

## Пространственно-временное распределение среднеянварских палеотемператур воздуха на территории Российской Арктики для периода 30-12 тыс. лет назад с высоким временным разрешением

Васильчук Юрий Кириллович

доктор геолого-минералогических наук

профессор, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)



✉ vasilch\_geo@mail.ru

**Аннотация.** Показано, что сингенетические ледяные жилы в едомных толщах активно формировались в северных Арктических районах в течение всего периода 30-12 тыс. лет назад. В едомных толщах различных регионов Российской Арктики возрастом 30-12 тыс. лет выполнен анализ достоверности радиоуглеродных датировок, позволивший надежно "привязать" изотопные диаграммы и выделить фрагменты с шагом 2-4 тыс. лет, датируемые временными интервалами 30-28, 24-22, 20-18, 16-12 тыс. лет. В работе выполнена верификация уравнения связывающего современные данные по росткам ледяных жил со среднеянварскими температурами. Осуществлена реконструкция зимних палеотемператур на основе распределения содержания тяжелого кислорода в позднеплейстоценовых повторно-жильных льдах в едомных толщах, датированных по радиоуглероду. Для временных интервалов 30-28, 24-22, 20-18, 16-12 тыс. лет построены новые карты распределения среднеянварских палеотемператур на территории Российской Арктики. Тенденции в распределении содержания тяжелого кислорода в ледяных жилах формировавшихся в течение всего периода 30-12 тыс. лет назад аналогичны современным, т.е. значения  $\delta$  (содержание тяжелого кислорода относительно стандарта) становились в позднеплейстоценовых жилах более отрицательными при движении с запада на восток примерно на 8-10 ‰, в среднем составляя: в Западной Сибири -23, -25‰ (в современных жилах -17, -19‰), в Северной Якутии -31 до -33 ‰ (в современных жилах -25, -27‰); При дальнейшем продвижении на восток они повышались от -28, -31 ‰ в Северной Чукотке (в современных жилах -22, -27‰) и центральных районах Магаданской области, до -25 до -28 ‰ в Восточной Чукотке (в современных жилах -16, -20‰). Средние температуры января над Российской Арктикой были примерно на 8-12°C меньше, чем современные. В районах с изменяемыми климатическими условиями, такими как Чукотке, диапазон средних температур января был до 17-18°C меньше, чем в наше время.

**Ключевые слова:** повторно-жильный лед, едома, изотопы кислорода, средняя температура января, плейстоцен, Российская Арктика, палеорекострукции, криохрон, радиоуглерод, многолетнемерзлые породы

**УДК:** 551.345

**DOI:** 10.7256/2453-8922.2016.1.21310

**Дата направления в редакцию:** 15-12-2016

**Дата публикации:** 16-12-2016

**Vasil'chuk Yu.K.** 2016. Spatio-temporal distribution of mean January air temperature over the Russian Arctic during 30-12 ka BP with high temporal resolution. *Arctic and Antarctic*. N1. P. 1—17.

DOI: 10.7256/2453-8922.2016.1.21310.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №14-05-00795).

## **Введение**

Позднеплейстоценовые сингенетические ледяные жилы широко распространены в арктических прибрежных равнинах, в долинах рек и межгорных котловинах Северной Евразии. Обширные равнины арктические прибрежные равнины в Западной Сибири, Якутии и Чукотки не покрывались покровным оледенением в течение последних 40 тыс. лет, о чем наглядно свидетельствуют широко развитые здесь сингенетические повторно-жильные льды.

Криолитозона Северной Евразии может быть поделена на две субширотных зоны: а) зона сплошного с поверхности распространения многолетнемерзлых толщ, приуроченная преимущественно к северным районам криолитозоны и б) зона прерывистого с поверхности распространения многолетнемерзлых толщ, приуроченная преимущественно к южным районам криолитозоны на юге. Распределение многолетнемерзлых толщ достаточно тесно широко связано с температурой воздуха. Среднегодовая температура грунтов варьирует от 0°C (в прерывистой криолитозоне до -10, -13°C (в северных районах сплошной криолитозоны). Граница между зонами сплошного и прерывистого распространения многолетнемерзлых толщ примерно соответствует средней годовой температуре воздуха -5.5°C на северо-востоке Европейской части России, -7.0°C в Западной Сибири, в Якутии -7.5°C и -3.5°C на Чукотке. На севере российской криолитозоны сингенетические повторно-жильные льды являются доминирующей формой подземного льда. Сингенетические повторно-жильные льды являются прямым показателем существования "холодных" многолетнемерзлых толщ со среднегодовыми температурами грунтов не выше -1, -3°C. Механизм формирования сингенетических ледяных жил [1] обеспечивает вертикальную стратификацию повторно-жильных льдов. Методология палеотемпературных реконструкций на основании исследования едомы была разработана более 30 лет назад [1, 2, 27]; она включает в себя детальный горизонтальный и вертикальный отбора проб больших сингенетических ледяных жил для изотопного анализа и радиоуглеродное датирование вмещающих отложений и органических микровключений непосредственно в клиньев. Вертикальный отбор из крупных ледяных жил предпочтительнее по сравнению с горизонтальной выборкой, потому что при горизонтальном отборе практически невозможно установить точную последовательность формирования жильного льда. Вертикальный интервал отбора обычно составлял 50-100 см. Это позволило построить кривые распределения изотопно-кислородных данных, которые можно было датировать. Реконструкция средней зимы и палеотемператур января выполнена на основе уравнения [1, 27], верифицированного с учетом с новыми изотопных данных, полученных вплоть до декабря 2016 года.

### **Верификация уравнения связывающего современные данные по росту ледяных жил с зимними температурами**

Для перевода изотопных значений в палеотемпературные использованы разработанные ранее одним из авторов [1, 27] уравнения регрессии, связывающие изотопные данные по современным ледяным жилкам со среднеянварскими температурами:

Было показано, что корреляцию среднеянварских температур воздуха со значениями  $\delta^{18}\text{O}$  в современных жильных ростках можно выразить в форме трех приблизительных зависимостей:

$$t^{\circ}_{\text{среднеянварская}} = 1,5\delta^{18}\text{O}_{\text{жилок}} (\pm 3^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

Точность значений, вычисляемых по уравнению (1), достаточна для ориентировочной оценки современных среднеянварских температурных характеристик и палеотемпературных реконструкций позднего плейстоцена.

Сравнивая между собой изотопный состав современных жилкок, сформировавшихся в условиях холодных и сухих зим Центральной Якутии и Забайкалья, и жилкок, образовавшихся в более мягких зимних условиях на Ямале и Чукотке [\[1\]](#), можно видеть, что степень соответствия их с зимними температурными характеристиками идентична, хотя известно, что зимняя сублимация в Забайкалье или в резко континентальных условиях Якутии может приводить к существенной возгонке снега – часто на плакорах остается лишь очень тонкий снежный покров. Таким образом, можно уверенно говорить о том, что изотопный “термометр”, созданный для современных ледяных жилкок, будет адекватно работать и при палеотемпературных реконструкциях прошлых эпох.

При подготовки данной статьи была проведена дополнительная ревизия ранее полученных уравнений с учетом новых изотопных данных по современным жилкам, включая полученные автором с коллегами по Свальбарду [\[30\]](#), а также данные 2015 г. – по образцам современных жилкок с о.Котельный и близ с.Лорино и пос.Лаврентия (отобранных в 2015-16 гг. аспирантом кафедры криолитологии и гляциологии МГУ А.А.Маслаковым) на востоке Чукотки [\[4, 5\]](#), и по образцам из района Бованенково, отобранных Дж.Васильчук (магистранткой кафедры геохимии ландшафтов и географии почв МГУ) в сентябре 2015 г. Отметим, что полученные новые данные полностью подтвердили ранее предполагавшиеся изотопные значения для этих пяти регионов. Безусловно важным доказательством справедливости полученных зависимостей приведено и в публикации Х.Майера, Т.Опеля и А.Деревягина с соавторами [\[14\]](#) по разрезу голоценовой сингенетической ледяной жилы (формировавшейся от 7,3 тыс. лет назад до современности) в устье р.Лены, для интерпретации которой авторы использовали зависимость, предложенную ранее Ю.Васильчуком [\[27\]](#), проверив ее на изотопно-метеорологической модели PMIP3. Моделирование выполненное К.Хоффман и М.Вернером подтвердило правильность выбранных коэффициентов корреляции температур и изотопного состава жилкок.

В связи с этим отметим еще один важный факт, который был установлен нами: в Северной Америке – от Аляски до восточных районов субарктической Канады между изотопным составом жилкок и зимними температурами зависимости подобной той которая установлена автором для Евразии нет. Причем не только количественной, но и часто даже качественной, т.е. нами встречены пункты в североамериканской криолитозоне, где изотопный состав в жилках ниже, чем в соседних регионах, а зимние температуры даже выше. Это связано с целым рядом факторов, ведущим среди которых является отсутствие столь закономерного движения воздушных масс, каковое наблюдается в Российской криолитозоне. Этот фактор заставляет искать другие пути для палеотемпературных реконструкций североамериканских едомных толщ.

## **Повторно-жильных льды, в едомных толщах, датированных по радиоуглероду периодом 32-12 тыс. лет назад**

Большие сингенетические повторно-жильные льды широко распространены в Российской криолитозоне, в том числе, например: разрез Сеяха на востоке Ямала (высота полигонально-жильной структуры более 30 м) на севере Западной Сибири; едома Зеленого Мыса (высотой около 40 м), Дуваный Яр (высота около 45 м), Воронцовский Яр (высота около 50 м), Станчиковский Яр (высота около 35 м) и Ойгосский Яр (высота около 40 м) в Якутии [17-23, 28, 31]. В Северной Америке, подобные мощные сингенетические повторно-жильные льды были найдены на п-ове Сьюарда, на северном склоне Аляски, на Клондайке, в долинах рек Титалук и Иткилик (высота около 30 м), на севере Аляски [12, 24]. Ширина крупных сингенетических ледяных клиньев варьирует от 1,5 до 3,0 м (очень редко до 4 м).

Автором настоящей работы 34 года назад начаты комплексные изотопно-геохронологические исследования опорных едомных разрезов криолитозоны России [1, 27], что позволило составить палеотемпературные карты на ключевые этапы позднечетвертичной истории: 35-30, 22-14 тыс. лет назад [1, 27]. Продолжение этих исследований как автором, так и некоторыми российско-германскими, российско-японскими, российско-британскими, российско-американскими коллективами привело к получению новой детальной информации о датировании опорных едомных разрезов и к созданию банка данных по распределению стабильных изотопов кислорода и водорода в повторно-жильных льдах. Число новых разрезов, дополняющих предшествующие построения автора сейчас уже составляет десятки. Это на Ямале: Марре-Сале, Бованенково. Основные опорные разрезы Гыданского полуострова: устье реки Еры-Маретаяха, Мыс Паха-Сале [9, 10], опорные разрезы Западного Таймыра: Мыс Макаревича - устье р. Крестьянка, Мыс Сопочная Карга [10], опорные разрезы Таймыра близ пос. Диксон: в бухте Северо-Восточная и в бухте Южная [9], разрезы мыс Саблера и оз.Лабаз [25].

В восточном секторе Арктики это прежде всего опорные разрезы Мамонтов Клык [2008]; Мамонтова Хайота [13]; Чекановские разрезы [19], многочисленные разрезы Северной Якутии детально изотопически исследованные и датированные автором [1] - Зеленый Мыс, Плахинский Яр, устье р.Омолон, Амбарчик, а также позднее повторно датированные и исследованные М.Фукудой с российскими коллегами [11]. Особо выделяется детальностью исследований опорный разрез Дуваный Яр, изучение которого ведется уже более 50 лет, ему посвящены десятки палеогеокриологических работ из которых необходимо упомянуть работы Т.Н.Каплиной [6-8] и [26]. Особо следует сказать об обобщающей монографии, изданной в 2015 г. [15] в которой приняли участие российские исследователи - С.Губин, Ю.Васильчук, А.Васильчук, А.Ложкин, Г.Саввинов, А.Тихонов, А. Лупачев, а также Ю.Шур, М.Каневский, Т.Gozlar, M.Edwards, M.Bateman, B.Ghaleb, J.Haile, S.Wolfe. В ней детально рассмотрены особенности криогенного строения, новые данные подробного радиоуглеродного датирования, погребенные горизонты почв. В эту монографию автором в приложения включены материалы неоднократных изотопных исследований разных фрагментов этого грандиозного едомного разреза и полученные на их основе палеотемпературные реконструкции. Этот капитальный труд - монография по Дуванному Яру позволил по новому взглянуть на генезис и на палеогеокриологическое развитие едомы - в книгу

включена [\[15, с. 220\]](#) принципиальная схема трехстадийного гетерохронного развития Дуваноярского комплекса, предложенная автором [\[28\]](#).

### **Верификация радиоуглеродных датировок едомных толщ**

Все упомянутые выше разрезы весьма детально, хотя и неоднородно датированы и в них выполнены изотопные исследования. Для (по возможности) корректного хронологического сопоставления этих разрезов между собой автором проведена ревизия всех имеющихся датировок и выбраны те из них, которые по мнению автора дают наиболее приемлемые хронологические привязки. Конечно в первую очередь это повторные определения давшие близкие результаты датирования (такие например были получены Ю.Васильчуком [\[1\]](#) и позднее М.Фукудой [\[11\]](#) по разрезу Плахинского Яра и т.п.). Основным принципом для выбора наиболее достоверной датировки был: наиболее достоверно возраст жил характеризуют более молодые датировки полученные из одного горизонта по сравнению с более древними датами, полученных на той же глубине, вследствие примесей аллохтонного древнего органического материала [\[3, 29\]](#).

Автором разработана новая стратегия радиоуглеродного датирования позднеплейстоценовых сингенетических повторно-жильных льдов и точной привязки во времени диаграмм распределения стабильных изотопов включает обязательной использованием ускорительной масс-спектрометрии (AMS).

При датировании синкриогенных толщ необходимо также учитывать их, преимущественно субаквальную природу большей части синкриогенных толщ – морских, аллювиальных, озерных. Переотложение органического материала в процессе накопления синкриогенных толщ происходит неоднократно. Поэтому даже в одном и том же горизонтальном прослое могут быть встречены кости животных и окатанная древесина, заметно более древние, чем осадконакопление. Отобранный из того же горизонта растительный детрит, может быть моложе костей и древесины, но всё же древнее истинного возраста осадконакопления. Следует тщательно отбраковывать заведомо более древние образцы (и среди них, в первую очередь, имеющие запредельные датировки, которые обычно в полигонально-жильных комплексах переотложены).

Основной проблемой радиоуглеродного датирования синкриогенных многолетнемерзлых отложений является надёжность полученной даты, поскольку может происходить как омоложение, так и удревнение в результате поступления в образец более молодого или более углерода, за счёт привноса современных растворённых карбонатов, почвенных растворов или углекислого газа. Поскольку даже самая незначительная примесь молодого органического материала приводит к существенному омоложению более древних датировок, считалось, что датировки органики могут быть только омоложены, Но это положение справедливо для открытых систем, а для закрытой системы, каковой являются многолетнемерзлые толщи говорить о возможном сильном омоложении вряд ли справедливо. Зато удревнение дат за счёт примеси переотложенного из более древних отложений материала – проблема для криолитозоны первостепенная. Это предопределяется длительной сохранностью органического материала в многолетнемерзлых толщах.

В субаквальных отложениях озёр и морей аномально древние даты неоднократно отмечались среди более молодых. Это особенно характерно для

районов активной аккумуляции переотложенного материала. Измерения возраста современного плавника на о. Виктория Канадского Арктического архипелага продемонстрировали, что из 30 бревен, выброшенных на берег в разных точках острова, только одно имело современный возраст, одно было не старше 80 лет, а в основном возраст аллохтонных бревен был древнее: от 1 тыс. лет до 3,2-4,7 тыс. лет. Захоронение переотложенной древесины в прибрежных районах почти не оставляет надежды на адекватное датирование содержащих ее отложений. Датируя по древесине возраст накопления отложений на пляже о. Виктория (или их более древних аналогов), можно ожидать ошибку более чем в 3 тыс. лет.

В криолитозоне подобные аномальные датировки совсем не исключение, а скорее правило. При  $^{14}\text{C}$  датировании синкриогенных толщ Аляски на мысе Барроу, были обнаружены существенные возрастные аномалии. В повторно-жильном льду были датированы остатки осок и пеллеты леммингов. На расстоянии 2 м от бокового контакта лед был датирован 14500 лет, а в центре ледяной жилы лед датирован 8200 лет. Совершенно очевидно, что дата 14,5 тыс. лет получена по аллохтонному материалу. Инверсии радиоуглеродных датировок получены также в разрезах Фокс Пермафрост туннель и Волт Крик туннель близ г.Фэрбенкс [24]. Часть инверсий связана с датированием перенесенных водным потоком костей, которые несколько древнее вмещающих отложений. Неоднородность растительного детрита аллювиального происхождения, датированного вблизи границы более молодого горизонта гравия, и отложений ледового комплекса подчеркивается разницей между датами, полученными из одного горизонта, которая составила около 12 тыс. лет: от 27790 до 43300 тыс. лет. Почти с такой же возрастной аномалией столкнулись Х.Майер и Л.Ширрмайстер при датировании почти аналогичного вышеописанному по составу флювиального синкриогенного повторно-жильного комплекса над золотоносной толщей в тоннеле в 40 км севернее Фэрбенкса, когда материал из жилы ими был датирован 34400 + 4390/-2820 (KIA-25275), а явно переотложенная органика (древесина, органический детрит) из непосредственно вмещающих жилы отложений – от 42 до 52 тыс. лет [24]. Ещё более яркий пример – это датирование Р.Е.Нельсоном [16] голоценовой террасы реки Икпикпак на Арктическом побережье Аляски. Здесь был получен ряд датировок от запредельных (т.е. старше предела датирования – для криолитозоны это древнее 45-50 тыс. лет) до 9100 лет назад. Наиболее молодые даты (не старше 10 тыс. лет) получены по семенам верблюдки – растения семейства маревых, а также по древесине тополя и пеньку ивы. По древесине ивы получены также более древние даты, в том числе и запредельные. Подтверждение того, что торф в разрезе является аллохтонным получено в результате датирования разных фракций одного и того же образца. Наиболее молодой является фракция размерностью 200 мкм (13730 лет), а наиболее древней и наименее достоверной – фракция размерностью 250-500 мкм (30260 лет) [16]. Безусловно, большая часть органического материала в этом голоценовом разрезе была переотложена, хотя и имела прекрасную сохранность.

Ближе всех к истинному времени седиментации и синкриогенного промерзания обычно бывает самая молодая датировка из всей серии полученных из того или иного горизонта дат. Этот принцип, разработанный автором по разному воспринимается исследователями. В связи с этим приведем цитату из работы одной из наиболее опытных и ярких исследователей едомных толщ – Т.Н.Каплиной [7]: "Ю.К. Васильчук провел подробный анализ большого

количества дат, полученных по различным материалам (в том числе из ледяных жил) и разными методами (с преобладанием метода AMS). Такой анализ позволил ему прийти к важному выводу о том, что многие даты из образцов, отобранных обычным способом (без предварительной сортировки), удревнены переотложенной более древней органикой. Отсюда следует, что наиболее достоверными являются наиболее молодые даты. В результате использования молодых дат Ю.К. Васильчук определил, что "время формирования повторно-жильного комплекса Дуванный Яр датируется примерно от 33–37 до 13 тыс. лет назад" [2, с. 171]. Нам представляется, что указанный Ю.К. Васильчуком интервал времени для совокупности толщ древнего АК и верхнего ЛК весьма правдоподобен. Такой вывод подтверждается тремя датами из торфяника древнего АК:  $35\ 600 \pm 1200$  (ГИН-2278),  $36\ 900 \pm 500$  (МГУ-469) и  $38\ 000 \pm 1400$  (ГИН-2277). К этому возрастному интервалу относятся даты, полученные О.Г. Заниной из погребенной почвы на уровне торфяника. Поэтому погребенный АК и соответствующую ему почву следует считать раннекаргинскими.... Что касается возраста нижнего ЛК, который С.В. Томирдиаро считал зырянским, то этому противоречит дата ( $45\ 500 \pm 500$ ) лет назад (ГИН-13485), полученная Ф.А. Романенко из нижнего ЛК" [7, с. 8]. Это авторитетное мнение беспристрастного и весьма критически настроенного крупного исследователя еще раз убедило нас в правильном в целом принципе отбраковки недостоверных датировок. Автором выполнена работа по ревизии датирования всех использованных в работе разрезов.

Затем были построены изотопные диаграммы привязанные во времени, и рассчитаны средние значения  $\delta^{18}\text{O}$  для временных отрезков с шагом 2-4 тыс. лет, датируемые временными интервалами 30-28, 24-22, 20-18, 16-12 тыс. лет назад. На основании этих данных были построены карты-схемы распределения значений  $\delta^{18}\text{O}$  в сингенетических жильных льдах для всей территории Российской криолитозоны (рис. 1).

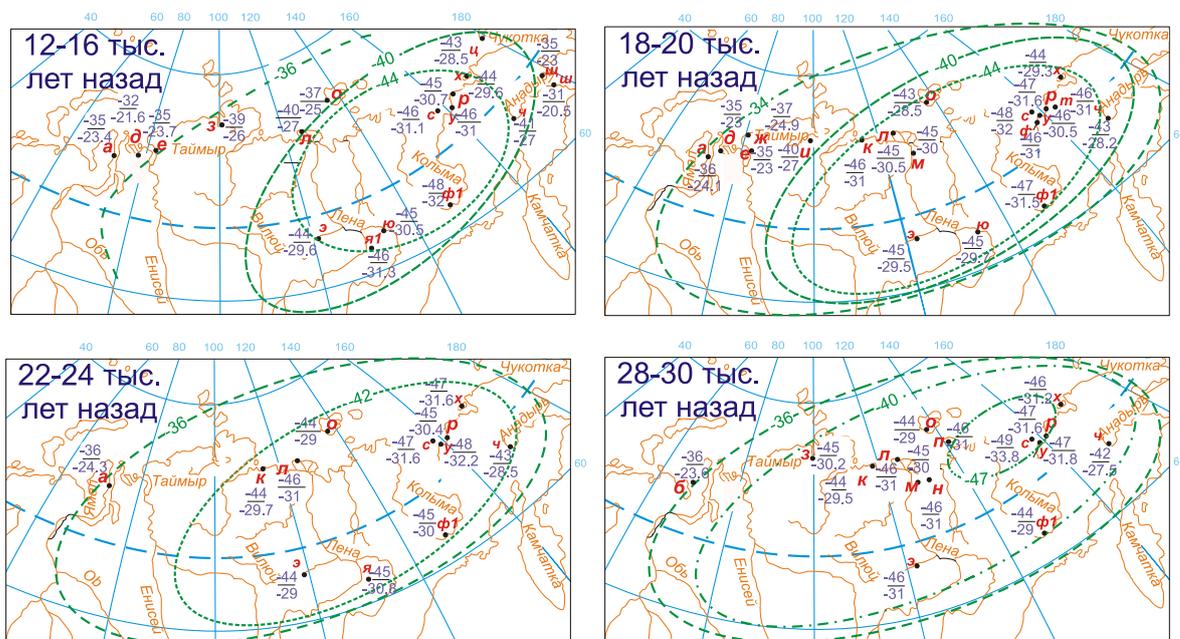


Рис. 1. Карты распределения среднеянварских палеотемператур воздуха для периода 30-12 тыс. лет назад на территории Российской Арктики. В числителе у точек значение среднеянварской температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ), в знаменателе - значение среднее  $\delta^{18}\text{O}$  для данного временного интервала для повторно-жильного льда

## Дискуссия

Основной созданный автором метод - сопоставление изотопных значений современных ледяных жил с зимними температурами и использование полученных коэффициентов взаимосвязи для реконструкции зимних палеотемператур по значениям  $\delta^{18}\text{O}$  в древних повторно-жильных льдах. Этот метод является know-how автора. В рамках этого метода осуществлялась:

а. Верификация радиоуглеродных датировок с использованием принципа наибольшей достоверности более молодых датировок по сравнению с более древними датами, полученных на той же глубине, вследствие примесей аллохтонного древнего органического материала.

б. Верификация и ревизия уравнения связывающего современные данные по росткам ледяных жил с зимними температурами, с использованием изотопных анализов современных ростков жил, полученных автором и коллегами, вплоть до декабря 2016 г.

в. Выделение на изотопных диаграммах повторно-жильных льдов фрагментов формировавшихся в течение временных интервалов 30-28, 24-22, 20-18, 16-12 тыс. лет назад тыс. лет назад.

г. Построение карт реконструированных по значениям распределения  $\delta^{18}\text{O}$  среднеянварских палеотемператур для временных интервалов 30-28, 24-22, 20-18, 16-12 тыс. лет назад тыс. лет назад.

Х.Майер, Т.Опель и А.Деревягин с соавторами [\[14\]](#) исследовали долговременную тенденция к потеплению зимних температур в низовьях р.Лены в среднем и позднем голоцене.

Известно, что в течение последних нескольких десятилетий Арктические районы потеплели значительно сильнее, нежели за последние 2000 лет. Палеореконструкции, основанные на точных палеоклиматических природных данных говорят о долгосрочной тенденции к похолоданию от среднего и позднего голоцена к современности, в отличие от результатов моделирования климата, которые демонстрируют незначительные изменения температуры, и даже потепление. Результаты изотопно-кислородного анализа образцов повторно-жильных льдов дельты реки Лены показали, что за последние 7000 лет содержание тяжелых изотопов, характеризующих температуры холодного периода, стало значительно выше, достигнув беспрецедентных значений в последние пятьдесят лет. Тенденция к потеплению от среднего и позднего голоцена противопоставлена похолоданию, прослеживающемуся по другим палеозаписям. Но, большинство имеющихся палеозаписей посвящены реконструкциям летних температур. По утверждению Х.Майера с соавторами [\[14\]](#) выявленная тенденция связана с сезонными изменениями орбитальных параметров Земли, в течение исследуемого периода. Авторы продемонстрировали, что Арктика переживает резко выраженное потепление, заметнее нежели другие регионы. Динамичная реакция на климатические изменения, и связанные с этим механизмы, по мнению авторов делают Арктическую среду крайне неустойчивой к изменениям будущего, а также ключевой для изучения изменений климата.

Х.Майером с соавторами [14] был проведен анализ образцов из десяти ледяных жил в толще первой надпойменной террасы Лены (высота которой 10-12 м, над современной поймой), и из трех ледяных жил из голоценовых вкладок в толще третьей надпойменной террасы Лены, высотой около 25 м. Все образцы были отобраны в обнажениях, расположенных вдоль русла, по течению р.Лены. Образцы из ледяных повторно-жильных льдов – шириной около 1,5 см (каждый включающий около десяти элементарных ледяных жилок - событий заполнения морозобойных трещин), были растоплены и проанализированы на изотопно-кислородный состав. Исходя из того, что морозное трещинообразование – повторяющийся процесс, который происходит не каждую зиму, авторы отнесли каждый образец к периоду порядка 20 лет. Для обеспечения точной хронологии по значениям  $\delta^{18}\text{O}$ , Х.Майер с соавторами [14] использовали только образцы повторно-жильных льдов, содержащие достаточное количество органического материала для ускорительной спектрометрии (AMS датирования) по  $^{14}\text{C}$ . Все 42 образца датированных с помощью AMS (37 с первой террасы Лены; 5 из верхней части ледового комплекса) были использованы для создания непрерывной записи значений  $\delta^{18}\text{O}$  в ледяных жилах (повторно-жильных льдах) центра дельты Лены, в результате преобразованной реконструкцию зимних температур среднего и позднего голоцена. В качестве современного аналога был проведен анализ 12 образцов из ростков ледяных жил, относящихся, вероятно к последним десяти годам.

AMS датировки по  $^{14}\text{C}$  показали, что повторно-жильные льды формировались начиная с 7,3 тыс. калиброванных лет вплоть до нашего времени. Согласно данным, полученным дельте Лены, отчетливо прослеживается значительный рост значений  $\delta^{18}\text{O}$  за последние 7 тыс. лет, что можно проинтерпретировать, как средне-позднеголоценовую тенденцию к потеплению ( $0,45 \pm 0,16$ ) промилле / 1000 лет). Это голоценовое потепление может быть связана либо с региональными особенностями развития региона дельты Лены и/или с сезонностью температурных данных, получаемых по повторно-жильным льдам (зима). Для оценки влияния сезонности и понимания причин несоответствия между данными из дельты Лены и существующими температурными реконструкциями, Х.Майер с соавторами [14] проанализировали группу современных климатических моделей, проекта палеоклиматического моделирования: «фаза взаимного сопоставления» (PMIP3) для среднего голоцена (6 тыс. лет назад) и доиндустриальной эпохи (1850 н.э.). Большинство модельных расчетов (10 из 14) по территории низовий Лены, показывают на зимнее потепление, что соответствует реконструкциям по изотопному составу ледяных жил в дельте Лены. В отличие от зим, в летний период все модели, а по среднегодовым значениям большинство моделей (11 из 14) демонстрируют похолодание. Эти температурные тенденции распространяются на большую часть полярных регионов. Противоположные тенденции для зимних и летних температур в моделях могут объясняться сезонными различиями влияния орбитальных характеристик на климат. В то время как инсоляция на  $60^\circ$  с.ш. с мая по октябрь начала снижаться 9 тыс. лет назад, зимняя инсоляция, отраженная в изотопной записи повторно-жильных льдов, выросла за тот же период на сопоставимые величины. Среднегодовая инсоляция к северу от  $45^\circ$  с.ш. снизилась в результате прецессии - изменения угла наклона земной оси. Этот эффект усиливается при движении к полюсам. В дополнение к прямой реакции на изменение инсоляции, оказали влияние нелинейные обратные связи, вызванные изменением в океанах, вариациями площади морских льдов и изменением растительного покрова [14]. Эти обратные связи являются более важными для зимы, чем для лета. Моделирование, вероятно недооценивает зимний тренд к потеплению, поскольку содержание

CO<sub>2</sub> использовавшееся в моделях считалось постоянным, в то время как в атмосфере его содержание за моделируемый период времени увеличилось на 23 части на миллион, Поэтому Х.Майер с соавторами [14] пришли к выводу, что на тенденцию к потеплению, судя по изотопной записи по повторно-жильным льдам в низовьях Лены, повлияло воздействие парниковых газов на зимние температуры, а также активная роль инсоляции, влиявшей как на зимние, так и на летние температуры в Арктике. Дополнительно, для интерпретации изотопной кривой, построенной по анализу ледяных жил, авторами рассмотрены региональные изменения в окружающей среде в голоцене. Район моря Лаптевых по их мнению [14] подвергся морской трансгрессии, сформировавшей современный уровень моря, примерно 5 тыс. лет назад. Затопление шельфа моря Лаптевых сократило площадь исследуемого района, за счет смещения береговой линии Северного Ледовитого океана, практически на 400 км. Из этого следует снижение степени континентальности, что означает более низкие годовые амплитуды температуры, что естественно сказалось на зимних температурах. Тем не менее, общая тенденция к потеплению, следующая из изотопного анализа, при анализе образцов древнее 5 тыс. лет до настоящего времени, остаётся устойчивой. Большая часть AMS датированных образцов повторно-жильного льда дельты Лены (31 шт.) относятся к последним 2,3 тыс. лет, что дает возможность более детально изучить последние два тысячелетия. В этот период времени, изотопно-температурная запись демонстрирует значительную положительную корреляцию. В ходе настройки возрастной модели с учетом неопределенности углеродного AMS датирования была получена хорошая корреляция. Эту корреляцию можно отнести к схожим изменениям векового масштаба, таким как локальное потепление 1 тыс. лет назад, последующее похолодание прошлого тысячелетия (малый ледниковый период), за которым последовало резкое потепление до современного арктического максимума температуры. Тем не менее, существуют значительные расхождения между общими тенденциями в Арктике выявленными по климатическим моделям с использованием анализа изотопного состава повторно-жильных льдов дельты Лены, что, вероятно, связано с сезонной изменчивостью. Недавнее беспрецедентное потепление, нашедшее свое отражение в составе повторно-жильных льдов дельты Лены, является, по меньшей мере, региональным, что подтверждается также изучением голоценовых повторно-жильных льдов Ойгосского Яра (72,7° с.ш., 143,5° в.д.), в которых максимум значений  $\delta^{18}\text{O}$ , также относится к самым молодым образцам последних двух тысячелетий [14].

Абсолютные максимумы значений  $\delta^{18}\text{O}$ , а, следовательно, и самые теплые зимние условия, во всей анализируемой толще ледяных повторно-жильных льдов дельты Лены (а также, вероятно, и во всей Арктике последних двух тысячелетий) наблюдаются в последнее время. Это согласуется с анализом современных повторно-жильных льдов, в которых наблюдаются схожие значения  $\delta^{18}\text{O}$ . В течение прошлого столетия, радиационное воздействие, обусловленное антропогенным увеличением выбросов парниковых газов, повлияло на зимние и летние температуры. Последнее Арктическое потепление оказало наибольшее влияние именно на зимний сезон, что отчетливо видно в зимней голоценовой палеорекострукции в низовьях Лены [14].

Отметим, что эти реконструкции в основном повторяют полученные автором ранее реконструкции по хорошо датированным голоценовым жилам в долине р.Чары, по голоценовому многоярусному жильному комплексу Мерзлый Яр в верховьях Енисея [2], и в существенной мере близки к нашим выводам

полученным при сопоставлении изотопных палеореконокструкций по ледяным жилам, формировавшимся в последние 2-3 тыс. лет на Свальбарде и Ямале [30]. И тем более странно, что Х.Майер, Т.Опель и А.Деревягин не сослались на наши, хорошо известные им работы [14], хотя каждый из них, передавал мне, что монография автора [1] является его настольной книгой.

Работами И.Д.Стрелецкой с соавторами [10] и Г.Е.Облогова [9] дополнена база данных по значениям изотопного состава разновозрастных сингенетических ПЖЛ в западном секторе Российской Арктики для разных морских изотопных стадий – от современных до МИС 4. Ими подтверждены, ранее сделанные автором [1] выводы, что: а) от 50–60 тыс. лет назад до настоящего времени направление атмосферного переноса в Российской Арктике в зимний период принципиально не изменялось; б) формирование ледниковых щитов в Карском море в позднем неоплейстоцене и их деградация не оказывали существенного влияния на направление зимней атмосферной циркуляции. Несомненно, ледники имели ограниченную площадь и мощность. На основе сравнения значений изотопного состава современных ПЖЛ (элементарных жилок) и климатических характеристик (средних за 1961–1990 гг. значений температуры воздуха) им уточнены ранее полученные корреляционные зависимости между значением  $\delta^{18}\text{O}$  и зимними температурами воздуха.

Чтобы сравнить оценки палеотемператур холодного периода с ранее опубликованными автором [1, 2] в качестве первого приближения И.Д.Стрелецкой и др. [10] использована линейная интерпретация и получены уравнения регрессии, описывающие связь  $\delta^{18}\text{O}$  и соответствующих температур:

$$t_{\text{ср. янв}} = 1,12 \delta^{18}\text{O} - 6,43 \quad (2)$$

Это уравнение регрессии использовано И.Д.Стрелецкой с соавторами [10] и Г.Е.Облоговым [9] для восстановления температуры формирования ПЖЛ по значениям изотопного состава.

Разница оценок температур по формуле (2), приведенной И.Д.Стрелецкой с соавторами [10] и по формуле (1) по Ю.К. Васильчуку [1] составляет менее 2°C. На основе полученных уравнений регрессии И.Д.Стрелецкой с соавторами [10] рассчитаны средние палеотемпературы января и холодного периода для временных интервалов МИС 1, МИС 2, МИС 3 и МИС 4. Ими реконструированы температуры января и зимы в целом для Приенисейских районов Российской Арктики начиная с 60 тыс. лет назад до настоящего времени. Ими: "Подтверждено, что МИС 3 характеризовалась сравнительно низкими зимними температурами воздуха [1] и [10, с. 105]."

Важные результаты наших палеоклиматических реконструкций в Северной Евразии 30-12 тыс. лет назад заключаются в следующем:

(1) Сингенетические ледяные жилы активно формировались в едомных толщах в Арктических районах в течение всего периода 30-12 тыс. лет назад.

(2) Период интенсивного роста конкретного массива ледяных жил в том или ином регионе мог отличаться от соседней области и даже от соседнего массива, и он длился, как правило, не более 10-15 тыс. лет, затем рост мог либо прекратиться совсем, либо временно приостановиться из-за смены режима

обводнения, и затем снова возобновиться, но уже в рамках другого цикла осадконакопления.

(3) Построены изотопные диаграммы по сингенетическим ледяным жилам, привязанные во времени, и затем рассчитаны средние значения  $\delta^{18}\text{O}$  для временных отрезков с шагом 2-4 тыс. лет, датируемые временными интервалами 30-28, 24-22, 20-18, 16-12 тыс. лет назад.

(4) Построены карты-схемы распределения значений  $\delta^{18}\text{O}$  в сингенетических ледяных жилах, датируемых временными интервалами 30-28, 24-22, 20-18, 16-12 тыс. лет назад.

(3). Выполнена палеореконструкция среднеянварских температур, на основании значений  $\delta^{18}\text{O}$  в сингенетических ледяных жилах, для временных интервалов 30-28, 24-22, 20-18, 16-12 тыс. лет и построены карты-схемы распределения зимних палеотемператур для этих временных интервалов для всей территории Сибири.

(4) Тенденции в распределении  $\delta^{18}\text{O}$  в ледяных жилах формировавшихся в течение всего периода 30-12 тыс. лет назад аналогичны современным, т.е. значения  $\delta^{18}\text{O}$  становились в позднеплейстоценовых жилах более отрицательными при движении с запада на восток примерно на 8-10 ‰, в среднем составляя: в Западной Сибири -23, -25‰ (в современных жилах -17, -19‰), в Северной Якутии -31 до -33 ‰ (в современных жилах -25, -27‰); При дальнейшем продвижении на восток они повышались от -28, -31 ‰ в Северной Чукотке (в современных жилах -22, -27‰) и центральных районах Магаданской области, до -25 до -28 ‰ в Восточной Чукотке (в современных жилах -16, -20‰).

(5) Средние температуры января над Российской Арктикой были примерно на 8-12°C меньше, чем современные. В районах с изменяемыми климатическими условиями, такими как Чукотке, диапазон средних температур января был до 17-18°C меньше, чем в наше время.

(6) Евразийская криолитозона в течение всего периода 30-12 тыс. лет назад была похожа на современную криолитозону якутского сектора.

(7) Тенденции распределения значений  $\delta^{18}\text{O}$  в сингенетических ледяных жилах в Сибири 30-12 тыс. лет назад свидетельствуют о том, что транспортировка воздушных масс транспорта по всей Субарктической зоне Сибири была похожа на современный воздушный перенос. Влияние Атлантических воздушных масс было доминирующим над территорией севера Сибири, преобладая от полуострова Ямал до северо-восточной части Якутии, но это влияние, возможно, было слабее, то в настоящее время, из-за более частой адвекции холодного и сухого арктического воздуха. Также вероятно, влияние воздушных масс Тихого океана была незначительной в восточной части Северной Азии. По-видимому, континентальный антициклонический режим доминировал в районах Тихоокеанского побережья, особенно в зимний период.

Наши палеоклиматические реконструкции исключают каких-либо значительные изменения в характере распределения многолетнемерзлых толщ в разные этапы внутри периода 30-12 тыс. лет назад на севере Сибири. Равномерные тенденции значений  $\delta^{18}\text{O}$  в повторно-жильных льдах на обширной территории

севера Сибири свидетельствует о равномерной атмосферной циркуляции в то время. Это в свою очередь служит наглядным свидетельством отсутствия мощных ледниковых покровов на равнинах Сибири, наличие которых могло значительно повлиять не только на характер распределения значений  $\delta^{18}\text{O}$  в сингенетических ледяных жилах, но и на сам факт развития мощных ледяных жил, которые конечно же не формируются под ледниковым покровом.

### Библиография

1. Васильчук Ю.К. *Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций)*. Изд. Отдел. Теоретических проблем РАН. МГУ, ПНИИИС. 1992. В 2-х томах. Т. 1. 420 с. Т. 2. 264 с.
2. Васильчук Ю.К. *Повторно-жильные льды; гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность*. Изд-во Моск. ун-та. М., 2006. 404 с.
3. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Достоверность наиболее молодых радиоуглеродных датировок в синкриогенных толщах многолетнемерзлых пород // *Криосфера Земли*. 2010. Том XIV. № 4. С. 15-28.
4. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Маслаков А.А., Чижова Ю.Н. Возраст и палеогеокриологические условия формирования голоценовых подземных льдов Восточной Чукотки // *Материалы пятой конференции геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14-17 июня 2016 г.* Т. 2. М.: Университетская книга. 2016а. С. 270–277.
5. Васильчук Ю.К., Макеев В.М., Маслаков А.А., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н. Палеогеокриологические условия формирования позднеплейстоценовых и голоценовых повторно-жильных льдов острова Котельный // *Материалы пятой конференции геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14-17 июня 2016 г.* Т. 2. М.: Университетская книга. 2016б. С. 284–291.
6. Каплина Т.Н. *Закономерности развития криолитогенеза в позднем кайнозое на аккумулятивных равнинах Северо-Востока Азии*: Диссертация на соиск. учёной степени доктора геол.-минерал. наук. М.: ПНИИИС, 1986, 475 с.
7. Каплина Т.Н. Древние аласные комплексы Северной Якутии (Сообщение 1) // *Криосфера Земли*. 2011. Т. XV, № 2. С. 3–13.
8. Каплина Т.Н., Гитерман Р.Е., Лахтина О.В., Абрашов Б.А., Киселев С.В., Шер А.В. Дуванный Яр – опорный разрез верхнеплейстоценовых отложений Колымской низменности // *Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода*. № 48. 1978. С. 51–65.
9. Облогов Г.Е. *Эволюция криолитозоны побережья и шельфа Карского моря в позднем плейстоцене-голоцене*: Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата геол.-минерал. наук. Тюмень, 2016. 25 с.
10. Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Токарев И.В. Реконструкция палеоклимата Российской Арктики в позднем неоплейстоцене–голоцене на основе данных по изотопному составу полигонально-жильных льдов // *Криосфера Земли*. 2015. Том XIX. № 2. С. 98–106.
11. Fukuda, M., Nagaoka, D., Saijyo, K. et al. Radiocarbon dating results of organic materials obtained from Siberian permafrost areas // *Reports of Institute of Low Temperature Science, Sapporo: Hokkaido University*. 1997. P. 17–28.
12. Kanevskiy, M., Shur, Y., Fortier, D., Jorgenson M.T. & Stephani, E. Cryostratigraphy of late Pleistocene syngenetic permafrost (yedoma) in northern Alaska, Itkillik River exposure // *Quaternary Research*. 2011. Vol. 75. P. 584–596.

13. Meyer, H., Dereviagin, A.Yu., Siegert, C. & Hubberten, H.-W. Paleoclimate studies on Bykovsky Peninsula, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ground ice // *Polarforschung*. 2002. Vol. 70. P. 37–51.
14. Meyer, H., Opel, T., Laepple, L., Dereviagin, A.Yu., Hoffmann, K., Werner, M. Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid-to late Holocene // *Nature Geoscience*. 2015. Vol. 8. P. 122–125.
15. Murton, Ju.B., Goslar, T., Edwards, M.E., Bateman, M.D., Danilov, P.P., Savvinov, G.N., Gubin, S.V., Ghaleb, B., Haile, J., Kanevskiy, M., Lozhkin, A.V., Lupachev, A.V., Murton, D.K., Shur, Yu., Tikhonov, A., Vasil'chuk, A.C., Vasil'chuk, Yu.K., Wolfe, S.A. Palaeoenvironmental Interpretation of Yedoma Silt (Ice Complex) Deposition as Cold-Climate Loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2015. Vol. 26. Iss. 3. P. 208–288. DOI: 10.1002/ppp.1843.
16. Nelson, R.E., Carter, L.D., Robinson, S.W. Anomalous radiocarbon ages from a Holocene detrital organic lens in Alaska and their implications for radiocarbon dating and paleoenvironmental reconstructions in the Arctic // *Quaternary Research*. 1988. Vol. 29. N1. P. 66–71.
17. Opel, T., Dereviagin, A.Yu., Meyer, H. & Wetterich, S. Paleoclimatic information from stable water isotopes of Holocene and recent ice wedges at the Oyogos Yar coast region (Northeastern Siberia) // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2011. Vol. 22(1). P. 84–100.
18. Schirrmeister, L., Siegert, C., Kuznetsova, T., Kuzmina, S., Andreev, A., Kienast, F., Meyer, H., Bobrov, A. Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia // *Quaternary International*. 2002. Vol. 89(1). P. 97–118.
19. Schirrmeister, L., Grosse, G., Schwamborn, G., Andreev, A.A., Meyer, H., Kunitsky, V.V., Kuznetsova, T.V., Dorozhkina, M.V., Pavlova, E.Y., Bobrov, A.A. & Oezen, D. Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): a multidisciplinary approach // *Polar Geography*. 2003. Vol. 27(4). P. 277–319.
20. Schirrmeister, L., Grosse, G., Kunitsky, V., Magens, D., Meyer, H., Dereviagin, A., Kuznetsova, T., Andreev, A., Babiy, O., Kienast, F., Grigoriev, M., Overduin, P.P. & Preussner, F. Periglacial land scape evolution and environmental changes of Arctic lowland areas for the last 60 000 years (Western Laptev Sea coast, Cape Mamontov Klyk) // *Polar Research*. 2008. Vol. 27(2). P. 249–272.
21. Schirrmeister, L., Grosse, G., Kunitsky, V. V., Fuchs, M. C., Krbetschek, M., Andreev, A. A., Herzsuh, U., Barbyi, O., Siegert, C., Meyer, H, Dereviagin, A. Y. & Wetterich, S. The mystery of Bunge Land (New Siberian Archipelago): Implications for its formation based on palaeo-environmental records, geomorphology, and remote sensing // *Quaternary Science Reviews*. 2010. Vol. 29. P. 3598–3614.
22. Schirrmeister, L., Kunitsky, V., Grosse, G., Wetterich, S., Meyer, H., Schwamborn, G., Babiy, O., Dereviagin, A. & Siegert, C. Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on north-east Siberian Arctic coastal lowlands and islands – A review // *Quaternary International*. 2011. Vol. 241 (1–2). P. 3–25.
23. Schirrmeister, L., Schwamborn, G., Overduin, P.P., Strauss, J., Fuchs, M.C., Grigoriev M., Yakshina I., Rethemeyer J., Dietze E., Wetterich S. Yedoma Ice Complex of the Buor Khaya Peninsula (southern Laptev Sea) // *Biogeosciences Discuss*. 2016a. P. 1–36. doi:10.5194/bg-2016-283.
24. Schirrmeister, L., Meyer, H., Andreev, A., Wetterich, S., Kienast, F., Bobrov, A.,

- Fuchs, M., Sierralta, M., Herzsuh, U. Late Quaternary paleoenvironmental records from the Chatanika River valley near Fairbanks (Alaska) // *Quaternary Science Reviews*. 2016b. Vol. 147, № 1. P. 259-278.
25. Siegert, C., Dereviagin, A.Y., Shilova, G.N., Hermichen, W.-D. & Hiller, A. Paleoclimate indicators from permafrost sequences in the Eastern Taymyr Lowland // *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic. Dynamics and History*. Kassens, H., Bauch, H.A., Dmitrenko, I.A., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J. & Timokhov, L.A. (eds): Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1999. P. 477-499.
  26. Strauss, J. *Late Quaternary environmental dynamics at the Duvanny Yar key section, Lower Kolyma, East Siberia*. Diploma Thesis. Universität Potsdam. 2010. 108 p.
  27. 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*. 1991, Vol. 17 (6). P. 640-647.
  28. Vasil'chuk, Yu. K. Syngenetic ice wedges: cyclical formation, radiocarbon age and stable-isotope records // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2013. Vol. 24. N1. P. 82-93.
  29. Vasil'chuk, Yu., Vasil'chuk, A. Spatial distribution of mean winter air temperatures in Siberian permafrost at 20-18 ka BP using oxygen isotope data // *Boreas*. 2014. Vol. 43. Iss. 3. P. 678-687.
  30. Vasil'chuk, Yu.K., Budantseva, N.A., Christiansen, H.H., Chizhova, Ju.N., Vasil'chuk, A.C., Zemskova, A.M. Oxygen Stable isotope variation in Late Holocene ice wedges in Yamal Peninsula and Svalbard // *Geography, Environment, Sustainability*. 2015. N3(8). P. 36-54.
  31. Wetterich, S., Rudaya, N., Tumskey, V., Andreev, A.A., Opel, T., Schirrmeister, L. & Meyer, H. 2011: Last Glacial Maximum records in permafrost of the East Siberian Arctic // *Quaternary Science Reviews*. Vol. 30(21-22), P. 3139-3151.

#### **References (transliterated)**

1. Vasil'chuk, Yu.K. *Oxygen Isotope Composition of Ground Ice (Application to Paleogeocryological Reconstructions) Izotopno-kislородnyi sostav podzemnykh l'dov (opyt paleogeokriologicheskikh rekonstruktsii)*. Izd. Otdel. Teoreticheskikh problem RAN. MGU, PNIIS. 1992. V 2-kh tomakh. T. 1. 420 s. T. 2. 264 s.
2. Vasil'chuk, Yu.K. *Ice Wedge: Heterocyclity, Heterogeneity, Heterochroneity. Povtorno-zhil'nye l'dy; geterotsiklichnost', geterokhronnost', geterogenost'*. Izd-vo Mosk. un-ta. M., 2006. 404 c.
3. Vasil'chuk, Yu.K., Vasil'chuk, A.C. Dostovernost' naibolee molodykh radiouglerodnykh datirovok v sinkriogennykh tolshchakh mnogoletnemerzlykh porod // *Kriosfera Zemli*. 2010. Tom XIV. № 4. S. 15-28.
4. Vasil'chuk, Yu.K., Budantseva, N.A., Vasil'chuk, A.C., Maslakov, A.A., Chizhova, Ju.N. Vozrast i paleogeokriologicheskie usloviya formirovaniya golotsenovykh podzemnykh l'dov Vostochnoi Chukotki // *Materialy pyatoi konferentsii geokriologov Rossii. MGU imeni M.V. Lomonosova, 14-17.06.2016*. T. 2. M.: Universitetskaya kniga. 2016a. S. 270-277.
5. Vasil'chuk, Yu.K., Makeev, V.M., Maslakov A.A., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Chizhova Ju.N. Paleogeokriologicheskie usloviya formirovaniya pozdnepleistotsenovykh i golotsenovykh povtorno-zhil'nykh l'dov ostrova Kotel'nyi // *Materialy pyatoi konferentsii geokriologov Rossii. MGU imeni M.V.Lomonosova, 14-17.06.2016*. Univer. kniga. T.2. 2016b. S. 284-291.

6. Kaplina, T.N. *Zakonomernosti razvitiya kriolitogeneza v pozdnem kainozoe na akkumulyativnykh ravninakh Severo-Vostoka Azii*: Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora geologo-mineral. nauk. M.: PNIIS, 1986, 475 s.
7. Kaplina, T.N. Drevnie alasnye komplekсы Severnoi Yakutii (Soobshchenie 1) // *Kriosfera Zemli*. 2011. T. XV, № 2. S. 3–13.
8. Kaplina, T.N., Giterman, R.E., Lakhtina, O.V., Abrashov, B.A., Kiselev, S.V., Sher, A.V. Duvannyi Yar – oporny razrez verkhnepleistotsenovykh otlozhenii Kolymskoi nizmennosti // *Byulleten' komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*. № 48. 1978. S. 51–65.
9. Oblogov, G.E. *Evolutsiya kriolitozony poberezh'ya i shel'fa Karskogo morya v pozdnem pleistotsene-golotsene*: Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk. Tyumen', 2016. 25 s.
10. Streletskaya, I.D., Vasil'ev, A.A., Oblogov, G.E., Tokarev, I.V. Rekonstruktsiya paleoklimata Rossiiskoi Arktiki v pozdnem neopleistotsene-golotsene na osnove dannykh po izotopnomu sostavu poligonal'no-zhil'nykh l'dov // *Kriosfera Zemli*. 2015. Tom XIX. № 2. S. 98–106.
11. Fukuda, M., Nagaoka, D., Saijyo, K. et al. Radiocarbon dating results of organic materials obtained from Siberian permafrost areas // *Reports of Institute of Low Temperature Science, Sapporo*: Hokkaido University. 1997. P. 17–28.
12. Kanevskiy, M., Shur, Y., Fortier, D., Jorgenson, M.T. & Stephani, E. Cryostratigraphy of late Pleistocene syngenetic permafrost (yedoma) in northern Alaska, Itkillik River exposure // *Quaternary Research*. 2011. Vol. 75. P. 584–596.
13. Meyer, H., Dereviagin, A.Yu., Siebert, C. & Hubberten, H.-W. Paleoclimate studies on Bykovsky Peninsula, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ground ice // *Polarforschung*. 2002. Vol. 70. P. 37–51.
14. Meyer, H., Opel, T., Laepple, L., Dereviagin, A.Yu., Hoffmann, K., Werner, M. Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid-to late Holocene // *Nature Geoscience*. 2015. Vol. 8. P. 122–125.
15. Murton, Ju.B., Goslar, T., Edwards, M.E., Bateman, M.D., Danilov, P.P., Savvinov, G.N., Gubin, S.V., Ghaleb, B., Haile, J., Kanevskiy, M., Lozhkin, A.V., Lupachev, A.V., Murton, D.K., Shur, Yu., Tikhonov, A., Vasil'chuk, A.C., Vasil'chuk, Yu.K., Wolfe, S.A. Palaeoenvironmental Interpretation of Yedoma Silt (Ice Complex) Deposition as Cold-Climate Loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2015. Vol. 26(3). P. 208–288.
16. Nelson, R.E., Carter, L.D., Robinson, S.W. Anomalous radiocarbon ages from a Holocene detrital organic lens in Alaska and their implications for radiocarbon dating and paleoenvironmental reconstructions in the Arctic // *Quaternary Research*. 1988. Vol. 29. N1. P. 66–71.
17. Opel, T., Dereviagin, A.Yu., Meyer, H. & Wetterich, S. Paleoclimatic information from stable water isotopes of Holocene and recent ice wedges at the Oyogos Yar coast region (Northeastern Siberia) // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2011. Vol. 22(1). P. 84–100.
18. Schirrmeyer, L., Siebert, C., Kuznetsova, T., Kuzmina, S., Andreev, A., Kienast, F., Meyer, H., Bobrov, A. Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia // *Quaternary International*. 2002. Vol. 89(1). P. 97–118.
19. Schirrmeyer, L., Grosse, G., Schwamborn, G., Andreev, A.A., Meyer, H., Kunitsky, V.V., Kuznetsova, T.V., Dorozhkina, M.V., Pavlova, E.Y., Bobrov, A.A. & Oezen, D. Late Quaternary history of the accumulation plain north of the

- Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): a multidisciplinary approach // *Polar Geography*. 2003. Vol. 27(4). P. 277–319.
20. Schirrmeister, L., Grosse, G., Kunitsky, V., Magens, D., Meyer, H., Dereviagin, A., Kuznetsova, T., Andreev, A., Babiy, O., Kienast, F., Grigoriev, M., Overduin, P.P. & Preussner, F. Periglacial land scape evolution and environmental changes of Arctic lowland areas for the last 60 000 years (Western Laptev Sea coast, Cape Mamontov Klyk) // *Polar Research*. 2008. Vol. 27(2). P. 249–272.
  21. Schirrmeister, L., Grosse, G., Kunitsky, V. V., Fuchs, M. C., Krbetschek, M., Andreev, A. A., Herzschuh, U., Barbyi, O., Siegert, C., Meyer, H, Dereviagin, A. Y. & Wetterich, S. The mystery of Bunge Land (New Siberian Archipelago): Implications for its formation based on palaeo-environmental records, geomorphology, and remote sensing // *Quaternary Science Reviews*. 2010. Vol. 29. P. 3598–3614.
  22. Schirrmeister, L., Kunitsky, V., Grosse, G., Wetterich, S., Meyer, H., Schwamborn, G., Babiy, O., Dereviagin, A. & Siegert, C. Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on north-east Siberian Arctic coastal lowlands and islands – A review // *Quaternary International*. 2011. Vol. 241 (1–2). P. 3–25.
  23. Schirrmeister, L., Schwamborn, G., Overduin, P.P., Strauss, J., Fuchs, M.C., Grigoriev, M., Yakshina, I., Rethemeyer, J., Dietze, E., Wetterich, S. Yedoma Ice Complex of the Buor Khaya Peninsula (southern Laptev Sea) // *Biogeosciences Discuss*. 2016a. P. 1-36. doi:10.5194/bg-2016-283.
  24. Schirrmeister, L., Meyer, H., Andreev, A., Wetterich, S., Kienast, F., Bobrov, A., Fuchs, M., Sierralta, M., Herzschuh, U. Late Quaternary paleoenvironmental records from the Chatanika River valley near Fairbanks (Alaska) // *Quaternary Science Reviews*. 2016b. Vol. 147, № 1. P. 259-278.
  25. Siegert, C., Dereviagin, A.Y., Shilova, G.N., Hermichen, W.-D. & Hiller, A. Paleoclimate indicators from permafrost sequences in the Eastern Taymyr Lowland // *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic. Dynamics and History*. Kassens, H., Bauch, H.A., Dmitrenko, I.A., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J. & Timokhov, L.A. (eds): Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 1999. P. 477–499.
  26. Strauss, J. *Late Quaternary environmental dynamics at the Duvanny Yar key section, Lower Kolyma, East Siberia*. Diploma Thesis. Universität Potsdam. 2010. 108 p.
  27. 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*. 1991, Vol. 17 (6). P. 640-647.
  28. Vasil'chuk, Yu. K. Syngenetic ice wedges: cyclical formation, radiocarbon age and stable-isotope records // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2013. Vol. 24. N1. P. 82–93.
  29. Vasil'chuk, Yu., Vasil'chuk, A. Spatial distribution of mean winter air temperatures in Siberian permafrost at 20-18 ka BP using oxygen isotope data // *Boreas*. 2014. Vol. 43. Iss. 3. P. 678–687.
  30. Vasil'chuk, Yu.K., Budantseva, N.A., Christiansen, H.H., Chizhova, Ju.N., Vasil'chuk, A.C., Zemskova, A.M. Oxygen Stable isotope variation in Late Holocene ice wedges in Yamal Peninsula and Svalbard // *Geography, Environment, Sustainability*. 2015. N3(8). P. 36–54.
  31. Wetterich, S., Rudaya, N., Tumskoy, V., Andreev, A.A., Opel, T., Schirrmeister, L. & Meyer, H. Last Glacial Maximum records in permafrost of the East Siberian Arctic // *Quaternary Science Reviews*. 2011. Vol. 30(21–22), P. 3139–3151.