*Криосфера Земли*, 2015, т. XIX, № 2, с. 98–106 **http://www.izdatgeo.ru**

УДК 551.345

# РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОКЛИМАТА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В ПОЗДНЕМ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНЕ–ГОЛОЦЕНЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПО ИЗОТОПНОМУ СОСТАВУ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ

**И.Д. Стрелецкая[1], А.А. Васильев[2,3], Г.Е. Облогов[2], И.В. Токарев[4]**

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; irinastrelets@gmail.com*
[2] *Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; al.a.vasiliev@gmail.com, oblogov@mail.ru*
[3] *Тюменский государственный нефтегазовый университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия*
[4] *Ресурсный центр "Геомодель" Санкт-Петербургского государственного университета, 198504, Санкт-Петербург, ул. Ульяновская, 1, Россия*

Представлены результаты реконструкции палеоклимата Российской Арктики на основе изучения значений изотопов кислорода $\delta^{18}O$ в полигонально-жильных льдах. Собраны доступные данные о значениях изотопного состава сингенетических повторно-жильных льдов, для которых известен их геологический возраст. Построено пространственное распределение содержания $\delta^{18}O$ в современных жилах и полигонально-жильных льдах, формировавшихся во время МИС 1, МИС 2, МИС 3, МИС 4. Установлено, что линии трендов изменения значений $\delta^{18}O$ во льдах с запада на восток примерно параллельны. На основе данных о значениях стабильного изотопа $\delta^{18}O$ в полигонально-жильных льдах разного возраста реконструировано пространственное распределение зимних палеотемператур для побережья Российской Арктики.

*Палеоклимат, полигонально-жильные льды, изотопный состав, атмосферный перенос*

## RECONSTRUCTION OF PALEOCLIMATE OF RUSSIAN ARCTIC IN LATE PLEISTOCENE–HOLOCENE ON THE BASIS OF ISOTOPE STUDY OF ICE WEDGES

**I.D. Streletskaya[1], A.A.Vasiliev[2,3], G.E. Oblogov[2], I.V. Tokarev[4]**

[1] *Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; irinastrelets@gmail.com*
[2] *Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, Malygina str., 86, Russia; al.a.vasiliev@gmail.com, oblogov@mail.ru*
[3] *Tyumen State Oil and Gas University, 625000, Tyumen, Volodarskogo str., 38, Russia*
[4] *Resources Center "Geomodel" of Sankt-Petersburg State University, 198504, St.-Petersburg, Ulyanovskaya str., 1, Russia*

Paleoclimate of the Russian Arctic has been reconstructed based on the isotope composition ($\delta^{18}O$) of ice wedges. All available data on isotope composition of syngenetic ice wedges with determined geologic age have been analyzed. Spatial distribution of $\delta^{18}O$ values has been analyzed by the present time, as well as MIS 1, MIS 2, MIS 3, and MIS 4. Trend lines of spatial distribution of $\delta^{18}O$ for different time periods are almost parallel. Based on the data on isotope composition of ice wedges of different age, winter paleotemperatures have been reconstructed for the Russian Arctic and their spatial distribution has been characterized.

*Paleoclimate, ice wedges, isotope composition, atmospheric transfer*

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы появляется все больше публикаций, в которых данные по изотопному составу повторно-жильных льдов (ПЖЛ) используются для реконструкции палеогеографических условий [*Васильчук, 1992; Mackay, 1983; Nikolayev, Mikhalev, 1995; Meyer et al., 2002a, b, 2010a, b; Popp et al., 2006; Vasil'chuk, Vasil'chuk, 2014*]. Физической основой таких реконструкций является установленная связь значений изотопного состава атмосферных осадков (снега и дождя) с температурой воздуха [*Dansgaard, 1964; Rozanski et al., 1993*]. Формирование ПЖЛ происходит за счет попадания снега и талой воды в криогенные трещины. Предполагается, что попавшие в трещины атмосферные осадки полностью или частично сохраняют изотопный состав, отражающий температурные условия образования снега, и несут "изотопный сигнал", по которому можно восстановить температуру воздуха.

Первые оценки зимних температур воздуха на основе изотопного состава ПЖЛ были выполнены Ю.К. Васильчуком [*1992*]. С учетом корреляционных связей изотопного состава и температуры воздуха им предложены простые формулы для опре-

**© И.Д. Стрелецкая, А.А. Васильев, Г.Е. Облогов, И.В. Токарев, 2015**

деления средней январской и средней зимней температур воздуха [*Васильчук, 2006*]. В некоторых случаях использование предложенных формул может вызывать неопределенность, поскольку из этих работ не ясно, какие именно климатические характеристики взяты автором для корреляций. Например, что понимается под средней зимней температурой, за какой период времени выполнено осреднение температуры воздуха? Кроме того, в формулах Ю.К. Васильчука использованы данные в сравнительно узком диапазоне изменения $\delta^{18}O$ от –14 до –29 ‰. Сейчас получены новые результаты, расширяющие этот диапазон. На основе изотопно-кислородного анализа ($\delta^{18}O$) около 1600 образцов ПЖЛ выполнена реконструкция зимних палеотемператур воздуха в Лаптевоморском регионе [*Деревягин и др., 2010*]. Проведены исследования изотопного состава ПЖЛ в новых географических регионах – на Шпицбергене, Западном Ямале, Западном Таймыре. С учетом новой информации необходимо уточнить предложенные Ю.К. Васильчуком зависимости применительно ко всему региону Российской Арктики.

Следует отметить, что проблема формирования и изменения изотопного состава снега в снежном покрове и во льду изучена недостаточно. Основная литература преимущественно относится к ледникам [*Fisher et al., 1983; Petit et al., 1999; Opel et al., 2009*]. Несомненно, в процессе накопления снежного покрова происходит фракционирование изотопов кислорода за счет испарения снега и потери при этом легких изотопов [*Friedman et al., 1991; Johnsen et al., 2000; Sokratov, Golubev, 2009; Lacelle, 2011*]. Совершенно не изучена проблема изменения изотопного состава льда в уже сформировавшихся ПЖЛ.

Ключевой вопрос – масштаб этих процессов. Иначе говоря, сохраняется ли связь изотопного состава снега с температурой воздуха при формировании и дальнейшем существовании ПЖЛ или же процессы фракционирования настолько меняют значения изотопного состава ПЖЛ, что восстановить температуры воздуха уже невозможно. В наших оценках в качестве первого приближения мы исходим из неизменности начального изотопного состава ПЖЛ в течение всего времени их существования, считая процессы сепарации изотопов малозначимыми. Однако возможны существенные изменения изотопного состава ПЖЛ за счет их взаимодействия с вмещающими породами и льдами другого генезиса. Такие данные исключены из рассмотрения.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Изучение геокриологического строения разрезов и изотопного состава ПЖЛ проведено нами на семи протяженных береговых обрывах побережья Карского моря (включая Енисейский и Гыданский заливы, на Западном Ямале), сложенных мерзлыми неоплейстоцен-голоценовыми отложениями. Особенности криолитологического строения этих разрезов и изотопный состав ПЖЛ приведены в работах [*Стрелецкая и др., 2007, 2009, 2012; Стрелецкая, Васильев, 2009, 2012; Облогов и др., 2012; Streletskaya et al., 2011*]. Мы обычно отбирали 15–20 образцов на определение изотопного состава льда из ПЖЛ и 2–3 образца из современных элементарных жилок. Опробованы все доступные жилы в обнажениях.

Стабильные изотопы $\delta^{18}O$ и D определены в изотопной лаборатории Института полярных и морских исследований (Потсдам, Германия). Ошибка определения $\delta^{18}O$ составляет 0,1 ‰, а $\delta D$ – 0,8 ‰ [*Boereboom et al., 2013*].

Для анализа использованы только те данные по изотопному составу сингенетических ПЖЛ, одновозрастных с вмещающими отложениями, которые обеспечены более или менее надежными оценками геологического возраста. Геологический возраст сингенетических жил близок к возрасту вмещающих отложений. В наших исследованиях датирование отложений выполнено с помощью радиоуглеродного или метода оптически стимулированной люминесценции.

Помимо собственных материалов, использованы все доступные литературные данные об изотопном составе ПЖЛ, а также авторские оценки геологического возраста сингенетических ПЖЛ и вмещающих отложений. Имеются также сведения об изотопном составе эпигенетических ПЖЛ, но в работе они не использовались в силу того, что невозможно точно определить возраст их формирования и, следовательно, привязать соответствующую им температуру воздуха к определенному геологическому временному интервалу. Авторы собрали и обобщили опубликованные данные об изотопном составе ПЖЛ Российской Арктики. Однако представительность этих данных разная: иногда речь идет только об отдельных пробах, часто авторы не указывают общее количество проб.

Поскольку стратиграфические схемы поздне-неоплейстоценовых отложений для разных регионов различаются и их возрастные границы не всегда совпадают, применялся принцип возрастного деления плейстоцена–голоцена в соответствии с морскими изотопными стадиями (МИС), границы которых установлены достаточно точно [*Bassinot et al., 1994*].

На рис. 1 и в табл. 1 приведены точки опробования, данные о географическом положении мест опробования и значения $\delta^{18}O$ в ПЖЛ разного возраста. Номера на рис. 1 соответствуют указанным в первой колонке табл. 1. Как видно, места отбора проб охватывают обширную территорию Российской Арктики в диапазоне географической широты 66–78° с.ш., долготы – 15–171° в.д. Все точки

Таблица 1. **Средние значения стабильного изотопа кислорода ($\delta^{18}O$) в повторно-жильных льдах Российской Арктики**

| Номер на рис. 1 | Место опробования | Геогр. координаты | Средние значения ($\delta^{18}O$), ‰ | | | | | Источник |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Соврем. (элемент. жилки) | Голоцен (МИС 1) | Поздний неоплейстоцен | | | |
| | | | | | МИС 2 | МИС 3 | МИС 4 | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | Долина Адвентдален, о. Шпицберген | 78°12′ с.ш., 15°50′ в.д. | –10,5(1)* | –15,6 (65) | – | – | – | [*Буданцева и др., 2012*] |
| 2 | Устье р. Печоры | 68°00′ с.ш., 54°30′ в.д. | –12,4 (1) | – | – | – | – | [*Коняхин, 1996*] |
| 3 | Пос. Амдерма | 70°00′ с.ш., 62°00′ в.д. | –16,5 (4) | –20,9 (4) | – | – | – | [*Васильчук, 2000; Leibman et al., 2001*] |
| 4 | Г. Воркута | 67°30′ с.ш., 64°00′ в.д. | –16,0 (12) | – | – | – | – | [*Васильчук и др., 2005*] |
| 5 | Мыс Марре-Сале, Западный Ямал | 69°41′ с.ш., 66°48′ в.д. | –14,0 (2) | –16,7 (40) | –23,9 (126) | –23,6 (1) | – | [*Стрелецкая и др., 2013*] |
| 6 | Р. Еркута, Западный Ямал | 68°11′ с.ш., 68°51′ в.д. | –12,3 (1) | –20,6 (25) | – | – | – | [*Буданцева и др., 2012*] |
| 7 | Р. Щучья, южный Ямал | 66°30′ с.ш., 69°00′ в.д. | –18,2 (1) | –19,4 (7) | – | – | – | [*Васильчук, 1992*] |
| 8 | Р. Сеяха Восточная | 70°00′ с.ш., 72°30′ в.д. | –17,3 (2) | –19,7 (3) | –22,9 (15) | –23,9 (17) | – | [*Васильчук, 1992, 2006*] |
| 9 | Гыданский п-ов | 71°48′ с.ш., 75°12′ в.д. | – | –19,5 (15) | –24,1 (5) | – | – | [*Облогов и др., 2012*] |
| | Гыданский п-ов | 71°50′ с.ш., 75°12′ в.д. | –18,8 (3) | –21,9 (40) | – | – | – | [*Васильчук, 1992*] |
| 10 | О. Свердруп | 75°15′ с.ш., 79°00′ в.д. | – | –19,9 (1) | –24,9 (1) | – | – | [*Тарасов и др., 1995*] |
| 11 | О. Сибирякова | 72°43′ с.ш., 79°06′ в.д. | – | –19,9 (22) | | – | – | [*Стрелецкая и др., 2012*] |
| 12 | Пос. Диксон | 73°30′ с.ш., 80°33′ в.д. | –20,7 (1) | –20,6 (33) | –24,9 (17) | – | – | [*Streletskaya et al., 2011, 2013*] |
| 13 | Мыс Сопочная Карга | 71°53′ с.ш., 82°40′ в.д. | –16,6 (1) | –19,8 (3) | –23,7 (42) | – | – | [*Streletskaya et al., 2011, 2013*] |
| 14 | Пос. Усть-Порт | 69°37′ с.ш., 84°25′ в.д. | –16,4 (1) | – | | – | – | [*Коняхин, 1996*] |
| 15 | Оз. Лабаз | 72°20′ с.ш., 99°00′ в.д. | – | –23,0 (138) | –30,2 (138) | – | – | [*Чижов и др., 1997*] |
| 16 | Мыс Саблера | 74°33′ с.ш., 100°32′ в.д. | –20,4(5) | –23,1 (8) | –26,3 (23) | –29,5 (24) | – | [*Деревягин и др., 1999*] |
| 17 | Мыс Мамонтовый Клык | 74°00′ с.ш., 116°00′ в.д. | –20,5 (1) | –24,9 (>200) | –31,0 (>200) | – | –30,6 (1) | [*Magens, 2005; Boereboom et al., 2013*] |
| 18 | Западная часть дельты р. Лены | 73°00′ с.ш., 124°00′ в.д. | –26,0 (1) | –22,7 (5) | – | –29,3 (12) | – | [*Magens, 2005; Schirrmeister et al., 2002, 2003*] |
| 19 | Быковский п-ов | 71°40′ с.ш., 129°00′ в.д. | –25,4 (15) | –28,2 (239) | –30,8 (72) | –30,1 (112) | –32,0 (1) | [*Schirrmeister et al., 2002; Meyer et al., 2002b*] |
| 20 | О. Котельный | 74°30′ с.ш., 139°00′ в.д. | –18,1 (1) | – | –28,5 (5) | – | – | [*Васильчук, 2006; Meyer et al., 2002a*] |
| 21 | Побережье Яно-Индигирской низменности (Оягосский Яр) | 72°42′ с.ш., 143°30′ в.д. | –22,0 (38) | –25,0 (>400) | – | – | – | [*Opel et al., 2011*] |
| 22 | О. Большой Ляховский | 73°11′ с.ш., 143°56′ в.д. | –20,4 (1) | –27,0 (1) | – | –31,2 (40) | – | [*Meyer et al., 2002a*] |

Окончание табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 23 | О. Новая Сибирь | 75°00′ с.ш., 150°00′ в.д. | –18,3 (3) | – | –29,0 (1) | – | – | [*Коняхин, 1996; Иванова, 2012*] |
| 24 | Район р. Колымы (Бизон) | 69°00′ с.ш., 158°00′ в.д. | –25,3 (7) | –27,0 (6) | – | –32,4 (61) | –33,0 (1) | [*Коняхин, 1996; Васильчук, 2006*] |
| 25 | Район р. Колымы (Плахтинский Яр) | 68°40′ с.ш., 160°17′ в.д. | –25,5 (15) | –20,8 (4) | –32,5 (19) | – | – | [*Васильчук, 1992; Fukuda et al., 1997*] |
| 26 | О. Четырехстолбовой | 70°47′ с.ш., 161°36′ в.д. | –19,2 (14) | –20,0 (3) | – | – | – | [*Коняхин, 1996*] |
| 27 | Полярная станция Амбарчик | 70°00′ с.ш., 162°00′ в.д. | –20,9 (7) | – | –29,2 (5) | – | – | [*Романенко и др., 2011*] |
| 28 | Р. Раучуа | 69°30′ с.ш., 167°00′ в.д. | – | –23,0 (3) | –31,2 (10) | – | – | [*Котов, 1998*] |
| 29 | О. Айон | 70°00′ с.ш., 168°00′ в.д. | –19,2 (1) | –21,6 (8) | –30,4 (160) | – | – | [*Васильчук, 1992; Коняхин, 1996*] |
| 30 | Апапельхинская низменность | 70°00′ с.ш., 171°00′ в.д. | –23,0 (1) | – | –33,6 (2) | – | – | [*Романенко и др., 2011*] |

*В скобках приведено количество образцов при определении средних значений изотопа кислорода $\delta^{18}O$.

отбора тяготеют к морскому побережью. Насыщенность табл. 1 разная, более или менее подробными данными обеспечены МИС 1 (<11 тыс. лет), МИС 2 (11–24 тыс. лет), а для МИС 3 (24–57 тыс. лет) и МИС 4 (57–71 тыс. лет), надежные сведения об изотопном составе ПЖЛ имеются только для отдельных регионов.

Для выявления связи изотопного состава ПЖЛ и температуры воздуха и построения калибровочных графиков собраны данные о значениях изотопного состава элементарных ледяных жилок, которые формируются в настоящее время в разных регионах Арктики – от Шпицбергена до Чукотки.

Наиболее точным методом калибровки было бы прямое сравнение изотопного состава элементарных жилок с точно установленным временем их формирования с климатическими характеристиками этого времени. Однако определить точный возраст элементарных жилок практически не представляется возможным. Поэтому вслед за Ю.К. Васильчуком [*1992*] мы используем приближенный метод. Всего элементарные жилы были опробованы на 22 участках, а для калибровки

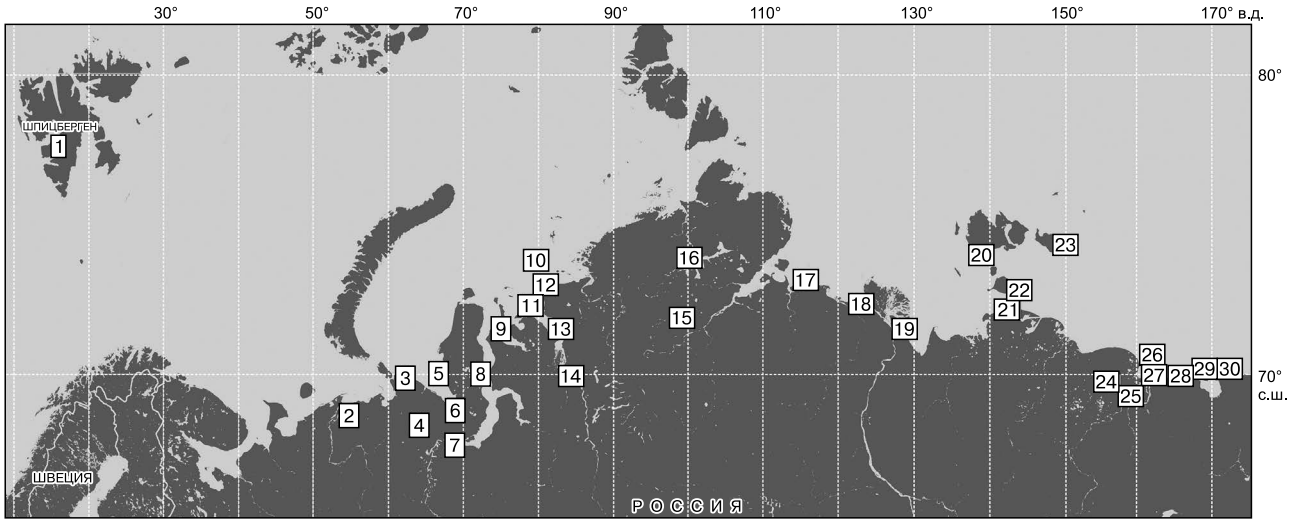


**Рис. 1. Расположение участков, для которых изучен изотопный состав сингенетических полигонально-жильных льдов и определен возраст их отложений.**

Номера участков указаны в первой колонке табл. 1.

Таблица 2. **Среднемесячные температуры воздуха холодного периода за 1961–1990 гг. (климатический стандарт) по данным метеостанций, ближайших к местам опробования элементарных жилок льда**

| Место опробования | Название ближайшей метеостанции | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Долина Адвентдален, о. Шпицберген | Баренцбург | –4,8 | –9,4 | –12,3 | –14,6 | –14,7 | –14,5 | –11,4 | –4,1 |
| Пос. Амдерма | Амдерма | –3,7 | –11,0 | –15,2 | –19,9 | –19,8 | –15,8 | –12,2 | –5,1 |
| Г. Воркута | Воркута | –5,2 | –13,4 | –17,0 | –21,2 | –20,1 | –14,6 | –10,3 | –3,1 |
| Мыс Марре-Сале | Марре-Сале | –5,1 | –13,4 | –18,2 | –22,6 | –22,4 | –18,3 | –13,9 | –5,8 |
| Р. Еркута, п-ов Ямал | Марре-Сале | –5,1 | –13,4 | –18,2 | –22,6 | –22,4 | –18,3 | –13,9 | –5,8 |
| Р. Щучья | Салехард | –4,9 | –15,6 | –20,7 | –24,8 | –23,6 | –16,2 | –9,9 | –1,8 |
| Р. Сеяха Восточная | Сеяха | –6,1 | –16,2 | –21,6 | –26,0 | –25,9 | –21,8 | –16,4 | –7,1 |
| Пос. Диксон | Диксон | –8,6 | –19,0 | –22,9 | –26,8 | –26,4 | –23,4 | –17,9 | –9,0 |
| Мыс Сопочная Карга | Сопочная Карга | –8,2 | –20,0 | –24,9 | –29,2 | –28,6 | –25,0 | –18,7 | –9,1 |
| Мыс Саблера | Оз. Таймыр | –12,5 | –24,6 | –29,1 | –32,9 | –32,4 | –29,8 | –20,8 | –10,4 |
| Мыс Мамонтовый Клык | Тэрпяй Тумса | –11,7 | –25,1 | –30,4 | –33,6 | –32,1 | –29,1 | –20,8 | –9,6 |
| Зап. часть дельты р. Лены | Дунай | –11,1 | –23,7 | –29,2 | –32,6 | –32,3 | –29,1 | –20,6 | –9,2 |
| Быковский п-ов | Тикси | –11,4 | –24,6 | –28,5 | –31,8 | –30,1 | –26,2 | –18,7 | –6,8 |
| О. Котельный | Котельный | –12,5 | –23,2 | –27,7 | –30,4 | –30,8 | –28,2 | –21,4 | –9,6 |
| О. Большой Ляховский | Мыс Шалаурова | –11,4 | –23,5 | –28,7 | –31,2 | –31,5 | –28,6 | –20,9 | –8,9 |
| О. Новая Сибирь | О. Жохова | –13,2 | –22,3 | –26,3 | –28,4 | –28,3 | –27,1 | –19,4 | –8,2 |
| Район р. Колымы (Бизон) | Колымская | –11,5 | –26,4 | –32,7 | –34,0 | –33,5 | –28,9 | –18,7 | –3,7 |
| Район р. Колымы (Плахтинский Яр) | Черский | –10,7 | –25,2 | –31,3 | –32,8 | –31,5 | –25,4 | –15,0 | –6,2 |
| О. Четырехстолбовой | Четырехстолбовой | –9,9 | –21,2 | –26,9 | –28,7 | –29,6 | –26,7 | –19,5 | –7,0 |
| О. Айон | О. Айон | –10,1 | –20,7 | –26,3 | –28,1 | –29,3 | –26,9 | –19,3 | –6,2 |

использованы данные по 20 участкам, так как в двух случаях метеостанции расположены на расстоянии более 100 км от места отбора образцов из элементарных жилок.

Климатические характеристики для районов образования элементарных жилок проведены по данным ближайших метеостанций из собственной базы климатических данных Российской Арктики. При выявлении соответствия изотопного состава элементарных жилок льда и климатических характеристик территории важно оговорить, о каком именно периоде осреднения климатических параметров идет речь. Ю.К. Васильчук [*1992*] выполнял сравнение исходя из предполагаемого возраста элементарных жилок менее 100 лет. Поскольку временной интервал наблюдений на большинстве северных метеостанций существенно меньше, представляется не вполне корректным выполнять осреднение климатических параметров за разные временные промежутки, а затем использовать их для корреляций. По нашему мнению, более правильно в качестве климатической базы сравнения выбрать период 1961–1990 гг., принимаемый в климатологии за климатическую норму (стандарт). Участки опробования элементарных ледяных жилок, список ближайших метеостанций и климатический стандарт для них приведены в табл. 2.

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПА $\delta^{18}O$ В ПЖЛ РАЗНОГО ВОЗРАСТА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

Пространственное распределение значений $\delta^{18}O$ в элементарных ледяных жилках, а также для сингенетических ПЖЛ разного возраста (сгруппированных в диапазонах возрастов, соответствующих морским изотопным стадиям) в зависимости от географической долготы представлено на рис. 2. Для наглядности (визуализации) здесь проведены линии трендов значений $\delta^{18}O$ для различного возраста в зависимости от долготы. Эти линии изображены для более четкого представления о тенденциях пространственной изменчивости $\delta^{18}O$ с запада на восток. Все точки расположены около линий трендов. Исключение составляет значение $\delta^{18}O$ для МИС 2 вблизи мыса Мамонтовый Клык. Здесь $\delta^{18}O$ составляет –30,5 ‰ по данным [*Magens, 2005*] и –37,0 ‰ по данным [*Boereboom et al., 2013*]. Величина –37,0 ‰ сильно отклоняется от линии тренда, и объяснить такое отклонение пока невозможно. Как следует из рис. 2, наклоны линий трендов близки друг к другу, хотя в холодный этап МИС 1 и в МИС 3 наблюдается несколько большая контрастность изменения $\delta^{18}O$ с запада на восток. Это позволяет сделать важный вывод

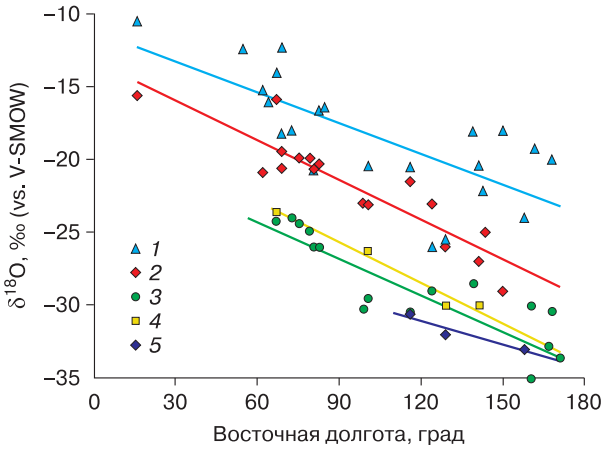


**Рис. 2. Пространственное распределение значений стабильных изотопов кислорода и линии их трендов в полигонально-жильных льдах Российской Арктики, формировавшихся в разное время.**

*1* – современные элементарные жилки; *2* – МИС 1; *3* – МИС 2; *4* – МИС 3; *5* – МИС 4.

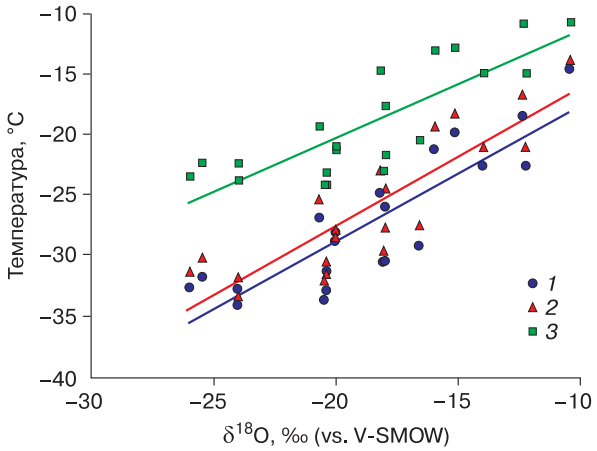


**Рис. 3. Корреляция между значениями $\delta^{18}O$ в современных элементарных ледяных жилках и температурами воздуха:**

*1* – январь; *2* – зима (декабрь–февраль); *3* – холодный период (октябрь–май).

о более или менее устойчивом характере атмосферного переноса, начиная примерно с 60 тыс. лет назад и до настоящего времени. Ранее был сделан вывод о неизменности направления атмосферного переноса от 18–20 тыс. лет назад до настоящего времени [*Vasil'chuk, Vasil'chuk, 2014*]. Наши данные расширяют этот диапазон до 50–60 тыс. лет.

Таким образом, формирование ледникового щита в Карском море в период последнего оледенения (МИС 2) не оказывало существенного влияния на направление атмосферного переноса [*Svendsen et al., 2004*]. Вероятно, ледниковый щит был незначительным по площади и высоте, так что он радикально не изменял атмосферного переноса. Мнение об ограниченном характере последнего оледенения в Карском море подтверждается новейшими исследованиями подводных краевых морен [*Гусев и др., 2012*]. Из рис. 2 следует также, что образование полигонально-жильных льдов в голоцене происходило в более суровых климатических условиях по сравнению с современными.

Имеющаяся обширная база данных по изотопному составу элементарных жилок льда, охватывающая большой географический регион, и представительные климатические данные позволяют достоверно установить корреляционные связи $\delta^{18}O$ и климатических параметров и построить калибровочные графики. Понятно, что в силу физических условий образования ПЖЛ из снега можно искать корреляционные связи только с зимними климатическими характеристиками.

Наиболее высокий уровень корреляции $\delta^{18}O$ ($R^2 > 0{,}73$) наблюдается с температурами ноября, декабря, января и средней зимней температурой (декабрь–февраль). Для палеоклиматических реконструкций обычно используются температуры самого холодного месяца (января) и средней температуры холодного периода (октябрь–май). Радиус корреляции ($R^2$) в соотношении $\delta^{18}O$ и средней температуры холодного периода составляет только 0,673, но мы решили все-таки использовать эту корреляцию, с тем чтобы сравнить наши оценки палеотемператур холодного периода с опубликованными. На рис. 3 приведены соотношения $\delta^{18}O$ со средними температурами января, средними зимними температурами и средними температурами холодного периода. В качестве первого приближения использована линейная интерпретация. Получены уравнения регрессии, описывающие связь $\delta^{18}O$ и соответствующих температур:

$$t_{\text{ср. янв}} = 1{,}12\ \delta^{18}O - 6{,}43,\ R^2 = 0{,}745,\ \sigma = 2{,}6,$$

$$t_{\text{ср. зим}} = 1{,}15\ \delta^{18}O - 4{,}6,\ R^2 = 0{,}754,\ \sigma = 2{,}7,$$

$$t_{\text{ср. хол}} = 0{,}885\ \delta^{18}O - 2{,}55,\ R^2 = 0{,}674,\ \sigma = 2{,}7.$$

Разница оценок температур по нашим формулам и по Ю.К. Васильчуку [*1992, 2006*] составляет менее 2 °С. С вероятностью 0,85 пределы варьирования частных значений определяемой по уравнениям регрессии температуры ±3,8 °С.

На основе полученных уравнений регрессии с использованием значений изотопного состава (см. табл. 1) рассчитаны средние палеотемпературы января и холодного периода для временных интервалов МИС 1, МИС 2, МИС 3 и МИС 4. Современные температуры (климатические стандарты) взяты из базы климатических данных. На рис. 4 приведено распределение средней темпера-

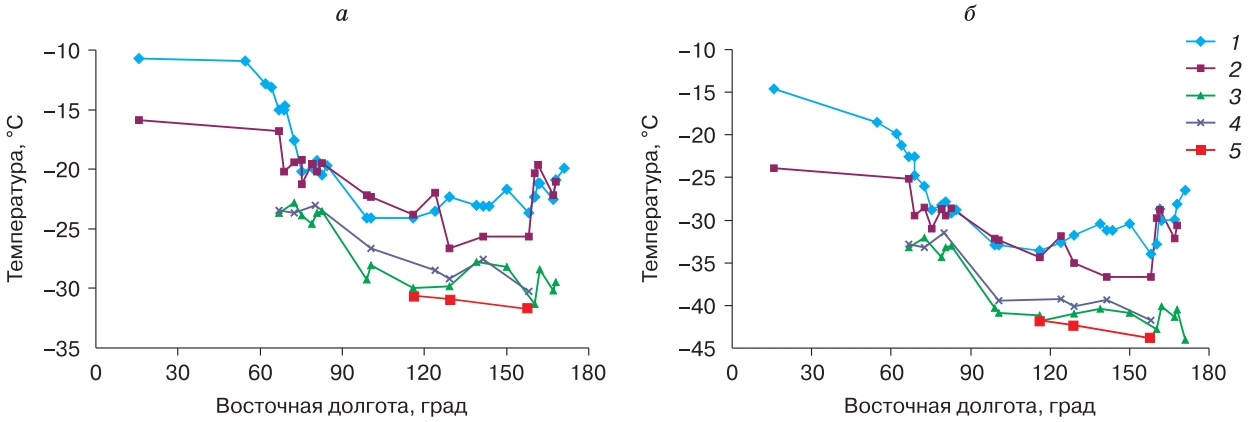


**Рис. 4. Пространственное распределение реконструированных современных и палеотемператур воздуха Российской Арктики:**

*а* – температуры холодного периода; *б* – температуры января; *1* – современные температуры; *2* – МИС 1; *3* – МИС 2; *4* – МИС 3; *5* – МИС 4.

туры холодного периода (рис. 4, *а*) и средней январской температуры по географической долготе (рис. 4, *б*).

Криохрон МИС 4 (зырянское похолодание) характеризуется самыми низкими температурами холодного периода. На современном побережье моря Лаптевых средняя температура холодного периода составляла около –31 °С, а средняя температура января достигала –42 °С, на побережье Восточно-Сибирского моря средние температуры были еще ниже – соответственно –32 и –43 °С. Для более западных регионов Российской Арктики данные по изотопному составу ПЖЛ для МИС 4 отсутствуют, поэтому восстановить здесь палеотемпературы зырянского (ранневалдайского) криохрона невозможно.

При переходе от МИС 4 к МИС 3 (каргинское время) средняя температура холодного периода возросла на 3–5 °С и составила в восточном секторе Арктики –27...–29 °С, а температура января повысилась до –38...–40 °С. В западном секторе Арктики в это же время средняя температура холодного периода повысилась до –23...–25 °С. Январская температура тоже была выше, чем в восточном секторе, и составила –32...–35 °С. Таким образом, реконструированные палеотемпературы не подтверждают предположение о том, что каргинское время относится к существенно более теплому периоду [*Архангелов и др., 1988; Meyer et al., 2002a; Schirrmeister et al., 2002*]. Для этого времени также характерны низкие зимние температуры, что ранее отмечал Ю.К. Васильчук [*1992*].

Анализ данных, представленных на рис. 4, *а*, *б*, позволяет утверждать, что понижение зимних температур в последний криохрон МИС 2 (сартанское время) на Европейском Севере и в восточном секторе Арктики по сравнению с МИС 3 было незначительным. Температура холодного периода снизилась всего на 2 °С, а температура января – менее чем на 1 °С по сравнению с температурами МИС 3. В то же время понижение температуры холодного периода в западном секторе Российской Арктики менялось от 3–4 °С на Таймыре до 0–1 °С в Западной Сибири. Минимальные температуры холодного периода и января были присущи районам Чукотки и достигали –32 и –44 °С соответственно.

Переход от последнего верхненеоплейстоценового похолодания МИС 2 к голоцену МИС 1 характеризуется резким повышением температур как холодного периода, так и января. На Чукотке и Таймыре средняя температура холодного периода и января повысилась на 7–8 °С, в западном секторе Российской Арктики – примерно на 4 °С.

Пространственное распределение зимних палеотемператур и распределение значений изотопного состава ПЖЛ показывают неизменность характера атмосферного переноса в Российской Арктике, по крайней мере начиная с МИС 3.

## ВЫВОДЫ

Создана база данных по значениям изотопного состава разновозрастных сингенетических ПЖЛ в Российской Арктике для разных морских изотопных стадий – от современных до МИС 4.

Установлено, что примерно от 50–60 тыс. лет назад до настоящего времени направление атмосферного переноса в Российской Арктике в зимний период принципиально не изменялось. Формирование ледниковых щитов в Карском море в позднем неоплейстоцене и их деградация не оказывали существенного влияния на направление

зимней атмосферной циркуляции. Вероятно, ледники имели ограниченные площадь и мощность.

На основе сравнения значений изотопного состава современных ПЖЛ (элементарных жилок) и климатических характеристик (средних за 1961–1990 гг. значений температуры воздуха) уточнены корреляционные зависимости между $\delta^{18}O$ и зимними температурами воздуха. Найденные уравнения регрессии позволяют восстановить температуру формирования ПЖЛ по данным о значениях изотопного состава.

Реконструированы температуры января и холодного периода Российской Арктики начиная с 60 тыс. лет назад до настоящего времени. Подтверждено, что МИС 3 характеризовалась сравнительно низкими зимними температурами воздуха [*Васильчук, 1992*]. Последнее верхненеоплейстоценовое похолодание развивалось на фоне понижения зимней температуры от МИС 3 к МИС 2 всего на 1–2 °С.

Авторы выражают благодарность Ханно Майеру и Томасу Опелю из Института полярных и морских исследований им. А. Вегенера (Потсдам, Германия) за лабораторное определение изотопного состава полигонально-жильных льдов и обсуждение результатов исследований, а также участникам экспедиций на Западном Таймыре, Гыданском полуострове и п-ове Ямал.

Работа выполнена в рамках программ Президиума РАН 23 и поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-335.2014.5). Часть исходных данных получена с использованием оборудования Ресурсного центра “Геомодель” (Научный парк Санкт-Петербургского университета).

## Литература

**Архангелов А.А., Коняхин М.А., Михалев Д.В., Соломатин В.И., Вайкмяэ Р.А.** Изотопно-кислородный состав подземных льдов // Проблемы геокриологии. М., Наука, 1988, с. 152–158.

**Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Земскова А.М. и др.** Вариации $\delta^{18}O$ в позднеголоценовых повторно-жильных льдах и изменения зимних температур воздуха на Ямале, Россия и в Адвентдалене, Свальбард // Десятая Междунар. конф. по мерзлотоведению (TICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Тюмень, Печатник, 2012, т. 3, с. 41–45.

**Васильчук Ю.К.** Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций) / Ю.К. Васильчук. М., РИО Мособлупрполиграфиздат, 1992, т. 1, 420 с.; т. 2, 264 с.

**Васильчук Ю.К.** Основы изотопной геокриологии и гляциологии / Ю.К. Васильчук, В.М. Котляков. М., Изд-во Моск. ун-та, 2000, 616 с.

**Васильчук Ю.К.** Повторно-жильные льды: гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность / Ю.К. Васильчук. М., Изд-во Моск. ун-та, 2006, 404 с.

**Васильчук Ю.К., Папеш В., Ранк Д. и др.** Первые для севера Европы $^{14}C$-датированные изотопно-кислородная и дейтериевая диаграммы из повторно-жильного льда близ г. Воркуты // Докл. РАН, 2005, т. 400, № 5, с. 684–689.

**Гусев Е.А., Костин Д.А., Маркина Н.В. и др.** Проблемы картирования и генетической интерпретации четвертичных отложений арктического шельфа России (по материалам ггк41000/3) // Регион. геология и металлогения, 2012, № 50, с. 5–14.

**Деревягин А.Ю., Чижов А.Б., Брезгунов В.С., Хуббертен Г.В., Зигерт К.** Изотопный состав повторно-жильных льдов мыса Саблера (оз. Таймыр) // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 3, с. 41–49.

**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.

**Иванова В.В.** Геохимия пластовых льдов острова Новая Сибирь (Новосибирские острова, Российская Арктика) как отражение условий их генезиса // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 1, с. 56–70.

**Коняхин М.А.** Изотопно-кислородный состав подземных льдов: Учеб. пособие / М.А. Коняхин, Д.В. Михалев, В.И. Соломатин. М., Изд-во Моск. ун-та, 1996, 156 с.

**Котов А.Н.** Аласный и ледовый комплексы отложений северо-западной Чукотки (побережье Восточно-Сибирского моря) // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 1, с. 11–18.

**Облогов Г.Е., Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Гусев Е.А., Арсланов Х.А.** Четвертичные отложения и геокриологические условия берегов Гыданской губы (Карское море) // Десятая Междунар. конф. по мерзлотоведению (TICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Тюмень, Печатник, 2012, т. 3, с. 365–368.

**Романенко Ф.А., Николаев В.И., Архипов В.В.** Изменение изотопного состава природных льдов побережья Восточно-Сибирского моря: географический аспект // Лед и снег, 2011, № 1(113), с. 93–104.

**Стрелецкая И.Д., Васильев А.А.** Изотопный состав полигонально-жильных льдов Западного Таймыра // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 3, с. 59–69.

**Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Гусев Е.А. и др.** Четвертичные отложения, подземные льды и динамика берегов Западного Таймыра // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М., Изд-во Моск. ун-та, 2009, с. 357–372.

**Стрелецкая И.Д., Васильев А.А.** Ледовый комплекс Западного Таймыра // Десятая Междунар. конф. по мерзлотоведению (TICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Тюмень, Печатник, 2012, т. 3, с. 499–504.

**Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Слагода Е.А., Опокина О.Л., Облогов Г.Е.** Полигонально-жильные льды на острове Сибирякова (Карское море) // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2012, № 3, с. 57–63.

**Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Матюхин А.Г.** Изотопный состав подземных льдов Западного Ямала (Марре-Сале) // Лед и снег, 2013, № 2 (122), с. 83–92.

**Стрелецкая И.Д., Гусев Е.А., Васильев А.А. и др.** Новые результаты комплексных исследований четвертичных отложений Западного Таймыра // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 3, с. 14–28.

**Тарасов П.Е., Андреев А.А., Романенко Ф.А., Сулержицкий Л.Д.** Палиностратиграфия верхнечетвертичных отложений острова Свердруп (Карское море) // Стратиграфия. Геол. корреляция, 1995, т. 3, № 2, с. 98–104.

**Чижов А.Б., Деревягин А.Ю., Симонов Е.Ф., Хуббертен Х.-В., Зигерт К.** Изотопный состав подземных льдов района оз. Лабаз (Таймыр) // Криосфера Земли, 1997, т. I, № 3, с. 79–84.

**Bassinot F.C., Labeyrie L.L., Vincent E., Quidelleur X., Shackleton N.J., Lancelot Y.** The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal // Earth and Planet. Sci. Lett., 1994, No. 126, p. 91–108.

**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, No. 7, p. 31–46, doi:10.5194/tc-7-31-2013.

**Dansgaard W**. Stable isotopes in precipitation // Tellus, 1964, vol. 19, No. 4, p. 425–463.

**Fisher D.A., Koerner R.M., Paterson W.S.B., Dansgaard W., Gundestrup N., Reeh N.** Effect of wind scouring on climatic records from ice-core oxygen-isotope profiles // Nature, 1983, No. 301, p. 205–209.

**Friedman I., Benson C., Gleason J.** Isotopic changes during snow metamorphism // Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein / H.P. Taylor Jr., J.R. O'Neil, I.R. Kaplan (eds). Spec. Publ., 3. The Geochemical Society, 1991, p. 211–221.

**Fukuda M., Nagaoka D., Saijyo K.** Radiocarbon dating results of organic materials obtained from Siberia permafrost area // Report of Institute of Low Temperature Science. Sapporo, Japan, Hokkaido Univ., 1997, p. 17–28.

**Johnsen S.J., Clausen H.B., Cuffey K.M. et al.** Diffusion of stable isotopes in polar firn and ice: The isotope effect in firn diffusion // Physics of Ice Core Records / T. Hondoh (ed.). Sapporo, Hokkaido Univ. Press, 2000, p. 121–140.

**Lacelle D.** On the $\delta^{18}O$, $\delta D$ and D-excess relation in meteoric precipitation and during equilibrium freezing: theoretical approach and field examples // Permafrost and Periglacial Processes, 2011, No. 22, p. 13–25, doi: 10.1002/ppp.712.

**Leibman M.O., Lein A.Yu., Hubberten H.-W., Vanshtein B.G., Goncharov G.N.** Isotope-geochemical characteristics of tabular ground ice at Yugorsky peninsula and reconstruction of conditions for its formation // Data of Glaciol. Studies, Moscow, 2001, No. 90, p. 30–39.

**Mackay J.R.** Oxygen isotope variations in permafrost, Tuktoyaktuk peninsula area, Northwest Territories // Geol. Surv. Canada, 1983, pap. 83-1B, p. 67–74.

**Magens D.** Late Quaternary climate and environmental history of Siberian Arctic – Permafrost Records from Cape Mamontovy Klyk, Laptev Sea. Diploma Thesis. 2005, Germany, Univ. Kiel, 78 p.

**Meyer H., Siegert C., Schirrmeister L., Hubberten H.-W.** Palaeoclimate reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ice wedges // Permafrost and Periglacial Processes, 2002a, No. 13, p. 91–105.

**Meyer H., Dereviagin A., Siegert C., Hubberten H.-W.** Palaeoclimate studies on Bykovsky Peninsula, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ground ice // Polarforschung, 2002b, No. 70, p. 37–51.

**Meyer H., Schirrmeister L., Andreev A. et al.** Late Glacial and Holocene isotopic and environmental history of northern coastal Alaska – results from a buried ice-wedge system at Barrow // Quatern. Sci. Rev., 2010a, vol. 29, p. 3720–3735, doi:10.1016/j.quascirev.2010.08.005.

**Meyer H., Schirrmeister L., Yoshikawa K. et al.** Permafrost evidence for severe winter cooling during the Younger Dryas in northern Alaska // Geophys. Res. Lett., 2010b, vol. 37, L03501, doi:10.1029/2009GL041013.

**Nikolayev V.I., Mikhalev D.V.** An oxygen-isotope paleothermometer from ice in Siberian permafrost // Quatern. Res., 1995, vol. 43 (1), p. 14–21.

**Opel T., Dereviagin A., Meyer H., Schirrmeister L., Wetterich S.** Paleoclimatic information from stable water isotopes of Holocene ice wedges at the Dmitrii Laptev Strait (Northeast Siberia) // Permafrost and Periglacial Processes, 2011, No. 22 (1), p. 84–100, doi:10.1002/ppp.667.

**Opel T., Fritzsche D., Meyer H. et al.** 115 year ice-core data from Akademii Nauk ice cap, Severnaya Zemlya: high-resolution record of Eurasian Arctic climate change // J. Glaciol., 2009, No. 55 (189), p. 21–31.

**Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. et al.** Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature, 1999, No. 399, p. 429–436.

**Popp S., Diekmann B., Meyer H. et al.** Palaeoclimate signals in permafrost as inferred from stable-isotope composition of ground ice in the Verkhoyansk foreland, Central Yakutia // Permafrost and Periglacial Processes, 2006, No. 17, p. 119–132.

**Rozanski K., Araguás-Araguás L., Gonfiantini R.** Isotopic patterns in modern global precipitation // Climate change in continental isotopic records / P.K. Swart, K.C. Lohmann, J.A. McKenzie, S. Savin (eds). Washington, DC, USA, Amer. Geophys. Union, 1993, p. 1–36.

**Schirrmeister L., Siegert C., Kuznetsova T. et al.** Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia // Quatern. Intern., 2002, No. 89, p. 97–118, doi: 10.1016/S1040-6182(01)00083-0.

**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 approach // Polar Geography, 2003, vol. 27, p. 277–319.

**Sokratov S.A., Golubev V.N.** Snow isotopic content change by sublimation // J. Glaciol., 2009, No. 55, p. 823–828.

**Streletskaya I., Vasiliev A., Meyer H.** Isotopic composition of syngenetic ice wedges and Palaeoclimatic reconstruction, Western Taymyr, Russian Arctic // Permafrost and Periglacial Processes, 2011, No. 22, p. 101–106, Publ. online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). doi: 10.1002/ppp.707.

**Streletskaya I.D., Gusev E.A., Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Molodkov A.N.** Pleistocene–Holocene paleoenvironmental records from permafrost sequences at the Kara Sea coasts (NW Siberia, Russia) // Geography, environment, sustainability, 2013, vol. 6, No. 3, p. 60–76.

**Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al.** Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // Quatern. Sci. Rev., 2004, No. 23, p. 1229–1271, doi: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008.

**Vasil'chuk Y., 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, doi:10.1111/bor.12033.

*Поступила в редакцию*
*1 июля 2014 г.*