

Первые результаты двух новых проектов глубокого кернового бурения на тропических ледниках

Л.Г.Томпсон¹, В.Н.Михаленко²

¹Университет штата Огайо, США, ²Институт географии РАН

*Статья поступила в редакцию 6 февраля 1998 г.
Представлена главным редактором В.М. Котляковым*

Представлены первые результаты изучения кернов льда с вулкана Сахама в Боливии и ледника Дасуопу в Гималаях.

Феномен Эль-Ниньо — несомненно один из наиболее значительных источников изменчивости современного климата. Эль-Ниньо — это поверхностное теплое тихоокеанское течение сезонного характера, которое возникает у берегов Эквадора с приходом экваториальных циклонов обычно в конце года. Примерно каждые 4 — 7 лет феномен набирает особенно большую силу, и тогда теплые экваториальные воды Тихого океана опускаются на юг до 15 — 17° ю.ш., вытесняя на глубину воды холодного Перуанского течения. При этом на тихоокеанском побережье Южной Америки резко повышается температура воздуха, начинаются обильные дожди, катастрофические наводнения и оползни, холоднолюбивые виды рыб уходят в открытый океан. Эффект Эль-Ниньо оказывает

влияние и на глобальный климат. Потеплевшие воды Мирового океана поставляют в атмосферу гораздо большее количество влаги, что меняет направление ветров и перераспределяет основные пути поступления осадков на континенты. Одновременно смещаются сроки активности Тихоокеанского и Индийского муссонов, на побережье Мексики и юга США приходят ураганы небывалой силы. Эль-Ниньо 1982 — 1983 гг. — самое сильное из наблюдавшихся в XX в., унесло жизни 2 тыс. человек, 600 тыс. остались без крова, а экономический ущерб составил 16 млрд. долларов. Нынешний Эль-Ниньо 1997 — 1998 гг. по всем прогнозам превзойдет предыдущий. Нанесенные им убытки, по данным Британского метеорологического управления, уже достигают 25 млрд. долларов.

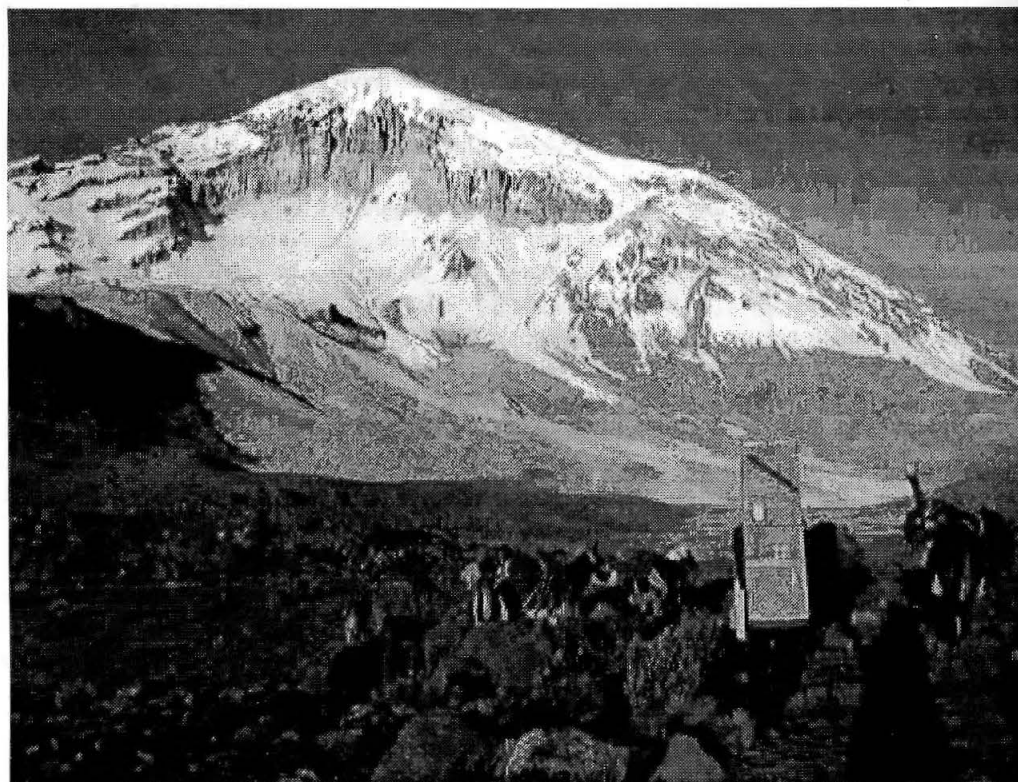


Рис. 1. Вулкан Сахама, 6550 м. Фото Д. Харди
Fig. 1. Sajama volcano, 6550 m. Photograph by D. Hardy

Прогноз будущих климатических колебаний как антропогенного, так и естественного характера напрямую зависит от понимания современных климатических процессов. Надежные метеорологические наблюдения, которые служат основой для климатических реконструкций, довольно ограничены, а для большинства регионов вообще отсутствуют вплоть до 1850 г. Это особенно актуально для тропического пояса Земли, на который приходится 50% всей площади суши и где сосредоточено 80% населения. Заполнить существующий пробел могут данные, получаемые из кернов льда. Впервые реконструкция повторяемости Эль-Ниньо для последних 1500 лет была выполнена на основе материалов, полученных при анализе керна льда с ледниковой шапки Келькайя в южном Перу [3]. Продолжение глубокого кернового бурения на высокогорных ледниках по обе стороны Тихого океана позволит получить новые данные о повторяемости Эль-Ниньо и его влиянии на изменчивость муссонного климата в южной части Азии.

В 1997 г. состоялись две новые гляциологические экспедиции в тропические районы, организованные Университетом штата Огайо из США. Объектом первой из них был вулкан *Сахама (Sajama)* в боливийской части Анд, а второй — ледник *Дасуори (Dasuori)* в массиве Шиша-Пангма (8014 м) в Гималаях.

Вулкан Сахама — высшая точка Боливии — расположен на самом юге тропической зоны Южной Америки в западной части альтиплано вблизи чилийской границы. Альтиплано представляет собой высокогорное плато на высотах 3500 — 4000 м. Несмотря на близость к тихоокеанскому побережью основные влагонесущие потоки приходят с востока, и уже сильно иссушенными. В зоне альтиплано выпадает около 200 мм осадков [2], главным образом во время влажного летнего сезона. Зимой (май — сентябрь) с полупустынной поверхности поднимается большое количество пыли, которая осаждается на поверхности ледников и служит хорошим маркером при выделении годовых слоев в верхней части ледниковой толщи. Данные, полученные на этом леднике, с одной стороны, позволяют заполнить пробел в палеоклиматической информации, собранной ранее на севере на ледниках Келькайя и Уаскаран и на Антарктическом полуострове на юге. С другой стороны, поскольку гора Сахама расположена на границе между влиянием атлантических и тихоокеанских воздушных масс, такие данные приобретают особую важность. Таким образом, информация, заключенная в ледниковой толще Сахама, отражает как глобальные климатические изменения, так и историю Эль-Ниньо.

С 31 мая по 19 июня 1997 г. на вершине Сахама (18° ю.ш.; 69° з.д.) на высоте 6550 м (рис. 1) был выполнен комплекс гляциологических и метеорологических исследований. В экспедиции принимало участие 105 человек из разных организаций США, Франции, России, Швейцарии, Боливии и Перу.

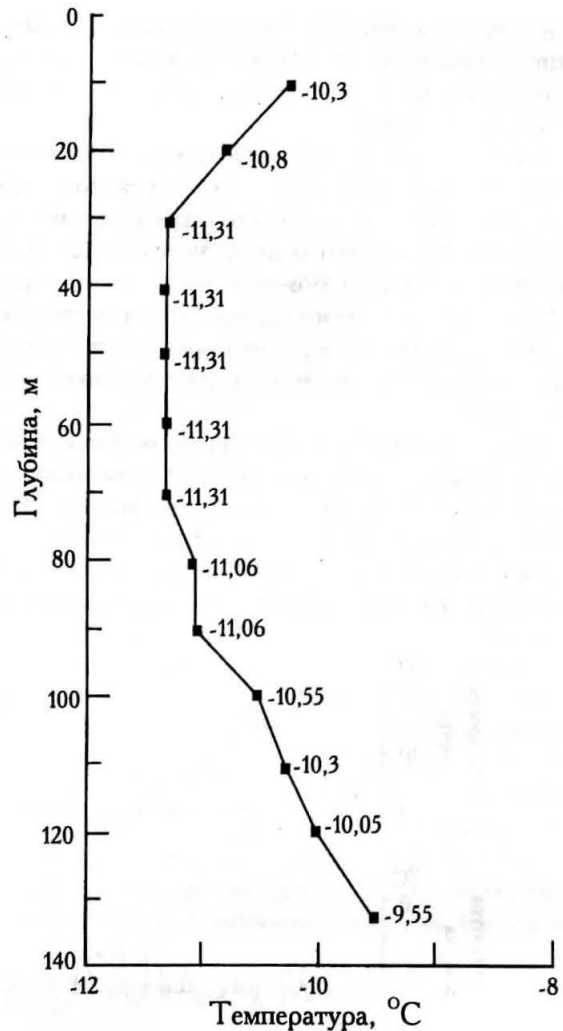


Рис. 2. Температура льда в скважине на вершине вулкана Сахама

Fig. 2. Ice temperature in the borehole on the top of Sajama volcano

Было задействовано 73 носильщика, которые перенесли более 4 тонн различных грузов, включая 308 м ледяного керна.

Бурение производилось электромеханическим буром, сконструированным в PICO (Polar Ice Coring Office). В качестве источника энергии были использованы солнечные батареи, ранее применявшиеся при работах на ледниках Келькайя и Уаскаран. Всего пробурено 4 скважины, две из которых достигли ледяной толщи на глубинах 132,35 и 132,75 м. Кроме керна из этих глубоких скважин было получено два керна льда длиной 40 и 4 м. Все керны в замороженном состоянии были доставлены для лабораторных исследований в Бердовский центр полярных исследований в США. В образцах льда будут определены концентрация и распределение микрочастиц, химический (анионы и катионы), изотопный (^{18}O и ^{2}H) составы, β -активность и содержание ^3H , газовый состав воздушных включений и содержание тяжелых металлов. Поскольку в кернах льда встречаются остатки насекомых и древесной коры, занесенных с альтиплано и

склонов вулкана, они будут использованы при датировании с помощью ^{14}C нижней части толщи, а микроорганизмы, которые послужат объектом биологических исследований.

Толщина льда на вершине вулкана Сахама определена с помощью высокочастотного радиолокатора по трем профилям, проложенным в разных направлениях. Ее величины колеблются от 121 м до максимума — 177 м на юго-восточном склоне вулкана. Это подтвердило более ранние выводы о том, что во время последнего извержения произошел боковой взрыв, поскольку основная кальдера расположена на этом склоне.

По окончании бурения в скважине были измерены температуры льда при помощи термисторов с точностью $0,01^\circ\text{C}$. Их значения колеблются от $-10,3$ на глубине 10 м до $-11,31^\circ\text{C}$ в интервале глубин от 30 до 70 м и повышаются до $-9,55^\circ\text{C}$ на контакте с ложем (рис. 2). Низкие температуры в толще льда обес-

печивают хорошую сохранность климатических сигналов по всей длине ледяного керна.

Для более корректной интерпретации полученных данных в октябре 1996 г. сотрудниками климатологической лаборатории Университета штата Массачусетс, США, вблизи вершины была установлена автоматическая метеорологическая станция. Согласно данным измерений, средняя температура воздуха за период 1 октября 1996 г. — 28 июля 1997 г. составила $-10,4^\circ\text{C}$, с 1 октября 1996 г. по 31 декабря 1996 г. — $-9,2^\circ\text{C}$. За первый из указанных периодов температура воздуха на уровне 450 гПа составила $-10,9^\circ\text{C}$. В 1994 г. средняя годовая температура воздуха на этом уровне была равна $-10,4^\circ\text{C}$, в 1995 г. — $-10,3^\circ\text{C}$, а в 1996 г. — $-11,1^\circ\text{C}$. По данным многолетних наблюдений, средняя температура воздуха на уровне 450 гПа 1985 — 1995 гг. равняется $-10,3^\circ\text{C}$. Эти данные хорошо согласуются с температурой льда в скважине на глубине нулевых ампли-

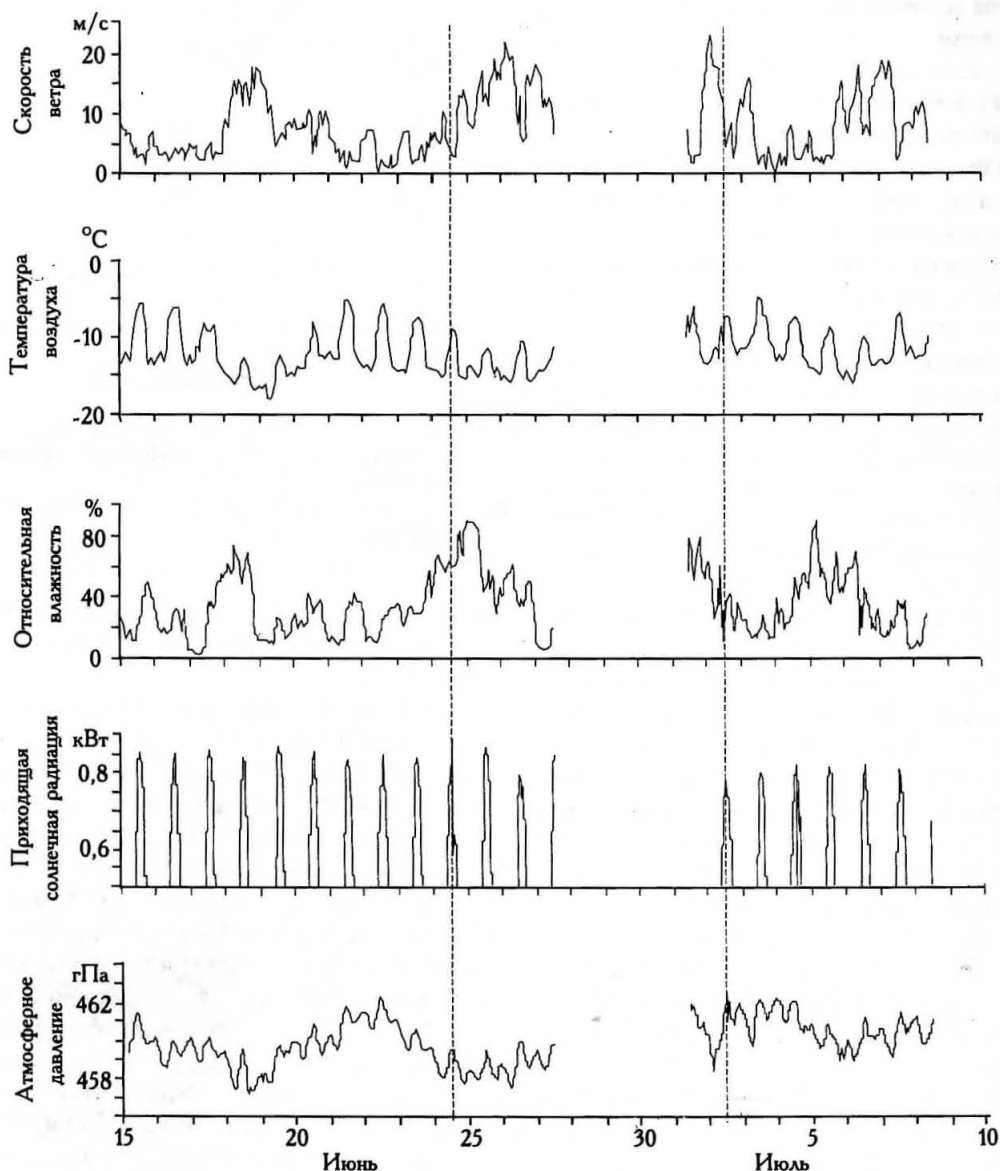


Рис. 3. Метеорологические условия на вершине вулкана Сахама в период проведения буровых работ
 Fig. 3. Meteorological conditions on the top of Sajama volcano during the drilling period

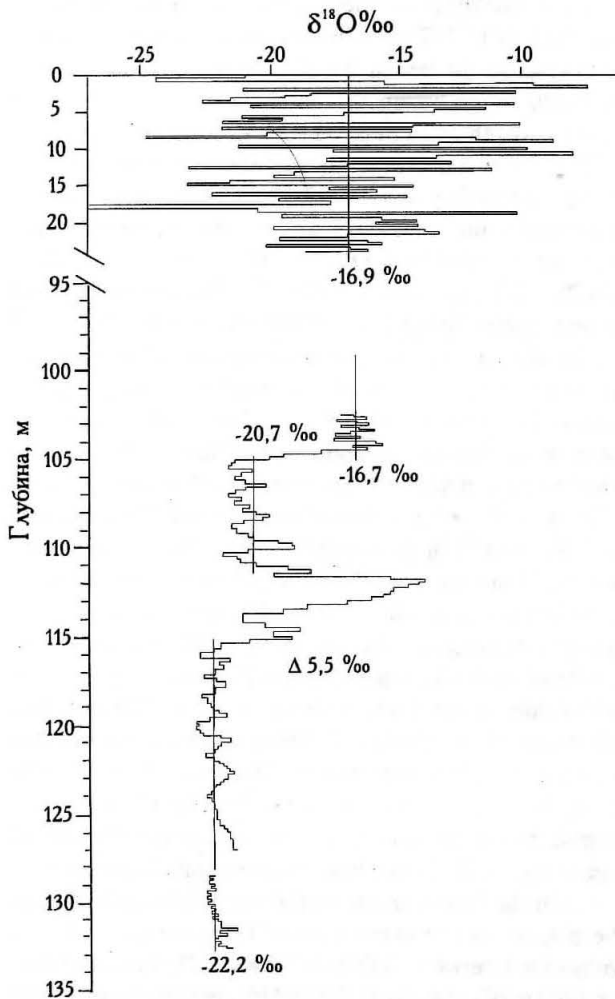


Рис. 4. Изотопно-кислородный профиль керна льда с вулкана Сахама

Fig. 4. Isotope-oxygen profile of ice core from Sajama volcano.

туд (10 м). Метеорологические условия в период проведения буровых работ показаны на рис. 3.

К настоящему времени получены первые результаты исследования керна льда с вулкана Сахама. В приповерхностной части снежно-фирновой толщи до глубины 20 м хорошо видны сезонные колебания $\delta^{18}\text{O}$, достигающие 20‰ (рис. 4). Лед, расположенный на глубинах 99 — 102 м, сформировался в раннеголоценовую стадию примерно 10 тыс. лет назад. Понижение изотопного состава до $-20,7\text{‰}$ в интервале глубин 103 — 111 м мы интерпретируем как похолодание раннего голоцена — молодой дриас, которое, по данным изучения кернов льда из гренландских скважин GISP-2 и GRIP [1], происходило 12 500 лет назад. Это событие представлено в разрезе 7 м, так что мы предполагаем проанализировать его с временным разрешением не менее 5 лет, что впервые будет сделано для тропической области. Предполагается, что столь большая толщина льда, приходящаяся на этот период, связана с увеличением аккумуляции в то время. Более положительные значения $\delta^{18}\text{O}$ в интервале глубин 111 — 115 м отражают стадию потеп-

ления Аллеред-Беллинг. Понижение изотопного состава от 115 м до ложа на глубине 132,75 м свидетельствует о том, что эта толща сформировалась во время последнего ледникового периода. Изотопный сдвиг на границе плейстоцен — голоцен составляет 5,5‰, что сопоставимо со значением 8‰, полученном на леднике Уаскаран в перуанских Андах [4].

Нижние 30 м ледниковой толщи, сформировавшейся во время последнего ледникового периода, представлены в разрезе очень чистым льдом. Это объясняется гораздо более влажными условиями, когда в позднюю стадию ледниковой эпохи поверхность альтиплано была занята двумя палеозерами — Минчин (Minchin) и Таука (Тауса), покрывавшими площадь от 43 до 100 тыс. км².

Ледник Дасуопу расположен на северном склоне г. Шиша-Пангма (8014 м). В августе — октябре 1997 г. на этом леднике состоялась еще одна гляциологическая экспедиция, организованная Бердовским центром полярных исследований Университета штата Огайо, США и Институтом гляциологии и геокриологии АН Китая. Задача экспедиции — глубокое керновое бурение для реконструкции климатических изменений в Центральной Азии и выяснения роли взаимодействия Эль-Ниньо с тихоокеанским и индийским муссонами в глобальном климате Земли. В работе экспедиции участвовало 40 специалистов из США, КНР, России, Непала и Перу. К несчастью, во время исследований трагически погиб Ш. Уайт из США.

Объектом бурения служило плато шириной 1,5 — 2 км в области питания ледника Дасуопу, в интервале высот 7000 — 7200 м. Согласно данным радиолокационных измерений, толщины льда меняются от 300 м в нижней части плато до 165 м в верхней. В конце августа 1996 г. здесь было установлено 10 аккумуляционных реек, которые одновременно служили геодезическими реперами. По данным измерений, в начале сентября 1997 г. аккумуляция снега на поверхности плато составляет около 2 м. В этом районе, находящимся, с одной стороны, под воздействием летнего индийского муссона, а с другой — Тибетского плато, аккумуляция происходит одновременно с абляцией. Все осадки выпадают в июне — августе. В июле — августе 1996 г. за отдельные снегопады выпадало до 0,5 м снега. Несмотря на круглосуточные отрицательные температуры воздуха в районе точки бурения, поверхностное таяние все же происходит из-за высокой солнечной радиации. В снежном шурфе на высоте 7000 м встречаются отдельные ледяные прослои толщиной 1 — 1,5 см. Температура на глубине 3 м составила $-8,5^\circ\text{C}$, а температура воздуха на уровне 2 м от поверхности в конце периода проведения работ (3 октября) в утренние часы была равна -29°C . По характеру строения снежно-фирновой толщи эта часть области питания ледника Дасуопу может быть отнесена к рекристаллизационно-режеляционной (снежно-фирновой) зоне льдообразования.

Всего было получено три керна льда. Первая из скважин, находящаяся на высоте 7000 м, была пройдена до глубины 149 м, две других, на высоте 7200 м, достигли ложа ледника на глубине 167,5 м. При бурении было использовано аналогичное оборудование, как и на вулкане Сахама. Окончательный переход фирна в лед отмечен на глубине 43 м. После завершения проходки скважин в них были измерены температуры. Их значения для фирна на глубине 24 м составили $-14,1^{\circ}\text{C}$, а для льда на контакте с ложем $-13,8^{\circ}\text{C}$.

Обработка керна, полученного на леднике Дасуопу, только началась. Но уже первые визуальные его исследования обнаружили хорошую годовую стратификацию, а столь низкие температуры льда позволяют надеяться на хорошую сохранность изотопных и геохимических профилей.

Финансирование исследований на вулкане Сахама осуществлялось за счет гранта NOAA No. NA-76GP0025.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dansgaard W., Jonsen S.J., Clausen H.B. et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. — *Nature*, v. 364, 1993, p. 218-220.
2. Montes de Oca I. Geografia y clima de Bolivia. — *Bull. Inst. fr. études andines*, v. 24, N. 3, 1995, p. 357-368.
3. Thompson L.G. Reconstructing the paleo ENSO records from tropical and subtropical ice cores. — *Bull. Inst. fr. études andines*, v. 22, N. 1, 1993, p. 65-83.
4. Thompson L.G., Mosley-Thompson E., Davis M.E. et al. — Late glacial stage and holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru. — *Science*, v. 269, 1995, p. 46-50.

SUMMARY

Two expeditions organized by the Ohio University, USA, took place in 1997. The goal of the first of them was Sajama volcano in the Bolivian part of the Andes, of the second one — Dasuopu glacier in the Shisha-Pangma massif in Himalayas.

Ice thickness on the Sajama top (6,550 m) varies from 121 m to 177 m. 4 boreholes were drilled, two of them reached the bed at the depths of 132.35 and 132.75 m. Temperature within the borehole varies from -10.3°C at the depth of 10 m to -11.31°C at the depth interval of 30 — 70 m and rises up to -9.55°C at the contact with the bed. According to the measurement data with the help of automatic meteorological station installed near the top, mean air temperature for the period of October 1, 1996 — July 28, 1997 amounted to -10.4°C . For the same period air temperature at the level of 450 gPa amounted to -10.9°C . By the data of many year observations the mean air temperature at the level of 450 m gPa for the period of 1985 — 1995 equals -10.3°C . The first results of borehole ice core on Sajama volcano showed that in the near-the-surface part of snow — firn thickness down to the depth of 20 m $\delta^{18}\text{O}$ seasonal variations reaching 20‰ are well seen. Ice located at the depths of 99 — 102 m was formed at Early Holocene stage nearly 10 thousand years ago. Ice in the interval of depths of 103 — 111 m where decrease of isotope composition value down to -20.7% is observed is referred to the Younger Dryas (12,500 years ago). Large $\delta^{18}\text{O}$ values in the depth interval of 111 — 115 m reflect the stage of Allerød-Bølling warming. Repeated decrease of isotope composition from the depth of 115 m to the bed (132.75 m) indicates that this thickness was formed during the last glacial period. Isotopic shift at the Pleistocene — Holocene boundary amounted to 5.5‰.

On the Dasuopu glacier drilling points are located at the plateau in the upper part of the nourishment field within the interval of 7,000 — 7,200 m. By the radar data ice thickness varies from 300 m in the lower part of the plateau to 165 m in the upper one. Snow accumulation on the plateau surface amounts to about 2 m. Surface melting occurs due to high solar radiation. In the snow well at the height of 7,000 m individual ice interbeds 1 — 1.5 cm thick are observed. Snow temperature at the depth of 3 m amounted to -8.5°C . This part of nourishment of the Dasuopu glacier is referred to the snow — firn zone of ice formation. Three ice cores were obtained: one from the borehole to the depth of 149 m at the height of 7,000 m and two from boreholes reaching the bed at the depth of 167.5 m at the height of 7,200 m. Firn transition into ice is fixed at the depth of 43 m. Ice temperature at the depth of 24 m amounted to -14.1°C , and at the contact with bed to -13.8°C .