

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К. — Вариации изотопов кислорода в ростках современных сингенетических повторно-жильных льдов в низовьях реки Колымы // Арктика и Антарктика. – 2019. – № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.30744 URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=30744](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=30744)

## Вариации изотопов кислорода в ростках современных сингенетических повторно-жильных льдов в низовьях реки Колымы

Буданцева Надежда Аркадьевна

кандидат географических наук

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

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

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



Васильчук Юрий Кириллович

доктор геолого-минералогических наук

профессор, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, Московский государственный университет имени МВ.Ломоносова, географический факультет

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"](#)

### Аннотация.

Предметом исследования являются изменение изотопно-кислородных значений в современных ростках современных повторно-жильных льдов в нижнем течении р. Колымы. Приведены значения  $\delta^{18}O$  от бухты Амбарчик и Походска на севере до устья р. Омолон и с. Колымского на юге исследуемого региона. Выполнен критический анализ публикаций по Нижнеколымскому району и по смежным территориям для которых выполнялось сопоставление изотопно-кислородных данных с зимними температурами воздуха. Также проанализированы аналогичные работы для Аляски и севера Канады. Основной метод исследования заключается в полевом опробовании ростков современных жил и анализ публикаций, содержащих данные по значениям  $\delta^{18}O$  в Нижнеколымском районе. Основными выводами проведенного исследования является подтверждение зависимостей, полученных около 30 лет назад Ю.К.Васильчуком для Сибири в целом и Нижнеколымского района, связывающих значения  $\delta^{18}O$  в ростках современных жил с среднеянварскими температурами воздуха. Прослежены тенденции изменчивости значений  $\delta^{18}O$  с севера на юг, по мере удаления от источника влаги и увеличения степени континентальности.

**Ключевые слова:** сингенетический, повторно-жильные льды, ростки жил, многолетнемерзлые породы, пойма, торфяник, алас, изотопы кислорода, изотопный палеотермометр, река Колыма

**DOI:**

----

10.7256/2453-8922.2019.3.30744

**Дата направления в редакцию:**

01-10-2019

**Дата рецензирования:**

01-10-2019

*Работа выполнена при поддержке РНФ (№19-17-00126 – изотопный анализ), РФФИ (17-05-00793, анализ метеоданных и 18-05-60272 Арктика – обобщение данных).*

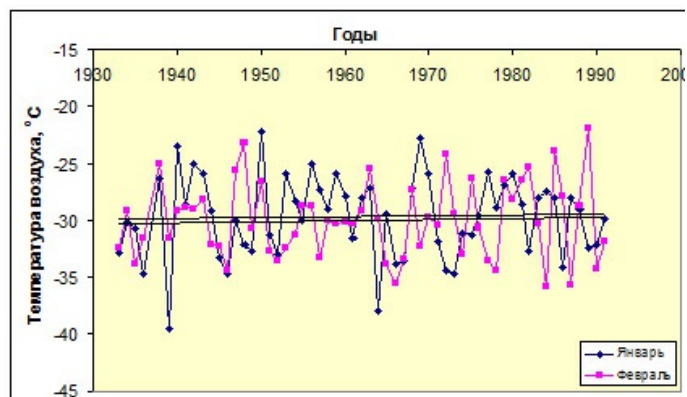
**Введение**

Впервые об изотопном составе повторно-жильных льдов в связи с зимними температурами упоминал Ю.К.Васильчук в статье 1984 г. [1]: "...можно предполагать, что процесс фракционирования изотопов кислорода в воде, формирующей повторно-жильные льды, контролируется прежде всего температурами конденсации атмосферной влаги зимой... Следовательно, по изотопно-кислородному составу ледяных жил можно характеризовать преимущественно температуру приземного слоя воздуха времени выпадения снега" [1, с. 426-427]. Впоследствии в статье, переданной для публикации в ДАН в 1984 г, посвященной Нижнеколымским повторно-жильным льдам близ пос. Зеленый Мыс, Ю.К.Васильчук отмечает: "Палеотемпературная интерпретация вариаций содержания стабильных тяжелых изотопов кислорода может быть выполнена на основе сопоставления с содержанием  $^{18}\text{O}$  в современных сингенетических жилках и в снеге" [2, с. 906].

**Район исследований**

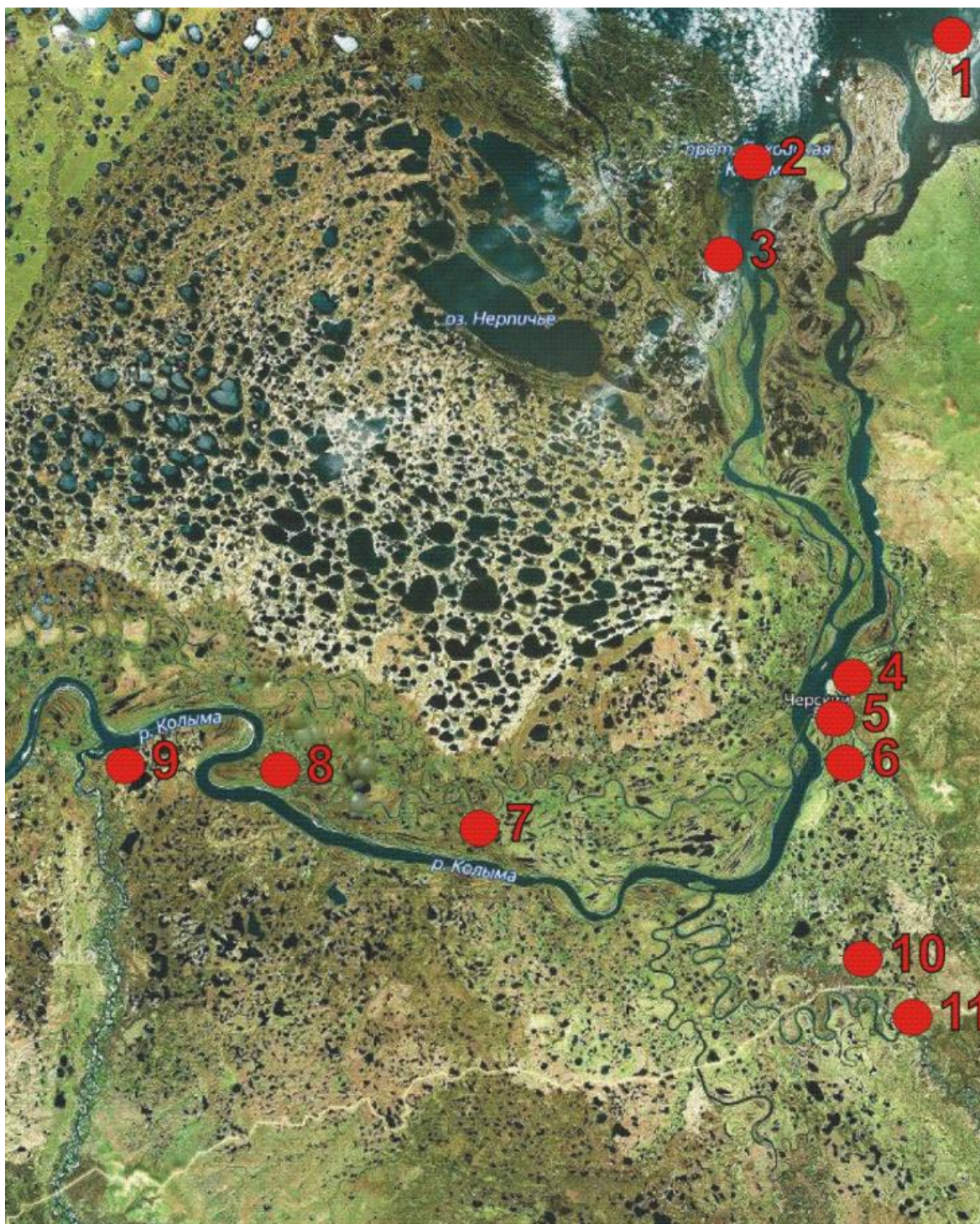
Исследования проводились в низовьях р.Колымы и ее притоков, между пос.Колымское и о.Каменка. Нижнеколымский район охватывает примерно 250-километровый отрезок нижнего течения Колымы от Евсейских островов на юге по побережью Восточно-Сибирского моря на севере. По территории региона проходит северная граница лиственничной тайги, выступающая на правобережье Колымы далеко к северу. С юго-востока в Колыму впадают крупнейшие притоки – реки Омолон и Анюй. По левому берегу к долине Колымы примыкает Колымо-Индибирская низменность, с многочисленными термокарстовыми озерами на водоразделах и в долинах рек. Не менее 90% территории Нижнеколымского района представлены водно-болотными ландшафтами [3].

По данным метеостанции в пос.Колымское среднегодовая температура воздуха составляет  $-13,4^{\circ}\text{C}$ , средняя температура января  $-34^{\circ}\text{C}$ , средняя температура июля  $+7,8^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовое количество осадков около 225 мм, половина их выпадает в виде снега [4]. По данным из [4] метеостанции Бухта Амбарчик в устье р.Колыма за период наблюдений 1933-1991 гг. средняя температура января составляла  $-29,7^{\circ}\text{C}$ , тренда изменения температуры за данный период не отмечено (рис. 1).



**Рис. 1.** Вариации средней температуры воздуха в январе и феврале на метеостанции "Бухта Амбарчик" ( $69^{\circ}6' \text{с.ш.}$ ,  $162^{\circ}3' \text{в.д.}$ , высота 23 м н.у.м.) за период 1933–1991 гг. (данные из [\[4\]](#))

Отобраны образцы льда из элементарных жилок в разных точках исследуемого района (рис. 2) и проанализирован их изотопно-кислородный состав.



**Рис. 2.** Карта района исследований в низовьях р.Колымы: 1 – метеостанция Бухта Амбарчик, 2 – о.Каменка, 3 – пос.Походск, 4 – пос. Зеленый Мыс, 5 – пос.Черский, 6 – стационар Амболиха, 7 – Плахинский Яр, 8 – Дуванный Яр, 9 – пос.Колымское, 10 – разрез Красивое, 11 – разрез Молотковский Камень.

### Методы

Определения изотопного состава кислорода выполнялись в лаборатории изотопной геологии ИГ АН Эстонии и в лаборатории изотопной гидрологии ИВП АН СССР при содействии А.Д.Есикова на приборе G-50. Проводились контрольные сопоставления стандартов обеих лабораториях.

### Результаты

Результаты изотопно-кислородного анализа элементарных жилок показывает, что

значения  $\delta^{18}\text{O}$  в жилах из разных точек варьируют в диапазоне от  $-23,0$  до  $-27,1$  ‰ (табл. 1), составляя в среднем около  $-25,8$  ‰.

**Таблица 1.** Значения  $\delta^{18}\text{O}$  в ростках современных сингенетических повторно-жильных льдов в низовьях р. Колымы, данные из [5, 6]

| Местоположение современных жилок и координаты                                                                           | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰   | Местоположение современных жилок и координаты                                                                    | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Устье р.Колымы, пойма на Походской протоке у пос.Походск (точка 15-ТЯ)*<br>69°2'с.ш., 161°0'в.д.                        | $-23,2 \div -26,8$<br>(n=5) | Стадухинская протока р.Колымы, близ зимовья Плахино (Плахинский Яр) (точка 312-YuV)<br>68°41' с.ш., 160°17' в.д. | $-23,3 \div -27,1$<br>(n=5) |
| Низовья р.Колымы, пойма у пос.Зеленый Мыс (точка 15-ТЯ)<br>68°47' с.ш. 161°22' в.д.                                     | $-25,4 \div -25,6$<br>(n=2) | Правобережье р.Колымы, Дуваный Яр, пойма р.Колымы (точка 2-РВ)<br>68°38' с.ш., 159°02' в.д.                      | $-25,4 \div -25,6$<br>(n=2) |
| Низовья р.Колымы, пойма на протоке Амболиха, 20 км юго-восточнее пос.Черский (точка 15-ТЯ)<br>68°42' с.ш., 161°31' в.д. | $-23 \div -26,1$<br>(n=3)   | Правобережье р.Колымы, Дуваный Яр, алас (точка 2-РВ)<br>68°38' с.ш., 159°03' в.д.                                | $-23,3$<br>(n=1)            |
|                                                                                                                         |                             | Левобережье р.Колымы, пойма у Дуванного переката (точка 317-YuV)<br>68°39' с.ш., 159°21' в.д.                    | $-25 \div -25,2$<br>(n=2)   |

\* Индексы образцов соответствуют инициалам исследователей, проводивших отбор. YuV – Васильчук Ю.К., РВ – Р.А.Вайкмяэ, ТЯ – Т.Я.Якимова

За период с 2001 по 2010 гг. на метеостанции в пос.Черский проводился отбор образцов осадков и определение его изотопного состава, полученные результаты были включены в базу данных GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation). Вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках зимнего периода составили от  $-15,4$  до  $-36,7$ ‰, среднее значение составило от  $-25,1$  до  $-26,9$ ‰ (табл. 2, 3).

Соотношение  $\delta^{18}\text{O}$  -  $\delta^2\text{H}$  в зимних осадках описывается уравнением  $\delta^2\text{H} = 7,2\delta^{18}\text{O} - 14,1$ , что близко к Глобальной Линии Метеорных Вод (ГЛМВ) (рис. 3).

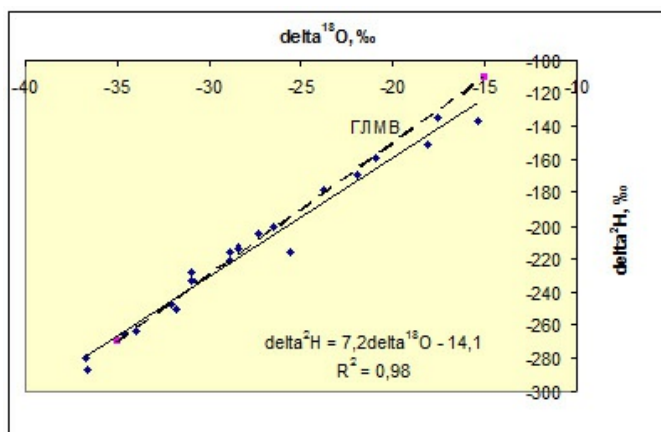
**Таблица 2.** Вариации среднемесячных величин  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  и  $d_{\text{exs}}$  в метеосадках пос. Черский за период 2001-2010 гг. Данные из базы GNIP [7]

| Месяц   | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ | $\delta^2\text{H}$ , ‰ | $d_{\text{exs}}$ , ‰ |
|---------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| Январь  | $-34,61 \pm 3,93$         | $-265,0 \pm 28,3$      | $11,9 \pm 3,4$       |
| Февраль | $-32,10 \pm 2,62$         | $-247,3 \pm 22,2$      | $9,5 \pm 1,3$        |
| Март    | $-31,77 \pm 3,62$         | $-250,1 \pm 28,7$      | $4,0 \pm 5,3$        |
| Апрель  | $-25,58 \pm 4,22$         | $-215,3 \pm 32,5$      | $4,9 \pm 3,8$        |

|          |                   |                   |                |
|----------|-------------------|-------------------|----------------|
| Май      | $-18,12 \pm 3,44$ | $-151,5 \pm 23,2$ | $-1,0 \pm 9,8$ |
| Сентябрь | $-17,54 \pm 2,02$ | $-135,0 \pm 13,4$ | $6,7 \pm 2,4$  |
| Октябрь  | $-23,77 \pm 3,45$ | $-178,5 \pm 24,2$ | $11,7 \pm 6,9$ |
| Ноябрь   | $-27,28 \pm 3,45$ | $-204,4 \pm 20,7$ | $13,9 \pm 8,0$ |
| Декабрь  | $-30,90 \pm 3,94$ | $-233,4 \pm 31,8$ | $13,8 \pm 5,3$ |
| Среднее  | $-26,9$           |                   |                |

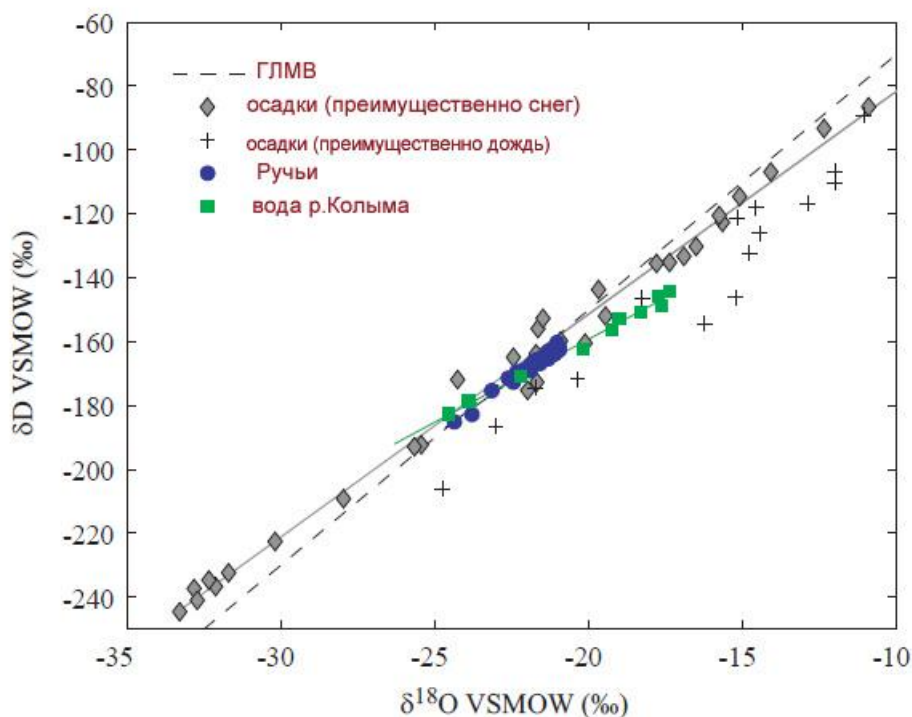
**Таблица 3.** Вариации среднемесячных величин  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в метеосадках пос. Черский в 2008-2010 гг. Данные из базы GNIP [8]

| Период<br>осадков | сбора | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ | $\delta^2\text{H}$ , ‰ |
|-------------------|-------|---------------------------|------------------------|
| Май 2008          |       | -20,9                     | -158,4                 |
| Октябрь 2008      |       | -28,9                     | -215,41                |
| Ноябрь 2008       |       | -28,4                     | -213,05                |
| Март 2009         |       | -28,9                     | -221,10                |
| Май 2009          |       | -15,4                     | -137,10                |
| Октябрь 2009      |       | -22,0                     | -169,40                |
| Ноябрь 2009       |       | -31,0                     | -227,80                |
| Декабрь 2009      |       | -26,5                     | -200,80                |
| Январь 2010       |       | -36,7                     | -279,20                |
| Февраль 2010      |       | -34,0                     | -263,00                |
| Март 2010         |       | -36,6                     | -286,20                |
| Среднее           |       | -25,1                     |                        |



**Рис. 3.** Соотношение  $\delta^{18}\text{O}$  -  $\delta^2\text{H}$  в зимних осадках в пос.Черский за период 2001-2010 гг.

По данным Л.Велп [9], проводившей исследования изотопного состава осадков и поверхностных вод в районе пос.Черский, в осадках с положительными значениями дейтериевого эксцесса (это преимущественно зимние осадки в виде снега) уравнение соотношения  $\delta^{18}\text{O}$  -  $\delta^2\text{H}$  имеет вид  $\delta^2\text{H} = 7\delta^{18}\text{O} - 11,7$ . Все осадки зимнего периода расположены вблизи ГЛМВ (рис. 4).



**Рис. 4.** Соотношение  $\delta^{18}\text{O}$  -  $\delta^2\text{H}$  в осадках и поверхностных водах в районе пос.Черский за период 2002-2004 гг. Из Welp [9]

Наблюдения М.А.Коняхина на стационаре Амболиха ИГ ДВНЦ РАН вблизи пос. Черский и на о.Каменка (устье р.Колыма) показали хорошее соответствие среднего изотопного состава снега и элементарной жилки [10, 11]. Так, на стационаре Амболиха среднее значение  $\delta^{18}\text{O}$  зимнего снега (период отбора – зима 1983-84 гг.) составило  $-25,7\text{‰}$ , во льду элементарной жилки –  $-25,7$  и  $-25,9 \text{‰}$ . На о.Каменка среднее значение  $\delta^{18}\text{O}$  зимнего снега (период отбора – зима 1984-85 гг.) составило  $-20,5\text{‰}$ , во льду элементарной жилки –  $-20,6$  и  $-20,8 \text{‰}$  (табл. 4).

**Таблица 4.** Изотопно-кислородный состав ( $\delta^{18}\text{O}$ ) современных жилок и снега и приземные температуры воздуха зимнего периода, низовья р.Колымы. Из [5, 6, 10, 11]

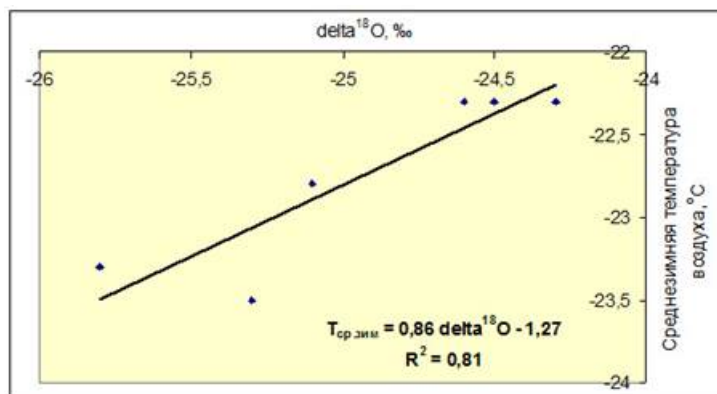
| Район                                       | Значения $\delta^{18}\text{O}$ (‰) в жилках |                             | Значения $\delta^{18}\text{O}$ (‰) в снеге | Температура приземного воздуха (°C) |        |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|--------|
|                                             | Кол-во жил                                  | Диапазон значений (среднее) | Диапазон значений (среднее)                | Зима                                | Январь |
| Пос.Походск<br>69°2' с.ш., 161°0' в.д.      | 5                                           | -23,2 ÷ -26,8<br>(-24,3)    | -                                          | -22,3                               | -34    |
| Пос.Зеленый Мыс<br>68°47' с.ш. 161°22' в.д. | 7                                           | -23,4 ÷ -25,6<br>(-24,5)    | -                                          | -22,3                               | -34    |
| Стационар Амболиха<br>68°42' с.ш., 161°31'  | 5                                           | -23,0 ÷ -26,1               | -21,5...<br>-36,3                          | -22,3                               | -34    |

| В.Д.                                                                   |    | (-24,6)                      | (-26) |       |     |
|------------------------------------------------------------------------|----|------------------------------|-------|-------|-----|
| Разрез Плахинский Яр<br><br>68°40' 43.8'' с.ш.,<br>160° 17' 6.6'' в.д. | 10 | -23,4 ÷ -<br>27,1<br>(-25,1) | -     | -22,8 | -35 |
| Разрез Дуваный Яр<br><br>68°37' с.ш., 159°08'<br>в.д.                  | 7  | -25,0 ÷ -<br>25,6<br>(-25,3) | -     | -23,5 | -36 |
| Пос.Колымское<br><br>68°43' с.ш., 158°42'<br>в.д.                      | 6  | -25,0 ÷ -<br>26,6<br>(-25,8) | -     | -23,3 | -36 |

Это позволяет говорить о том, что жилки формируются преимущественно из талого снега, при этом изменение изотопного сигнала снега в результате фракционирования не отмечается. Об этом ранее упоминал Дж.Росс Маккай [\[12\]](#), делая вывод о том, что скорость замерзания воды в морозобойной трещине настолько велика, что фракционирование при образовании элементарной жилки не происходит.

Сопоставление средних значений изотопного состава современных жилок, снега и зимних температур воздуха показывает, что изотопно-кислородный состав современных жил льда в различных районах в низовьях р.Колымы закономерно изменяется в зависимости от зимних температур приземного воздуха (табл. 4, рис. 5).

Коэффициент соотношения значений  $\delta^{18}\text{O}$  в жилках со среднезимней температурой воздуха составляет 0,86, при высоком значении достоверности аппроксимации ( $R^2 = 0,8$ ).



**Рис. 5.** Зависимость значений  $\delta^{18}\text{O}$  в современных ледяных жилках со среднезимней температурой воздуха в Нижнеколымском районе (по данным из табл. 1 и 4).

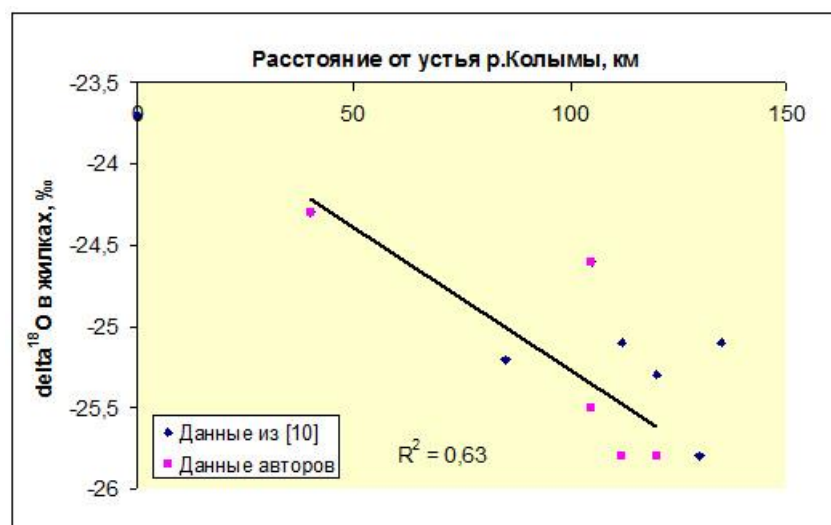
Для Колымской низменности было показано, что изотопный состав элементарных жилок определяется значениями зимних температур воздуха. Нами было прослежено изменение изотопного состава льда жилок на поймах и лайдах от побережья вглубь материка и установлено, что с удалением от побережья изотопный состав жильных ростков становился более изотопически отрицательным. Такая же тенденция ранее отмечена и М.А.Коняхиным с В.И.Соломатиным (табл. 5, рис. 6). Так, жилки на о.Каменка (дельта р.Колымы) характеризовались средним значением  $\delta^{18}\text{O}$  -20,5 ‰, у пос.Походск (40 км от устья) -24,3 ‰, у пос.Черский (80 км от устья) -25,2 ‰, у стационара

Амболиха (105 км от устья) –24,6 ‰, в районе пос.Колымское (130 км от устья) –25,8 ‰ [11]. Такое выраженное понижение значения изотопного состава современных жилкок Колымской низменности с удалением от побережья согласуется с понижением среднезимних температур приземного воздуха (разница среднезимних температур между поселками Амбарчик в устье Колымы и Колымское составляет 3,1 °С) и является еще одним доказательством того, что жилки формируются в основном из талого зимнего снега. Поэтому их изотопный состав отражает зимние температурные условия периодов их формирования [11].

**Таблица 5.** Изменение изотопно-кислородного состава ( $\delta^{18}\text{O}$ ) современных жильных льдов Колымской низменности с удалением от побережья. Из [10, 11] с дополнением из [5, 6]

| Географическое положение и координаты                                 | Удаление от побережья (км) | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ |                             |                      |                             |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|
|                                                                       |                            | Высокая пойма (лайда)     |                             | Плакор (едома, алас) |                             |
|                                                                       |                            | Кол-во жил                | Диапазон значений (среднее) | Кол-во жил           | Диапазон значений (среднее) |
| о. Каменка (дельта р.Колыма)<br>69°26' с.ш.,<br>161°36' в.д.          | 0                          | 5                         | -22,9 ÷ -24,2<br>(-23,7)    | 8                    | -18,1 ÷ -22,7<br>(-20,1)    |
| пос. Походск<br>69°04'46.3" с.ш.,<br>160°58'10.3" в.д.                | 40                         | 5                         | -23,2 ÷ -26,8<br>(-24,3)    | -                    | -                           |
| пос. Черский<br>68°45'06" с. ш.<br>161°19'47" в.д.                    | 85                         | 4                         | -24,0 ÷ -25,8<br>(-25,2)    | -                    | -                           |
| Стационар Амболиха<br>68°42' с.ш.,<br>161°31' в.д.                    | 105                        | 5                         | -23,0 ÷ -26,1<br>(-24,6)    | -                    | -                           |
| Разрез Плахинский Яр,<br>р. Мал. Анюй<br>68°40' с.ш.,<br>160°17' в.д. | 112                        | 10                        | -23,4 ÷ -27,1<br>(-25,1)    | 5                    | -19,4 ÷ -25,8<br>(-22,6)    |
| Разрез Дуванный Яр<br>68°37' с.ш.,<br>159°08' в.д.                    | 120                        | 6                         | -25,0 ÷ -25,6<br>(-25,3)    | 1                    | -25,2 (-25,2)               |
| Пос. Колымское                                                        | 130                        | 6                         | -25,0 ÷ -26,6               | -                    | -                           |

|                                                   |     |   |                   |   |                   |
|---------------------------------------------------|-----|---|-------------------|---|-------------------|
| 68°43' с.ш.,<br>158°42' в.д.                      |     |   | (-25,8)           |   |                   |
| Разрез Красивое,<br>р. Мал. Анюй                  | 135 | 7 | -23,5 ÷ -<br>26,5 | 3 | -25,3 ÷ -<br>25,9 |
| 68°18' с.ш.,<br>161°44' в.д.                      |     |   | (-25,1)           |   | (-25,6)           |
| Разрез<br>Молотковский<br>Камень, р. Мал.<br>Анюй | 145 | - | -                 | 5 | -22,9 ÷ -<br>26,2 |
| 68°14' с.ш.,<br>161°53' в.д.                      |     |   |                   |   | (-24,5)           |



**Рис. 6.** Изменение значений  $\delta^{18}\text{O}$  в современных ледяных жилках Нижнеколымского района в зависимости от расстояния от устья р.Колымы вглубь материка (построено по данным из табл. 1 и 5).

### Дискуссия

Зависимость между значениями  $\delta^{18}\text{O}$  в элементарных жилках и среднезимней температурой в 1‰ на 1°C и среднеянварской температурой как 1,5‰ на 1°C, предложенная Ю.К.Васильчуком [13] для российской криолитозоны была впоследствии подтверждена исследованиями Николаева и Д.В.Михалева, которые получили зависимость 0,83-0,86‰ на 1°C для осадков холодного периода и 0,48‰ на 1°C для среднеянварской температуры. Х.Майер в своей диссертации (защищенной в 2001, опубликованной в 2003) [14] проанализировал полученные зависимости и построил график по всем имеющимся данным и получил зависимости:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{пжл}} = 1,02 \times T_{\text{ср.зим.}} - 0,72 \quad (R^2 = 0,81) \quad (1)$$

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{пжл}} = 1,02 \times T_{\text{ср.январ.}} - 3,46 \quad (R^2 = 0,72) \quad (2)$$

Данные, полученные Х.Майером по Быковскому п-ову (n=8) и о.Большой Ляховский (n=22) хорошо согласуются с полученными зависимостями. Для идентификации возраста современных жилок был проведен анализ трития в них, который показал высокий

уровень  $^3\text{H}$ , характерный для последних десятилетий [\[14\]](#).

Ряд исследований в российской и зарубежной Арктике посвящен изучению зависимостей изотопного состава осадков и приземной температуры воздуха и изотопного состава снега и современных жилок.

Исследования на о.Самойлова в дельте р.Лены были проведены с целью изучения участия снега в заполнении морозобойных трещин и формирования современных ледяных ростков. Для этого было отобрано и проанализировано на содержание стабильных изотопов около 250 образцов снега в различных районах острова в 2013 г. [\[15\]](#).

Было показано, что во льду в морозобойной трещине значения  $\delta^{18}\text{O}$  варьировали от  $-25,4\text{‰}$  до  $-20,3\text{‰}$ , среднее  $-23,7\text{‰}$ . По образцам снега получены значения между  $-29,2\text{‰}$  и  $-24,8\text{‰}$ , среднее значение  $-26,2\text{‰}$ , близко к наиболее низкому значению по льду из жилки. Образцы глубинной изморози имели значения между  $-26,4\text{‰}$  и  $-22,9\text{‰}$ , среднее  $-24,3\text{‰}$ . Показано, что изотопный сигнал, сохраняющийся в годичной жилке, лучше всего соответствует изотопному сигналу снега из нижней части снежного покрова, глубинной изморози и талому снегу в понижениях над трещинами [\[15\]](#).

Для периода исследований 2004-2010 гг. была показана наилучшая корреляция изотопного состава снега с температурой холодного периода ( $r^2 = 0,67$ ). Исследования показали, что морозобойные трещины образуются преимущественно в декабре. Заполнение трещин происходит как после их образования в декабре (сухим снегом), так и в апреле-мае, когда начинается снеготаяние (талым снегом). Как результат, изотопный состав современных жилок, образовавшихся в течение одного года, заметно варьирует. Однако, вариабельность среднего изотопного состава жилок разных лет гораздо ниже ( $0,13\text{ ‰}$  на  $1^\circ\text{C}$ ), что близко к предсказанным В.Дансгором значениям для среднегодовой температуры воздуха ( $0,7\text{ ‰}$  на  $1^\circ\text{C}$ ). Это, скорее всего, объясняется тем, что процесс формирования ледяных жил ограничен холодным периодом (наиболее низкие температуры при формировании морозобойных трещин и температура немного выше  $0^\circ\text{C}$  при заполнении их талым снегом), а также гомогенизацией изотопного сигнала осадков в снеге.

Для о.Самойлова показано, что все температуры холодного сезона (ноябрь-май) могут быть рассмотрены для калибровки изотопного термометра. Для периода наблюдений 2004-2010 гг. была получена корреляция с весенними температурами (уравнение зависимости имеет вид:  $T = 4,40\delta^{18}\text{O} + 77,34$ ), что указывает на преимущественное заполнение трещин в весеннее время [\[16\]](#).

Исследования изотопного состава осадков и льда современных жилок, проведенные на побережье моря Лаптевых, в 300 км к западу от дельты р.Лена ( $73^\circ36'\text{ с.ш.}$ ,  $117^\circ10'\text{ в.д.}$ ) показали, что для снега получены средние значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$   $-20,5\text{‰}$  и  $-154\text{‰}$ , соответственно, при этом среднезимняя температура воздуха в данном районе составляет  $-22^\circ\text{C}$ . Наклон линии  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  для снега составляет 7,9 (для Глобальной Линии Метеорных Вод (ГЛМВ) он равен 8), почти все значения изотопного состава расположены на ГЛМВ. Средний изотопный состав современных жилок ( $\delta^{18}\text{O} = -20,5\text{ ‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -156\text{ ‰}$ ) идентичен среднему изотопному составу снега, что позволяет говорить о генетической корреляции изотопного состава зимних осадков и современных жилок [\[17\]](#).

Для о.Большой Ляховский показано различие изотопного состава современного снега и ледяных ростков. Средний изотопный состав снега снежников составляет  $-26,3\text{‰}$  для величин  $\delta^{18}\text{O}$  и  $-199\text{‰}$  для значений  $\delta^2\text{H}$ . Наклон линии соотношения  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  составляет 7,1. Значительный диапазон значений дейтериевого эксцесса (от 3,5 до 23 ‰) объясняется просачиванием дождевой или талой снеговой воды или испарением. Изотопный состав современных жилкок заметно отличается от среднего состава снежников и составляет  $-20,5\text{‰}$  для значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $-152\text{‰}$  для величин  $\delta^2\text{H}$ , значения  $d_{\text{exc}}$  4,5‰, что соответствует изотопически тяжелым значениям для снежников и легким значениям для дождей. Это может указывать на 2 причины: 1) современные жилки на о.Большой Ляховский формируются из снега, пропитанного дождевой водой или 2) они формируются из талой снеговой воды, которая подверглась изотопному обогащению перед заполнением трещины. Эти данные противоречат результатам, полученным для Быковского п-ова и п-ова Таймыр, для которых показано, что процессы фракционирования не влияют на изотопный состав талого снега, попадающего в трещины [14].

Исходя из этого, высказано предположение, что современные жилки на о.Большой Ляховский формируются из последних порций тающего снега и поэтому обогащенного тяжелыми изотопами, как это было показано Б.Лауриолем с соавторами [18] для севера Канады. Также возможным объяснением может быть малое количество снега, выпадающее в районе исследований, что способствует сублимации снега и как результат, формированию низких значений  $d_{\text{exc}}$ . Кроме того, надо принимать во внимание сезонность формирования и заполнения морозобойных трещин, которые могут заполняться как в январе (более низкие изотопные значения) так и в марте (более высокие значения). Поскольку неизвестно точное время формирования и заполнения трещин, приходится рассматривать зимние температуры воздуха как основу для формирования изотопного состава жил [14].

Для континентальных районов Сибири, однако, не было показано влияния сублимации на изотопный состав зимних осадков. Снег в районе г.Якутск характеризовался наклоном линии соотношения  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  равным 7,6, среднее значение  $d_{\text{exc}}$  составило 8,9, большая часть полученных значений расположена на ГЛМВ [19]. Для молодых жил (моложе 700 лет), исследованных на р.Тумара, показано обогащение изотопного состава льда, что объяснялось как формированием льда жил из последних порций талого снега, так и участием поверхностных вод, разбавляющих снег и заметно изменяющих его первичный изотопный сигнал [19].

Для северной Америки (Аляска, Юкон) показано в целом хорошее соответствие температуры воздуха в зимний период и изотопного состава осадков в данный период. Так, сопоставление изотопного состава осадков и поверхностных вод Аляски показало, что температуры и количество осадков зимы (декабрь – февраль) в наибольшей степени определяют изотопный состав поверхностных вод [20]. Для этого периода была получена зависимость  $\delta^{18}\text{O} = 0,28 \times T_{\text{дек-фев}} - 14,9$  ( $R^2 = 0,59$ ), уравнение для локальной линии метеорных вод очень близко к таковому для ГЛМВ и имеет вид  $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 6,8$ . Однако, для ледяных жил, исследованных в туннеле Фокс Пермафрост, наклон линии соотношения  $\delta^{18}\text{O}$  -  $\delta^2\text{H}$  имеет наклон 6,4, хотя значения изотопного состава находятся внутри диапазона современного снега. Скорее всего, снег, заполняющий жилы, подвергался изотопному фракционированию [20].

На севере Юкона, в районе оз. Ту Муз (Two Moose Lake) многие позднеголоценовые ледяные жилы (не старше 3 тыс. лет) характеризуются изотопно-кислородным составом ( $\delta^{18}\text{O}$  от  $-22\text{‰}$  до  $-24\text{‰}$ ) близким к современным зимним осадкам в Майо ( $-22,32 \pm 3,06\text{‰}$ ) и к значению в современной жилке в 10 км севернее ( $-22,4 \pm 0,5\text{‰}$ ) [21]. При этом наклон линии соотношения  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  для жильного льда во многих случаях заметно ниже локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ), что может отражать, например, фракционирование в результате неоднократного замерзания-протаивания воды. Также низкая статистическая корреляция ( $R^2 < 0,3$ ) для некоторых графиков, построенных по жилам, может указывать на различные источники влаги, формирующей лед [21].

Для континентального Юкона было показано [22], что зависимость изотопного состава осадков и температуры описывается уравнением  $\delta^{18}\text{O}_{\text{осадки}} = 0,41\text{‰}/^\circ\text{C} \times T - 20,2$  ( $R^2 = 0,87$ ) и  $\delta^2\text{H}_{\text{осадки}} = 3,1\text{‰}/^\circ\text{C} \times T - 155$  ( $r_2 = 0,87$ ). Для молодых жил (возраст не более 500 лет) в Бримстоуне среднее значение  $\delta^2\text{H}$  составило  $-187 \pm 3\text{‰}$ , что близко к среднему значению  $\delta^2\text{H}$  в снеге (выпадающем с октября по май) на ближайшей метеостанции в Майо ( $-191\text{‰}$ ). Также было отмечено хорошее соответствие приземной температуры воздуха в период октябрь-май в Клондайке ( $-12^\circ\text{C}$ ) и температурой, реконструированной по значениям  $\delta^2\text{H}$  жил в Бримстоуне ( $-10^\circ\text{C}$ ), что, по мнению Т.Портера, позволяет рассматривать ледяные жилы как довольно надежный зимний палеотермометр [22], что, примерно за 30 лет до этого, и было показано Ю.Васильчуком [1, 2, 6, 13 и др].

### Выводы

1. Показано, что вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  в ростках современных ледяных жил в низовьях р.Колымы составляют около 4‰ от  $-23$  до  $-27,1\text{‰}$ , средние значения по жилкам варьируют в более узком диапазоне от  $-23,7$  до  $-25,8\text{‰}$ .
2. Показано подтверждение зависимостей, полученных около 30 лет назад Ю.К.Васильчуком для Сибири в целом и Нижнеколымского района, связывающих значения  $\delta^{18}\text{O}$  в ростках современных жил со среднеянварскими температурами воздуха.

### Библиография

1. Васильчук Ю.К., Трофимов В.Т. Изотопно-кислородная диаграмма повторно-жильных льдов Западной Сибири, ее радиологический возраст и палеогеокриологическая интерпретация // Доклады АН СССР. 1984. Том 275. № 2. С. 425–428.
2. Васильчук Ю.К., Есиков А.Д., Опруненко Ю.Ф., Васильчук А.К., Сулержицкий Л.Д. Новые данные по содержанию стабильных изотопов кислорода в сингенетических повторно-жильных льдах позднеплейстоценового возраста низовий р.Колымы // Доклады АН СССР. 1985. Том 281. N 4. С. 904–907.
3. Водно-болотные угодья России. Том 4. Водно-болотные угодья Северо-Востока России. Составитель Андреев А.В. 2001. 296 с.
4. meteo.ru/data/156-temperature.
5. Вайкмяэ Р.А., Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный анализ подземных льдов севера Западной Сибири, Якутии и Чукотки. Таллинн: изд. АН Эстонии. 1991. 70 с.
6. Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт

- палеогеокриологических реконструкций): В 2 т. Т..1. М.: изд. Отдела теоретических проблем РАН-МГУ, 1992. 420 с.
7. <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx> [Partner: Northeast Science Station, Cherskij]
  8. <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>
  9. Welp, L.R., Randerson J.T., Finlay J.C., Davydov S.P., Zimova G.M., Davydova A.I., Zimov S.A. A high-resolution time series of oxygen isotopes from the Kolyma River: Implications for the seasonal dynamics of discharge and basin-scale water use // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol.32. P. L14401.doi:10.1029/2005 GL022857.
  10. Соломатин В.И. Физика и география подземного оледенения. Новосибирск: Академическое изд-во "Гео". 2013. 346 с.
  11. Коняхин М.А., Михалев Д.В., Соломатин В.И. Изотопно-кислородный состав подземных льдов М.: Изд-во Моск. ун-та. 1996. 156 с.
  12. Mackay J.R. Oxygen isotope variations in permafrost, Tuktoyaktuk Peninsula area, Northwest Territories // *Geological Survey of Canada. Current Research. Part B*. 1983. Paper 83-1B. P.67-74.
  13. Vasil'chuk Yu.K. Reconstruction of the paleoclimate of the Late Pleistocene and Holocene on the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone // *Water Resources*. Published by Consultants Bureau. New York. 1991. Vol. 17. N 6. P. 640-647.
  14. Meyer H. Late Quaternary climate history of Northern Siberia - evidence from ground ice / PhD Dissertation. Alfred Wegener Institute. Polar- und Meeresforschung Forschungsstelle. Potsdam. 2001 (2003). 112 p.
  15. Böhm E. Stable isotope dynamics in a seasonally changing snow cover on Samoylov Island, Northern Siberia / Bachelor thesis, University of Potsdam. 2014. 78 p.
  16. Kleine C. Recent cryogenic processes at Samoylov Island, North Siberia for calibrating a stable-isotope thermometer for ice wedges / Bachelor thesis, University of Potsdam. 2014. 81 p.
  17. Magens D. Late Quaternary climate and environmental history of the Siberian Arctic – Permafrost Records from Cape Mamontovy Klyk, Laptev Sea / PhD Dissertation. Kiel, 2005. 130 p.
  18. Lauriol B., Duchesne A., Clark I.D. Systematique du remplissage en eau fentes de gel: les resultats d'une etude oxygene-18 et deuterium (Periodic water saturation of ice wedges: results of an oxygen-18 and deuterium study) // *Permafrost and Periglacial Processes*. 1995. Vol. 6. N 1. P. 47-55.
  19. Popp S. Late Quaternary environment of Central Yakutia (NE' Siberia): Signals in frozen ground and terrestrial sediments / PhD Dissertation. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Forschungsstelle Potsdam. 2006. 80 p.
  20. Sloat A. Modern to Late Pleistocene Stable Isotope Climatology of Alaska / PhD Dissertation. Department of Geoscience. College of Sciences. The Graduate College University of Nevada, Las Vegas. 2014. 181 p.
  21. Grinter M. Pleistocene and Holocene Climate Reconstruction at Two Moose Lake, Central Yukon, using Stable Isotopes and <sup>14</sup>C-DOC radiocarbon from Ice wedges, Pore ice and Buried sediments / PhD Dissertation. Department of Earth Sciences Faculty of Science, University of Ottawa. 2017. 122 p.
  22. Porter T.J., Froese D.G., Feakins S.J., Bindeman I.N., Mahony M.E., Pautler B.G., Reichert G.-J., Sanborn P.T., Simpson M.J., Weijers J.W.H. Multiple water isotope proxy reconstruction of extremely low last glacial temperatures in Eastern Beringia (Western

Arctic) // Quaternary Science Reviews. 2016. N 137. p. 113–125.