0.10 | 0.48 | 54    | 0.91 | -    |
| 16-M-31                                    | 0.4 | 0.08 | 0.02 | 0.04 | 1.26 | 0.13 | 0.06 | 1.25 | 111.7 | 2.25 | -    |
| 16-M-32                                    | 0.5 | 0.15 | 0.04 | 0.08 | 0.27 | 0.19 | 0.10 | 0.30 | 46.3  | 1.83 | 5.26 |
| 16-M-33                                    | 0.6 | 0.19 | 0.02 | 0.08 | 0.39 | 0.21 | 0.09 | 0.42 | 55.1  | 2.29 | -    |
| 16-M-34                                    | 0.7 | 0.17 | 0.01 | 0.08 | 0.29 | 0.18 | 0.08 | 0.34 | 45.3  | 2.27 | -    |

а



б

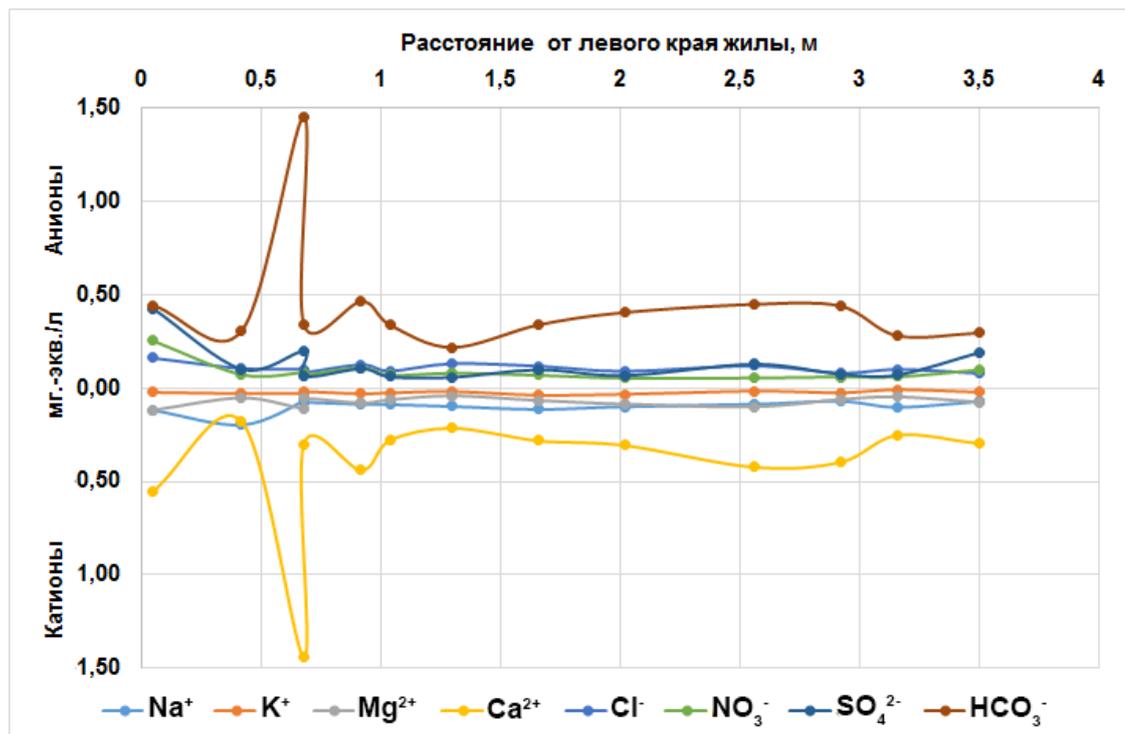


Рис. 6. Содержание основных ионов во льду жилы в районе пос. Лаврентия: а – в центральной части жилы по вертикали, б – в верхней части жилы по горизонтали

Минерализация льда жил в районе с. Лорино в целом не более 90 мг/л, в составе ионов преобладают  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ . Во льду жилы №1 (рис. 4, а) в с. Лорино в вертикальном профиле наблюдается контрастное распределение хлорид-иона с максимумами на глубине 1.8 и 3.1 м и минимумами на глубине 1.2 и 2.5 м (рис. 7, а, табл. 4). В то же время распределение гидрокарбонат-иона имеет максимум на глубине 2.5 м, что может указывать на некоторую стадийность при формировании жилы. Содержание ионов натрия в профиле жилы возрастает с глубиной. Максимальное значение содержания ионов кальция совпадает по глубине с максимумом содержания гидрокарбонат-иона. Можно предположить, что лед на глубине 3.1 м формировался из атмосферных осадков при участии морских аэрозолей с Берингова моря, что обуславливает хлоридно-натриевый состав жильного льда и минерализацию 47 мг/л.

Таблица 4. Минерализация (мг/л) и содержание основных ионов (мг-экв/л) во льду жил в районе с. Лорино

| № образца   | Глубина отбора от поверхности/расстояние от левого края жилы, м | $\text{Na}^+$ | $\text{K}^+$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ | Минерализация, мг/л |
|---|---|---------------|--------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|------------------|--------------------------------|---------------------|
| <i>ПЖЛ №1. Отбор вдоль вертикальной оси в центре жилы</i>               |   |               |              |                  |                  |               |                    |                  |                                |                     |
| 15-Л-06   | 1.2   | 0.14          | 0.02         | 0.04             | 0.04             | 0.06          | 0.01               | 0.19             | 9.87                           | 19.07               |
| 15-Л-05   | 1.5   | 0.24          | 0.04         | 0.09             | 0.09             | 0.37          | 0.08               | 0.01             | 4.73                           | 27.40               |
| 15-Л-04   | 1.8   | 0.29          | 0.06         | 0.06             | 0.45             | 0.43          | 0.05               | 0.38             | 8.92                           | 58.97               |
| 15-Л-03   | 2.5   | 0.34          | 0.07         | 0.12             | 0.62             | 0.18          | 0.02               | 0.94             | 7.25                           | 89.02               |
| 15-Л-01   | 3.1   | 0.38          | 0.03         | 0.20             | 0.13             | 0.50          | 0.01               | 0.23             | 34.94                          | 47.43               |
| <i>ПЖЛ №1. Отбор вдоль горизонтального профиля на глубине 0.6-0.7 м</i> |   |               |              |                  |                  |               |                    |                  |                                |                     |
| 15-Л-07   | 0.2   | 0.78          | 0.09         | 0.06             | 0.10             | 1.11          | 0.03               | 0.00             | 33.17                          | 65.08               |
| 15-Л-09   | 0.8   | 0.60          | 0.08         | 0.18             | 0.12             | 0.67          | 0.12               | 0.19             | 5.83                           | 62.41               |
| 15-Л-10   | 1.1   | 0.19          | 0.03         | 0.04             | 0.29             | 0.26          | 0.03               | 0.27             | 8.30                           | 39.20               |
| 15-Л-11   | 1.4   | 0.19          | 0.02         | 0.05             | 0.01             | 0.24          | 0.02               | 0.00             | 11.12                          | 15.58               |
| 15-Л-12   | 1.7   | 0.11          | 0.02         | 0.01             | 0.01             | 0.05          | 0.02               | 0.07             | 2.27                           | 10.97               |
| <i>ПЖЛ №2. Отбор вдоль вертикальной оси в центре жилы</i>               |   |               |              |                  |                  |               |                    |                  |                                |                     |
| 15-Л-19   | 0.6   | 0.15          | 0.02         | 0.01             | 0.01             | 0.04          | 0.00               | 0.14             | 14.24                          | 14.84               |
| 15-Л-20   | 0.9   | 0.21          | 0.03         | 0.05             | 0.01             | 0.30          | 0.03               | 0.00             | 12.02                          | 18.74               |
| 15-Л-22   | 1.5   | 0.33          | 0.05         | 0.06             | 0.02             | 0.41          | 0.02               | 0.03             | 20.69                          | 27.54               |
| <i>ПЖЛ №2. Отбор вдоль горизонтального профиля на глубине 0.2-0.3 м</i> |   |               |              |                  |                  |               |                    |                  |                                |                     |
| 15-Л-13   | 0.1   | 0.19          | 0.04         | 0.07             | 0.05             | 0.35          | 0.03               | 0.00             | 11.46                          | 21.81               |
| 15-Л-15   | 0.7   | 0.11          | 0.02         | 0.04             | 0.03             | 0.07          | 0.01               | 0.12             | 6.79                           | 14.71               |
| 15-Л-16   | 1.0   | 0.10          | 0.01         | 0.03             | 0.12             | 0.12          | 0.01               | 0.13             | 12.98                          | 18.20               |
| 15-Л-17   | 1.3   | 0.17          | 0.03         | 0.04             | 0.07             | 0.18          | 0.03               | 0.10             | 6.34                           | 20.92               |
| 15-Л-18   | 1.7   | 0.15          | 0.03         | 0.02             | 0.03             | 0.09          | 0.01               | 0.13             | 12.25                          | 16.62               |
| <i>ПЖЛ №3. Отбор вдоль вертикальной оси в центре жилы</i>               |   |               |              |                  |                  |               |                    |                  |                                |                     |
| 15-Л-33   | 1.5   | 0.44          | 0.13         | 0.09             | 0.14             | 0.51          | 0.06               | 0.23             | 8.63                           | 54.42               |
| 15-Л-34   | 2.0   | 0.25          | 0.03         | 0.06             | 0.01             | 0.32          | 0.02               | 0.01             | 13.64                          | 20.86               |
| <i>ПЖЛ №3. Отбор вдоль горизонтального профиля на глубине 0.3 м</i>     |   |               |              |                  |                  |               |                    |                  |                                |                     |
| 15-Л-25   | 0.2   | 0.23          | 0.02         | 0.04             | 0.02             | 0.25          | 0.02               | 0.04             | 10.32                          | 19.06               |
| 15-Л-27   | 1.2   | 0.17          | 0.02         | 0.03             | 0.40             | 0.09          | 0.00               | 0.53             | 22.17                          | 48.75               |
| 15-Л-28   | 1.6   | 0.17          | 0.02         | 0.05             | 0.40             | 0.23          | 0.01               | 0.40             | 18.14                          | 46.68               |

|  |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 15-Л-29  | 2.2  | 0.18 | 0.05 | 0.06 | 0.01 | 0.08 | 0.00 | 0.22 | 26.32 | 23.20 |
| 15-Л-30  | 2.7  | 0.23 | 0.08 | 0.08 | 0.10 | 0.48 | 0.03 | 0.0  | 15.85 | 28.25 |
| 15-Л-31  | 3.2  | 0.18 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 0.20 | 0.02 | 0.04 | 11.44 | 15.89 |
| <i>ПЖЛ №4. Отбор вдоль горизонтальной оси в верхнем правом фрагменте на глубине 0.2 м (от кровли жилы)</i> |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
| 16-М-41  | 0.1  | 0.13 | 0.03 | 0.08 | 0.22 | 0.29 | 0.04 | 0.13 | 6.76  | 29.59 |
| 16-М-43  | 0.5  | 0.13 | 0.02 | 0.05 | 0.18 | 0.15 | 0.05 | 0.18 | 2.91  | 26.60 |
| <i>ПЖЛ №4. Отбор вдоль горизонтальной оси в правой части жилы на глубине 0.3 м (от кровли жилы)</i>        |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
| 16-М-46  | 0.15 | 0.22 | 0.03 | 0.05 | 0.19 | 0.24 | 0.07 | 0.19 | 3.47  | 34.45 |
| 16-М-48  | 0.75 | 0.22 | 0.02 | 0.05 | 0.11 | 0.26 | 0.11 | 0.04 | 2.43  | 25.43 |
| <i>ПЖЛ №4. Отбор вдоль вертикальной оси в центре жилы</i>  |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
| 16-М-51  | 1.6  | 0.22 | 0.02 | 0.05 | 0.11 | 0.33 | 0.04 | 0.03 | 8.45  | 24.36 |
| 16-М-52  | 2.0  | 0.42 | 0.03 | 0.10 | 0.24 | 0.49 | 0.09 | 0.20 | 5.17  | 50.82 |
| 16-М-53  | 2.4  | 0.36 | 0.04 | 0.08 | 0.25 | 0.39 | 0.07 | 0.28 | 5.59  | 50.02 |
| 16-М-54  | 2.8  | 0.22 | 0.03 | 0.06 | 0.11 | 0.36 | 0.06 | 0.0  | 6.23  | 24.31 |
| 16-М-55  | 3.2  | 0.36 | 0.03 | 0.13 | 2.40 | 0.60 | 0.12 | 2.22 | 5.19  | 221.4 |
| <i>Современный жильный росток</i>  |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
| 16-М-39  | 0.2  | 0.20 | 0.03 | 0.10 | 0.39 | 0.41 | 0.20 | 0.11 | 2.02  | 45.82 |
| 16-М-40  | 0.3  | 0.26 | 0.03 | 0.09 | 0.19 | 0.39 | 0.07 | 0.11 | 5.53  | 36.06 |

Выше, на глубине 2.5 м, залегает лед гидрокарбонатно-кальциевого состава с еще более высокой минерализацией – 89 мг/л, что может указывать на участие в формировании жилы гидрокарбонатно-кальциевых поверхностных вод. На глубине 1.8 м при минерализации 58 мг/л в составе ионов доминируют хлориды, гидрокарбонаты и кальций, что может говорить о совместном влиянии морских солей и гидрокарбонатно-кальциевых поверхностных вод, либо осадков, принесенных с континента. На глубине 1.5 м состав льда хлоридно-натриевый, что указывает на привнос с осадками морских аэрозолей. На глубине 1.2 м состав солей снова гидрокарбонатно-хлоридно-кальциевый при пониженной минерализации 19 мг/л.

При горизонтальном опробовании льда жилы (рис. 7, б) выявлено преобладание хлоридов натрия в составе ионов, только в центральной части жилы отмечен гидрокарбонатно-кальциевый состав льда. Минерализация льда снижается от левого к правому краю жилы от 65 до 10 мг/л.

Лед жилы №2 (см. рис. 4, б) характеризуется значениями минерализации не более 28 мг/л, в верхней части жилы в составе ионов преобладают  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  (см. табл. 4, рис. 8). В центральной же части жилы лед имеет гидрокарбонатно-натриевый состав на глубине 0.6 м, что, вероятно, связано с формированием этого льда преимущественно из атмосферных осадков, при влиянии морских аэрозолей, поскольку соотношение хлоридов и сульфатов в анионном составе варьирует от 12 до 20. Общая минерализация увеличивается с глубиной от 14 до 27 мг/л. Также с глубиной увеличивается и концентрация ионов хлора в 10 раз и натрия в 2 раза. Концентрация гидрокарбонат-ионов с глубиной уменьшается от 0.14 до 0.03 мг-экв/л. При опробовании льда вдоль горизонтальной оси жилы отмечено преобладание гидрокарбонатов кальция и более низкая минерализация в центральной части жилы, что позволяет предположить, что эта часть жилы и была центром льдообразования, а соли подтягивались к периферии, где сформировался лед хлоридно-натриевого состава. Концентрация других ионов по вертикальному профилю остается стабильной.

Выше, на глубине 2.5 м, залегает лед гидрокарбонатно-кальциевого состава с еще более высокой минерализацией – 89 мг/л, что может указывать на участие в формировании жилы гидрокарбонатно-кальциевых поверхностных вод. На глубине 1.8 м при минерализации 58 мг/л в составе ионов доминируют хлориды, гидрокарбонаты и кальций, что может говорить о совместном влиянии морских солей и гидрокарбонатно-кальциевых поверхностных вод, либо осадков, принесенных с континента. На глубине 1.5 м состав льда хлоридно-натриевый, что указывает на привнос с осадками морских аэрозолей. На глубине 1.2 м состав солей снова гидрокарбонатно-хлоридно-кальциевый при пониженной минерализации 19 мг/л.

При горизонтальном опробовании льда жилы (рис. 7. б) выявлено преобладание хлоридов натрия в составе ионов, только в центральной части жилы отмечен гидрокарбонатно-кальциевый состав льда. Минерализация льда снижается от левого к правому краю жилы от 65 до 10 мг/л.

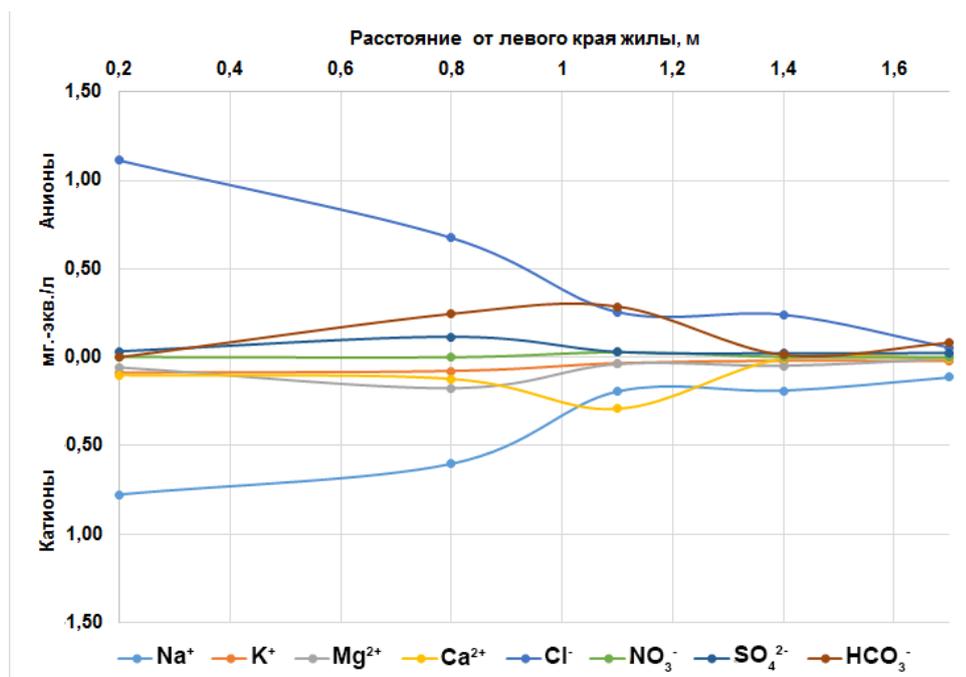
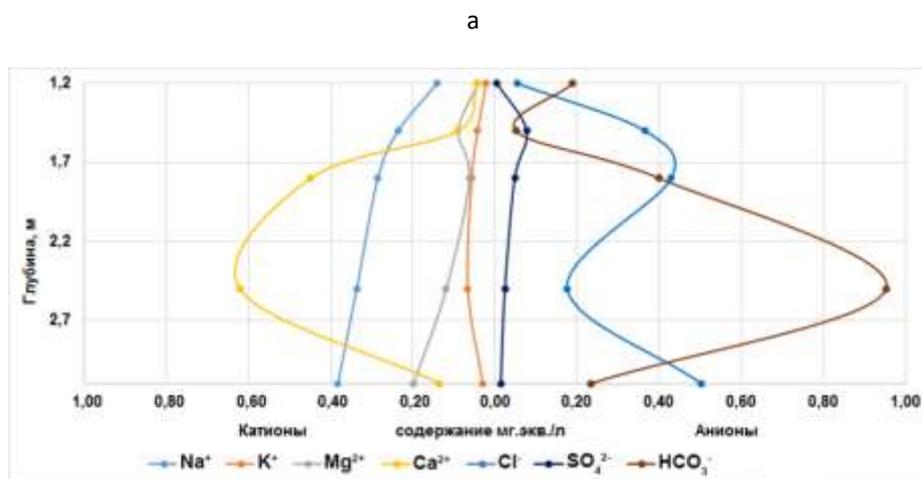
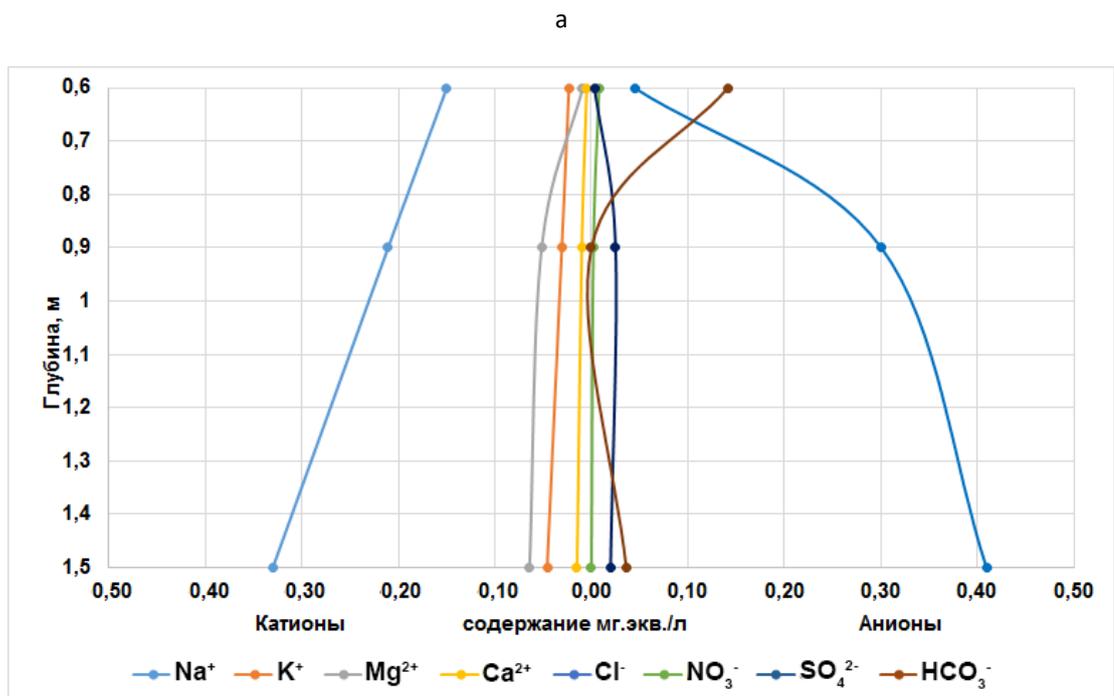


Рис. 7. Содержание основных ионов во льду жилы №1 в районе с. Лорино: а – в центральной части жилы по вертикали, б – в верхней части жилы по горизонтали



б

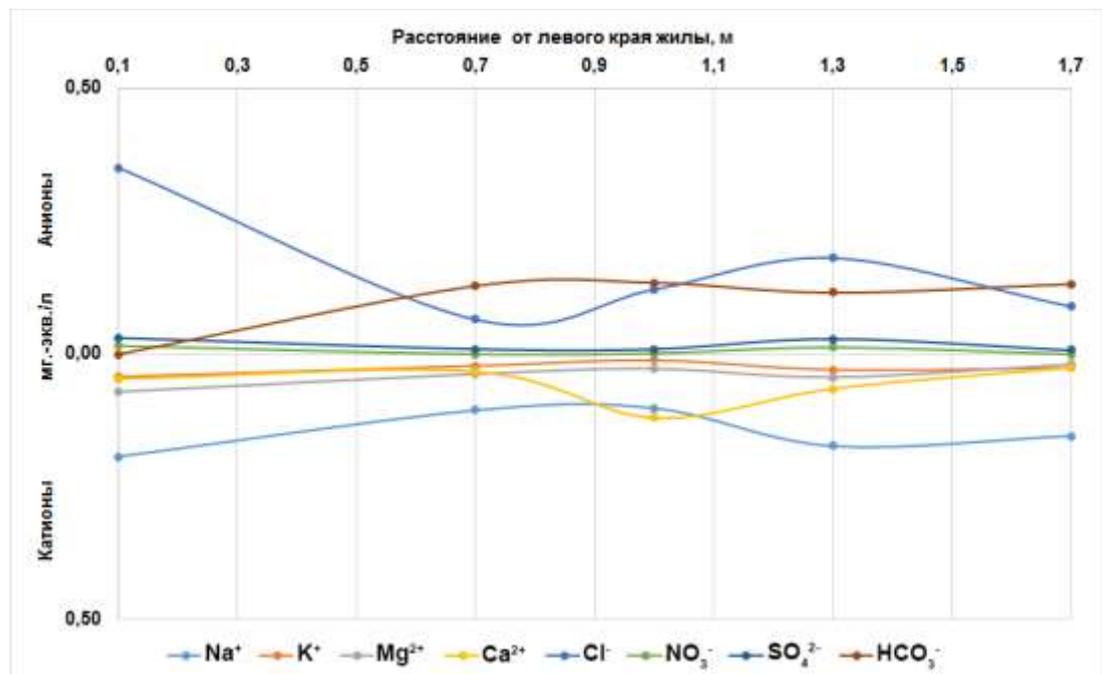
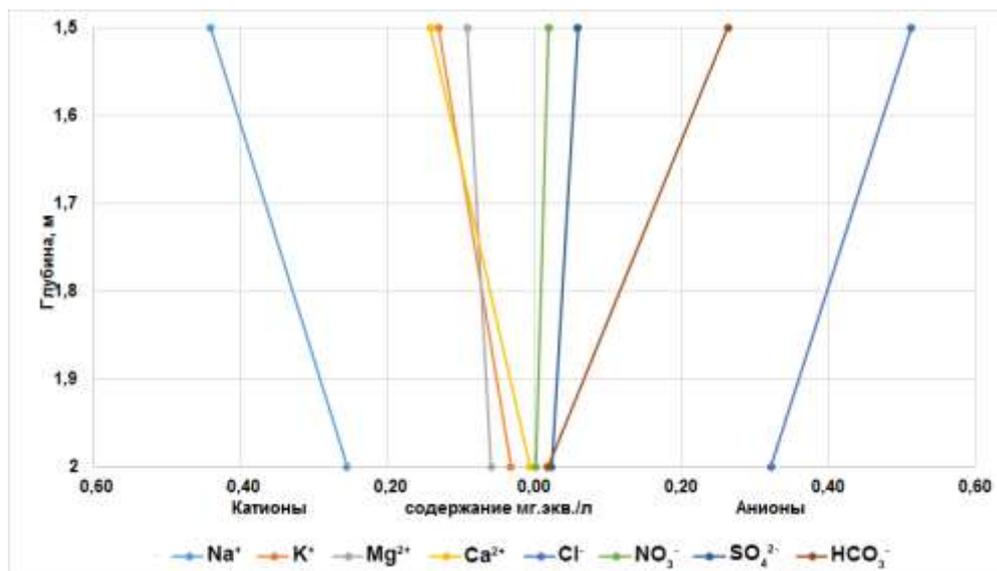


Рис. 8. Содержание основных ионов во льду жи́лы №2 в районе с. Лорино: а – в центральной части жи́лы по вертикали, б – в верхней части жи́лы по горизонтали

Лед жи́лы №3 (см. рис. 4, в) также оказался ультрапресным с минерализацией от 15 до 54 мг/л, в составе ионов преобладали  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , в краевой части жи́лы лед характеризовался хлоридно-натриевым составом (см. табл. 3, рис. 9).

а



б

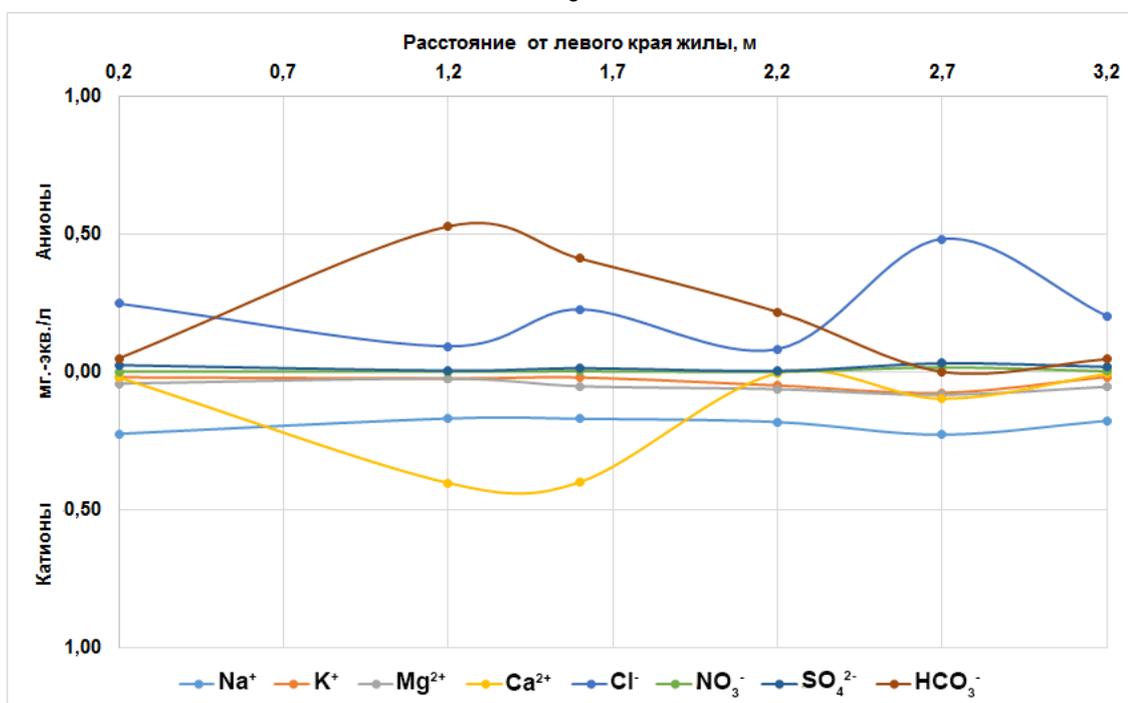


Рис. 9. Содержание основных ионов во льду жилы №3 в районе с. Лорино: а – в центральной части жилы по вертикали, б – в верхней части жилы по горизонтали

Лед жилы №4 (см. рис. 4, г) в целом характеризовался значениями минерализации от 24 до 50 мг/л, кроме нижней части жилы, где на глубине 3.2 м получено значение минерализации 225 мг/л. По вертикальному профилю отмечено преобладание ионов Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> и Ca<sup>2+</sup>. При горизонтальном опробовании не выявлено вариаций значений концентраций ионов: содержание Na<sup>+</sup> составило 0.13 мг-экв/л, Cl<sup>-</sup> – около 0.2 мг-экв/л, Ca<sup>2+</sup> – около 0.2 мг-экв/л. Вдоль вертикального профиля отмечено возрастание концентраций этих ионов с глубиной, наряду с возрастанием минерализации: Na<sup>+</sup> – от 0.22 до 0.36 мг-экв/л, Cl<sup>-</sup> – от 0.33 до 0.6 мг-экв/л и Ca<sup>2+</sup> – от 0.11 до 2.4 мг-экв/л. Определение концентрации иона NO<sub>3</sub><sup>-</sup> показало, что в большинстве образцов жильного льда она ниже предела обнаружения. Однако в некоторых фрагментах льда отмечена

концентрация нитратов от 0.01 до 0.25 мг-экв/л. Увеличение содержания нитратов в повторно-жильных льдах приурочено, в основном, к увеличению содержания хлоридов натрия, и может быть связано с затеканием в трещины засоленных вод сезонно-талого слоя с повышенным содержанием органических веществ. Лед современного жильного ростка в районе с. Лорино ультрапресный, с минерализацией не более 40-50 мг/л, в составе ионов преобладают  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$  (см. табл. 3, рис. 10).

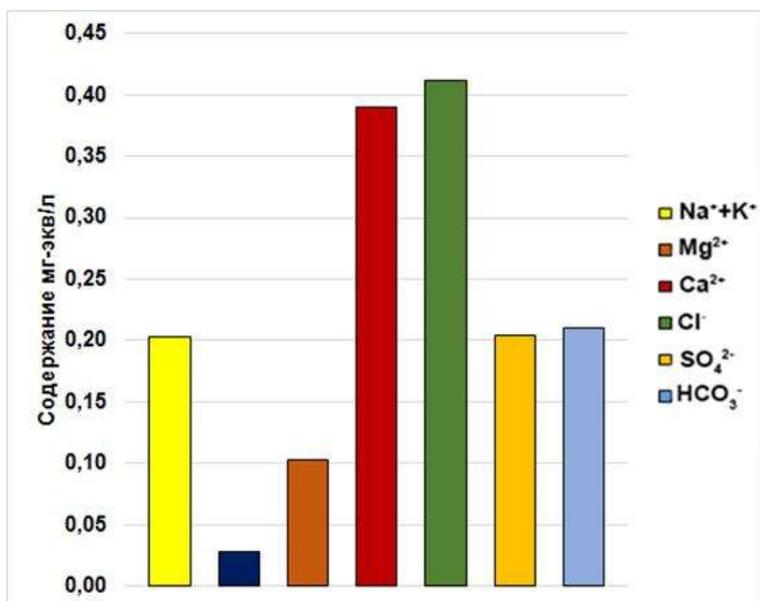


Рис. 10. Содержание основных ионов во льду современного ростка в районе с. Лорино

В составе ионов в жилах преобладают  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , выявлены фрагменты льда с высокими значениями минерализации. Вероятно, это объясняется привнесением морских аэрозолей со снегом, а также затеканием в морозобойные трещины засоленных вод сезонно-талого слоя.

#### **Соотношение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ во льду исследованных жил**

Анализ соотношения иона хлора и сульфат иона ( $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ) во льду исследованных жил показывает заметное отличие этого показателя для повторно-жильных льдов в районе с. Лорино, пос. Лаврентия и оз. Коолень, что очевидно связано с разным участием морских аэрозолей в составе льда. В повторно-жильных льдах, сформировавшихся на пойме оз. Коолень и в районе пос. Лаврентия соотношение этих ионов не превышает значение 2.3, минимальное значение 0.38, максимальное – 2.29, что примерно соответствует этому параметру в снегу снежника и речной воде из этого района, а также в воде озера Коолень (табл. 4). Подобные значения отмечены для снега и атмосферных осадков и для других районов криолитозоны [\[4, 5, 6\]](#).

Повышенное содержание ионов кальция в повторно-жильном льду у пос. Лаврентия (от 0.18 до 1.26 мг-экв/л), никак не отразилось в соотношении  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  (0.38-2.29), что, скорее всего, указывает на участие речных вод в составе повторно-жильного льда в результате экстремального весеннего подъема уровня реки, поскольку вода ручья у пос. Лаврентия имеет близкую концентрацию ионов кальция (1.3 мг-экв/л). Данные химического состава повторно-жильного льда в районе оз. Коолень и пос. Лаврентия свидетельствуют об его преимущественно атмосферном происхождении, участие морских аэрозолей практически не прослеживается.

Соотношение  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  в повторно-жильных льдах в районе с. Лорино сильно варьирует от 2.4 до 34, при доминировании в составе ионов натрия и хлора. Наиболее высокие значения соотношения  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  отмечены там же, где наблюдается самая высокая концентрация ионов хлора – в центральной части жилы №1 на глубине 1.5-1.8 м и 3 м и в краевой части жилы на глубине 0.6 м (см. табл. 3). Во льду современного жильного роста в районе с.Лорино это соотношение составляет 2-5.5. Следует отметить, что в морской воде значение соотношения  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  близок к 11, в криопэгах – 24-25 [4]. Скорее всего, жилы в районе с.Лорино начинали формироваться в засоленных грунтах, при некотором участии засоленных вод сезонно-талого слоя, поскольку наиболее высокие значения соотношения  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ , а также содержания ионов хлора и натрия отмечаются в нижней части жил. Основная часть жил формировалась из снега с участием морских аэрозолей, приносимых с акватории Берингова моря.

## Дискуссия

При проведении геокриологических исследований на территории Чукотки лабораторией мерзлотоведения Отдела комплексных исследований Чукотки СВКНИИ составлен банк данных о химическом составе голоценовых и плейстоценовых повторно-жильных льдов [7], вмещающих отложений (водные вытяжки), талых снеговых и поверхностных вод, а также вод сезонно-талого слоя (СТС).

Химический состав повторно-жильных льдов во многом определяется составом исходных снеговых вод и их преобразованием в СТС при промерзании. Осредненные данные А.Н.Котова и С.Н.Бражник [7] по минерализации и химическому составу атмосферных осадков и вод СТС в соответствующих районах в период формирования повторно-жильных льдов показывают, что химический состав повторно-жильных льдов гидрокарбонатно-натриевый. Лед пресный, минерализация не превышает 180 мг/л (табл. 5).

Минимальная минерализация (20-37 мг/л) отмечена в современных повторно-жильных льдах первой надпойменной террасы р.Тавайваам (север Нижне-Анадырской низменности). Их химический состав хлоридный и гидрокарбонатно-хлоридный натриевый. Атмосферные осадки этого района ультрапресные (минерализация 14 мг/л), химический состав хлоридно-натриевый (натрия до 100% - экв.). В пределах СТС происходит незначительное насыщение вод гидрокарбонатами кальция и магния, минерализация при этом повышается незначительно (см. табл. 5), т.к. аллювиальные отложения хорошо промыты (до 0.02% на 100 г грунта), преобразование химического состава происходит при промерзании вод в морозобойных трещинах. А.Н.Котов и С.Н.Бражник отмечают, что при льдообразовании минерализация увеличивается как за счет гидрокарбонатов, так и за счет хлоридов [7]. В составе повторно-жильных льдов обнаружены ионы аммония, которые отсутствуют в водах СТС (рис. 11, а).

Подобные изменения химического состава, по мнению А.Н.Котова и С.Н.Бражник [7], возможны лишь в условиях "закрытой системы", т.е. при затрудненном оттоке воды. На первой стадии промерзания воды в морозобойных трещинах в этих условиях происходит криогенное концентрирование раствора, разложение органических веществ, вынесенных из СТС и образование аммония. На зафершающей фазе замерзания воды в трещине образуется лед с минерализацией большей, чем минерализация вод СТС. Обычно в аллювиальных отложениях формируются повторно-жильные льды, химический состав и минерализация которых незначительно отличается от атмосферных осадков и идентичных им вод СТС [7].

А.Н.Котов и С.Н.Бражник фиксируют, что химический состав голоценовых и современных повторно-жильных льдов на мысе Рогожном (залив Онемен, устье р. Анадырь) гидрокарбонатный натриевый (см. рис. 11, а), минерализация льда составляет 70-120 мг/л. Атмосферные осадки при поступлении в СТС насыщаются

водорастворимыми солями в большей степени, чем в аллювиальных отложениях р.Тавайваам. Минерализация вод СТС в районе мыса Рогожного достигает 87 мг/л, что свидетельствует о большом содержании водорастворимых солей в делювиальных и покровных супесчаных отложениях (до 0.06% на 100 г грунта).

Таблица 5. Химический состав и минерализация (М) атмосферных осадков (а) и вод СТС (б). По А.Н.Котову, С.Н.Бражник [\[7\]](#)

| Места отбора проб                   |   | Химический состав, мг/л (а), мг-экв/л (б) |                 |                               |                                 |                  |                  | М,<br>мг/л |
|-------------------------------------|---|---|-----------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------|
|                                     |   | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>             | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> |            |
| Надпойменная терраса<br>р.Тавайваам | а | 2.44                                      | 6.40            | н/о                           | 5.10                            | н/о              | н/о              | 14.00      |
|                                     |   | 0.04                                      | 0.18            |                               | 0.22                            |                  |                  |            |
|                                     | б | 7.32                                      | 6.40            | н/о                           | 4.60                            | 0.92             | 0.76             | 20.00      |
|                                     |   | 0.12                                      | 0.18            |                               | 0.20                            | 0.04             | 0.06             |            |
| Мыс Рогожный                        | а | 12.20                                     | 7.10            | н/о                           | 9.20                            | н/о              | н/о              | 28.50      |
|                                     |   | 0.20                                      | 0.20            |                               | 0.40                            |                  |                  |            |
| Залив Онемен                        | б | 48.80                                     | 12.70           | 2.00                          | 13.80                           | 6.00             | 3.66             | 88.00      |
|                                     |   | 0.80                                      | 0.36            | 0.04                          | 0.60                            | 0.30             | 0.30             |            |
| Левый борт долины<br>р.Амгуэмы      | а | 18.30                                     | 3.50            | н/о                           | 6.60                            | 1.00             | 0.60             | 30.00      |
|                                     |   | 0.30                                      | 0.10            |                               | 0.30                            | 0.05             | 0.06             |            |
|                                     | б | 36.60                                     | 7.10            | н/о                           | 8.50                            | 4.00             | 4.88             | 61.40      |
|                                     |   | 0.60                                      | 0.20            |                               | 0.20                            | 0.20             | 0.40             |            |
| Правый борт долины<br>р.Амгуэмы     | а | 18.30                                     | 3.50            | н/о                           | 6.60                            | 1.00             | 0.60             | 30.00      |
|                                     |   | 0.30                                      | 0.10            |                               | 0.30                            | 0.05             | 0.05             |            |
|                                     | б | 36.60                                     | 3.50            | 4.00                          | 7.40                            | 6.00             | 1.80             | 59.30      |
|                                     |   | 0.60                                      | 0.10            | 0.07                          | 0.32                            | 0.30             | 0.15             |            |

Сравнительный анализ химического состава вод СТС и голоценовых повторно-жильных льдов показал, что в процессе льдообразования повышается относительное содержание гидрокарбоната натрия, а минерализация существенно не изменяется. При повышении минерализации в отдельных пробах повторно-жильных льдов также отмечено увеличение содержания гидрокарбоната натрия (см. рис. 11, б).

Схема формирования вод СТС и повторно-жильных льдов такого гидрохимического типа описана Н.П.Анисимовой [\[8, 9\]](#). Промерзание водонасыщенного песка в условиях открытой системы не приводит к значительному повышению минерализации воды. Изменения в соотношении ионов обусловлены образованием труднорастворимых карбонатов кальция и магния, а в химическом составе остаточного раствора увеличивается доля натрия гидрокарбоната. При полном промерзании СТС более засоленным оказывается слой, промерзший в последнюю очередь. Последующее протаивание СТС формирует талые воды с дешифрующими содержаниями гидрокарбоната и натрия, которые определяют химический состав повторно-жильных льдов.

Химический состав и минерализация повторно-жильных льдов в супесчаных отложениях определяется скорее всего содержанием водорастворимых солей в протаивающем слое, а затем криометаморфизмом вод СТС. Так Ю.В.Кузнецовым [\[10\]](#) получены данные о голоценовых повторно-жильных льдах хлоридно-натриевого состава с минерализацией до 300 мг/л. Эти повторно-жильные

льды образовались в засоленных (до 1.5% на 100 г грунта) отложениях морской террасы в прибрежно-морских климатических условиях.

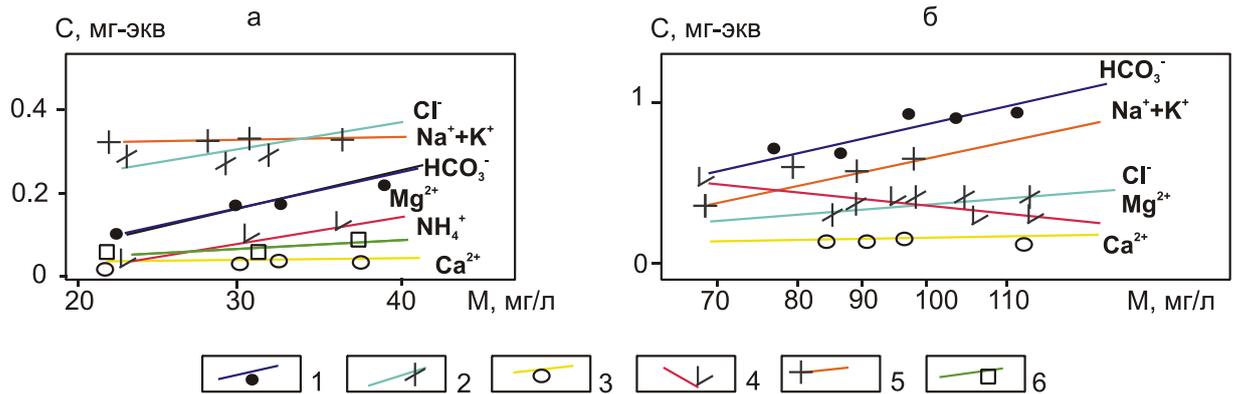


Рис. 11. Химический состав повторно-жильных льдов (ПЖЛ) в зависимости от их минерализации. Из А.Н.Котова и С.Н.Бражник [71]: а – голоценовые ПЖЛ, терраса р.Тавайваам; б – голоценовые ПЖЛ, мыс Рогожный. 1 –  $\text{HCO}_3^-$ ; 2 –  $\text{Cl}^-$ ; 3 –  $\text{Ca}^{2+}$ ; 4 –  $\text{Mg}^{2+}$ ; 5 –  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ; 6 –  $\text{NH}_4^+$

В условиях более континентального климата на локальных участках формируются повторно-жильные льды с различным катионным составом. Так, в долине р.Амгуэмы в делювиальных отложениях встречены как гидрокарбонатные магниевые, так и гидрокарбонатные натриевые (голоценовые и современные) повторно-жильные льды с минерализацией до 80 мг/л. Химический состав атмосферных осадков в этом районе гидрокарбонатный натриевый (см. табл. 5). Доминирующее содержание магния в повторно-жильных льдах определяется гидролитическим расщеплением минералов ультраосновных пород. В суровых климатических условиях этот процесс, происходящий при промерзании горных пород, усиливается их криогенной дезинтеграцией. В результате этих физико-химических процессов вода СТС насыщаются соответствующими химическими компонентами. Аналогичный процесс привел к возникновению гидрокарбонатных натриевых (натрия до 100%-экв) вод СТС и повторно-жильных льдов на локальном участке вблизи выхода на поверхность кислых эффузивов.

Химический состав голоценовых повторно-жильных льдов в верховьях р.Анадырь гидрокарбонатный кальциевый; минерализация 50-60 мг/л. Отсутствие данных о химическом составе атмосферных осадков в этом районе не позволяет нам проследить формирование химического состава повторно-жильных льдов. Предполагается [71], что оно протекало по вышеописанным схемам при незначительном участии водорастворимых солей СТС, т.к. их содержание во вмещающих отложениях, незначительно (до 0.03% на 100 г грунта).

Проведенный анализ химического состава голоценовых и современных повторно-жильных льдов на территории Чукотки привел А.Н.Котова и С.Н. Бражник [71] к выводу, что его формирование зависит от состава атмосферных осадков. При этом происходит преобразование первичных вод как в СТС, так и в морозобойных трещинах. Направленность и интенсивность этих процессов зависит от гидрохимических и литохимических особенностей пород СТС в различных климатических и ландшафтных условиях. Криометаморфизм исходных вод при льдообразовании в любом случае увеличивает относительные содержания гидрокарбонатов и натрия [71].

Нами получены данные по химическому составу сегрегационного льда бугров пучения в долине р. Чульхевеем в районе пос. Лаврентия. Сегрегационный лед формировался из

вод СТС, поэтому можно говорить и о химическом составе вод СТС в данном районе. Показано, что минерализация вод СТС в среднем составляла 30-40 мг/л, состав вод преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый и натриевый, реже хлоридно-кальциевый и натриевый, рН варьирует от 4.6 до 6.0 (табл. 6).

Таблица 6. Минерализация (мг/л) и содержание основных ионов (мг-экв/л) в сегрегационном льду из бугров пучения в долине р.Чульхевеем, пос.Лаврентия. Из Ю.К.Васильчука [\[11\]](#)

| № образца  | Глубина, м | Сухой остаток, мг/л | Na <sup>++</sup><br>K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | рН  | Cl <sup>-</sup> /<br>SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |
|--|------------|---------------------|------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----|--|
| <i>Бугор 1. Сегрегационный лед. Вмещающие отложения - торф до 0.5 м, ниже бурый мелкий песок с щебнем и галечником</i> |            |                     |                                    |                  |                  |                 |                               |                               |     |  |
| 342-YuV/11   | 0.4        | 40                  | 0.12                               | 0.41             | 0.20             | 0.32            | 0.21                          | 0.20                          | 4.6 | 1.56   |
| 342-YuV/13   | 0.6        | 44                  | 0.24                               | 0.30             | 0.20             | 0.32            | 0.17                          | 0.25                          | 5.2 | 1.87   |
| 342-YuV/14   | 0.7        | 40                  | 0.16                               | 0.30             | 0.20             | 0.28            | 0.19                          | 0.20                          | 5.2 | 1.49   |
| <i>Бугор 2. Сегрегационный лед. Вмещающие отложения - серо-бурый мелкий песок</i>                                      |            |                     |                                    |                  |                  |                 |                               |                               |     |  |
| 342-YuV/15   | 1.0        | 124                 | 1.46                               | 0.17             | 0.20             | 0.11            | 1.42                          | 0.30                          | 6.0 | 0.08   |
| 342-YuV/17   | 0.8        | 28                  | 0.34                               | 0.08             | 0.10             | 0.11            | 0.21                          | 0.20                          | 5.4 | 0.55   |
| 342-YuV/18   | 1.1        | 30                  | 0.29                               | 0.08             | 0.10             | 0.11            | 0.17                          | 0.20                          | 6.0 | 0.69   |
| 342-YuV/19   | 0.9        | 24                  | 0.20                               | 0.08             | 0.10             | 0.09            | 0.15                          | 0.15                          | 6.0 | 0.59   |
| 342-YuV/25   | 0.4        | 30                  | 0.26                               | 0.08             | 0.10             | 0.09            | 0.21                          | 0.15                          | 5.5 | 0.41   |
| 342-YuV/27   | 1.8        | 26                  | 0.26                               | 0.08             | 0.10             | 0.17            | 0.13                          | 0.15                          | 6.0 | 1.37   |

Сравнение с химическим составом повторно-жильного льда показывает, что минерализация и рН льда в целом близки к таковым для вод СТС, в составе ионов также преобладают гидрокарбонаты и кальций, в нижней части жилы возрастает доля натрия и хлора (см. табл. 3). При этом концентрации ионов Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> во льду жилы заметно ниже, а Ca<sup>2+</sup> - выше, чем в воде СТС, что объясняется большим участием атмосферных осадков в формировании льда жил, а также возможным участием поверхностных вод.

Ю.К.Васильчуком [\[11\]](#) показано, что голоценовые повторно-жильные льды и на самом востоке и на юго-востоке Чукотки по составу ультрапресные – минерализация не выше 40 мг/л, и даже на морской лаиде о. Айон минерализация голоценовых повторно-жильных льдов не превысила 60-70 мг/л, несмотря на преобладание хлоридов – более 30% от общего содержания легкорастворимых солей. В этом случае близость моря в какой-то мере сказалась на составе повторно-жильных льдов, но все же морское влияние проявилось лишь косвенно, лед – ультрапресный и, несомненно, вода в нем атмосферно-метеорного происхождения [\[11\]](#).

### Заключение

Содержание макроэлементов в исследованных на северо-востоке Чукотки повторно-жильных льдах имеет неравномерное латеральное и вертикальное распределение, что может свидетельствовать о разных факторах, влиявших на состав воды, из которой впоследствии формировались жилы. Для повторно-жильных льдов пос. Лаврентия и с. Лорино отмечено контрастное распределение гидрокарбонатов кальция и хлоридов натрия. Речные воды и, вероятно, атмосферные осадки, приходящие с западным переносом воздушных масс, в этом районе преимущественно гидрокарбонатно-кальциевого состава, атмосферные осадки на морском побережье могут иметь хлоридно-натриевый состав. Доминирующий тип атмосферных осадков, как можно

предположить, определяет макросостав повторно-жильных льдов. По исследованным вертикальным профилям жил можно предположить, что имела место стадийность формирования повторно-жильных льдов из осадков разных воздушных масс. В случае повышенной минерализации и резкого повышения содержания гидрокарбонат-ионов в жиле в районе пос.Лаврентия, можно также сделать вывод о повышении уровня паводковых вод, из которых частично сформировался лед. Для повторно-жильных льдов на оз.Коолень характерен хлоридно-натриевый состав, который может быть связан с импультверизацией морских солей.

Вдоль горизонтальной оси повторно-жильных льдов у с. Лорино отмечена одинаковая тенденция уменьшения минерализации и замещение хлоридов натрия гидрокарбонатами кальция в центральной части и увеличение минерализации и содержания хлорид-ионов в краевых частях жил. Можно предположить, что часть жилы в середине была центром начала льдообразования и засоленные растворы подтягивались к периферии жилы, где впоследствии также промерзли, формируя лед хлоридно-натриевого состава.

Авторы благодарны Л.В.Добрыдневой за гидрохимические анализы образцов льда.

### **Библиография**

1. Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В., Иващенко А.И., де Гереню В.О. Микрометеорологическая оценка биогенных потоков диоксида углерода в типичных тундрах Восточной Чукотки // Почвоведение. 2005. № 7. С. 859–863.
2. Васильчук Ю.К. Повторно-жильные льды; гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность Изд-во Моск. ун-та. М. 2006. – 404 с. (Vasil'chuk Yu.K. 2006. Ice Wedge: Heterocyclity, Heterogeneity, Heterochroneity. Moscow University Press; 404 pp.).
3. Памятники, памятные места истории и культуры Северо-Востока России. Магадан, обл. и Чукотка) / Науч. ред. Н. Н. Диков. Всерос. 6-во охраны Памятников истории и культуры. Магадан, обл. совет; Магадан, обл. управление культуры. Магадан: Кн. изд-во, 1994. 256 с
4. Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Инженерно-геологические и геохимические условия полигональных ландшафтов острова Белый (Карское море) // Инженерная геология. 2015. №1. С. 50–65.
5. Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Инженерно-геологические и геохимические условия полигональных ландшафтов в районе устья реки Тамбей (север полуострова Ямал) // Инженерная геология, 2015. № 4. С. 36–54.
6. Васильчук Ю.К. Геохимический состав подземных льдов севера Российской Арктики // Арктика и Антарктика. 2016. № 2. С. 23-39.
7. Котов, А.Н., Бражник С.Н. Химический состав повторно-жильных льдов Чукотки // Комплексные геокриологические исследования Чукотки. Магадан, СВК НИИ ДВО АН СССР, 1991. С. 39–48.
8. Анисимова Н.П. Химический состав подземных льдов в аллювиальных песках среднего течения р.Лены // Условия и особенности развития мерзлых толщ в Сибири и на Северо-Востоке. М.: Изд-во АН СССР, 1363. С. 101–111.
9. Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 151 с.
10. Кузнецов Ю.В. Изменение гидрохимического состава морских отложений и повторно-жильного льда Нижне-Анадырской низменности под воздействием озерного термокарста // Колыма (Магадан). 1976. № 8. С. 41–43.
11. Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокириологических реконструкций). М.: Изд. Отдел. Теоретических проблем РАН. МГУ, ПНИИИС. 1992. В 2-х томах. Т.1. – 420 с. Т.2 – 264 с. (Vasil'chuk Yu.K.

1992. Oxygen Isotope Composition of Ground Ice (Application to Paleogeocryological Reconstructions). Moscow; Vol.1. – 420 pp. Vol. 2 – 264 pp.).

### References (transliterated)

1. Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Ivashchenko A.I., de Gerenyu V.O. Mikrometeorologicheskaya otsenka biogennykh potokov dioksida ugleroda v tipichnykh tundrach Vostochnoi Chukotki // Pochvovedenie. 2005. № 7. S. 859–863.
2. Vasil'chuk Yu.K. Povtorno-zhil'nye l'dy; geterotsiklichnost', geterokhronnost', geterogennost' Izd-vo Mosk. un-ta. M. 2006. – 404 c. (Vasil'chuk Yu.K. 2006. Ice Wedge: Heterocyclity, Heterogeneity, Heterochroneity. Moscow University Press; 404 pp.).
3. Pamyatniki, pamyatnye mesta istorii i kul'tury Severo-Vostoka Rossii. Magadan, obl. i Chukotka) / Nauch. red. N. N. Dikov. Vseros. 6-vo okhrany Pamyatnikov istorii i kul'tury. Magadan, obl. sovet; Magadan, obl. upravlenie kul'tury. Magadan: Kn. izd-vo, 1994. 256 s
4. Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Yu.K. Inzhenerno-geologicheskie i geokhimicheskie usloviya poligonal'nykh landshaftov ostrova Belyi (Karskoe more) // Inzhenernaya geologiya. 2015. №1. S. 50–65.
5. Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Yu.K. Inzhenerno-geologicheskie i geokhimicheskie usloviya poligonal'nykh landshaftov v raione ust'ya reki Tambei (sever poluostrova Yamal) // Inzhenernaya geologiya, 2015. № 4. C. 36–54.
6. Vasil'chuk Yu.K. Geokhimicheskii sostav podzemnykh l'dov severa Rossiiskoi Arktiki // Arktika i Antarktika. 2016. № 2. S. 23-39.
7. Kotov A.N., Brazhnik S.N. Khimicheskii sostav povtorno-zhil'nykh l'dov Chukotki // Kompleksnye geokriologicheskie issledovaniya Chukotki. Magadan, SVK NII DVO AN SSSR, 1991/ C. 39–48.
8. Anisimova N.P. Khimicheskii sostav podzemnykh l'dov v allyuvial'nykh peskakh srednego techeniya r.Lenya // Usloviya i osobennosti razvitiya merzlykh tolshch v Sibiri i na Severo-Vostoke. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. C. 101–111.
9. Anisimova N.P, Kriogidrogeokhimicheskie osobennosti merzloi zony. Novosibirsk: Nauka, 1981. 151 s.
10. Kuznetsov Yu.V. Izmenenie gidrokhimicheskogo sostava morskikh otlozhenii i povtorno-zhil'nogo l'da Nizhne-Anadyrckoi nizmennosti pod vozdeistviem ozepnogo termokarsta // Kolyma (Magadan). 1976. № 8. C. 41–43.
11. Vasil'chuk Yu.K. Izotopno-kislorodnyi sostav podzemnykh l'dov (opyt paleogeokriologicheskikh rekonstruktsii). M.: Izd. Otdel. Teoreticheskikh problem RAN. MGU, PNIIS. 1992. V 2-kh tomakh. T.1. – 420 s. T.2 – 264 s. (Vasil'chuk Yu.K. 1992. Oxygen Isotope Composition of Ground Ice (Application to Paleogeocryological Reconstructions). Moscow; Vol.1. – 420 pp. Vol. 2 – 264 pp.).