

Изотопно-кислородный состав льда ледника № 30 в горах Сунтар-Хаята

© 2016 г. Н.А. Буданцева^{1*}, Б.Р. Мавлюдов², Ю.Н. Чижова¹, Ю.К. Васильчук¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; ²Институт географии РАН, Москва
*nadin.budanceva@mail.ru

Oxygen isotopic composition of ice of the glacier № 30, Suntar-Khayata Mountains

N.A. Budantseva^{1*}, B.R. Mavlyudov², Ju.N. Chizhova¹, Yu.K. Vasil'chuk¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ²Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
*nadin.budanceva@mail.ru

Article accepted for publication on August 30, 2015

Keywords: *ice formation conditions, stable oxygen isotopes, winter snow.*

Summary

The object of research is the mountain-valley glacier № 30, located in the central part of the Suntar-Khayata Ridge – one of the largest centers of modern glaciation of the North-East of Russia. This glacier had been chosen due to lamination of ice on its surface, providing successive sampling of increasingly young ice upward the glacier slope. At the end of August 2013, surface ice of the glacier was sampled within the altitude range 2060–2510, an age of this ice here was estimated to be about 500 years old. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ values in the glacier ice amounted about 5.5‰: from –20.2 to –25.9‰ that is numerically consistent with isotopic values for the neighboring glaciers № 29 and 31. No essential relation between the ice isotopic composition and altitude, age or the change of the ice granularity was found. Absence of high-altitude isotope effect is explained by the fact that precipitation on the glacier № 30 falls at the same level of condensation as well as by intensive infiltration-congelation ice formation and fixation in the firn and snow cover of a part of the meltwater coming from higher and steeper areas on gently sloping sites of the glacier. The $\delta^{18}\text{O}$ values of ice from glacier № 30 are rather «heavy» for glaciers being formed in severe climate conditions with average January temperature of –28 °C. According to Dansgaard's dependence $\delta^{18}\text{O}_{\text{precipitation}} - t \text{ } ^\circ\text{C}_{\text{air}}$ the winter snow on the glacier № 30 should be hypothetically characterized by the $\delta^{18}\text{O}$ values from –30 to –40‰ which are typical ones for the winter snow in Siberia. Oxygen isotope values of the ice show insignificant contribution of winter snow into formation of the glacier and prevalence of spring-autumn snowfalls. No definite trend of changes in the glacier alimentation and the ice-formation process was found for the last 500 years.

Статья принята к печати 30 августа 2015 г.

Ключевые слова: *зимний снег, стабильные изотопы кислорода, условия льдообразования.*

Рассмотрен изотопно-кислородный состав поверхностного льда ледника № 30 в горах Сунтар-Хаята, отобранного в 2013 г. Вариации $\delta^{18}\text{O}$ во льду ледника № 30 составили около 5,5‰. При этом не отмечено существенного изменения изотопного состава льда с высотой или с его возрастом. Сопоставлен изотопный состав льда ледника № 30 и зимнего снега, выпадающего в разных районах Сибири. На основании полученных изотопных данных показано, что питание ледника происходит преимущественно за счёт весенне-осенних осадков при незначительном участии зимнего снега.

Изотопные исследования ($\delta^{18}\text{O}$) ледников позволяют установить вариации температур воздуха в период выпадения твёрдых осадков, а также условия формирования воздушных масс, приносящих осадки, и сезонность выпадения осадков [6]. Изотопный анализ применяется при исследованиях антарктического и гринландского льда, однако этот метод хорошо зарекомендовал себя и при изучении кернов тропических горных ледников [24].

Постановка проблемы

На ледниках в горах Сунтар-Хаята лёд формируется по инфильтрационно-конжеляционному типу. Это означает, что каждый годовой слой изотопически гомогенизируется посредством таяния и замерзания талой воды, но, как правило, данный процесс затрагивает не более одного годового слоя. Исследования изотопного состава таких ледников, несмотря на сложный

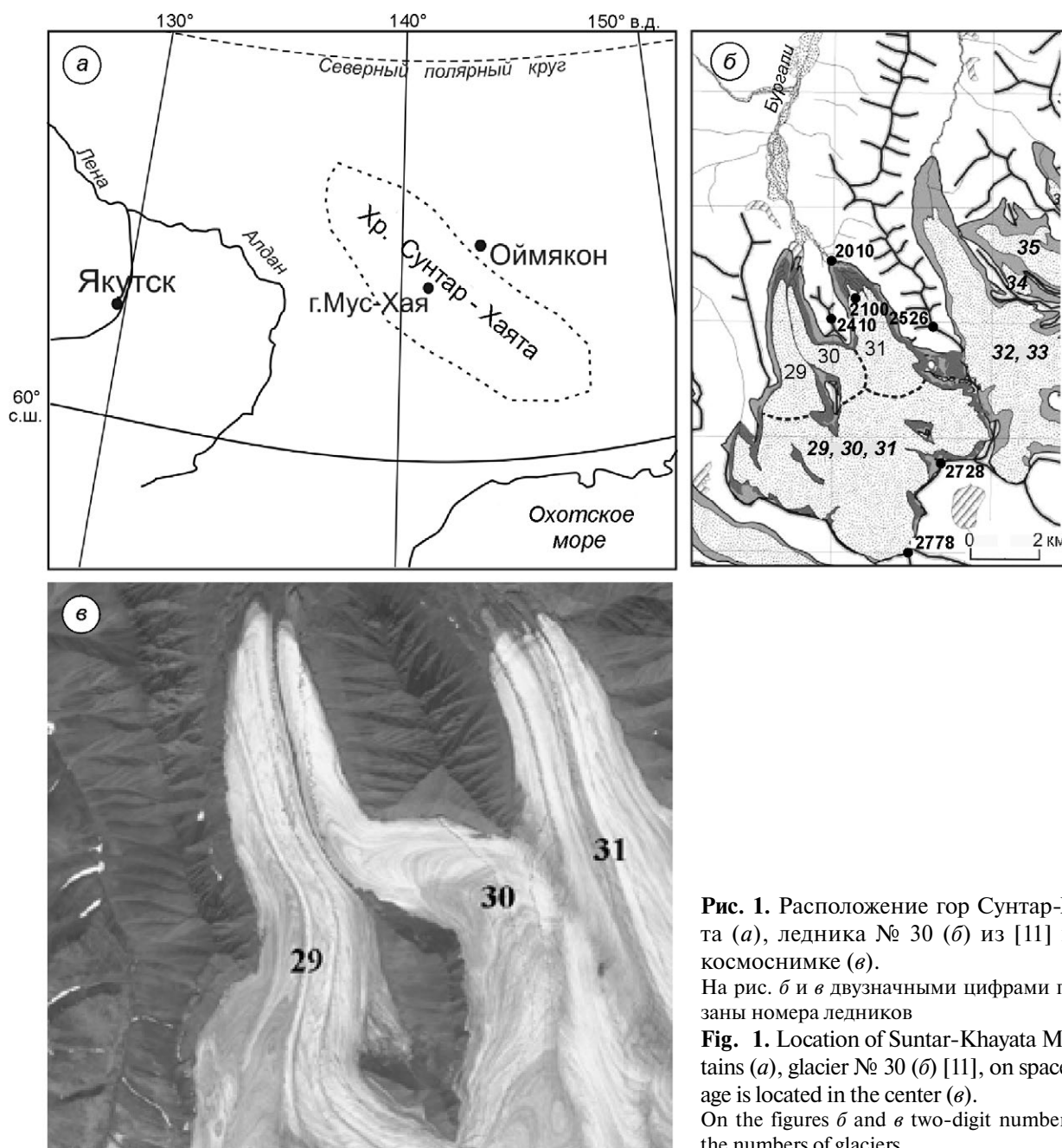


Рис. 1. Расположение гор Сунтар-Хаята (а), ледника № 30 (б) из [11] и на космоснимке (в).

На рис. б и в двузначными цифрами показаны номера ледников

Fig. 1. Location of Suntar-Khayata Mountains (а), glacier № 30 (б) [11], on space image is located in the center (в).

On the figures б and в two-digit numbers are the numbers of glaciers

механизм формирования льда, — перспективный подход к пониманию динамики оледенения. Объект наших исследований — горно-долинный ледник № 30, расположенный в центральной части гор Сунтар-Хаята, одного из крупнейших очагов современного оледенения Северо-Востока России (рис. 1, а). Ледник № 30 — один из многочисленных (более 200) ледников, занимающих площадь, по данным на 2003 г., 162,2 км² [1]. Этот ледник расположен в днище трога. Средняя высота снеговой границы —

около 2300 м. Ледник № 30 имеет общую область питания с ледниками № 29 и 31; в верхней части ледники № 29 и 30 отделены друг от друга скальным гребнем, а в области абляции они сливаются (см. рис. 1, б, в, рис. 2). Нижняя треть ледника № 30 представляет собой типичный ледниковый язык, лежащий в троговой долине. Рельеф поверхности в области абляции сравнительно спокойный, пологие уклоны сменяются почти горизонтальными плоскими участками. Толщина льда ледника № 30 в осевой части, скорее всего,



Рис. 2. Годовая слоистость льда ледника № 30, горы Сунтар-Хаята. Фото Б.Р. Мавлюдова
Fig. 2. The annual layers of ice in glacier № 30, the Suntar-Khayata Mountains. Photo by B.R. Mavlyudov

близка к таковой для ледника № 31 и составляет в среднем 120–125 м [10].

Учитывая, что ледники № 30 и 31 имеют общую область питания, расположены в близких высотных интервалах (примерно от 2000 до 2600 м) и характеризуются похожим рельефом ложа и уклоном, предполагается, что скорости их движения также близки. Исходя из скоростей движения ледника № 31 от 2,5 до 5 м/год [8, 10], можно оценить возрастной интервал между крайними отобранными нами образцами из слоистого льда на леднике № 30 примерно в 500 лет или чуть более (расстояние между точками 1 и 30 составляет 2,6 км).

Выбор ледника № 30 для изотопных исследований обусловлен его отличающейся от других ледников слоистостью льда на поверхности «кулисного» типа (см. рис. 2), обеспечивающей последовательный отбор всё более молодого льда вверх по склону ледника. При таком отборе лёд из каждого расположенного ниже слоя, как правило, оказывается старше, чем из верхнего. Для сравнения, на ледниках № 29 или 31 полосчатость ориентирована вдоль ледника, параллельно его движению. В этих условиях достаточно сложно отбирать разновременный лёд. Возможно, что на ледниках № 29 или 31 лёд, расположенный на 100 или 200 м ниже, имеет тот же возраст, что и расположенный выше.

Состояние ледников (размеры, баланс массы) этого района определяется прежде всего влияни-

ем окраинных морей Тихого океана, откуда приходят летние муссоны, хотя в основном здесь отмечается западный перенос воздушных масс [10], а также положением хребта вблизи «полюса холода» (150 км от Оймяконского плоскогорья), где зимой распространяется отрог сибирского антициклона, обуславливающий крайне низкие температуры.

Цель исследований — установить основные источники питания ледника № 30, а также выявить температурные тенденции в период формирования льда, особенно за последние 40 лет, когда отмечается отступление многих ледников в горах Сунтар-Хаята.

Методика исследований

В 2013 г. на ледниках гор Сунтар-Хаята проводили исследования сотрудники Института географии РАН и Исследовательского института глобальных изменений Японской ассоциации морских и наземных наблюдений (Йокосука, Япония). Были исследованы ряд ледников, в частности ледники № 29 и 30 (см. рис. 1). Б.Р. Мавлюдовым в конце августа 2013 г. был отобран поверхностный лёд ледника № 30 в диапазоне высот 2060–2510 м (рис. 3). Образцы льда отбирались с поверхности ледника до глубины 0,2–0,4 м с интервалом по высоте от 3 до 40 м (таблица). Определялись размер зёрен льда

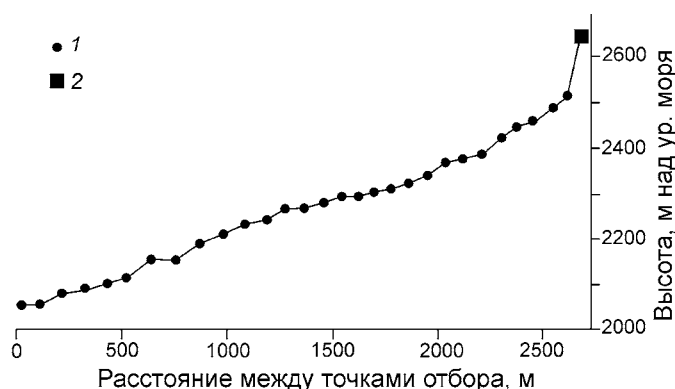


Рис. 3. Положение точек отбора поверхностного льда ледника № 30 по высоте.

1 — образцы льда; 2 — образец свежевыпавшего снега

Fig. 3. Sampling of surface ice of glacier № 30 with height:

1 — samples of glacier ice; 2 — sample of fresh snow

(визуально) и азимут падения слоёв (с помощью геологического компаса). Образцы упаковывали в чистые полиэтиленовые пакеты; в дальнейшем образцы растапливали при температуре 10–12 °С. До начала анализа расплавленные образцы хранили в холодильной камере. Анализ изотопно-кислородного состава льда выполнялся в изотопной лаборатории географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на масс-спектрометре «Delta-V» со стандартной опцией газ-бенч. Точность измерений составляла $\pm 0,1\text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$. Повторные измерения нескольких образцов показали хорошую воспроизводимость результатов. Для измерений использовались международные стандарты V-SMOW (значение $\delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$), GISP ($\delta^{18}\text{O} = -24,76\text{‰}$) и SLAP ($\delta^{18}\text{O} = -55,5\text{‰}$).

Изотопно-кислородный состав льда ледника № 30, хр. Сунтар-Хаята

Широта/долгота, градусы	Высота, м над ур. моря	Вид льда, зернистость льда, азимут падения слоёв/угол наклона	$\delta^{18}\text{O}$, ‰
62,60535/140,83798	2060	Лёд со шлирами без обломков	-22,6
62,60535/140,83798	2060	Лёд с рыжими шлирами с обломками	-22,3
62,60437/140,83816	2092	Лёд с серыми шлирами и обломками	-22,4
62,60433/140,83783	2101	Тектонически изменённый крупнозернистый лёд	-22,1
62,60401/140,83747	2109	Молочно-белый лёд, зерно 2–4 см	-25,9
62,59838/140,84088	2183	Зерно 3–5 см	-23,9
62,59840/140,84061	2183		-24,0
62,59763/140,84090	2200	Зерно 1–3 мм, 245°/40°	-23,3
62,59657/140,84059	2211	Зерно 1–5 мм, 320°/10°	-20,9
62,59555/140,84198	2238	Зерно 2–10 мм, 320°/5°	-22,0
62,59475/140,84441	2248	Зерно 1–4 см, 75°/5°	-21,3
62,59445/140,84619	2261		-24,2
62,59934/140,84793	2266	Зерно 1–3 мм, 75°/5°	-22,8
62,59420/140,84988	2272	Зерно 1–2 мм, 115°/10°	-22,6
62,59416/140,85070	2279	Зерно 1–4 мм, 115°/10°	-23,3
62,59402/140,85170	2285	Зерно 1–3 мм, 115°/10°	-23,8
62,59403/140,85171	2289	Зерно 1–3 мм, горизонтальное залегание	-24,0
62,59404/140,85216	2296	Зерно 1–2 мм, горизонтальное залегание	-22,5
62,59383/140,85270	2299	Зерно 1–3 мм, 115°/5°	-22,8
62,59328/140,85413	2322	Зерно 1–3, 90°/15°	-23,0
62,59290/140,85511	2335	Зерно 1–3 мм, 110°/10°	-22,0
62,59234/140,85651	2345	Зерно 1–3 мм, 175°/3°	-21,2
62,59101/140,85731	2365	Зерно 1–5 мм, 20°/5°	-20,2
62,58917/140,85809	2382	Зерно 1–5 мм, горизонтальное залегание	-22,5
62,58790/140,85871	2395	Зерно 1–3 мм, 170°/3°	-23,7
62,58548/140,85662	2428	Зерно 1–2 мм, 150°/3°	-22,0
62,58333/140,85547	2456	Зерно 1–3 мм, 220°/2–3°	-23,0
62,58253/140,85563	2462		-23,2
62,58015/140,85664	2494	Зерно 1–3 мм, 245°/5°	-24,5/-24,5*
62,57847/140,85762	2510	Зерно 1–3 мм, 235°/3°	-24,3/-24,2*
62,57023/140,87327	2651	Водораздел, свежий снег	-21,7/-21,7*

*Повторные измерения.

Результаты исследований и их обсуждение

Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ во льду ледника в диапазоне высот 2060–2510 м составили около 5,5‰: от –20,2 до –25,9‰ (см. таблицу), среднее значение равно –22,9‰. При этом не отмечено какой-либо связи изотопного состава льда с высотой (рис. 4), возрастом или с изменением зернистости льда. Изотопная кривая по ледниковому льду не демонстрирует какого-либо тренда (увеличения или уменьшения значений), линейная аппроксимация распределения значений $\delta^{18}\text{O}$ выражается уравнением $y = -0,001x - 22,86$, коэффициент достоверности аппроксимации

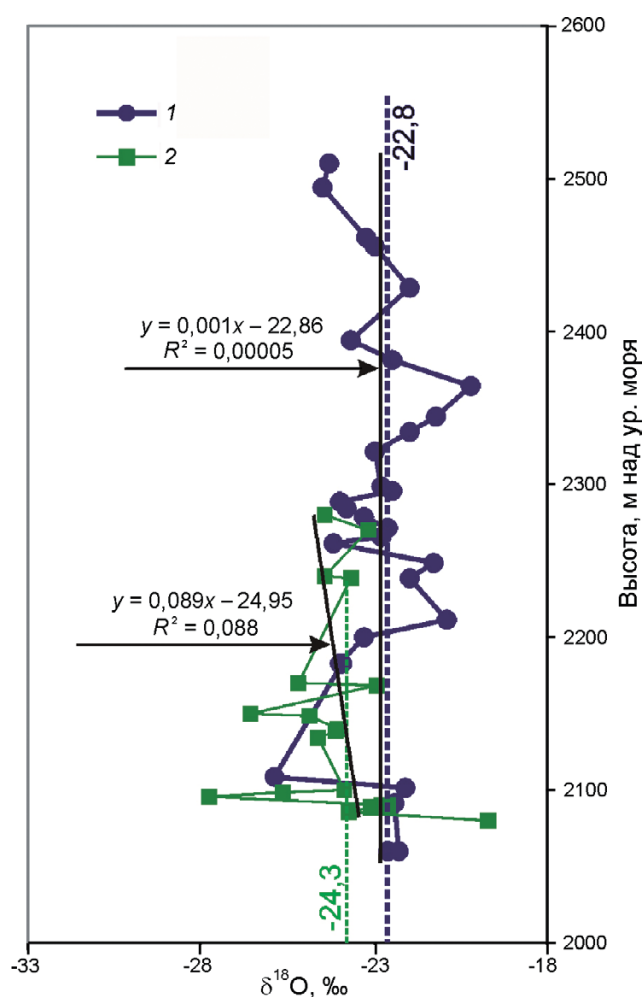


Рис. 4. Диапазон вариаций $\delta^{18}\text{O}$ в ледниковом льду в горах Сунтар-Хаята:

1 – настоящая работа; 2 – из [13]; пунктирной линией показаны средние значения

Fig. 4. Range of $\delta^{18}\text{O}$ values in glaciers ice in Suntar-Khayata Mountains:

1 – the present work; 2 – from [13]; dotted line shows mean values

$R^2 = 0,00005$. Это означает отсутствие зависимости $\delta^{18}\text{O}$ от высоты и, как мы полагаем, возраста льда и графически выражается вертикальной прямой линией (см. рис. 4), которая практически совпадает со средним значением $\delta^{18}\text{O}$ во льду.

Полученные нами данные изотопно-кислородного состава для льда ледника № 30 численно согласуются с изотопными данными, приведёнными в работе [13] для соседних ледников № 29 и 31. На этих ледниках был отобран лёд с поверхности ледника (с глубины 1–4 м) в высотном интервале 2080–2280 м. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в ледниковом льду ледников № 29 и 31 варьировали от –19,7 до –27,8‰. По приведённым в исследовании [13] данным построена изотопная кривая в тех же координатах, в которых рассматривались и полученные нами результаты (см. рис. 4). Отметим, что и данные, полученные в работе [13], демонстрируют отсутствие выраженного тренда изотопных значений по высоте: линейная аппроксимация выражается уравнением $y = 0,089x - 24,95$, $R^2 = 0,088$, что графически выражается линией со слабоотрицательным наклоном, близкой к вертикали и к среднему значению по льду. Если не учитывать единственное наименее отрицательное значение $\delta^{18}\text{O} = -19,7‰$, то диапазон вариаций $\delta^{18}\text{O}$ сужается до 5‰, что совпадает с диапазоном вариаций $\delta^{18}\text{O}$, полученным нами по леднику № 30.

В работе [13] на основе изотопных данных сделана попытка реконструировать среднегодовые температуры периода формирования ледников № 29 и 31, однако применение формулы В. Дансгора для реконструкции температур по изотопному составу ледников Восточной Сибири необоснованно. В работе [14] возраст этого льда ошибочно отнесён к позднеплейстоценовому путём сопоставления значений по приповерхностному ледниковому льду в диапазоне высот 100 м со 100-метровым датированным керном озёрных отложений оз. Эликчан. По нашему мнению, подобное сопоставление неправомерно, а возраст проанализированного льда этих ледников составляет не более нескольких сотен лет. Длина ледников не превышает 3000 м. Даже если использовать скорость движения льда, равную около 1 м/год, то смещение поверхностного льда от верхней к нижней точке происхождения не более чем за 3000 лет. Для предположения задержки льда в углублённом каре, сохранения его в течение 15–20 тыс. лет, а затем выхода на поверхность

нет никаких оснований. К тому же изотопный состав позднеледниковой льда в горах Сунтар-Хаята, скорее всего, должен быть ниже -30‰ .

Отметим, что полученные по льду ледника № 30 значения изотопно-кислородного состава довольно «тяжёлые» для ледников, формирующихся в суровых климатических условиях со средней температурой января -28 °C . По уравнениям для отдельных снегопадов в высокогорных районах и уравнению В. Дансгора [17] глобальной зависимости $\delta^{18}\text{O}_{\text{осадков}} - t_{\text{воздуха}}\text{ °C}$, зимний снег на леднике № 30 гипотетически должен характеризоваться значениями $\delta^{18}\text{O}$ от -30 до -40‰ . Низкие температуры воздуха в Сибири определяют низкие значения изотопно-кислородного состава зимнего снега. Нами получен ряд изотопно-кислородных данных по свежеснеговому снегу на Алтае: район городов Барнаул и Горно-Алтайск ($\delta^{18}\text{O} = -22,1 \div -31,5\text{‰}$), г. Улан-Удэ ($\delta^{18}\text{O} = -30 \div -35\text{‰}$, сборы Дж. Васильчук и Д.Л. Голованова), долина р. Чара ($\delta^{18}\text{O} = -36,2 \div -42,4\text{‰}$ [5]). Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ зимнего снега в г. Якутск, по данным [20], составляет $-32,6\text{‰}$. Эти значения показывают наличие континентального изотопного эффекта в осадках, который проявляется в уменьшении значений $\delta^{18}\text{O}$ выпадающих осадков при движении: источника пара — океан — в глубь континента.

Изотопный состав льда ледника № 30 показывает, что изотопически лёгкий зимний снег очень мало участвует в формировании льда. Это, скорее всего, объясняется малым количеством снега, выпадающего в зимний период. По данным метеостанции (ГМС) Сунтар-Хаята (высота 2070 м) в 1957–1964 гг. с ноября по март количество осадков составило 3,8% общего годового количества осадков [9]. На ледниках гор Сунтар-Хаята широко развита ледяная (инфильтрационно-конжеляционная) зона льдообразования. В условиях ледяной зоны слой наложенного льда в областях аккумуляции формируется почти весь период таяния, а в областях абляции — в его начале. Наличие этого льда в области абляции уменьшает общую величину таяния. Частые летние снегопады в короткий период абляции (июль–август) также задерживают таяние. После снегопадов в начале августа таяние резко замедляется и почти всегда прекращается после 20–25 августа [9].

Значение $\delta^{18}\text{O}$ свежеснеговому снегу, отобранного в конце августа на водоразделе на высо-

те 2650 м, составило $-21,7\text{‰}$, что близко к среднему значению изотопного состава льда. Скорее всего, питание ледника происходит преимущественно за счёт весенних, летних и осенних снегопадов. Отметим, что по минерализации лёд исследуемого ледника — ультрапресный (значения общей минерализации не превышают 56 мг/л), что характерно для ледников континентальных районов с невысокой аккумуляцией. Значения изотопного состава льда ледника № 30 в интервале высот 2060–2510 м не коррелируют с высотой (см. рис. 4), значения $\delta^{18}\text{O}$ изменяются чуть более чем на 5‰: от $-20,2$ до $-25,9\text{‰}$. Перепад высот в 500 м предполагает наличие высотного температурного градиента. Однако не всегда наличие температурного градиента приводит к изотопному градиенту в осадках, как отмечено в нашем случае.

Ледник № 30 расположен на высотах до 3000 м, это — высоты типичного среднегорья. Кроме того, небольшая площадь ледника скорее указывает, что осадки на леднике выпадают на одном уровне конденсации (и только в единичных случаях формируется классическая изотопная высотная зональность). Высотный изотопный эффект в горах связан с закономерным падением температуры с подъёмом на каждые 100 м. В классической схеме формирования снежного покрова на леднике в высокогорье [4, 21, 22] облако поднимается вверх по склону, и последовательное охлаждение и конденсация приводят к тому, что с увеличением высоты изотопный состав конденсирующего облака и выпадающего снега становится всё более лёгким. В горах Сунтар-Хаята часто отмечаются температурные инверсии, и, как отмечал М.М. Корейша, «принять какую бы ни было единую схему температурной поясности для среднегодовых температур не представляется возможным». Также и в среднегорье, и в низкогорье. Даже при значительном перепаде высот и наличии температурного градиента нарушение высотного изотопного эффекта связано с ветровым перераспределением и конденсацией на одном уровне. Например, в Скалистых горах на высотах от 2000 до 2800 м в зимний сезон отмечены снегопады с отсутствием нормального высотного изотопного распределения, с несколько даже обратным изотопным градиентом, что связано с различной метеобстановкой и особенностями прихода облака на склон [19].

Дополнительные факторы отсутствия высотной изотопной зональности — интенсивное инфильтра-

ционно-конжеляционное льдообразование, формирование наложенного льда и фиксация в фирне и снежном покрове на пологих участках ледника части талых вод с более крутых и высоких участков.

Возраст льда ледника № 30 в интервале высот 2060–2510 м мы оцениваем примерно в 500 лет судя по скорости движения льда, определённой на соседнем леднике. По данным М.М. Корейши, средние скорости движения ледника № 31 в 1957–1959 гг. составляли от 4 до 6 м/год [10] в зависимости от высотной зоны. По нашему мнению, скорости ледников № 30 и 31 примерно одинаковы или очень близки (так как уклон примерно одинаков, а толщи ледников скорее всего сравнимы). Таким образом, можно считать, что в течение последних 500 лет вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ во льду составили 5,5‰. Самые низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ могут характеризовать лёд самых холодных сезонов. Самые высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ присущи льду, формировавшемуся в более тёплые весенние и осенние сезоны или с большим участием летних снегопадов.

Выраженного утяжеления изотопного состава льда в верхней части ледника, которая предположительно формировалась в последние десятилетия, по сравнению с нижней частью, более древней, не отмечено. Несмотря на то, что льдообразование происходит и на языке, и в области аккумуляции, в течение последних десятилетий повышение летних температур способствует усилению таяния на языке и стаиванию всего годового слоя осадков, что даёт основание предполагать обнажение более древнего льда на языке.

Анализ температурных трендов за период с начала 1950-х до начала 2000-х годов по данным 13 ГМС Северо-Востока России показал переход от тенденции к похолоданию климата (1953–1958 гг.) к устойчивому потеплению. Большее потепление характерно для более континентальных районов — Якутск—Усть-Мая, центральной части гор Сунтар-Хаята и хр. Черского в пределах 1000-метрового высотного интервала. Рассчитанное повышение среднегодовой температуры воздуха с 1958 по 2001 г. составило +0,86 °C [2], а с 1950 по 2009 г. — +1,9 °C [23]. В последние десятилетия для Северо-Востока России отмечен существенный рост средней летней температуры (с 1 до 3 °C за 30 лет), что привело к сокращению площади ледниковых систем гор Бырранга, Сунтар-Хаята, хр. Черского, Корякского нагорья. На фоне повышения тем-

пературы, увеличивающей абляцию ледников, твёрдых осадков недостаточно для компенсации этого процесса [1]. В работе [23] показано, что в течение последней трети XX в. — начале XXI в. тренд зимних осадков в районе гор Сунтар-Хаята был слабо отрицательным, что выразилось в отрицательном балансе массы ледников.

С середины XX в. наблюдается отступление ледников и в горных системах Китая. Масштабное отступление отмечено с 1950-х до конца 1960-х годов, оно несколько замедлилось в 1970-х годах и вновь активизировалось в 1980-х. Наиболее интенсивное отступление ледников наблюдалось с 1990-х годов, когда большая часть прежде наступавших ледников стала отступать. Отступление ледников наиболее интенсивно протекало на юго-востоке Тибетского плато и в горах Каракорума, менее интенсивно — в центральной части Тибетского плато [15]. В горах китайского Алтая отмечено заметное сокращение оледенения, а суммарная площадь всех исследованных ледников уменьшилась с 1959 по 2008 г. на 30,4%. 55 ледников исчезли совсем [26]. В северной части Наньшаня (Китай) исследован изотопный состав ледника Дунде, толщина льда которого достигает 140 м. Выполнены бурение и детальное изучение ледниковых кернов. Изотопная стратиграфия установлена по годичным вариациям $\delta^{18}\text{O}$, которые различимы до глубины 70 м. Полученный 140-метровый керн был датирован в 35 500 лет. Значения $\delta^{18}\text{O}$ льда варьируют от –13 до –8‰ [24]. Особенность изотопно-кислородной кривой — очень высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ за последние 60 лет, иногда превышающие –8‰. Самые высокие значения получены для участков керна, датированных 1940-, 1950- и 1980-ми годами. Эти данные, по мнению исследователей [1, 15, 23, 24], указывают на повышение температуры воздуха в период аккумуляции льда.

Изотопная кривая получена по ледниковому керну другого китайского ледника — Музтак Ака на северо-западе Китая. В ледниковом керне общей мощностью 38 м, датированном от 1963 г. до современности по подсчёту годовых слоёв, $\delta^{18}\text{O}$ варьирует от –6 до –27‰. С 1963 г. (глубина 38 м) отмечается заметный тренд к утяжелению изотопных значений вверх по керну в среднем на 8–10‰ по $\delta^{18}\text{O}$ [16], что отражает явную тенденцию к потеплению за последние 50 лет. По нашим изотопным данным, потепления (по

крайней мере, для периода активных снегопадов: весенних, летних и осенних) не отмечено.

Анализ данных о положении концов ледников в горах Сунтар-Хаята и их режиме показывает, что ледники этого района претерпели значительные изменения за последние несколько десятилетий, выразившиеся в отступании их концов, замедлении скорости движения льда, понижении поверхности, отложении новых моренных гряд. По сравнению с 1945 г. (199,4 км² по данным М.М. Корейши [10]) к 2003 г. площадь ледников здесь сократилась на 37,2 км² [1], что эквивалентно сокращению площади примерно на 20% за период с 1945 по 2003 г. [8]. В период 1958–1970 гг. отступление ледников № 29 и 32 составило около 30 м, а ледника № 31 — около 25 м. В период 1970–2001 гг. отступление ледников № 29, 31, 32 было более 100–120 м [11]. Потеря массы ледника № 31 в период 1975–2001 гг. оказалась в 3,5 раза больше, чем за предыдущие 34 года. С 1961 по 2003 г. объём ледника сократился на 4,83 км³ [2, 3, 18]. С 1957–1959 гг. по 2001 г. ледник отступил на 200 м, а его поверхность понизилась на 20 м [25].

Тенденция к потеплению и существенный рост средней летней температуры приводят к сокращению ледников, стаиванию годового слоя осадков, отрицательному балансу массы (всё это — условия летнего сезона, сезона абляции), однако в случае с ледником № 30 это не отражается на составе льда. Выше снеговой линии, в области аккумуляции, лёд продолжает накапливаться и близкий состав этого льда к составу льда на языке указывает на неизменность условий льдообразования.

На протяжении всего периода изучения современного оледенения гор Сунтар-Хаята наиболее проблематичным всегда оставался возраст ближайших к ледникам краевых и боковых морен, а также положение и размеры ледников во время последнего максимума. В работе [12] оценено сокращение оледенения Сунтар-Хаята по дендрограммам и данным о балансе ледника № 31. Моренный комплекс максимального распространения ледников датирован началом их отступления 130 лет тому назад [10], причём отступление принималось как непрерывно идущий процесс. Однако сокращение массы ледника происходило с 1750 г. в виде пульсирующего отступления, и с начала сокращения ледников в горах Сунтар-Хаята прошло около 210 лет [12].

Отступление ледников может происходить на фоне относительно стабильных температурных ус-

ловий, что было показано авторами [7] для языка приэльбрусского ледника Большой Азау. Был проанализирован изотопно-кислородный состав льда ледников в областях аккумуляции и абляции. Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ современного фирна и льда в области аккумуляции ледника Большой Азау ($-14,8\text{‰}$) практически идентично среднему изотопному составу мёртвого льда ($-14,9\text{‰}$), возраст которого мы оцениваем в 150–250 лет. Температурная запись за период 1951–2005 гг. по ГМС Терскол в 4 км от ледника Большой Азау не показала выраженного температурного тренда, хотя за этот период язык ледника отступил почти на 900 м, что мы связываем с таянием льда, поступившего в долину в результате пульсации [7].

Выводы

На основании полученных изотопных данных по льду ледника № 30 в горах Сунтар-Хаята сделан ряд выводов. 1. Лёд ледника № 30 характеризуется значениями $\delta^{18}\text{O}$ от $-20,2$ до $-25,9\text{‰}$; в диапазоне высот 2060–2510 м изотопный высотный эффект не выражен. 2. Изотопно-кислородные значения льда показывают незначительное участие зимнего снега в формировании ледника; значения $\delta^{18}\text{O}$ льда отражают изотопный состав преимущественно осенних и весенних снегопадов. 3. Изучение изотопно-кислородного состава льда ледника № 30 не показало однонаправленной тенденции изменения условий питания и льдообразования за последние 500 лет во льду, формировавшемся в области аккумуляции; в течение последних десятилетий не отмечено выраженного изменения изотопного состава по сравнению с более древним льдом языка ледника.

Благодарности. Авторы благодарят В.Н. Михаленко и рецензентов за сделанные замечания.

Работа выполнена при финансировании Российским научным фондом (грант № 14-27-00083).

Литература

1. Ананичева М.Д. Оценка площадей, объёмов и высот границы питания ледниковых систем Северо-Востока России по космическим снимкам начала XXI в. // Лёд и Снег. 2014. № 1 (125). С. 35–47.
2. Ананичева М.Д., Давидович Н.В., Кононов Ю.М., Корейша М.М., Такахаши Ш., Ямада Т., Ширавива Т.

- Ледники современного массива гор Сунтар-Хаята: изменения со времени МГГ // МГИ. 2003. Вып. 95. С. 86–92.
3. *Ананичева М.Д., Корейша М.М.* Отступление ледников северного и южного массивов гор Сунтар-Хаята и хребта Черского // МГИ. 2005. Вып. 99. С. 18–25.
4. *Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н.* Изотопные методы в географии: Часть 3: Геохимия стабильных изотопов атмосферы и гидросферы. М.: изд. Географического факультета МГУ, 2013. 216 с.
5. *Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Станиловская Ю.В.* Летние и зимние температуры воздуха в северном Забайкалье в период формирования голоценовых повторно-жильных льдов // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 2. С. 7–22.
6. *Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н.* Высотный градиент распределения $\delta^{18}\text{O}$ и δD в атмосферных осадках и в снежном покрове высокогорных районов // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 13–21.
7. *Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А., Мухина Ю.С.* Быстрое сокращение ледника Большой Азау в Приэльбрусье на фоне стабильных климатических условий и возникающие при этом риски // Геориск. 2010. № 2. С. 16–29.
8. *Галанин А.А., Лыткин В.М., Федоров А.Н., Кадота Т.* Сокращение ледников гор Сунтар-Хаята и методические аспекты его оценки // Лёд и Снег. 2013. № 4 (124). С. 30–42.
9. Каталог ледников СССР. Т. 19. Северо-Восток. Ч. 3. Хребет Сунтар-Хаята. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 72 с.
10. *Корейша М.М.* Современное оледенение хребта Сунтар-Хаята. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 169 с.
11. *Корейша М.М.* Дневник экспедиционных исследований: Основные результаты // Инженерная геология. 2007. № 3. С. 50–55.
12. *Ловелиус Н.В.* Изменчивость прироста деревьев. Дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. Л.: Наука, 1979. 232 с.
13. *Мельников В.П., Спектор В.Б., Шейнкман В.С., Федоров А.Н., Галанин А.А., Спектор В.В., Пушкарь В.С., Кадота Т.* Экспериментальное исследование изотопного состава ледников хребта Сунтар-Хаята // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. № 4. С. 63–73.
14. *Спектор В.Б., Пушкарь В.С., Федоров А.Н., Галанин А.А., Спектор В.В.* Возраст ледников хребта Сунтар-Хаята // Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Тр. 8-го Всерос. совещ. по изучению четвертичного периода. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2013. С. 606–607.
15. *Яо Тандонг, Ванг Юкин, Лиу Шинг, пу Йанчен, Шен Йонгпин, Лу Анксин.* Современное отступление ледников Высокой Азии в Китае и его воздействие на водные ресурсы Северо-Западного Китая // Снежно-ледовые и водные ресурсы высоких гор Азии: Материалы междунар. семинара «Оценка снежно-ледовых и водных ресурсов Азии». Алматы, Казахстан, 28–30 ноября 2006 г. Алматы, 2007. С. 90–102.
16. *Chen Y., Li X.-K., Si J., Wu G.-J., Tian L.-D., Xiang S.-R.* Influence of aeolian activities on the distribution of microbial abundance in glacier ice // Biogeosciences Discussion. 2014. № 11. P. 14531–14549.
17. *Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 16. Iss. 4. P. 436–468.
18. *Dyurgerov M.B.* Reanalysis of glacier changes: from the IGY to the IPY, 1960–2008 // МГИ. 2010. Вып. 108. 116 с.
19. *Moran T.A., Marshall S.J., Evans E.C., Sinclair K.E.* Altitudinal gradients of stable isotopes in lee-slope precipitation in the Canadian Rocky Mountains // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2007. V. 39. № 3. P. 455–467.
20. *Popp S., Diekmann B., Meyer H., Siegert C., Syromyatnikov I., Hubberten H.-W.* Palaeoclimate signals as inferred from stable-isotope composition of ground ice in the Verkhoyansk Foreland, Central Yakutia // Permafrost and Periglacial Processes. 2006. № 17. P. 119–132.
21. *Schürch M., Kozel R., Schotterer U., Tripet J.-P.* Observation of isotopes in the water cycle – the Swiss National Network (NISOT) // Environmental Geology. 2003. V. 45. № 1. P. 1–11.
22. *Siegenthaler U., Oeschger H.* Correlation of O-18 in precipitation with temperature and altitude // Nature. 1980. V. 285. P. 314–317.
23. *Takahashi S., Sugiura K., Kameda T., Enomoto H., Kononov Yu., Ananicheva M.D., Kapustin G.* Response of glaciers in the Suntar-Khayata Range, eastern Siberia, to climate change // Annals of Glaciology. 2011. № 52 (58). P. 185–192.
24. *Thompson L.G., Mosley-Thompson E., Davis M.E., Bolzan J.F., Dai J., Yao T., Gundestrup N., Wu X., Klein L., Xie Z.* Holocene-Late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau // Science. 1989. V. 246. № 4929. P. 474–477.
25. *Yamada T., Takahashi Sh., Shiraiwa T., Fujii Y., Kononov Yu., Ananicheva M., Koreisha M., Muravyev Ya., Samborsky T.* Reconnaissance on the No.31 Glacier in the Suntar-Khayata Range, Sakha Republic, Russian Federation // Japanese Society of Snow and Ice. Bulletin of Glaciological Research. 2002. № 19. P. 101–106.
26. *Wang P., Li Z., Luo S., Bai J., Huai B., Wang F., Li H., Wang W., Wang L.* Five decades of changes in the glaciers on the Friendship Peak in the Altai Mountains, China: Changes in area and ice surface elevation // Cold Regions Science and Technology. 2015. V. 116. P. 24–31.