

**О НЕКОРРЕКТНОСТИ МЕТОДИКИ Ю.К. ВАСИЛЬЧУКА  
ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАЛЕОТЕМПЕРАТУР ПО ИЗОТОПНОМУ СОСТАВУ  
ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ**

**Рецензия на статью Ю.К. Васильчука, А.К. Васильчук  
“Реконструкция январской палеотемпературы воздуха 48–15 тысяч калиброванных лет  
назад по изотопно-кислородному составу едомы Зеленого Мыса”**

**А.А. Галанин**

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; agalanin@gmail.com*

Показано, что разработанные и широко применяемые Ю.К. Васильчуком методические приемы и формулы для реконструкции средних температур января ( $t_j = 1.5 \cdot \delta^{18}\text{O}$ ), суммы зимних отрицательных температур ( $\Sigma t_w = 250 \cdot \delta^{18}\text{O}$ ), а также средней зимней температуры ( $t_w = \delta^{18}\text{O}$ ) на основе кислородно-изотопного состава полигонально-жильных льдов являются некорректными, а получаемые по ним палеоклиматические реконструкции – недостоверными.

*Стабильные изотопы  $^{18}\text{O}$  и D, полигонально-жильные льды, реконструкции палеотемператур, неоплейстоцен, голоцен, криолитозона*

**ABOUT THE INCORRECTNESS OF Yu.K. VASIL'CHUK'S METHOD  
FOR THE RECONSTRUCTION OF PALEOTEMPERATURES  
USING ISOTOPE COMPOSITION OF WEDGE ICE**

**Review of the article by Yu.K. Vasil'chuk, A.C. Vasil'chuk  
“Air January paleotemperature reconstruction  
48–15 calibrated ka BP using oxygen isotope ratios from Zelyony Mys Yedoma”**

**A.A. Galanin**

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,  
Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; agalanin@gmail.com*

It has been revealed that methodological techniques and formulas developed and widely used by Yu.K. Vasil'chuk for the reconstruction of average January temperatures ( $t_j = 1.5 \cdot \delta^{18}\text{O}$ ), the sum of winter negative temperatures ( $\Sigma t_w = 250 \cdot \delta^{18}\text{O}$ ), as well as average winter temperatures ( $t_w = \delta^{18}\text{O}$ ) based on the oxygen-isotopic composition of polygonal ice wedge are incorrect, and the paleoclimatic reconstructions obtained from these formulas are unreliable.

*Stable isotopes  $^{18}\text{O}$  and D, ice wedges, reconstruction of paleotemperatures, Pleistocene, Holocene, permafrost*

**ВВЕДЕНИЕ**

Первые попытки применения изотопного состава полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) для оценки палеотемператур предпринимались начиная с 1970-х гг. Первоначально они вызвали большой интерес и оживленную дискуссию. Однако в 1980–1990-е гг. многие исследователи пришли к выводу, что использование ПЖЛ в качестве источника информации о палеотемпературах имеет множество ограничений [Архангелов и др., 1987; Коняхин, 1988; Васильчук, 1990; Голубев и др., 2001; Vasil'chuk, 1991]. Формирование изотопного состава данных типов льдов зависит не только от климатических факторов, но и от локальных условий роста, учет которых в настоящее время не представляется возможным. Поэтому в большинстве современных публикаций изотопный состав ПЖЛ интерпретируется преимущественно на качест-

венном, а не на количественном уровне [Деревягин и др., 2010; Meyer et al., 2002, 2015; Schirmermeister et al., 2003; Wetterich et al., 2011; Boereboom et al., 2013].

Ю.К. Васильчук является известным специалистом в изучении изотопного состава различных типов природных льдов, и начиная с 1990-х гг. по настоящее время опубликовал большое количество работ в данной области. В рецензируемой здесь статье рассматриваются вопросы использования изотопно-кислородного состава ПЖЛ для количественных палеоклиматических реконструкций второй половины позднего неоплейстоцена в бассейне нижней Колымы. В ней авторы используют несколько ранее выведенных формул [Васильчук, 1990; Васильчук, Васильчук, 2017; Vasil'chuk, 1991], которые, по их мнению, функци-

онально связывают величины  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) в ПЖЛ и палеотемпературы воздуха. Для средних температур января эта зависимость имеет вид

$$t_j = 1.5 \cdot \delta^{18}\text{O}, \quad (1)$$

для суммы зимних отрицательных температур

$$\Sigma t_w = 250 \cdot \delta^{18}\text{O}, \quad (2)$$

для средней зимней температуры

$$t_w = \delta^{18}\text{O}. \quad (3)$$

Из формул (1)–(3) следует, что средняя зимняя температура численно равна  $\delta^{18}\text{O}$ , температура января в 1.5 раза больше данной величины, а сумма зимних отрицательных температур в 250 раз больше. Вызывает сомнение не только простота используемых авторами зависимостей для описания весьма сложной многофакторной системы формирования изотопных составов ПЖЛ, но и то, что все реконструируемые температуры связаны между собой простыми линейными уравнениями и могут быть легко выведены друг из друга. Так, при несложной подстановке формулы (3) в (1) получается, что  $t_j = 1.5 \cdot t_w$ . Согласно формулам Ю.К. Васильчука, средняя температура января оказывается в 1.5 раза ниже средней зимней температуры. То же самое относится и к сумме зимних отрицательных температур, которую можно вывести из средней зимней температуры или температуры января. Рецензент полагает, что подобные следствия, напрямую вытекающие из формул (1)–(3), сами по себе полностью противоречат результатам современных метеорологических наблюдений и основным принципам климатологии, они ставят под сомнение корректность данной методики.

Целью настоящей публикации является обсуждение правомочности использования методики Ю.К. Васильчука, лежащей в основе рецензируемой статьи и других публикаций автора [Васильчук, 1990; Васильчук, Васильчук, 2017; Васильчук и др., 2019а,б; Vasil'chuk, 1991]. Для этого были проанализированы первичные данные из методических работ Ю.К. Васильчука, а также ключевые результаты отечественных и зарубежных исследований в данной области.

#### Некоторые теоретические аспекты использования изотопных составов ПЖЛ в качестве палеоклиматических индикаторов

Чтобы разобраться в правомочности методики Ю.К. Васильчука [1990, 1992; Vasil'chuk, 1991], необходимо привести несколько теоретических допущений, лежащих в основе использования изотопного состава ПЖЛ в качестве индикаторов палеотемпературы. Первое допущение состоит в том, что изотопный состав ПЖЛ формируется из талых вод снежного покрова, которые периодически

просачиваются и замерзают в морозобойных трещинах. Второе допущение: изотопный состав исходного снежного покрова изначально связан с температурой атмосферного воздуха и реконструируемыми палеоклиматическими характеристиками, данная взаимосвязь надежно установлена для исследуемого региона. Третье допущение состоит в том, что изотопный состав атмосферных осадков не испытал существенного фракционирования (изменения) в процессе формирования снежного покрова, его оттаивания и вторичного замерзания расплавов в морозобойных трещинах в виде ПЖЛ.

Очевидно, что корректное использование изотопных составов ПЖЛ в качестве палеоклиматических индикаторов предусматривает непрерывное обсуждение получаемых результатов в рамках указанных допущений при интерпретации реконструируемых палеотемператур. В противном случае достоверность этих результатов вызывает большие сомнения.

**Первое допущение** касается собственно гипотезы происхождения сингенетических позднеолейстоценовых ПЖЛ, широко распространенных в составе лессово-ледовых (едомных) отложений Арктики и Субарктики. Согласно этой гипотезе, ПЖЛ растут путем систематического раскрытия морозобойной полигональной решетки в зимнее время. В теплый сезон талые снеговые воды просачиваются в вертикальные морозобойные трещины и быстро там замерзают. Этот процесс повторяется из года в год и приводит к росту ПЖЛ в ширину и высоту. Данная гипотеза поддерживается большинством современных исследователей [Meyer et al., 2002; Schirmer et al., 2003], в том числе Ю.К. Васильчуком [1992], и здесь не подвергается критике. В целом из данного механизма формирования, который наглядно подтверждается тонкой вертикальной полосчатостью и весьма легким изотопным составом, вытекает, что ПЖЛ относятся к конгеляционному типу льдов, сформировавшихся путем замерзания снегового расплава. Слагающие ПЖЛ элементарные годичные жилки имеют разный возраст и различный изотопный состав, что связано с коротко- и долгопериодными вариациями температуры атмосферного воздуха при выпадении снежных осадков.

Вертикальная “стратификация” ПЖЛ и непредсказуемый характер заложения очередной элементарной жилки представляют наиболее серьезные и практически непреодолимые проблемы использования данных типов льдов для детальных палеоклиматических реконструкций [Meyer et al., 2002]. Из имеющихся сведений об абсолютном возрасте ПЖЛ и вмещающих отложений следует, что их формирование происходило на протяжении тысяч и десятков тысяч лет в условиях существенных климатических флуктуаций. Кроме

того, во многих случаях возраст льдов оказывается существенно меньше возраста вмещающих отложений того же горизонтального уровня, что отражается в большей вариации изотопного состава вкрест простирания ПЖЛ, чем по вертикали. В то же время возраст и изотопный состав льда в верхней и нижней частях жилы может оказаться одинаковым, из-за чего опробование льдов из ПЖЛ рекомендуется выполнять поперек жил.

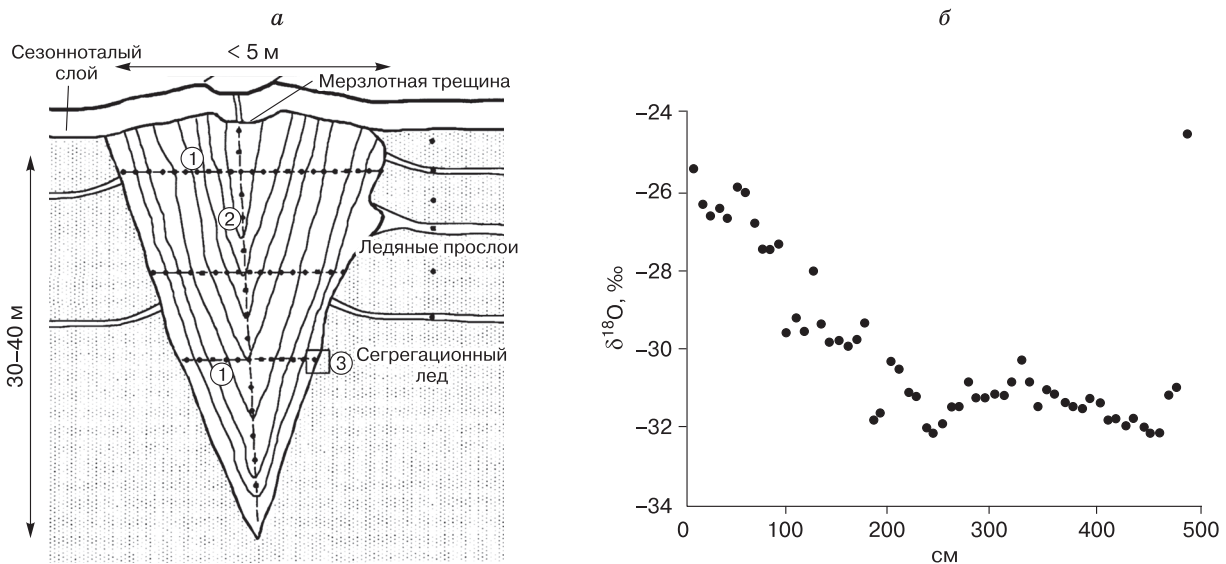
На определяющую роль стратегии пробоотбора при изучении изотопного состава ПЖЛ указывают все известные специалисты в данной области [Деревягин и др., 2010; Meyer et al., 2002, 2015; Schirmeister et al., 2003; Wetterich et al., 2011; Voerboom et al., 2013]. Так, в статье Х. Мейера с соавт. [Meyer et al., 2002], посвященной изучению изотопного состава ПЖЛ п-ова Быковский, есть специальный параграф “Sampling strategy”, где авторы констатируют: “Стабильные изотопы из вертикальных разрезов ледяных жил (ПЖЛ) имеют в четыре раза меньшие стандартные отклонения, чем горизонтальные разрезы (в тех же жилах), потому что вертикальный отбор проб осуществляется вдоль направления трещин (по одной жилке). Таким образом, случайно выбранный вертикальный профиль не обязательно отражает климатические вариации”. Интересно, что данная работа цитируется в рецензируемой статье, но авторы не комментируют заключение своих коллег по стратегии пробоотбора льдов из ПЖЛ.

Действительно, как далее заключает Х. Мейер с соавт. [Meyer et al., 2002], вариация изотопного состава жил в горизонтальном сечении намного

более существенная (рис. 1). Отсутствие вертикальной плоскости симметрии на графике вариации  $\delta^{18}\text{O}$  (рис. 1, б) свидетельствует о том, что рост жилы происходил не симметрично, а путем добавления новых элементарных жилок преимущественно с левой стороны. По мере роста жилы кислородно-изотопный состав льда изменился практически в 1.5 раза – от 32 до 24 ‰. Это свидетельствует о значительных изменениях климатических условий и изотопного состава снежного покрова на протяжении формирования ПЖЛ.

В рецензируемой статье, как и в других публикациях Ю.К. Васильчука [Васильчук, 1990, 1992; Васильчук, Васильчук, 2017; Васильчук и др., 2019а,б; Vasil'chuk, 1991], пробоотбор выполнен по вертикальной секции [наст. сб., с. 54, рис. 5]. Согласно рассмотренным выше представлениям о строении и механизме формирования ПЖЛ, эти пробы могут представлять какую-то группу элементарных жилок близкого возраста. Данное предположение полностью подтверждается отсутствием каких-либо закономерных изменений кислородно-изотопного состава в вертикальном профиле жилы. Имеющиеся единичные выбросы статистически недостоверны и не могут рассматриваться как климатические события, кроме того, они невелики и могут быть вызваны изменениями локальных условий.

При данном способе отбора большинство проб попадает в узкую совокупность элементарных жилок близкого возраста, в то время как состав боковых и, возможно, более древних частей ПЖЛ остается неизвестным. Незначительная ва-



**Рис. 1.** Рекомендуемая стратегия пробоотбора при изучении изотопного состава ПЖЛ (а) и вариация величины  $\delta^{18}\text{O}$  поперек ледяной жилы шириной около 5 м по трансекту 1 (б), п-ов Быковский [Meyer et al., 2002].

а: черные точки – положение отобранных проб; цифры в кружках: 1 – горизонтальный трансект, 2 – вертикальный трансект, 3 – обменные процессы между ледяной жилой и сегрегационным льдом.

риация в интервале 30–32 % и единичные отклонения значений  $\delta^{18}\text{O}$  носят скорее случайный характер и не могут рассматриваться как климатические события. В целом вариация значений  $\delta^{18}\text{O}$  по вертикали не дает оснований судить о закономерных тенденциях изменения климатических условий формирования состава ПЖЛ по вертикали.

**Вторым допущением**, лежащим в основе использования  $^{18}\text{O}$  и  $\text{D}$  в качестве температурных индикаторов, является фундаментальная зависимость изотопного состава атмосферных осадков от температуры их конденсации [Craig, 1961; Dansgaard, 1964; Clark, Fritz, 1997]. Данная зависимость обоснована В. Дансгардом [Dansgaard, 1964] на большом фактическом материале. В обобщенном виде при конденсации атмосферного водяного пара в лед (снег) в интервале температур  $-30\text{ }^\circ\text{C} < t < 0\text{ }^\circ\text{C}$  изотопный состав конденсата (лед, снег) приближенно описывается уравнениями  $\delta^{18}\text{O} = 0.68t - 13.6$  и  $\delta\text{D} = 5.6t - 100$ . Величины  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  здесь выражены в промилле (‰), а температура  $t$  – в градусах шкалы Цельсия ( $^\circ\text{C}$ ). В очень холодных регионах при низких температурах конденсации атмосферного пара в интервале от  $-20$  до  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  угловые коэффициенты уравнений для  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  снижаются до 0.58 и 4.5 соответственно [Dansgaard, 1964].

Таким образом, изотопный состав выпадающего зимой снега зависит от температуры воздуха в момент его выпадения. Чем ниже эта температура, тем более легкий изотопный состав имеет выпадающий снег. Следует отметить, что снежные осадки, формирующиеся из них снежинки, ледники и некоторые другие виды природных льдов относятся к осадочно-метаморфическому типу природных льдов. Их изотопный состав напрямую связан с температурными условиями в момент конденсации и может быть использован в качестве температурного индикатора.

Вызывает удивление, что ни в рецензируемой здесь статье, ни в методических публикациях Ю.К. Васильчука [Васильчук, 1990; Васильчук, Васильчук, 2017; Васильчук и др., 2019а,б; Vasil'chuk, 1991] установленная В. Дансгардом [Dansgaard, 1964] фундаментальная зависимость и формулы связи значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\text{D}$  атмосферных осадков с температурой воздуха в момент их выпадения никак не обсуждаются.

Поскольку температура воздуха на протяжении зимнего сезона существенно изменяется, изменяется также изотопный состав выпадающего снега. Например, в Якутске снег с наиболее легким изотопным составом обычно выпадает на протяжении января – самого холодного месяца года [Папина и др., 2017; Kurita et al., 2005]. В период наблюдений с 2013 по 2015 г. в январских осадках наблюдались отдельные экстремально низкие значения  $\delta^{18}\text{O}$  ( $-45.0\text{ }^\circ\text{‰}$ ) и  $\text{D}$  ( $-350.1\text{ }^\circ\text{‰}$ ) [Папина и

др., 2017]. В целом взаимосвязь изотопного состава атмосферных осадков холодного периода и средней температуры воздуха за время их выпадения описывается уравнениями

$$\delta^{18}\text{O} = 0.59t^\circ - 19.7 \quad (R^2 = 0.88),$$

$$\delta\text{D} = 4.16t^\circ - 149.38 \quad (R^2 = 0.89),$$

где  $t^\circ$  – средняя температура.

Угловые коэффициенты этих уравнений (0.59 и 4.16) близки к значениям коэффициентов (0.58 и 4.5) уравнений В. Дансгарда [Dansgaard, 1964], установленным для условий конденсации атмосферного водяного пара в снег в интервале температуры приземного воздуха от  $-20$  до  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ .

Приведенные выше уравнения получены на основе реальных наблюдений изотопного состава снежных осадков и температуры воздуха во время их выпадения [Папина и др., 2017]. Однако они никаким образом не коррелируют с уравнениями Ю.К. Васильчука (для средней температуры января и для средней температуры холодного периода) [Васильчук, 1990; Васильчук, Васильчук, 2017; Vasil'chuk, 1991], которые для удобства сравнения можно записать в виде

$$\delta^{18}\text{O} = 0.67t_j, \quad \delta^{18}\text{O} = t_w.$$

Необходимо отметить, что наиболее низкие температуры зимнего периода связаны с ясной антициклональной погодой, при которой осадки практически не выпадают. Поэтому в ультраконтинентальных районах доля январского снега в общем зимнем снеготопле, как правило, невелика. В то же время максимальное количество снежных осадков связано с проникновением циклонов, сильными оттепелями и более высокими температурами конденсации выпадающего снега.

Метеорологические данные свидетельствуют, что только в континентальных регионах январь является наиболее холодным месяцем года, в то время как в морском арктическом климате наиболее холодный месяц – февраль. Поэтому снежные осадки февраля, а не января, будут обладать наиболее легким изотопным составом. К районам с морским арктическим климатом, где наиболее холодным месяцем является февраль, относится значительная часть территории Чукотского полуострова и некоторая часть арктического побережья Северо-Восточной Азии (см. метеоданные станций Провидения, Певек, Билибино, Мыс Шмидта, Тикси). В данной связи не совсем понятно, какие палеотемпературы реконструирует Ю.К. Васильчук по формуле (1) для этих районов? Правомочна ли данная зависимость также и для среднефевральской температуры? Если правомочна, то в каких случаях?

В целом необходимо констатировать, что нормированные величины изотопных составов снеж-



ного покрова проявляют жесткую связь с температурой воздуха во время их выпадения. Поэтому они могут использоваться для оценки температуры воздуха на основе формул В. Дансгарда [Dansgaard, 1964] после их калибровки для конкретных климатических районов, как это сделано в работе [Папина и др., 2017]. Данные формулы также правомочно применять для оценки температурных условий формирования всех осадочно-метаморфических льдов, поскольку изотопный состав последних напрямую связан с температурой атмосферного воздуха при конденсации.

**Третье допущение** использования ПЖЛ в качестве температурных индикаторов состоит в том, что их состав близок к исходному снежному покрову и не подвергался существенному фракционированию на стадиях его оттаивания и повторного замерзания на морозобойных трещинах. Вообще фракционирование изотопного состава воды происходит непрерывно в процессе ее испарения из океана, движения вглубь континентов, выпадения в виде осадков [Craig, 1961; Dansgaard, 1964; Rozanski et al., 1993; Clark, Fritz, 1997; Kurita et al., 2005]. В целом по мере удаления от океана изотопный состав становится существенно более легким.

Известно, что соотношение между  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  в атмосферном паре вблизи точки росы весьма устойчиво, оно сохраняется при различной температуре и описывается уравнением

$$\delta\text{D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10,$$

именуемым глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ), линией Крейга, линией равновесия изотопного состава и др. [Rozanski et al., 1993; Clark, Fritz, 1997].

В результате сложных процессов фракционирования в ходе круговорота воды изотопные составы могут отклоняться в ту или иную сторону от ГЛМВ. Величину и характер этого отклонения принято измерять в виде дейтериевого эксцесса  $d_{\text{exc}}$ , рассчитываемого по формуле [Dansgaard, 1964]

$$d_{\text{exc}} = \delta\text{D} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}.$$

В аридных обстановках уже на стадии движения жидких атмосферных осадков к земной поверхности происходит их частичное испарение. При этом более легкая вода ( $\text{H}_2\text{O}$ ) возвращается в парообразное состояние, а в жидкой фазе накапливаются молекулы тяжелой воды ( $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ,  $\text{D}_2^{16}\text{O}$ ). Однако скорость испарения молекул  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  выше, чем молекул  $\text{D}_2^{16}\text{O}$ , поэтому жидкая фаза относительно обедняется тяжелым кислородом и обогащается дейтерием. Данный процесс называется испарительным фракционированием. В графическом виде в координатах  $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$  изотопные составы с ярко выраженным испарительным фракционированием лежат существенно

ниже ГЛМВ, а их дейтериевые эксцессы нередко приобретают отрицательные значения.

В зимнее время при поступательном охлаждении воздушных масс существенно снижается количество водяного пара, изотопный состав которого становится все более легким. Это происходит за счет обеднения водяного пара молекулами тяжелой воды, которые конденсируются в первую очередь. В таких условиях изотопное равновесие  $\delta\text{D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$  не сохраняется из-за затрудненности изотопного обмена в системе “лед–пар” [Dansgaard, 1964]. Поэтому изотопный состав атмосферного пара смещается вверх по отношению к ГЛМВ, а дейтериевый эксцесс приобретает высокие положительные значения ( $>10$ ).

На протяжении зимнего периода еще до начала снеготаяния изотопный состав снежного покрова также не остается постоянным, что связано с интенсивной его сублимацией (минуя жидкую фазу). Инструментально установлено, что в Центральной Якутии в зимний период испаряется до 30 % выпавшего снега и более [Арэ, 1972; Голубев и др., 2001]. При сублимации испаряются преимущественно молекулы легкой воды, а снежный остаток обогащается тяжелыми изотопами. О повышении концентраций  $^{18}\text{O}$  и  $\text{D}$  (в 1.5–3 раза) в снежном покрове в результате его сублимации свидетельствуют результаты исследований В.Н. Голубева с соавт. [2001].

В Центральной Якутии в 10 генерализованных пробах, отобранных из снежного покрова (на всю его мощность) за один зимний период, вариации  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  достигали около 10 и 75 ‰ соответственно, а средние значения составили  $\delta^{18}\text{O} = -32.0 \pm 5.1 \text{ ‰}$  и  $\delta\text{D} = -248.4 \pm 35.4 \text{ ‰}$ ,  $d_{\text{exc}} = 7.5 \pm 6.5 \text{ ‰}$  [Галанин и др., 2019]. Исследованный состав описывается уравнением  $\delta\text{D} = 6.8 \cdot \delta^{18}\text{O} - 31.9$  [Там же] и кардинально отличается от состава выпадающего зимой снега, описываемого уравнением  $\delta\text{D} = 8.2 \cdot \delta^{18}\text{O} + 21.9$  [Папина и др., 2017]. Значительное снижение дейтериевого эксцесса и углового коэффициента в снежном покрове свидетельствует о мощном испарительном фракционировании как до начала весеннего снеготаяния, так и на его протяжении. Самые тяжелые изотопные составы ( $\delta^{18}\text{O} = -19.3 \text{ ‰}$ ,  $\delta\text{D} = -160.9 \text{ ‰}$ ,  $d_{\text{exc}} = -6.7 \text{ ‰}$ ) различаются почти в 2 раза и характерны для проб, отобранных из последних снежников в июне [Галанин и др., 2019].

Из вышесказанного следует, что при расчете палеотемператур из изотопного состава ПЖЛ и других льдов необходимо сначала провести оценку их степени фракционирования, дейтериевого эксцесса, сравнить их положение относительно ГЛМВ. В противном случае невозможно установить реальный генезис исследуемых водных и ледовых объектов, а также корректно интерпретировать температурные условия их формирования.

Например, в условиях наиболее холодных и малоснежных зим неизбежно возрастает роль сублимации снежного покрова, что отразится на существенном утяжелении изотопного состава снежного покрова и ПЖЛ. В то время как на основе методики Ю.К. Васильчука любое утяжеление изотопного состава ПЖЛ всегда сопоставляется с потеплением климата.

К сожалению, вопросы формирования изотопного состава снежного покрова и механизмов фракционирования на стадии преобразования в ПЖЛ совершенно не рассматриваются в рецензируемой статье. Многие важные и известные работы в данной области (например, [Голубев и др., 2001] и мн. др.) не цитируются и не комментируются авторами. Вообще, в большинстве своих исследований Ю.К. Васильчук оперирует лишь с кислородно-изотопными составами, а дейтерий не учитывает. Рецензент полагает, что, используя только величины  $\delta^{18}\text{O}$ , невозможно оценить степень фракционирования исследуемых водных и ледовых объектов, а также установить реальное происхождение их изотопного состава.

#### Анализ методики Ю.К. Васильчука для реконструкции палеотемператур по изотопному составу ПЖЛ

Критическим аспектом рецензируемой статьи Ю.К. Васильчука, А.К. Васильчук являются не только некорректная стратегия пробоотбора и отсутствие данных об изотопном фракционировании исследуемых авторами ПЖЛ. Вызывает скепсис отсутствие в методических публикациях [Васильчук, 1990, 1992; Васильчук, Васильчук, 2017, 2020; Васильчук и др., 2019а,б; Vasil'chuk, 1991] объяснения, каким математическим способом были выведены авторские формулы (1)–(3) (см. введение) и какие фактические данные лежат в их основе. В процессе изучения работ Ю.К. Васильчука рецензент с удивлением обнаружил, что впервые данные формулы были использованы автором в 1990 г. [Васильчук, 1990], в то время как исходные данные, лежащие в основе их разработки, опубликованы лишь в 1992 г. [Васильчук, 1992].

Парадоксально, что ни в одной работе автора за последние 30 лет, где использованы данные формулы, не рассматриваются первичные данные и способ их аппроксимации, не указаны точность, достоверность и воспроизводимость получаемых результатов. Автор лишь сообщает, что по формуле (1) ( $t_j = 1.5 \cdot \delta^{18}\text{O}$ ) средние температуры января реконструируются с точностью  $\pm 3^\circ\text{C}$  [Васильчук, 1990, 1992; Васильчук, Васильчук, 2017; Vasil'chuk, 1991].

В рецензируемой статье и в других своих публикациях автор сообщает, что методика получения данной формулы им была впервые разработа-

на и опубликована в англоязычной версии журнала “Водные ресурсы” [Vasil'chuk, 1991]. Возникает вопрос, если данная формула является столь важной для палеоклиматических реконструкций, то почему на протяжении почти 30 лет после ее опубликования автор не выполнил дополнительных методических исследований по ее уточнению, калибровке, верификации на более представительной выборке первичных данных? Странно, что совершенно отсутствуют более поздние публикации автора по развитию данной методики и улучшению приемов реконструкции палеотемператур по изотопному составу ПЖЛ.

Публикация методики Ю.К. Васильчука [Vasil'chuk, 1991] в англоязычной версии журнала длительное время оставалась недоступной для большинства исследователей. Еще более 15 лет назад рецензент пытался найти данную публикацию и проанализировать используемую автором методику. Однако попытка ознакомиться с этой наиболее самоцитируемой работой автора [Vasil'chuk, 1991] не увенчалась тогда успехом из-за физической удаленности от крупных библиотек, а также слабого развития отечественных и международных научных электронных ресурсов, отсутствия доступа к международным базам цитирования. Рецензент предполагает, что и для большинства других исследователей доступ к первичным данным, лежащим в основе методики Ю.К. Васильчука, был весьма ограничен и практически невозможен на протяжении длительного времени.

Занимаясь рецензированием публикуемой статьи, рецензент обнаружил, что в настоящее время на портале eLibrary стали доступны как русскоязычная [Васильчук, 1990], так и англоязычная [Vasil'chuk, 1991] версии данной статьи. Сравнение обеих версий показало, что они полностью идентичны. Рецензент весьма удивлен тем, что автор никогда не ссылается на русскоязычную версию [Васильчук, 1990] своей методической публикации, которая, несомненно, была бы более доступна для широкого круга читателей.

К своему очередному удивлению, исследуя основные наиболее самоцитируемые методические публикации Ю.К. Васильчука [Васильчук, 1990; Vasil'chuk, 1991], рецензент не обнаружил в их тексте формулы  $t_j = 1.5 \cdot \delta^{18}\text{O}$  для средней температуры января, а также способа ее разработки. После тщательного изучения данной публикации формула все же была найдена в названии одного из заголовков столбца таблицы вместе с реконструированными на ее основе средними температурами января. Но какие-либо сведения об исходных данных и способе получения формул (1)–(3) в публикациях [Васильчук, 1990; Vasil'chuk, 1991] рецензентом не были обнаружены.

В этой же публикации рецензент обнаружил формулу  $\Sigma t_w = 250 \cdot \delta^{18}\text{O}$ , разработанную Ю.К. Васильчуком для реконструкции суммы отрицательных зимних температур. Но никаких алгоритмов и методических приемов разработки формулы (2) в указанных публикациях Ю.К. Васильчука не имеется. Однако именно в данных публикациях эти формулы появляются впервые без каких-либо ссылок на предшествующие методические работы. Это подтверждают и более ранние публикации, в которых автор еще не применял никаких формул для реконструкции палеотемператур.

В аннотациях статей [Васильчук, 1990; Vasil'chuk, 1991] Ю.К. Васильчук также ничего не со-

общает о разработанных им формулах, но пишет, что им сооставлены карты распределения величины  $\delta^{18}\text{O}$  в современных ледяных жилах и карты изотерм сумм отрицательных зимних температур в пределах низкотемпературной криолитозоны СССР. Действительно, в данных публикациях приведены весьма обобщенные мелкомасштабные климатические карты из Справочника по климату СССР за 1965–1967 гг. [Справочник..., 1966а,б, 1967], где показаны среднеянварские и средnezимние температуры северо-востока Азии в виде изотерм. На эти же карты автором вынесены местонахождения и кислородно-изотопные составы опробованных им ПЖЛ. Причем местоположения

**Значения  $\delta^{18}\text{O}$  в ростках современных сингенетических повторно-жильных льдов на о. Айон, на севере Чукотки и близлежащих островах Восточной Арктики России, по [Васильчук, 1992] с дополнениями по [Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., 2017]**

Местоположение современных жилок	Координаты	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PIW}}$ , ‰ в современных ПЖЛ	Климатические данные по метеостанциям			
			$\Sigma t_w$	$t_w$	$t_j$	$t_s$
О. Айон	69°47' с.ш., 168°39' в.д.	-20.0	-5047	-20	-29	-12
Устье р. Раучуа	69°30' с.ш., 166°43' в.д.	-22.0	-5436	-21	-32	-13
Р. Кувет	69°16' с.ш., 175°02' в.д.	-21.0	-4700	-18	-27	-11
О. Врангеля	71°14' с.ш., 179°24' з.д.	-20.0	-4272	-17	-25	-11
Р. Амгуэма	67°03' с.ш., 178°53' з.д.	-19.0	-4992	-19	-29	-11
Оз. Коолень	65°59' с.ш., 170°58' з.д.	-16.0	-3400	-14	-22	-7
Оз. Эльгыгытгын	67°30' с.ш., 172°00' в.д.	-20.4	-4598	-18	-27	-10
О. Генриетты	77°06' с.ш., 156°30' в.д.	-15.3	-5330	-17	-27	-12
О. Жохова	76°09' с.ш., 152°43' в.д.	-20.0	-5363	-18	-29	-13
О. Котельный	75°27' с.ш., 140°50' в.д.	-18.1	-5408	-19	-29	-14
О. Земля Бунге	75°24' с.ш., 141°16' в.д.	-17.6	-5989	-21	-28	-14
О. Малый Ляховский	74°07' с.ш., 140°40' в.д.	-18.0	-5408	-20	-31	-14
О. Большой Ляховский, юг	74°07' с.ш., 140°40' в.д.	-20.4	-5400	-20	-31	-14
О. Новая Сибирь	75°03' с.ш., 148°28' в.д.	-18.0	-5500	-20	-30	-14
О. Четырехстолбовый	70°47' с.ш., 161°36' в.д.	-20.0	-5143	-19	-30	-13
Плахинский Яр	70°47' с.ш., 161°36' в.д.	-25.0	-5733	-23	-35	-13

Примечание.  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PIW}}$  – значения  $\delta^{18}\text{O}$  в ростках повторно-жильных льдов, ‰ к SMOW;  $\Sigma t_w$  – сумма зимних температур, град-сут;  $t_w$  – средnezимняя температура воздуха, °C;  $t_j$  – среднеянварская температура воздуха, °C;  $t_s$  – среднегодовая температура грунта (°C) без снежного и растительного покровов. (Заголовок таблицы и примечание сохранены в авторском варианте [Васильчук, Васильчук, 2017]).

последних в большей части удалены от ближайших метеостанций на сотни километров. При этом автор ничего не сообщает о том, как именно были получены собственно функциональные зависимости (1) и (2) на основе анализа данных карт. В заблуждение вводит и тот факт, что во всех своих последующих публикациях автор указывает, что формулы (1)–(3) были получены именно на основе сопоставления данных метеостанций, а не генерализованных мелкомасштабных карт, построенных на их основе!

Вместе с тем по мере знакомства с другими публикациями Ю.К. Васильчука становится очевидным, что именно эти карты [Васильчук, 1990; Vasil'chuk, 1991] и являются исходными данными для выведения формул (1)–(3). То есть климатические характеристики для всех точек опробования современных ПЖЛ были установлены Ю.К. Васильчуком путем экстраполяции изотерм мелкомасштабных климатических карт из [Строчков..., 1966а,б, 1967] в форму цифровой таблицы, которая, вероятно, была получена автором уже после выведения формул, поскольку отсутствует в его методических наиболее цитируемых работах [Васильчук, 1990; Vasil'chuk, 1991], а появляется двумя годами позже в другой малодоступной публикации [Васильчук, 1992]. Наконец, в 2017 г. данная исходная таблица и основанные на ней формулы были опубликованы автором в широкодоступном издании [Васильчук, Васильчук, 2017] и в настоящее время доступны для анализа. Для удобства рассмотрения эта таблица с исходными данными, лежащими в основе формул (1)–(3) приведена в настоящей статье (см. таблицу).

#### Анализ корректности и надежности исходных данных для расчета формул (1)–(3)

Много вопросов имеется к исходным данным (величина  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PIW}}$ , см. таблицу) кислородно-изотопного состава современных элементарных ПЖЛ из разных районов криолитозоны Северной Евразии, использованных автором для разработки формул (1)–(3) [Васильчук, 1990, 1992; Васильчук, Васильчук, 2017; Vasil'chuk, 1991]. Что автор имеет в виду под современным возрастом и каким образом он был установлен?

Согласно утверждению самого автора, один стандартный отбираемый из ПЖЛ образец льда размерами 10 × 10 см включает множество элементарных годовичных жилок и охватывает интервал от 100 до 300 лет [Васильчук, 1990; Vasil'chuk, 1991]. В таком случае изученные автором “современные” жилки толщиной 10–20 см могли формироваться начиная с Малого ледникового периода вплоть до настоящего времени. За это время как глобальный, так и региональные климаты претерпели существенные изменения, о чем свидетельствуют данные метеорологических наблюдений. Зимние и среднегодовые температуры за этот пе-

риод повысились на несколько градусов, что отразилось в существенном сокращении ледников. С учетом того, что в исходную выборку автора могли попасть и более древние жилы, законсервированные в многолетнемерзлых породах на протяжении нескольких тысяч лет, рецензент считает, что их кислородно-изотопный состав может характеризовать не современные климатические условия, а осредненные для всего позднего голоцена, поскольку абсолютных датировок данных жил не имеется.

Необходимо отметить, что даже в пределах одного района вариации кислородно-изотопного состава современных ростков ПЖЛ достигают существенных значений. Так, в районе Ойгосского Яра (пролив Дмитрия Лаптева) в 38 пробках из современных ростков ПЖЛ величина  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PIW}}$  варьирует от  $-18.24$  до  $-25.27$  ‰ [Opel et al., 2011], а на п-ове Быковский (22 пробы) – от  $-22.38$  до  $-29.02$  ‰ [Meyer, 2001] и др. При попытке определить современную среднюю температуру января  $t_j$  для данных районов по формуле (1) Ю.К. Васильчука ( $t_j = 1.5 \cdot \delta^{18}\text{O}$ ) путем подстановки значений  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PIW}}$  получается, что в районе Ойгосского Яра она варьирует от  $-27$  до  $-38$  °С, а на полуострове Быковский – от  $-34$  до  $-44$  °С соответственно. Однако при использовании формулы (1) для интерпретации изотопных составов древних ПЖЛ гораздо меньшие отклонения величины  $\delta^{18}\text{O}$  в 2–5 ‰, полученные по одному-двум образцам, интерпретируются Ю.К. Васильчуком как изменения средней температуры января на 5–7 °С и более. Данный подход представляется категорически неприемлемым и противоречащим фактическим данным.

Еще одним спорным моментом использования состава данных голоценовых жил для реконструкции температур формирования поздне-неоплейстоценовых ПЖЛ является возможность принципиального различия их генезиса и условий формирования. Поздне-неоплейстоценовые ПЖЛ в составе лессово-ледовых (едомных) отложений являются сингенетическими образованиями. Многие исследователи считают, что лессово-ледовые отложения вместе с данным типом ПЖЛ являются ископаемыми реликтами. На протяжении голоцена и в настоящее время они практически не формируются, а лишь деградируют, формируя обширные термокарстовые аласные равнины [Строчков..., 1979; Геокриология..., 1989]. Ландшафты и климатические условия их формирования относятся к разряду “вымерших” [Строчков..., 1979; Томирдиаро, Черенький, 1987].

Наоборот, исследованные Ю.К. Васильчуком голоценовые жилки могут представлять собой эпигенетические ПЖЛ, формирующиеся путем промерзания современных и голоценовых пойм. Вторичному (эпигенетическому) промерзанию и



морозобойному растрескиванию могут подвергаться также ископаемые ПЖЛ позднеплейстоценового возраста. Однако лед, слагающий современные ПЖЛ, может оказаться изотопным дериватом не только талых снеговых вод, но и надмерзлотных, а также паводковых речных вод, затекающих в морозобойные трещины.

Так, анализ 22 изотопных определений для конжеляционных наледных льдов в Центральной Якутии [Галанин и др., 2019] показывает, что их осредненный состав  $\delta^{18}\text{O} = -21.1 \pm 1.2 \text{ ‰}$ ,  $\delta\text{D} = -172.2 \pm 9.5 \text{ ‰}$ ,  $d_{\text{exc}} = -2.5 \pm 2.5 \text{ ‰}$  даже более легкий, чем осредненный состав  $\delta^{18}\text{O} = -19.4 \pm 2.3 \text{ ‰}$  современных ПЖЛ арктической криолитозоны из публикаций Ю.К. Васильчука [1990; Vasil'chuk, 1991].

Однако, как известно, наледи имеют гидрогенное происхождение и формируются путем замерзания речной воды, изотопный состав которой всегда значительно тяжелее снегового расплава, являющегося близким дериватом атмосферных осадков холодного времени года.

На принципиальное отличие генезиса древних сингенетических ПЖЛ от современных эпигенетических жил указывает кардинальное различие их дейтериевого эксцесса. Это должно быть известно Ю.К. Васильчуку из публикации [Буданцева, Васильчук, 2019], в которой он является соавтором.

Отличить разные генетические типы льдов близкого кислородно-изотопного состава можно по величине  $d_{\text{exc}}$ . У осадочно-метаморфических льдов (снежный покров, ледники) и их близких дериватов величина  $d_{\text{exc}} > 5 \text{ ‰}$ , что свидетельствует об их тесной связи с атмосферными осадками.

Данная связь обычно наблюдается и в изотопном составе позднеплейстоценовых ПЖЛ, осредненный дейтериевый эксцесс которых варьирует в пределах  $5 \text{ ‰} < d_{\text{exc}} < 10 \text{ ‰}$  [Галанин и др., 2019]. Снижение дейтериевого эксцесса в ПЖЛ и утяжеление их изотопного состава характерно для наиболее холодных и сухих интервалов, в частности, последнего термического минимума МИС-2. Низкий дейтериевый эксцесс  $d_{\text{exc}} < 5 \text{ ‰}$  может свидетельствовать о существенном фракционировании и весьма опосредованной связи изотопного состава ПЖЛ с составом исходного снежного покрова и температурами воздуха в момент его формирования.

Как это следует из таблицы [Васильчук, Васильчук, 2017], а также других данных [Meuser, 2001; Opel et al., 2011], кислородно-изотопный состав современных ПЖЛ Северной Евразии совершенно не похож на изотопный состав современного снежного покрова, выпадающего в этих районах при температурах ниже  $-20 \dots -40 \text{ °C}$  [Папина и др., 2017; Галанин и др., 2019; Kurita et al., 2005]. К сожалению, автор не приводит никаких убедитель-

ных описаний строения исследованных элементарных ледяных жил, изотопный состав которых использован им для разработки формул (1)–(3). Отсутствие сведений о величине  $\delta\text{D}$  не дает возможности оценить величину  $d_{\text{exc}}$  и сделать выводы о характере фракционирования и генетической принадлежности данных льдов. Все это приводит к снижению достоверности основанных на этих данных методических построений, формул (1)–(3), а также выполненных на их основе палеотемпературных реконструкций автора.

Наиболее серьезный скепсис вызывают данные инструментальных наблюдений по метеостанциям, использованные Ю.К. Васильчуком [Васильчук, Васильчук, 2017] для разработки формул и приведенные в таблице. Непонятно, данные каких метеостанций автор имеет в виду и за какой период наблюдений. Большинство читателей, очевидно, не останавливаются на этом вопросе. Вместе с тем во всех публикациях автора нет ссылок на источник этих данных.

Вообще большинство местоположений современных ПЖЛ, исследованных Ю.К. Васильчуком, крайне удалены от любых метеостанций, однако и для них автор приводит детальные климатические характеристики (см. таблицу). Автор уверенно манипулирует климатическими данными многолетних наблюдений таких удаленных объектов, как острова Генриетты, Котельный, Жохова, Малый Ляховский, Земля Бунге, приводя не только средние зимние и средние январские температуры, но и среднегодовые температуры земной поверхности. Разобраться с данным вопросом можно только путем анализа первых публикаций [Васильчук, 1990; Vasil'chuk, 1991], в которых появляются формулы (1)–(3).

Однако и в этих публикациях нет никаких исходных таблиц со списком метеостанций и данными метеорологических наблюдений, но приведены мелкомасштабные климатические карты из Справочника по климату СССР за 1965–1967 гг. [Справочник..., 1966а,б, 1967]. Автор не объясняет, как именно данные мелкомасштабные карты были трансформированы в количественные температурные характеристики и переведены из графического вида в цифровой формат. Однако автор сообщает, что для своего анализа он использовал данные по 250 метеостанциям! Рецензент считает эти сведения спекулятивными и недостоверными.

В контексте указанных публикаций и приведенных в них иллюстраций легко понять, что все метеорологические данные взяты автором путем графической экстраполяции изотерм. Данный способ получения исходных климатических характеристик для аппроксимации изотопных составов современных ПЖЛ и выведения формул (1)–(3), по мнению рецензента, совершенно недопус-

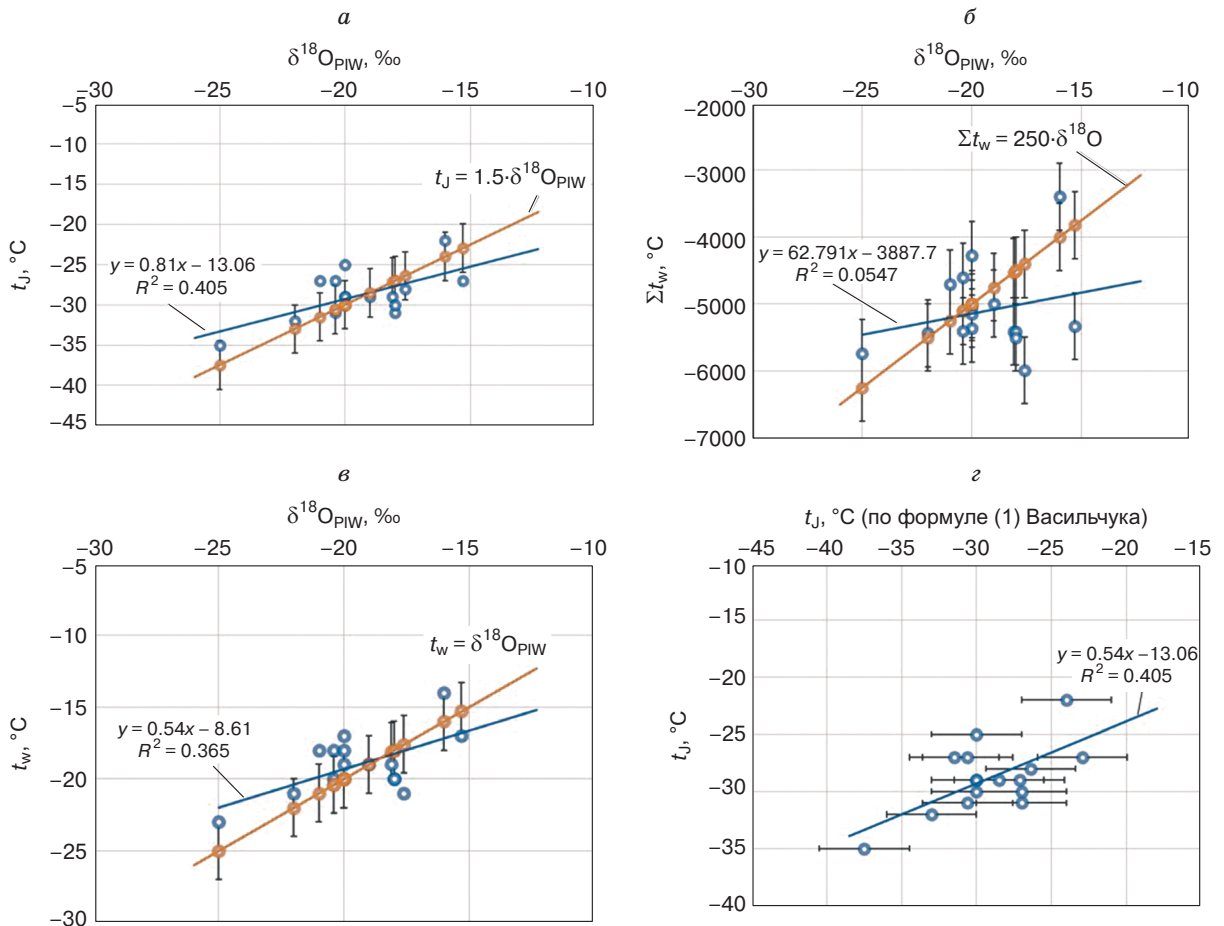
тим. Это связано как с весьма разреженной сетью метеостанций в регионе, так и со значительными искажениями, вызванными генерализацией метеорологических данных при построении изотерм. Данные карты также практически не учитывают изменения климатических параметров в связи с высотной поясностью и локальными особенностями климатов.

Вызывает большой скепсис, что вплоть до настоящего времени автор продолжает использовать формулы, построенные на основе климатических данных более чем полувекковой давности, не задумываясь о необходимости их перепроверки и корректировки в соответствии с современными климатическими изменениями, увеличением продолжительности временных рядов наблюдений на метеостанциях и др.

### Анализ математической достоверности формул (1)–(3) и связи с исходными данными

Перечень установленных рецензентом выше критических неопределенностей и возможных источников ошибок настолько велик и предельно критичен, что дальнейшее доказательство неправомерности методики Ю.К. Васильчука [Васильчук, 1990; Vasil'chuk, 1991], казалось бы, уже не требуется. Вместе с тем, поскольку автор умалчивает об алгоритмах и методах, на основе которых были выведены его формулы, рецензент попытался сделать это самостоятельно.

Для этого был выполнен анализ статистической связи (корреляции) значений  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PIW}}$  с инструментальными данными ( $\Sigma t_w$ ,  $t_w$ ,  $t_j$ ), взятыми из публикации [Васильчук, Васильчук, 2017] (см. таблицу, рис. 2). Для оценки характера и величи-



**Рис. 2.** Линейные регрессии (синие точки и линии) между климатическими параметрами и величиной  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PIW}}$  в современных ростках ПЖЛ в разных районах Северной Евразии и их аппроксимация формулами Ю.К. Васильчука (оранжевые точки и линии).

*а* – линейная регрессия между  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PIW}}$  и средней температурой января и аппроксимация формулой  $t_j = 1.5 \cdot \delta^{18}\text{O}$ ; *б* – линейная регрессия между  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PIW}}$  и суммой зимних отрицательных температур и аппроксимация формулой  $\Sigma t_w = 250 \cdot \delta^{18}\text{O}$ ; *в* – линейная регрессия между  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PIW}}$  и средней зимней температурой и аппроксимация формулой  $t_w = \delta^{18}\text{O}$ ; *г* – линейная регрессия между значениями средних температур января по данным метеостанций и этими же температурами, рассчитанными по формуле  $t_j = 1.5 \cdot \delta^{18}\text{O}$  на основе кислородно-изотопного состава современных ростков ПЖЛ. Исходные данные и величины погрешностей взяты из [Васильчук, Васильчук, 2017] и приведены в таблице.

ны корреляции указанных параметров и построения графиков использованы стандартные инструменты программы Microsoft Excel.

Анализ рис. 2 свидетельствует о характере статистической взаимосвязи между содержанием изотопа  $^{18}\text{O}$  в современных ПЖЛ из разных районов и климатическими характеристиками для данных районов, экстраполированных для точек пробоотбора путем обычного оверлея. В сущности, справедливо считать, что приведенные на рис. 2 линии и уравнения регрессий отражают корреляцию не с данными инструментальных наблюдений на метеостанциях, а с контурами изотерм данных параметров на климатических картах 1965–1966 гг. [Справочник..., 1966а,б, 1967]. Для сравнения на рис. 2 отражены как реальные корреляции (синие точки и линии), полученные рецензентом, так и результаты аппроксимации этих параметров (оранжевые точки и линии) формулами Ю.К. Васильчука [1990; Vasil'chuk, 1991]. Рецензент предположил, что если уравнения (1)–(3) выведены автором именно на основе приведенных в таблице данных и имеют линейный вид, то уравнения линейных регрессий, выведенных рецензентом, будут иметь тот же самый вид. К своему удивлению рецензент обнаружил (см. рис. 2), что полученные линии регрессий и аппроксимирующие их уравнения кардинально отличаются от уравнений (1)–(3) Ю.К. Васильчука. Так, связь между величиной  $\delta^{18}\text{O}$  и средней температурой января, по данным таблицы, с большими отклонениями ( $R^2 = 0.405$ ) аппроксимируется уравнением  $t_j = 0.81 \cdot \delta^{18}\text{O} - 13.06$ , в то время как на основании этих же данных Ю.К. Васильчуком выведена зависимость  $t_j = 1.5 \cdot \delta^{18}\text{O}$ .

Связь между величиной  $\delta^{18}\text{O}$  и суммой отрицательных зимних температур  $\Sigma t_w$  вообще отсутствует ( $R^2 = 0.055$ ) и описывается случайной регрессией с уравнением  $\Sigma t_w = 62.79 \cdot \delta^{18}\text{O} - 3887.7$ , в то время как Ю.К. Васильчук из этих же данных вывел зависимость  $\Sigma t_w = 250 \cdot \delta^{18}\text{O}$ . То же относится и к связи величины  $\delta^{18}\text{O}$  со средней зимней температурой  $t_w$ , которая статистически недостоверна ( $R^2 = 0.365$ ) и описывается уравнением регрессии  $t_w = 0.54 \cdot \delta^{18}\text{O}$ , тогда как Ю.К. Васильчук на основе таблицы вывел формулу  $t_w = \delta^{18}\text{O}$ .

Итогом проведенного анализа формул (1)–(3) является график на рис. 2, *з*, где приведено уравнение регрессии ( $y = 0.54x - 13.06$ ) между наблюдаемыми средними температурами января на метеостанциях и теми же температурами, реконструированными на основе значений  $\delta^{18}\text{O}$  по формуле (1) Ю.К. Васильчука. Заметим, что это одна и та же климатическая характеристика, поэтому она должна с высокой значимостью ( $R^2 > 0.9$ ) аппроксимироваться уравнением вида  $y = x$  и проходить через точку (0; 0). На самом деле корреляция между инструментальными и расчет-

ными значениями здесь практически отсутствует ( $R^2 = 0.405$ ). Величину систематического расхождения между инструментальными и расчетными значениями легко оценить путем подстановки вместо  $x$  или  $y$  нулевого значения. В результате получаем величину систематического расхождения между расчетным и наблюдаемым средним значениям температуры января, равную  $13.06^\circ\text{C}$ .

Таким образом, на основе проведенного рецензентом анализа формул (1)–(3) Ю.К. Васильчука, первоначально опубликованных им в [Васильчук, 1990, 1992; Vasil'chuk, 1991] и многократно использованных во всех последующих публикациях, установлено, что данные формулы не имеют фактического обоснования и не вытекают из первичных данных по изотопному составу современных ПЖЛ и метеорологических данных, приведенных в [Васильчук, 1992; Васильчук, Васильчук, 2017]. Приведенные Ю.К. Васильчуком фактические данные аппроксимируются совершенно другими зависимостями (см. рис. 2). Реальные первичные данные, лежащие в основе формул (1)–(3), а также способ их выведения, остаются неизвестными.

В завершение рецензии статьи Ю.К. Васильчука и его методики реконструкции палеотемператур на основе изотопно-кислородного состава ПЖЛ необходимо констатировать следующее. Множество современных исследователей, изучающих изотопный состав ПЖЛ [Meyer et al., 2002], ограничиваются весьма скромными качественными выводами о палеотемпературах их формирования. Интерпретируя вертикальную и горизонтальную вариации изотопного состава жил, эти авторы указывают, что зимние температуры были холоднее или теплее в тот или иной период, но они не переводят их в конкретные абсолютные значения, как делает Ю.К. Васильчук в большинстве своих реконструкций и в рецензируемой здесь статье. Несмотря на некорректность методики Ю.К. Васильчука и недостоверность получаемых на ее основе палеоклиматических реконструкций, автор продолжает использовать выведенные в 1990 г. формулы [Васильчук, 1990] и активно публиковать свои результаты во многих журналах.

Вызывает крайнее недоумение недавнее заявление Ю.К. Васильчука о том, что его формулы официально подверглись критике еще в 1991 г. профессором Дж.Р. Маккеем и профессором А. Уошборном в отзывах, присланных на автореферат его докторской диссертации [Буданцева, Васильчук, 2019]. Они апробировали формулы Ю.К. Васильчука на изотопных составах ПЖЛ Северной Америки и пришли к выводу о полной их неприменимости. Однако Ю.К. Васильчук пишет, что на протяжении длительного времени после разработки формул он занимался их проверкой и верификацией и теперь пришел к выводу о хоро-

шей их применимости на территории всей Северной Евразии [Там же]. Все это напоминает полный каламбур, поскольку ни формулы, ни их коэффициенты, ни погрешности никак не изменились со времени их публикации [Васильчук, 1990], а методы их разработки остаются неизвестными до настоящего времени.

### ВЫВОДЫ

Ю.К. Васильчук – известный специалист в области изучения изотопного состава ископаемых льдов, рецензент знаком со многими его работами, в том числе в области некоторых обобщений. За последние 25–30 лет Ю.К. Васильчуком опубликовано много фактических, в том числе заимствованных данных, характеризующих изотопные составы подземных и поверхностных льдов из разных регионов России. Работы Ю.К. Васильчука часто цитируются, а фактические данные используются для сравнительного анализа.

Вместе с тем предложенный автором в 1990 г. метод реконструкции палеотемператур января, средних зимних температур и суммы отрицательных зимних температур вызывает большой скепсис со стороны всех зарубежных и многих отечественных специалистов. Используемый Ю.К. Васильчуком преимущественно вертикальный способ пробоотбора вдоль простираия ПЖЛ является некорректным, противоречит общим закономерностям строения и происхождения ПЖЛ и не позволяет достоверно оценить реальную вариацию их изотопного состава. Данный способ противоречит стратегии пробоотбора, рекомендуемого ведущими современными специалистами в области изучения ПЖЛ.

Разработанные Ю.К. Васильчуком формулы для пересчета кислородно-изотопного состава в палеотемпературы не имеют физического обоснования, они выведены некорректным способом, противоречат данным метеорологических наблюдений, в том числе приводимых самим автором в его публикациях, а также полученных другими авторами. Полученные на основе этих формул реконструкции палеотемператур неоплейстоцена и голоцена недостоверны.

В своих палеотемпературных реконструкциях Ю.К. Васильчук и его соавторы совершенно не используют концентрацию дейтерия и величину дейтериевого эксцесса, не уделяют внимания анализу степени фракционирования исследуемых ПЖЛ, их генетической связи с глобальной линией метеорных вод [Craig, 1961] и атмосферными осадками. В большинстве публикаций не учитываются ключевые зарубежные работы [Dansgaard, 1964] в области изучения взаимосвязи изотопного состава водных и ледовых объектов и температурных условий их формирования.

На фоне приведенных выше критических замечаний все остальные недочеты рецензируемой статьи не заслуживают особых комментариев. В целом рецензент считает, что продолжение публикации результатов применения методики Ю.К. Васильчука в серьезных научных, тем более в переводных, изданиях будет негативно сказываться не только на имидже самого автора. В большей степени это будет дискредитировать сами журналы, вызывая критику со стороны зарубежных и отечественных специалистов не только в области геохимии стабильных изотопов, но и геокриологии, палеогеографии и палеоклиматологии.

Высокий научный статус Ю.К. Васильчука требует от его публикаций максимально высокого уровня подготовки, соблюдения принципов элементарной статистики, научной этики и здравого смысла, поскольку данные публикации будут рассматриваться некоторыми, особенно молодыми исследователями в качестве методик для дальнейших исследований. Продолжение использования методики Ю.К. Васильчука его учениками и последователями приведет к обострению теоретического кризиса в области изучения изотопных составов ПЖЛ и геокриологии в целом.

### Литература

- Архангелов А.А., Коняхин М.А., Михалев Д.В. и др. Изотопно-кислородный состав подземных льдов // Проблемы геокриологии. М., Наука, 1987, с. 136–143.
- Арз А.Л. Испарение и эволюция снежного покрова в окрестностях Якутска // Экспериментальные исследования процессов теплообмена в мерзлых горных породах. М., Наука, 1972, с. 160–167.
- Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К. Изотопы водорода и дейтериевый эксцесс в ростках ледяных жил севера Евразии // Арктика и Антарктика, 2019, № 4, с. 16–32, DOI: 10.7256/2453-8922.2019.4.31391.
- Васильчук Ю.К. Реконструкции палеоклимата позднего плейстоцена и голоцена на основе изотопных исследований подземных льдов и вод криолитозоны // Вод. ресурсы, 1990, т. 17, № 6, с. 162–170.
- Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав повторно-жильных льдов (опыт палеогеогеографических реконструкций): В 2 т. М., Отдел теорет. проблем РАН, МГУ, ПНИИИС, 1992, т. 1, 420 с.; т. 2, 264 с.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Изотопно-кислородный состав повторно-жильных льдов острова Айон и палеотемпературные реконструкции позднего плейстоцена и голоцена для севера Чукотки // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология, 2017, № 6, с. 92–104.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Зимние палеотемпературы воздуха в низовьях Колымы 30–12 тысяч лет назад по результатам изучения изотопного состава едомы Плахинского Яра // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 5, с. 3–19.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Изотопно-геохимический состав повторно-жильных льдов склоновой едомы хребта Кулар и реконструкция среднеянварской палеотемпературы воздуха 47–25 тысяч лет назад // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 3, с. 25–37.



- Васильчук Ю.К., Макеев В.М., Маслаков А.А. и др.** Реконструкция позднелепестовых и раннеголоценовых зимних температур воздуха на острове Котельный по изотопному составу повторно-жильных льдов // Криосфера Земли, 2019а, т. XXIII, № 2, с. 13–28.
- Васильчук Ю.К., Шмелев Д.Г., Чербунина М.Ю. и др.** Новые изотопно-кислородные диаграммы позднелепестовых и голоценовых повторно-жильных льдов Мамонтовой Горы и Сырдаха, Центральная Якутия // Докл. РАН, 2019б, т. 486, № 3, с. 365–370. – <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863365-370>
- Галанин А.А., Павлова М.Р., Папина Т.С. и др.** Стабильные изотопы  $O^{18}$  и  $D$  в ключевых компонентах водного стока и криолитозоны Центральной Якутии (Восточная Сибирь) // Лед и снег, 2019, т. 59, № 3, с. 333–354.
- Геокриология СССР. Средняя Сибирь** / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Наука, 1989, 414 с.
- Голубев В.Н., Конищев В.Н., Сократов С.А., Гребенников П.Б.** Влияние сублимации сезонного снежного покрова на формирование изотопного состава повторно-жильных льдов // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 3, с. 71–77.
- Деревягин А.Ю., Чижов А.Б., Майер Х.** Температурные условия зим Лаптевоморского региона за последние 50 тысяч лет в изотопной записи повторно-жильных льдов // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 32–40.
- Коняхин М.А.** Изотопно-кислородный состав полигонально-жильных льдов как показатель условий их формирования и генезиса: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1988, 26 с.
- Папина Т.С., Мальгина Н.С., Эйрих А.Н. и др.** Изотопный состав и источники атмосферных осадков в Центральной Якутии // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 2, с. 60–69.
- Справочник по климату СССР. Ч. II. Температура воздуха и почвы. Вып. 24.** Якутская АССР. Л., Гидрометеиздат, 1966а, 403 с.
- Справочник по климату СССР. Ч. II. Температура воздуха и почвы. Вып. 33.** Чукотский национальный округ и Магаданская обл. Л., Гидрометеиздат, 1966б, 288 с.
- Справочник по климату СССР. Ч. II. Температура воздуха и почвы. Вып. 21.** Красноярский край и Тувинская АССР. Л., Гидрометеиздат, 1967, 504 с.
- Строение и абсолютная геохронология аласных отложений Центральной Якутии** / Под ред. Е.М. Катасонова. Новосибирск, Наука, 1979, 95 с.
- Томирдиаро С.В.** Криогенно-эоловые отложения Восточной Арктики и Субарктики / С.В. Томирдиаро, Б.И. Черненко. М., Наука, 1987, 198 с.
- Voerboom T., Samyn D., Meyer H., Tison J.-L.** Stable isotope and gas properties of two climatically contrasting (Pleistocene and Holocene) ice wedges from Cape Mamontov Klyk, Laptev Sea, northern Siberia // The Cryosphere, 2013, vol. 7, p. 31–46, DOI: 10.5194/tc-7-31-2013.
- Clark I.D., Fritz P.** Environmental isotopes in hydrogeology. N.Y., Lewis Publishers, Boca Raton, 1997, 328 p.
- Craig H.** Isotopic variations in meteoric waters // Science, 1961, vol. 133, p. 1702–1703.
- Dansgaard W.** Stable isotope in precipitation // Tellus, 1964, vol. XVI, No. 4, p. 436–468.
- Kurita N., Sugimoto A., Fujii Y. et al.** Isotopic composition and origin of snow over Siberia // J. Geophys. Res., 2005, vol. 110, D13102, DOI: 10.1029/2004JD005053.
- Meyer H.** Late Quaternary climate history of Northern Siberia – evidence from ground ice. PhD Dissertation. Alfred Wegener Institute. Polar- und Meeresforschung Forschungsstelle, Potsdam, 2001, 112 p.
- Meyer H., Dereviagin A.Yu., Siegert C., Hubberten H.W.** Palaeoclimate studies on Bykovsky Peninsula, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ground ice // Polarforschung, 2002, No. 70, p. 37–51.
- Meyer H., Opel T., Laepple T. et al.** Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid-to late Holocene // Nature Geoscience, 2015, vol. 8 (2), p. 122–125.
- Opel T., Dereviagin A.Yu., Meyer H. et al.** Palaeoclimatic information from stable water isotopes of Holocene ice wedges on the Dmitrii Laptev strait, Northeast Siberia, Russia // Permafrost and Periglacial Processes, 2011, vol. 22, p. 84–100.
- Rozanski K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini R.** Isotopic patterns in modern global precipitation // Climate Change in Continental Isotopic Records, Geophys. Monogr., 1993, vol. 78, p. 1–36.
- Schirrmeister L., Grosse G., Schwamborn G. et al.** Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): a multidisciplinary 1 approach // Polar Geography, 2003, vol. 27, No. 4, p. 277–319.
- Vasil'chuk Yu.K.** Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone // Water Resources, 1991, vol. 17, No. 6, p. 640–647.
- Wetterich S., Rudaya N., Tumskey V. et al.** Last Glacial Maximum records in permafrost of the East Siberian Arctic // Quaternary Sci. Reviews, 2011, vol. 30, p. 3139–3151. – <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.07.020>

## References

- Arkhangelov A.A., Konyakhin M.A., Mikhalev D.V. et al. Oxygen isotope composition of underground ice. In: Problemy geokriologii [Problems of Geocryology]. Moscow, Nauka, 1987, p. 136–143 (in Russian).
- Are A.L. Evaporation and evolution of snow cover in the vicinity of Yakutsk. In: Eksperimental'nye issledovaniya processov tenoobmena v merzlyh gornyh porodakh [Experimental Studies of Heat Exchange Processes in Frozen Rocks]. Moscow, Nauka, 1972, p. 160–167 (in Russian).
- Budantseva N.A., Vasil'chuk Yu.K. Hydrogen isotopes and deuterium excess in the shoots of ice veins in northern Eurasia. Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic], 2019, No. 4, p. 16–32.
- Vasil'chuk Yu.K. Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone. Vodnye Resursy [Water Resources], 1990, vol. 17, No. 6, p. 162–170 (in Russian).
- Vasil'chuk Yu.K. Izotopno-kislородnyy sostav povtopnozhl'nyh l'dov (opyt paleogeokpilogicheskikh pekonstupkicij) [Oxygen isotope composition of recurrent-veined ice (experience of paleogeocryological reconstructions)]: in 2 vol. Moscow, Department of Theoretical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow State University, PNIIS, 1992, vol. 1, 420 p.; vol. 2, 264 p. (in Russian).
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. Oxygen isotope composition of the ice wedges of Ayon island and Late Pleistocene and Holocene paleotemperature reconstruction of the northern Chukotka. Vestnik Moskovskogo universiteta [Moscow University Bulletin]. Series 4. Geology, 2017, No. 6, p. 92–104.
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. Winter air paleotemperatures at 30–12 kyr BP in the lower Kolyma River, Plakhinskii Yar

- yedoma: evidence from stable isotopes. *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XXII, No. 5, p. 3–16.
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. Isotope-geochemical composition of the ice wedges in the slope yedoma on the Kular Ridge and reconstruction of the mean January air paleotemperature during 47,000–25,000 BP. *Earth's Cryosphere*, 2020, vol. XXIV, No. 3, p. 22–33.
- Vasil'chuk Yu.K., Makeev V.M., Maslakov A.A. et al. Late Pleistocene and Early Holocene winter air temperatures in Kotelny Island: reconstructions using stable isotopes of ice wedges. *Earth's Cryosphere*, 2019a, vol. XXIII, No. 2, p. 12–24.
- Vasil'chuk Yu.K., Shmelev D.G., Cherbunina M.Y. et al. New oxygen isotope diagrams of late Pleistocene and Holocene ice wedges of Mamontova Gora and Syrdah Lake, Central Yakutia. *Doklady Akademii Nauk* [Reports of Academy of Sciences], 2019, vol. 486, No. 3, p. 365–370, DOI: 10.31857/S0869-56524863365-370.
- Galanin A.A., Pavlova M.R., Papina T.S. et al. Stable O<sup>18</sup> and D isotopes in key components of water runoff and cryolitozone of Central Yakutia (Eastern Siberia). *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2019, vol. 59, No. 3, p. 333–354.
- Ershov E.D. (Ed.). *Geokriologiya SSSR. Srednyaya Sibir* [Geocryology of USSR. Middle Siberia]. Moscow, Nedra, 1989, 414 p. (in Russian).
- Golubev V.N., Konishchev V.N., Sokratov S.A., Grebennikov P.B. Influence of sublimation of a seasonal snow cover on formation of an isotopic content of wedge ice. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2001, vol. V, No. 3, p. 71–77 (in Russian).
- Dereviagin A.Yu., Chizhov A.B., Mayer H. Water temperature conditions of Laptev sea region during the last 50 thousands years in the isotopic records of ice wedges. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2010, vol. XIV, No. 1, p. 32–40 (in Russian).
- Konyakhin M.A. *Izotopno-kislorodnyj sostav poligonal'nozhil'nyh l'dov kak pokazatel' uslovij ih formirovaniya i genezisa* [Oxygen isotope composition of polygonal wedge ice as an indicator of the conditions of their formation and genesis]. Author's abstract. dis. ... Cand. geogr. Moscow, 1988, 26 p. (in Russian).
- Papina T.S., Malygina N.S., Eirikh A.N. et al. Isotopic composition and sources of atmospheric precipitation in Central Yakutia. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 2, p. 52–61.
- Spravochnik po klimatu SSSR* [Reference book on the climate of the USSR]. Part II. Air and soil temperature. Iss. 24. Yakut ASSR. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1966, 403 p. (in Russian).
- Spravochnik po klimatu SSSR* [Reference book on the climate of the USSR]. Iss. 33. Chukotka National District and Magadan Region. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1966, 288 p. (in Russian).
- Spravochnik po klimatu SSSR* [Reference book on the climate of the USSR]. Iss. 21. Krasnoyarsk Territory and Tuva ASSR. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1967, 504 p. (in Russian).
- Katasonova E.M. (Ed.). *Stroenie i absolyutnaya geohronologiya alasnnyh otlozhenij Central'noj Yakutii* [Structure and Absolute Geochronology of the Alass Deposits of Central Yakutia]. Novosibirsk, Nauka, 1979, 95 p. (in Russian).
- Tomirdiaro S.V., Chernenky B.I. *Kriogenno-eolovye otlozheniya Vostochnoj Arktiki i Subarktiki* [Cryogenic-aeolian Deposits of the Eastern Arctic and Subarctic]. Moscow, Nauka, 1987, 198 p. (in Russian).
- Boereboom T., Samyn D., Meyer H., Tison J.-L. Stable isotope and gas properties of two climatically contrasting (Pleistocene and Holocene) ice wedges from Cape Mamontov Klyk, Laptev Sea, northern Siberia. *The Cryosphere*, 2013, vol. 7, p. 31–46, DOI: 10.5194/tc-7-31-2013.
- Clark I.D., Fritz P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. N.Y., Lewis Publishers, Boca Raton, 1997, 328 p.
- Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, p. 1702–1703.
- Dansgaard W. Stable isotope in precipitation. *Tellus*, 1964, vol. XVI, No. 4, p. 436–468.
- Kurita N., Sugimoto A., Fujii Y. et al. Isotopic composition and origin of snow over Siberia. *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, D13102, DOI: 10.1029/2004JD005053.
- Meyer H. Late Quaternary climate history of Northern Siberia – evidence from ground ice. PhD Dissertation. Alfred Wegener Institute. Polar- und Meeresforschung Forschungsstelle, Potsdam, 2001, 112 p.
- Meyer H., Dereviagin A.Yu., Siegert C., Hubberten H.W. Palaeoclimate studies on Bykovsky Peninsula, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ground ice. *Polarforschung*, 2002, No. 70, p. 37–51.
- Meyer H., Opel T., Laepple T. et al. Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid-to late Holocene. *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8 (2), p. 122–125.
- Opel T., Dereviagin A.Yu., Meyer H. et al. Palaeoclimatic information from stable water isotopes of Holocene ice wedges on the Dmitrii Laptev Strait, Northeast Siberia, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2011, vol. 22, p. 84–100.
- Rozanski K., Araguafis-Araguafis L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate Change in Continental Isotopic Records*, *Geophys. Monogr.*, 1993, vol. 78, p. 1–36.
- Schirrmeister L., Grosse G., Schwamborn G., Andreev A. A. et al. Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): a multidisciplinary 1 approach. *Polar Geography*, 2003, vol. 27, No. 4, p. 277–319.
- Vasil'chuk Yu.K. Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone. *Water Resources*, 1991, vol. 17, No. 6, p. 640–647.
- Wetterich S., Rudaya N., Tumskey V. et al. Last Glacial Maximum records in permafrost of the East Siberian Arctic. *Quaternary Science Reviews*, 2011, vol. 30, p. 3139–3151. – <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.07.020>

*Поступила в редакцию 7 декабря 2020 г.,  
после доработки – 20 декабря 2020 г.,  
принята к публикации 24 декабря 2020 г.*