

Российско-германские гляциологические исследования на Северной Земле и прилегающих островах в 2000 г.

Л.М. Саватюгин¹, С.М. Архипов², Н.И. Васильев³, Р.Н. Вострецов³, Д. Фритzsche⁴, Х. Миллер⁴

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт; ²Институт географии РАН;

³Санкт-Петербургский государственный горный университет им. П.В. Плеханова); ⁴Институт Альфреда Вегенера

Статья поступила в редакцию 14 марта 2000 г.

Представлена членом редколлегии А.Ф. Глазовским

Анализируются результаты комплексных исследований снежного покрова на островах Уединения, Ушакова, Комсомолец, а также деятельного слоя и глубинного разреза (504 м) ледника Академии Наук (о. Комсомолец).

Работы экспедиции “Северная Земля — 2000” проводились в рамках долгосрочного международного проекта “Система моря Лаптевых — 2000” в соответствии со Специализированным соглашением о сотрудничестве в полярных и морских исследованиях между Министерством промышленности, науки и технологий Российской Федерации и Федеральным министерством образования, науки, исследований и технологий Германии.

Обязанности участников экспедиции распределились следующим образом: финансирование взял на себя главным образом Институт Альфреда Вегенера (AWI, BRD), а материально-техническое обеспече-

ние, организацию и проведение работ — Государственный научный центр Российской Федерации — Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт. Санкт-Петербургским государственным горным университетом было изготовлено оборудование, выполнены монтаж бурового комплекса, глубокое бурение с полным отбором керна, геофизические исследования в скважине. В изучении деятельного слоя ледников и ледяного керна принял участие сотрудник Института географии РАН.

Исследования 2000 г. — логическое продолжение работ 1999 г., когда была организована база на ледниковом куполе Академии Наук (о. Комсомолец,

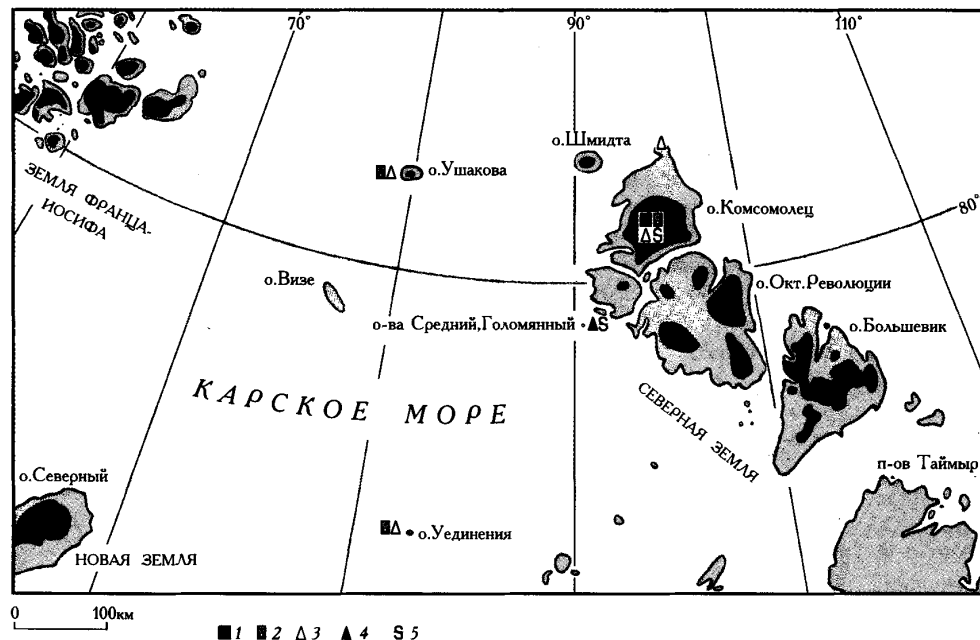


Рис. 1. Карта-схема Карского моря: 1 — ледник Академии Наук, район глубокого бурения 1986/87 и 1999 — 2000 гг.; 2 — шурфы; 3 — автоматические метеостанции; 4 — метеообсерватория на о. Голомянный; 5 — споро-пыльцевые ловушки

Fig. 1. The map of Karskoye Sea: 1 — Akademii Nauk glacier, the drilling sites of 1986/87 and 1999 — 2000; 2 — pits; 3 — automatic weather stations; 4 — the permanent weather station on Golomyannyi Island; 5 — spore-and-pollen traps

Таблица 1

Основные задачи экспедиции и методы их решения в рамках экспедиционных исследований

Научные задачи	Виды и методы исследований
Реконструкция температур воздуха, состава и количества атмосферных осадков, антропогенного загрязнения, условий льдообразования и метаморфизма льда на леднике Академии Наук в голоцене — плейстоцене.	Глубокое электромеханическое бурение скважины на ледниковом куполе с полным отбором керна (включая подледниковые отложения)*. Термо-, инклино- и кавернометрия скважины.
Оценка условий и закономерностей льдообразования в деятельном слое ледникового купола Академии Наук в последние десятилетия.	Механическое керновое бурение скважин глубиной до 15 м; описание стратиграфии керна; термометрия скважин* Радиолокационные исследования.
Оценка температур воздуха, состава и количества атмосферных осадков на ледниковых (ледниковые купола Академии Наук, Ушакова) и неледниковых поверхностях (о-ва Уединения, Голомянный) в 1999 — 2001 гг.	Исследования в шурфах: стратиграфическое описание, измерения плотности*. Установка и обслуживание автоматических метеостанций. Установка спорово-пыльцевых ловушек.

*Во всех скважинах и шурфах был отобран соответственно фирново-ледяной керн (полностью) и образцы снега, фирна и льда. Они хранились при температуре около -10 °С и были доставлены в AWI для комплексного анализа.

архипелаг Северная Земля), установлена автоматическая метеостанция, смонтирован буровой комплекс и забурена основная скважина до глубины примерно 54 м (рис. 1). Основная цель проекта — реконструкция палеоклимата и в целом эволюции природной среды Евразийской Арктики в плейстоцене-голоцене по результатам комплексных исследований ледникового купола Академии Наук (табл. 1).

Глубокое бурение скважины на леднике Академии Наук (80,52° с.ш., 94,8° в.д.), (см. рис. 1) было организовано на основе бурового разборного комплекса КОБРА (рис. 2), предназначенного для бурения скважин глубиной до 1000 м во льду с выходом в подледниковые моренные отложения и полным отбором керна. Комплекс общей массой около 4 т включает: 1) общую монтажную платформу (6 × 3 × 0,54 м) весом 1000 кг с буровым зданием — деревянным каркасом (6 × 3 × 2,6 м), обшитым фанерой; 2) объемную трубчатую буровую вышку высотой 9 м и весом 400 кг, оснащенную оттяжками, стрелой с механической лебедкой для спуска — подъема снаряда и брезентовым чехлом-тентом; 3) лебедку с двигателем мощностью 3,2 кВт и максимальным тяговым усилием 3000 кг, колодочным электрогидравлическим и ручным ленточным тормозами, кабелеукладчиком, приводом равномерной подачи, кабелем длиной 1000 м и диаметром 15,8 мм (общий вес в снаряженном состоянии 1200 кг); 4) трубооборот (весом 200 кг) для обслуживания снаряда и выемки керна; 5) пульт управления.

Бурение велось колонковым электромеханическим снарядом типа КЭСМ-127 (рис. 3) на грузонесущем кабеле (аналогичный буровой снаряд использовался при бурении скважин на станции Восток в Антарктиде). Длина снаряда около 8 м; наружный диаметр коронки и труб колонкового набора соответственно 135 и 127 мм; длина колонковой (керноприемной) трубы 1,5 м, диаметр керна около 105 мм; число оборотов коронки 90 — 220 об/мин, механическая

скорость бурения по льду до 20 м/час, по подледниковым породам до 1,5 м/час; масса 240 кг. Вращение от приводного двигателя через редуктор передается колонковой трубе с закрепленной на ней коронкой. Ледяной шлам, образующийся в процессе бурения, потоком заливочной жидкости (обратная призабойная циркуляция) увлекается в шламоборный отсек, где накапливается в сетчатом фильтре. Заливочная жидкость по центральным отверстиям в валах редуктора и приводного двигателя выбрасывается в затрубное пространство насосом. Коньки распорного устройства, контактируя со стенками скважины, предотвращают проворот верхней части бурового снаряда и кабеля при бурении.

Глубина скважины контролировалась в процессе бурения по счетчику глубин, связанному через систему сельсинов с блоком на мачте. При указанном диаметре бронированного кабеля и желоба блока длина прошедшего через блок кабеля не соответствовала показаниям счетчика и оказалась заниженной (496,55 м) в сравнении с истинной глубиной скважины (504,77 м), определяемой по суммарной длине ледяного керна. Пересчет глубин, измеренных по кабелю, в истинные осложняется тем, что глубина прохода за каждый рейс, как правило, не совпадает с длиной соответствующего керна (рис. 4) по следующим причинам: во-первых, при отрыве снаряда на забое может оставаться “пенек” длиной от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров; во-вторых, происходит захват “пенька” и отколовшихся фрагментов керна, полученного за предыдущий рейс. В целом глубина забоя, как правило, на несколько или десятки сантиметров превышает глубину нижнего конца керна из соответствующего рейса. Поэтому, хотя глубины, измеренные по кабелю D_C и по керну D_I (м), коррелируют вполне удовлетворительно (коэффициент линейной корреляции $r = 1,00$ при $D_C = 0,984D_I + 0,701$) (см. рис. 4), расчетная глубина скважины все равно оказывается за-

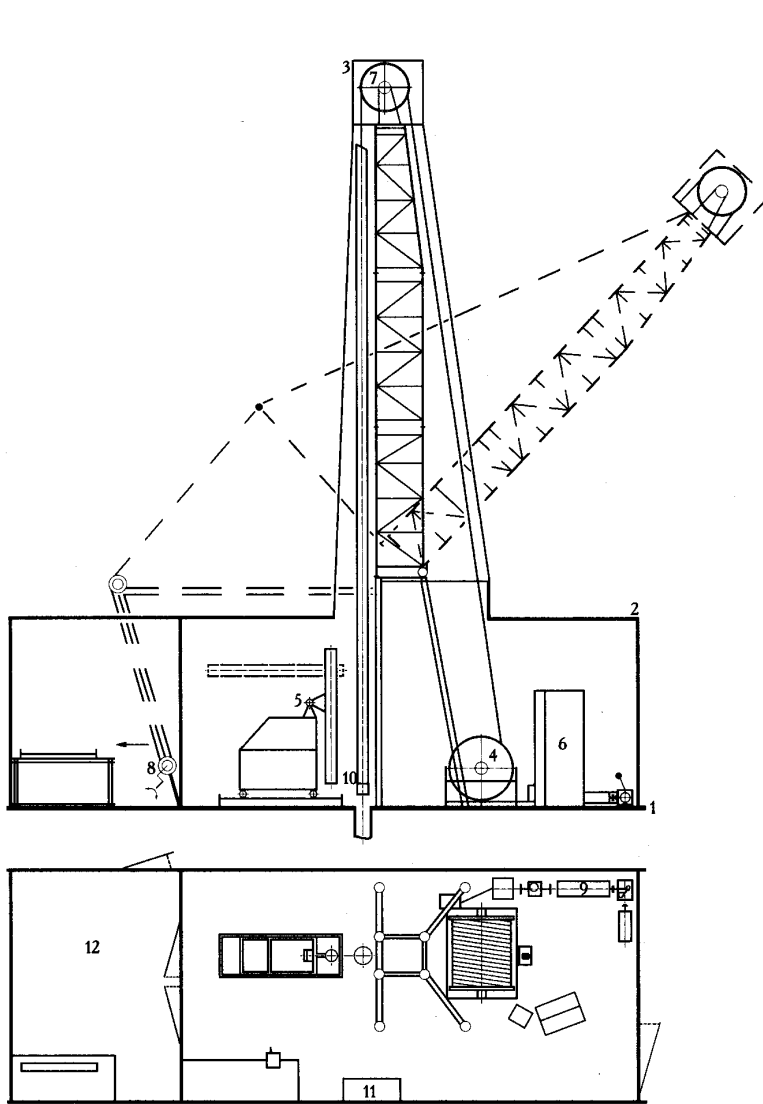


Рис. 2. Схема разборного бурового комплекса КОБРА:
 1 — монтажная платформа (рама основания),
 2 — буровое здание, 3 — вышка, 4 — лебедка,
 5 — трубооборот, 6 — пульт управления, 7 — ролик,
 8 — устройство для подъема и опускания вышки,
 9 — силовой привод лебедки, 10 — электро-
 механический буровой снаряд, 11 — генератор по-
 стоянного тока, 12 — лаборатория обработки керна
 Fig. 2. Dismountable deep drilling complex CODRID:
 1 — mounting platform of the basis, 2 — drill site
 (house), 3 — protective casing, 4 — winch with
 cable, 5 — assembling/disassembling device,
 6 — control desk, 7 — mast with a roller,
 8 — devices for rise of a mast, 9 — drives of a
 winch, 10 — electromechanical ice core drill,
 11 — generator of a direct current, 12 — “cold lab”
 for ice core processing

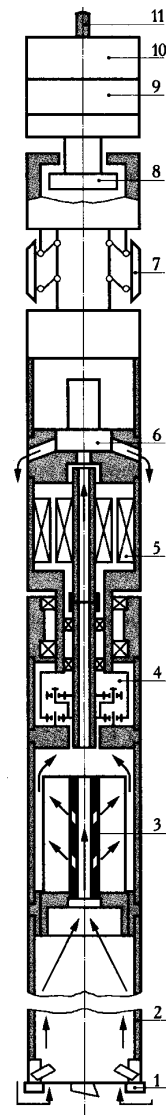


Рис. 3. Электромеханический буровой снаряд
 КЭСМ-127: 1 — буровая коронка, 2 — колонковая труба, 3 — шламо-
 сборный отсек с фильтром для сбора
 шлама, 4 — редуктор, 5 — приводной
 электродвигатель, 6 — насос, создаю-
 щий обратную циркуляцию заливаю-
 щей жидкости, 7 — распорное устрой-
 ство для восприятия реактивного мо-
 мента на невращающейся части снаря-
 да, 8 — ударное устройство, 9 — эле-
 ктроотсек, 10 — кабельный замок,
 11 — грузонесущий кабель
 Fig. 3. Electromechanical ice core drill:
 1 — drill head, 2 — core barrel,
 3 — chips filter, 4 — gear reducer,
 5 — driving electric motor,
 6 — pump, 7 — anti-torque device,
 8 — hammer block, 9 — electric cham-
 ber, 10 — transition bundle (slip ring),
 11 — cable

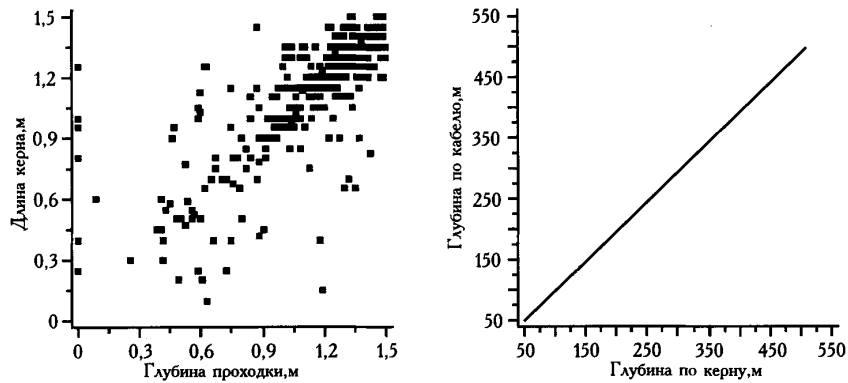


Рис. 4. Основная скважина: зависимости между глубиной проходки и длиной керна, глубиной по керну и по кабелю
 Fig. 4. Main hole: correlation between hole sinking and core depth, depth by core and by cable

ниженной (503,87 м). Дальнейшие уточнения этой зависимости (исключение рейсов, где длина керна существенно меньше проходки, использование аппроксимирующих кривых иного типа и т.п.) позволяет несколько улучшить конечный результат (504,04 м). Далее все глубины, определявшиеся по кабелю, даны в пересчете на истинные.

В целом работы по глубокому электромеханическому бурению 2000 г. можно условно подразделить на четыре этапа (рис. 5):

1. 6 — 14 апреля — расконсервация бурового комплекса, расчистка снежных заносов, подключение к ДЭС, спуск-подъем буровой вышки для замены тента, укрепление растяжек, установка в устье скважины обсадной колонны диаметром 210 мм до глубины около 4 м, сооружение тамбура для обработки керна (3 × 3,5 × 2 м).

2. 15 — 17 апреля — восстановление (разбуривание) ствола скважины 1999 г. (0 — 55 м): инфильтрация талых вод и жидких осадков в период абляции 1999 г. привела к образованию натечного льда на

стенках скважины практически по всей ее глубине и особенно в интервале 4 — 15 м. В частности, на глубине около 5 м образовалась почти сплошная пробка-кольцо натечного льда толщиной около 1 м, а на забое (примерно 54–55 м) толщиной несколько десятков сантиметров с явными включениями ржавчины (рис. 6).

3. 18 — 22 апреля (55 — 120 м) — доработка технологии бурения и оборудования (переход на круглосуточное двухсменное бурение 18 — 19 апреля, ремонт сорванного ветром чехла на буровой вышке 20 апреля, переход на бурение с незамерзающей заливочной жидкостью 20 — 21 апреля и т.п.). При заливке в скважину нескольких бочек незамерзающей жидкости с помощью 8-метрового шланга обнаружилось, что высота столба жидкости на забое (≈ 108.5 м) не превышает 0,5 м, т.е. вся жидкость, сливаясь по стенкам скважины, уходит в фирновую толщу. При использовании в последствии шланга длиной 30 м потери заливочной жидкости прекратились. Среднесуточная проходка за 18 — 22 апреля составила 13,0 м (см. рис. 5).

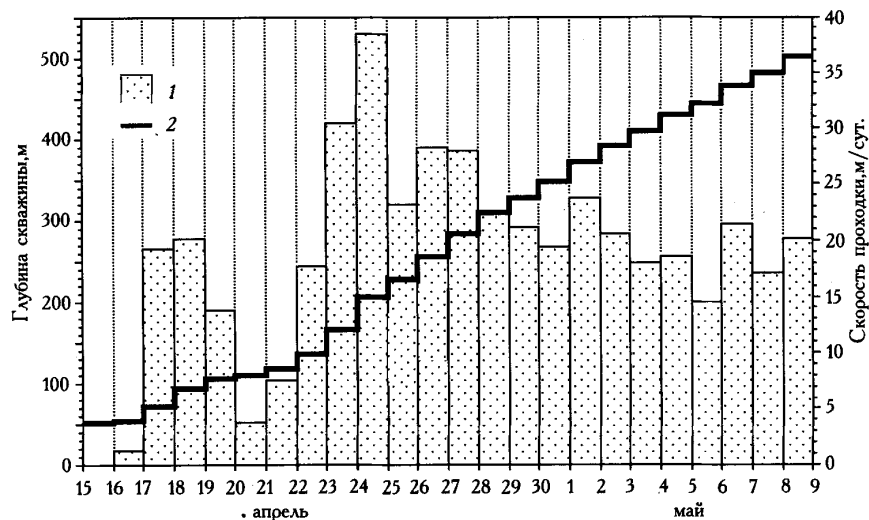


Рис. 5. Скорость проходки за сутки (1) и глубина основной скважины (2) (верхние 54 м пробурены в 1999 г.)
 Fig. 5. Sinking rate (1) and depth of main bore hole (2) (upper 54 m were drilled in 1999)

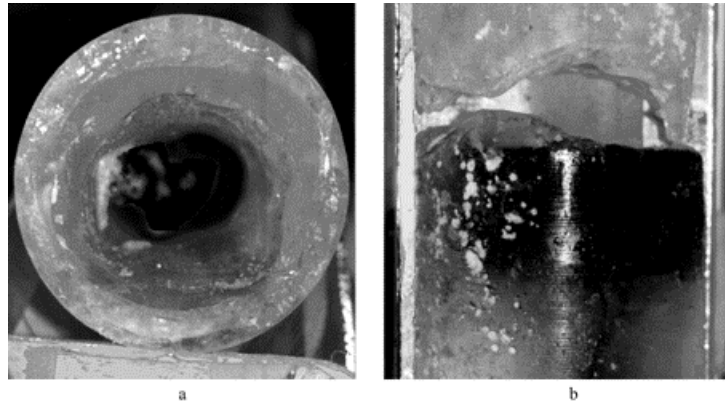


Рис. 6. Основная скважина: керны натечного льда с глубин около 5 м (а) и 54 — 55 м (б) со следами ржавчины
 Fig. 6. Main bore hole: of ice from leashed-in water cores (a — depth about 5 m; б — 54 — 55 m), with rust

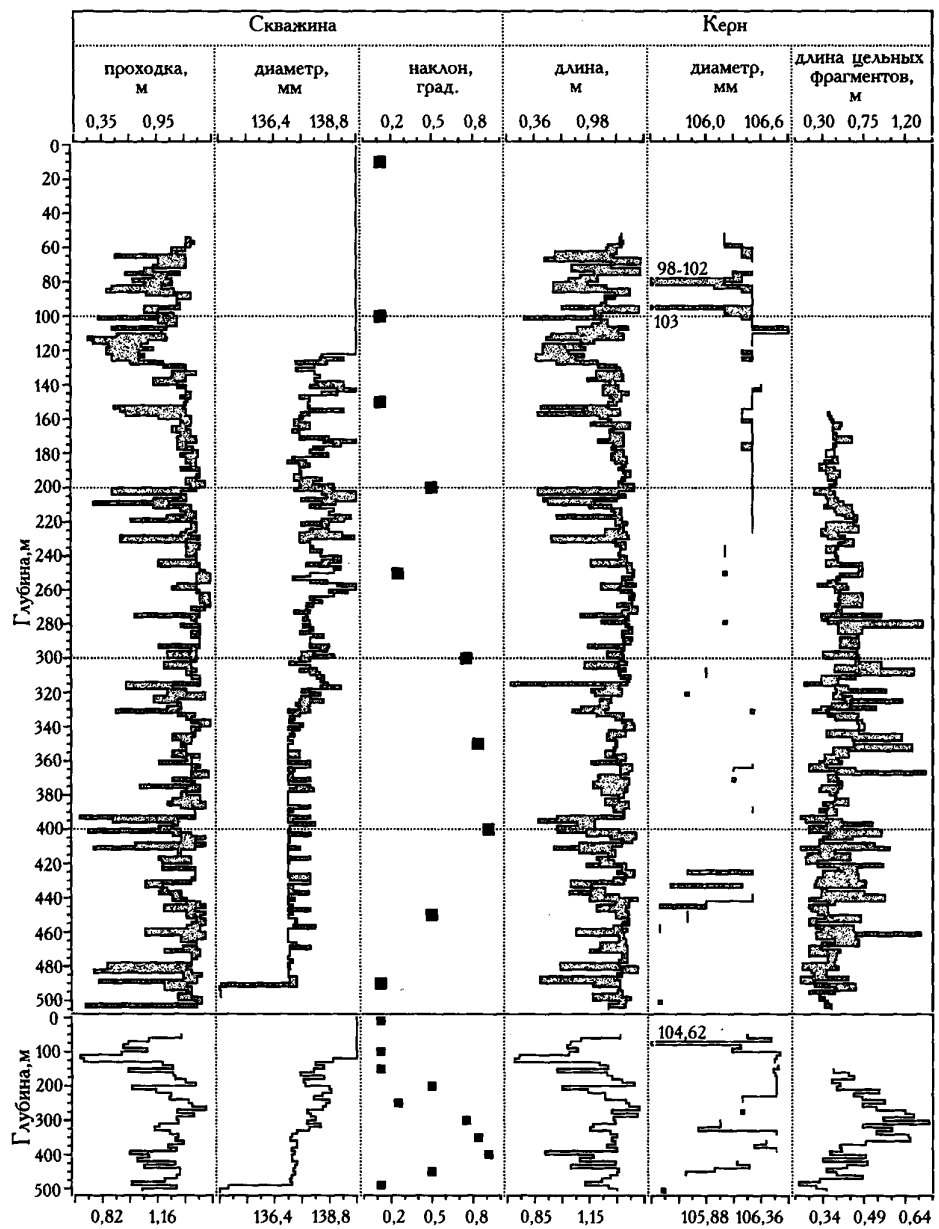


Рис. 7. Параметры основной скважины и керна
 Fig. 7. Parameters of main hole and ice core

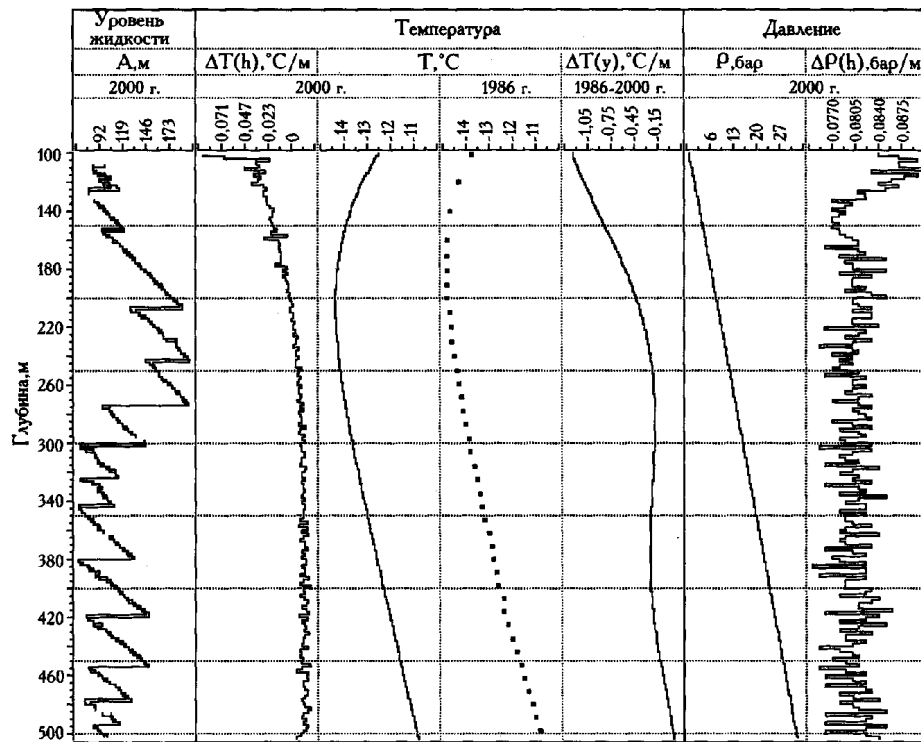


Рис. 8. Основная скважина: уровень жидкости A , температура T и давление P в интервале глубин 100 — 500 м ($\Delta P(h)$ и $\Delta T(h)$ — градиент температуры и давления по глубине); $\Delta T(y)$ — разница температур по скважинам 1986 и 2000 гг.
 Fig. 8. Main bore hole: liquid level A , temperature T and pressure P in depth interval 100 — 500 m ($\Delta P(h)$ and $\Delta T(h)$ — temperature and pressure gradient with depth); $\Delta T(y)$ — difference in temperature measured in bore holes 1986 and 2000)

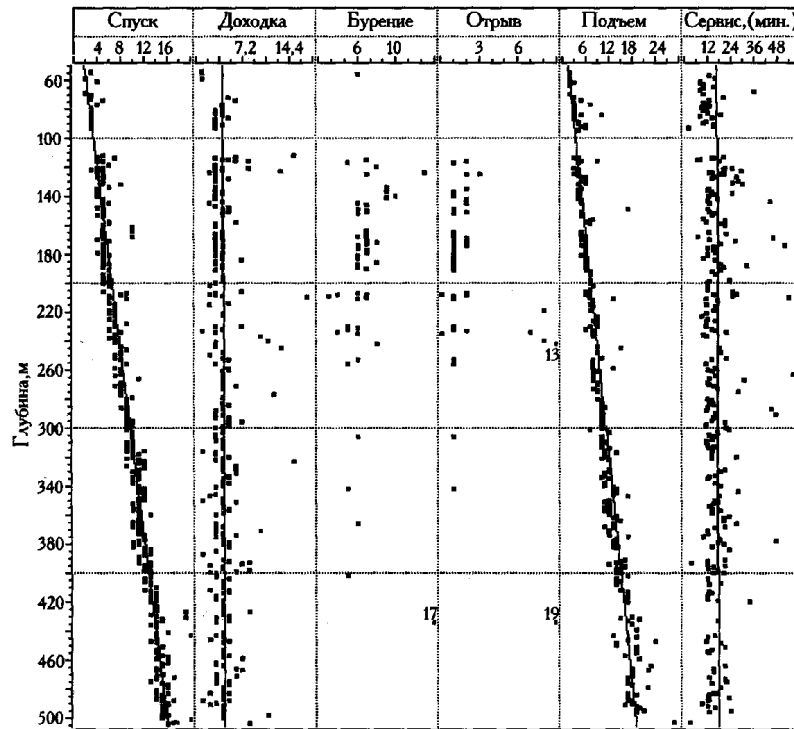


Рис. 9. Основная скважина: продолжительность отдельных операций, мин. (по рейсам)
 Fig. 9. Main bore hole: duration of separate operations (by runs) (in minutes)

Рейсовая проходка при бурении в этом интервале колебалась от рейса к рейсу и уменьшалась с глубиной (особенно в интервале 100 — 120 м). При этом процесс резания протекал стабильно, изменений момента на коронке практически не наблюдалось, фильтры были полностью заполнены шламом, количество которого, однако, превышало объем разбуренного льда. Возможная причина — срезание слоя льда со стенок скважины при спускоподъемных операциях торцом верхнего шламособорника. После изменения конструкции шламособорника (края трубы были загнуты внутрь) рейсовая проходка увеличилась и стабилизировалась, диаметр скважины несколько уменьшился (рис. 7).

4. 22 апреля — 9 мая. Бурение в интервале 120 — 505 м. Среднесуточная проходка 22,6 м. Относительно небольшие нерегулярные вариации проходки связаны с наличием или отсутствием в течение суток технологического перерыва на заливку незамерзающей жидкости (рис. 8) и незначительными техническими неполадками (поломки электродвигателя насоса, нарушение изоляции токоведущих проводов и т.п.). Постепенное несущественное снижение среднесуточной проходки с глубиной (рис. 5) связано с увеличением продолжительности спуска-подъема снаряда (рис. 9,10). Вместе с тем следует

отметить, что на этих глубинах наблюдались нарушения режимов бурения: периодически резко повышался момент на коронке, вплоть до ее заклинивания, изменялся шаг винтовых рисок, которые оставляют резцы на керне. Все это свидетельствовало о неравномерности подачи бурового снаряда при бурении. Возможные причины (при равномерном стравливании кабеля с лебедки) — увеличение трения между коньками распорного устройства и льдом, а также трение грузонесущего кабеля о стенки скважины. Первоначально было уменьшено давление коньков распорного устройства на стенки скважины (глубина 330 м, рис. 7). Это помогло, но ненадолго. Затем, резцы коронки были заточены таким образом, чтобы на нижней грани образовалась опорная площадка, ограничивающая внедрение в лед. Полностью процесс резания льда стабилизировался, начиная с глубины 440 м, когда на коронках дополнительно были установлены ограничители внедрения резцов. Скорость бурения при этом не превышала 20 м/час.

Всего в скважину (включая консервацию, при которой уровень жидкости был повышен до 107 м) закачано около 13,5 м³ (70 бочек) незамерзающей заливочной жидкости (рис 8). Выполнено 386 рейсов с отбором керна (см. рис.7), регулярно производилось

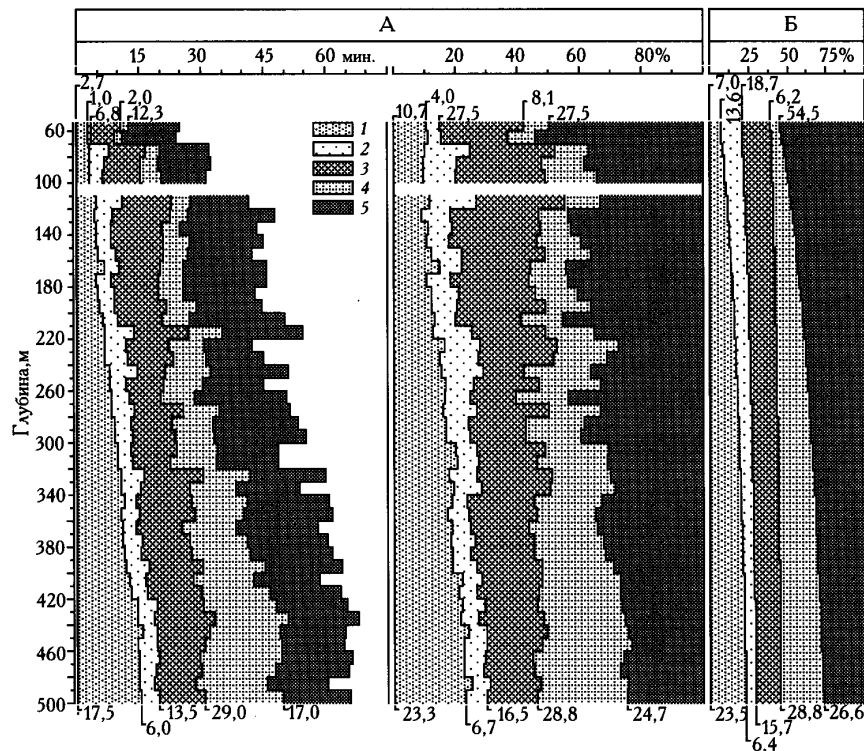


Рис. 10. Основная скважина: продолжительность отдельных операций (средние значения для десятиметровых интервалов) А — фактические, Б — рассчитанные по аппроксимирующим кривым (1 — спуск снаряда, 2 — доходка, 3 — бурение и отрыв, 4 — подъем, 5 — техническое обслуживание между рейсами)

Fig. 10. Main bore hole: duration of separate operations (mean values for 10-meter depth intervals); А — measured values, Б — calculated by approximating curves (1 — the drill going down, 2 — reach, 3 — drilling (cutting) and break off (the break), 4 — to go up, 5 — the drill service

разбуривание специальной коронкой пройденных интервалов в призабойной зоне скважины. Средняя скорость бурения в период с 17 апреля по 9 мая составила 19,6 м/сут; средняя проходка за рейс — 1,17 м; максимальная глубина скважины — 504,77 м.

Как отмечалось, бурение было прекращено в связи с повышением температуры воздуха на о. Средний (где находится аэродром) до $-5 - 0^{\circ}\text{C}$, что не обеспечивало требуемых условий хранения керн (не выше -10°C).

Детальный анализ отдельных операций (см. рис. 9 и 10) свидетельствует о том, что продолжительность спуска и подъема снаряда закономерно увеличивается с глубиной от 6 — 7 (50 м) до 24 — 28 минут (500 м). Продолжительность других операций (доходка, собственно бурение, отрыв снаряда, его обслуживание на поверхности) относительно постоянна или незначительно уменьшается с глубиной (в данном случае, в отличие от суточной проходки, не учитывались

мелкие поломки и другие причины увеличения продолжительности обслуживания снаряда). Наибольшие затраты времени (до 50% на глубинах 50 — 60 м) (рис. 11) приходится на обслуживание снаряда и возрастают при использовании заливочной жидкости. Вероятно, оптимизация технологического цикла именно на этом этапе — наиболее перспективный путь повышения скорости бурения в целом.

Параметры керн (см. рис. 7). Средний диаметр керн составил около 106 мм и был относительно стабилен (по крайней мере на глубинах более 100 — 120 м). Длина керн варьирует в пределах от 15 — 20 см до 1,4 — 1,48 м (рис. 7) и при бурении с использованием заливочной жидкости более стабильна (в интервале глубин 50 — 120 м она закономерно уменьшалась). Качество керн вполне удовлетворительно: средняя длина цельных фрагментов составила не менее 0,3 — 0,4 м, а в интервале глубин 280 — 380 м — около 0,5 м; суммарная длина раз-

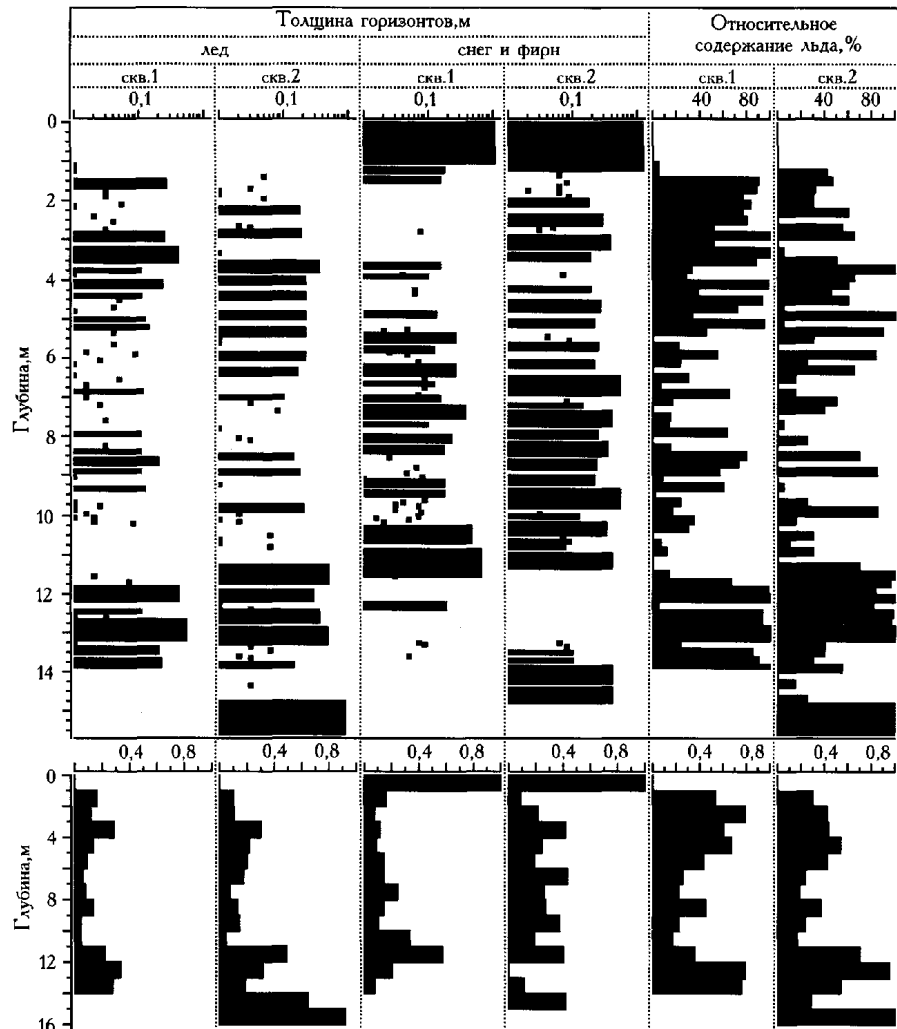


Рис. 11. Стратиграфия деятельного слоя ледника Академии Наук (о. Комсомолец)
 Fig. 11. The active layer of Akademii Nauk glacier (Komsomoletz Island): layer thickness, mm and ice concentration, %

дробленных участков керна, создающих немалые сложности при его последующем комплексном анализе, не превышает 5 — 10% общей длины керна. В интервале глубин 380 — 500 м прочностные характеристики керна постепенно ухудшаются, что проявляется в самопроизвольном его разрушении на отдельные фрагменты, как правило, по косым плоскостям.

До начала бурения с незамерзающей заливочной жидкостью было отобрано также 49 интегральных проб шлама на изотопно-геохимический анализ. Керн разделялся (при отсутствии сколов) на метровые фрагменты и укладывался в полиэтиленовых пакетах в пенопластовые ящики-термобоксы. В качестве уплотнителя использовали снег. Для дальнейшего анализа отобран, упакован и вывезен в АВИ весь добытый в 2000 г. керн из глубокой скважины (450 м). Непосредственно на леднике термобоксы с керном складировались в кернохранилище глубиной до 2 м. Для сохранности керна при транспортировке дополнительно использовано около 300 кг сухого льда, доставленного самолетом на о. Средний и распределенного внутри термобоксов. Там же были размещены электронные термометры-самописцы, записи которых свидетельствуют о том, что за весь период транспортировки керна (до помещения в холодильники АВИ 31 мая 2000 г.) температура керна не превышала -10°C .

Измерения диаметра и наклона основной скважины. Измерения диаметра скважины проводились 10 — 11 мая специальным снарядом, позволяющим измерять диаметр скважины до 140 мм с точностью $\pm 0,2$ мм и чувствительностью 0,05 мм (рис. 8). Измерения угла и азимута отклонения оси скважины от вертикали производились инклинометром типа КИТ. Диапазон измерения угла наклона 0 — 50° , погрешность $\pm 0,5^{\circ}$. Диапазон и основная погрешность измерения азимута: 0 — $360^{\circ} \pm 10^{\circ}$ (при углах наклона менее 3°). Результаты инклинометрии, выполненной 9 мая с остановками через 50 м (потоечно), свидетельствуют о практически вертикальном положении ствола скважины (см. рис. 7): углы наклона не превышают $55'$ (на глубине 400 м). Значения азимута при таких углах наклона могут быть любыми и измерения его не производятся.

В целом следует отметить вполне удовлетворительную работу бурового снаряда (механическая скорость бурения и рейсовая проходка близки к расчетным) и лебедки (средняя скорость спуско-подъемных операций на глубине 500 м составила около 1600 м/час).

Измерения температуры и давления в основной скважине проводились 10 мая (через 16 — 20 часов после завершения бурения) манометром-термометром ДМТ-01: диапазон измерения давления (P) 0 — 250 бар, приведенная погрешность 0,2%, разрешение 0,02 бар; диапазон измерения температуры (T) от -25 до $+40^{\circ}\text{C}$, абсолютная погрешность не хуже $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, разрешение $0,01^{\circ}\text{C}$ (градуировка и метрологическая поверка выполнены в марте 2000 г. во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева). Манометр-термометр работает в комплекте с

персональным компьютером типа RoverBook, измерения и регистрация данных выполняются непрерывно в автоматическом режиме специальной программой в среде Windows. Результаты измерений записываются в базу данных во временном масштабе через каждые 2,2 с. В процессе измерений с клавиатуры компьютера в программу вводятся значения глубин по счетчику (через 25 м), которые автоматически учитываются при привязке результатов измерений к глубине. Скорость спуска-подъема прибора поддерживалась в пределах 200 — 250 м/час. Результаты измерений P и T (рис. 8) отнесены к расчетным значениям глубин по керну (см. выше). Поскольку манометр-термометр предназначен для измерений в жидких средах, результаты измерений в воздухе в интервале глубин 0 — 100 м (в незаполненной жидкостью части скважины) носят сугубо оценочный характер и далее рассматривались в самом общем виде. Объем базы данных измерений P и T составил 5018 точек. На графике (рис. 8) приведены осредненные значения P и T с шагом 2 м по глубине; выбирались точки, глубина которых наиболее близка к целым значениям, (например, 101, 103, ..., 504 м). Градиенты P и T по глубине ($\Delta P(h)$ и $\Delta T(h)$, бар/м и град/м, соответственно) рассчитывались как разность значений параметра в ниже- и вышележащей точках измерений.

Уровень заливочной жидкости в скважине в период измерений находился на глубине 101 м. До глубины 55 — 60 м температура практически не изменяется и скорее всего отражает температуру воздуха на поверхности (около $-10,5^{\circ}\text{C}$), затем до глубины 101 м плавно понижается до $-10,8^{\circ}\text{C}$. Давление от поверхности до глубины 101 м медленно увеличивается (от $-0,32$ до $-0,28$ бар), что отражает увеличение барометрического давления воздуха с уменьшением высоты, при этом его флуктуации не превышают $\pm 0,03$ бар.

При входе в жидкость, заполняющую скважину, температура резко снижается до -12°C , а давление повышается (см. рис. 8). При дальнейшем спуске снаряда давление возрастает практически линейно при $\Delta P(h) = 0,074 — 0,086$ бар/м (по крайней мере с глубины около 125 м) и соответствует распределению гидростатического давления заливочной жидкости по глубине. Нерегулярные вариации $\Delta P(h)$ в указанных пределах сопоставимы с разрешающей способностью методики измерения давления.

В верхней части интервала глубин 101 — 504 м температура льда монотонно уменьшается, достигая минимальных значений ($-14,4^{\circ}\text{C}$) на глубине 206,9 м, затем постепенно увеличивается и в области забоя достигает $-10,83^{\circ}\text{C}$. Градиент температур минимален на контакте воздух/керосин ($\Delta T(h) = -0,080 \pm 0,012$ град/м в интервале глубин 100 — 104 м), далее плавно возрастает от $-0,033 \pm 0,014$ град/м на глубинах 105 — 115 м до $\Delta T(h)$ около 0 град/м в районе 200 — 210 м и до $0,014 \pm 0,004$ град/м на глубинах 495 — 505 м. Линейная интерполяция нижней части температурной кривой 2000 г. позволяет ожидать на глубинах около 750 м (предположительная

Таблица 2

Механическое керновое бурение деятельного слоя ледника Академии Наук

Номер скважины	Сроки бурения	Тип бурения	Глубина, м	Местоположение (относительно основной скважины)
1	11-12.IV	мотобур	13,83	100 м к В-ЮВ
2	29.IV-02.V	ручное	15,64	350 м к В-ЮВ
3	11-12.V	мотобур		350 м к С-СВ

толщина ледника в точке бурения) температуры около -5°C .

В целом результаты термометрии следует рассматривать как предварительные, поскольку время выстаивания скважины после окончания буровых работ и последней заливки керосина составило всего несколько часов. В следующий сезон планируется сделать повторную термометрию в скважине до начала буровых работ.

Сопоставление полученных данных с результатами термометрии в скважине, пробуренной на леднике Академии Наук в 1986 г. ($80,5^{\circ}$ с.ш.; $94,83^{\circ}$ в.д.), показало сходство полученных температурных кривых (на рис. 8 представлен обобщенный профиль температур 1986 г., объединяющий результаты нескольких наиболее представительных серий точечных измерений, выполненных с 30 июля по 5 сентября с интервалом по глубине, как правило, ≥ 10 м) (устное сообщение В.С. Загороднова).

Кривые распределения температур, измеренных в 1986 и 2000 гг., аппроксимируются полиномами пятой степени с достоверностью аппроксимации $>0,99$, и для их обобщенного сопоставления использовались разности температур, рассчитанных по полиномиальным кривым с интервалом по глубине 2 м ($\Delta T(y)$, $^{\circ}\text{C}$) (см. рис. 8). Наибольшие различия ($\Delta T(y) \approx -1,2^{\circ}\text{C}$) наблюдаются на глубинах 100 — 115 м. Далее значения $\Delta T(y)$ закономерно уменьшаются (по абсолютной величине) до $\Delta T(y) \approx -0,2^{\circ}\text{C}$ на глубинах 240 — 260 м, относительно постоянны до глубин 380 — 400 м и снова увеличиваются, причем с переменной знака, до $\Delta T(y) \approx 0,05^{\circ}\text{C}$ на глубине 500 м. Иначе говоря, верхняя часть разреза 1986 г. заметно холоднее, нижняя — несколько теплее, а область перегиба температурной кривой 1986 г. залегает несколько выше (175 — 180 м), чем в 2000 г. (205 — 210 м). Наиболее вероятные причины этих различий — пространственные вариации температурного поля в области аккумуляции ледника Академии Наук и/или продолжающееся

отепление верхних горизонтов ледника (которое, собственно, и привело к образованию точек перегиба на температурных кривых).

Механическое керновое бурение деятельного слоя ледника Академии Наук проводилось параллельно с электромеханическим керновым бурением основной скважины (табл. 2). Керн из этих скважин также был упакован и отправлен в AWI для последующего анализа. Особый интерес представляют в перспективе данные по геохимии керна из скважины 3, пробуренной в пределах полигона, на поверхности которого в 1999 г. была рассыпана соль NaCl и разлита минеральная вода с высоким содержанием Ca, Mg. По скважинам 1 и 2 было выполнено стратиграфическое описание керна (см. рис. 11).

Сравнительный анализ стратиграфических параметров по скважинам 1 и 2, удаленным друг от друга не менее чем на 200 м, свидетельствует об относительном постоянстве основных стратиграфических характеристик деятельного слоя ледника Академии Наук в районе бурения: по обоим скважинам хорошо прослеживаются максимумы относительного содержания льда на глубинах 2 — 6, 8 — 9 и более 11 м и наиболее толстые ледяные прослои (на глубинах 3 — 4, 11 — 13 и, возможно, более 15 м). Иначе говоря, в условиях холодной фирновой зоны имеет место вполне удовлетворительная репрезентативность единичного разреза, по крайней мере в отношении рассматриваемых стратиграфических параметров.

В скважине 1 также были организованы режимные термометрические наблюдения.

В районе бурения выполнена серия радиолокационных профилей (протяженностью до 5 км) по изучению верхних горизонтов ледника Академии Наук (до глубины 30 — 35 м).

Палинологические исследования. В соответствии с методикой Pollen Monitoring Programme установлены две спорово-пыльцевые ловушки с объемом пы-

Таблица 3

Установка спорово-пыльцевых ловушек

Острова	Характер поверхности	Дата установки	Координаты		Высота над ур. моря, м
			с.ш.	в.д.	
Комсомолец*	ледник Академии Наук	08.V.2000	$80,52^{\circ}$	$94,81^{\circ}$	
Голомянный	грунт	14.V.2000	$79,55^{\circ}$	$90,62^{\circ}$	< 50

*Приблизительно в 350 м к востоку юго-востоку от основной скважины.

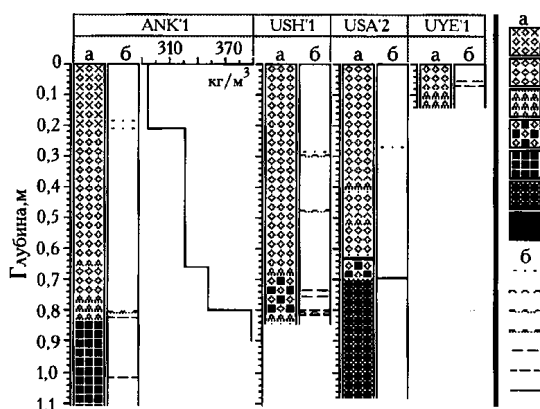


Рис. 12. Стратиграфия снежно-фирнового покрова островов Карского моря (шурфы: ANK — ледник Академии Наук на о. Комсомолец, USH — ледник Ушакова на о. Ушакова, UYE — о. Уединения; 1 — свежеложенный снег, 2 — лежалый снег, 3 — глубинная изморозь, 4 — фирнизированный снег, 5 — фирн, 6 — льдистый (5 — 35%) фирн, 7 — лед (а); 8 — радиационно-ветровые и ветровые корки толщиной ≤ 2 мм; 9, 10 — горизонты глубинной изморози толщиной соответственно 5 — 8 и 9 — 15 мм; 11 — фирново-ледяные корки толщиной 7 — 9 мм; 12, 13 и 14 — ледяные корки толщиной соответственно 2 — 4, 5 — 8 и 9 — 14 мм (б)

Fig. 12. Islands of Karskoye Sea: stratigraphy of snow-firn cover (pits: ANK — Akademii Nauk glacier on Komsomoletz island, USH — Ushakova glacier on Ushakova island, UYE — Uyedineniya island; 1 — newly-deposited snow/ snow; 2 — snow; 3 — depth hoar; 4 — firnified snow; 5 — firn; 6 — ice-contained (5 — 35%) firn; 7 — ice (a); 8 — sun (radiation)/ wind and wind crusts by thickness of ≤ 2 mm; 9, 10 — depth hoar horizons by thickness of 5 — 8 and 9 — 14 mm; 11 — firn-ice crusts by thickness of 7 — 9 mm; 12, 13, 14 — ice crusts by thickness of 2 — 4, 5 — 8 and 9 — 14 mm (b)

лесборника 5 л и диаметром приемного отверстия 0,05 м (табл. 3).

8 мая на леднике Академии Наук вблизи шурфа ANK'1 с глубины 0,80 — 1,10 м (верхние горизонты годового слоя 1998/99 балансового года) отобран интегральный образец фирна весом около 40 кг для спорово-пыльцевого анализа.

Исследования снежно-фирнового покрова в шурфах. За период работ сделано 4 шурфа на разных островах Карского моря (табл. 4, рис. 12).

Рассматриваемые шурфы отобраны не только в разных местах, характер подстилающей поверхности также был различен. Так, шурфы ANK'1 и USH'2 расположены в области аккумуляции и вскрывают только приповерхностные горизонты фирново-ледяной толщи, USH'1 — в области абляции (ниже 0,85 м начинается монолитный лед), UYE'1 — непосредственно на грунте. Тем не менее очевидно сходство их стратиграфического строения, т.е. наличие трех основных пачек слоев, сформировавшихся в 1999/2000 балансовом году: 1) свежеложенный снег и частично переотложенный уплотненный метелевый снег (годовой слой 1999/2000 г. в основном представлен именно последним, исключение — UYE'1); 2) хорошо выраженная глубинная изморозь толщиной от 0,01 — 0,03 до 0,15 — 0,20 м (исключение — USH'2); 3) фирнизированный снег с ледяными корками (прослоями) толщиной от первых миллиметров до первых сантиметров, также частично переработанный процессами сублимационного диафореза.

Именно последний горизонт создает некоторые сложности с однозначным определением границы раздела между 1998/99 и 1999/2000 балансовыми годами, так как формируется в весенне-осенний период за счет снегопадов, перемежающихся оттепелями, поверхностным таянием и выпадением жидких осадков разной интенсивности. При этом логично предположить, что шурфы UYE'1 и USH'1, расположенные практически на уровне моря, сложены исключительно снегом 1999/2000 балансового года. Для шурфа ANK'1 годовая граница проведена по фирново-ледяной корке (так называемый Firnspegel), формирующейся, как правило, на поверхности абляции и залегавшей в момент шурфования на глубине 0,800 — 0,808 м. Иначе говоря, осенне-зимняя аккумуляция 1999/2000 балансового года на леднике Академии Наук составила (в районе бурения) 256 кг/м².

На вершине ледникового купола Ушакова (USH'2) аналогичная годовая граница располагалась, по нашим оценкам, в интервале глубин 0,62 — 0,68 м, и осенне-зимняя аккумуляция 1999/2000 балансового года составила $0,205 \pm 0,010$ кг/м², а в нижней части языка (первые десятки метров от края ледника, USH'1) — около 280 кг/м². Впрочем, репрезентативность этой точки наблюдений более чем проблематична, поскольку она расположена в хорошо выра-

Таблица 4

Исследования снежно-фирнового покрова в шурфах

Острова	Ледники	Номер шурфа	Дата	Координаты		Высота над ур. моря, м	Глубина, м		Количество образцов
				с.ш.	в.д.		шурфа	отбора проб	
Комсомолец	Академии Наук	ANK'1	16.IV	80,52°	94,80°		1,30	1,10	26
		USH'1	22.IV	80,76°	78,90°	< 50	0,85	0,85	18
Ушакова	Ушакова	USH'2	22.IV	80,84°	78,55°	≈320	1,10	0,74	19
		UYE'1	22.IV	77,52°	82,22°	< 50	0,14	0,14	6
Уединения	неледниковая поверхность								

* По вертолетному высотомеру.

Таблица 5

Установка автоматических метеостанций

Острова	Характер поверхности	Дата установки	Координаты		Высота над ур. моря, м
			с.ш.	в.д.	
Комсомолец	грунт (мыс Арктический*)	06.IV.2000 г.	81,17°	96,06°	10
	ледник Академии Наук	V.1999 г.	80,52°	94,96°	
Ушакова	грунт	22.IV.2000 г.	80,76°	78,90°	< 50
Уединения	грунт	22.IV.2000 г.	77,52°	82,22°	< 50

* В 150 м к западу от маяка.

женной ложбине. Нерепрезентативным (применительно к оценке количества осадков, выпадающих в осенне-зимний период) представляется и шурф UYE'1, расположенный на идеально плоской поверхности вблизи обрыва (снег просто сдувается).

Сопоставление шурфов USH'1, USH'2 и ANK'1 свидетельствует о том, что общая толщина горизонта фирнизированного снега и степень его переработки инфильтрационно-конжеляционными процессами явно уменьшается по мере увеличения абсолютных высот, на которых закладывались шурфы. Этот горизонт хорошо выражен и в шурфе UYE'1.

Представляется весьма нетривиальным и сам факт существования области фирнового питания на леднике Ушакова, т.е. на абсолютных высотах около 350 м.

Установка автоматических метеостанций и метеорологические наблюдения. Установлено две автоматических метеостанции российского производства, заменен блок питания и считана информация с автоматической метеостанции австрийского производства, установленной на леднике Академии Наук в 1999 г. (см. рис. 1, табл. 5).

Использование подобных метеостанций предполагает возможность автоматической регистрации и записи широкого спектра метеохарактеристик, однако следует учитывать, что представительность большинства данных весьма проблематична. Основная причина — интенсивное обмерзание большинства приборов и оттяжек. В частности, установленная в 1999 г. метеостанция на момент высадки на ледник Академии Наук в 2000 г. (5 апреля) оказалась частично занесена снегом и покрыта практически сплошным чехлом изморози толщиной в несколько десятков сантиметров. Соответственно, наиболее репрезентативными представляются данные по температуре воздуха и снежно-фирновой толщине (пусть и несколько сглаженные) и атмосферному давлению.

В частности средняя месячная температура воздуха в мае 1999 и 2000 г. составила (на высоте 2,5 м) соответственно около -15 и -20 °С, а амплитуда срочных температур воздуха — 12 и 18 °С. Абсолютный максимум срочных температур воздуха на высоте 2,5 м за период наблюдений (май 1999 — май 2000 г.) составил 4 °С (30 июля 1999 г. и в сентябре 2000 г.). Абсолютные максимум и минимум срочных температур

воздуха на высоте 0,5 м за тот же период наблюдений составили соответственно 11,7 °С (8 августа 1999 г.) и -38,9 °С (январь 1999 г.). Судя по изменениям и различиям температур на высоте 0,5 — 2,5 и глубине 0,5 м, интенсивное таяние снежного покрова в 1999 г. началось 12 июля и закончилось 17 сентября. В ясные дни дополнительно измеряли прозрачность атмосферы (плотность аэрозолей) оптическим спектрофотометром.

Заключение

Программа работ экспедиции “Северная Земля — 2000” выполнена полностью. Буровой лагерь на леднике Академии Наук (о. Комсомолец) и база ААНИИ на о. Средний законсервированы и полностью пригодны для дальнейшего использования. Скважина на леднике Академии Наук пробурена до глубины 504,77 м (пройдено около 450 м), полученный керн отобран полностью, обеспечено его хранение при температуре не выше -10 °С и доставка в АВИ для дальнейшего комплексного анализа. Выполнены термометрия (подтвердившая наличие отрицательного температурного градиента с глубин 205 — 210 м), инклинометрия и кавернометрия скважины (свидетельствующая об отсутствии существенного наклона и вариаций диаметра ствола).

Проведены радиолокационные исследования (до глубины 30 м) и режимные наблюдения (апрель — май 2000 г.) за температурой (до глубины 13 м) деятельного слоя ледника Академии Наук. Отобрано и доставлено в АВИ для дальнейшего анализа более 25 м керна из серии скважин глубиной до 15 м, пробуренных на леднике Академии Наук, 69 образцов снега и фирна с островов Комсомолец (ледник Академии Наук), Уединения и Ушакова (ледник Ушакова). Выполнено стратиграфическое описание керна из серии скважин на леднике Академии Наук: до глубины 15 м наблюдается относительное постоянство основных стратиграфических характеристик разреза в пределах, как минимум, первых сотен метров по простиранию. По результатам исследований в шурфах определены величины зимней аккумуляции 1999/2000 г. (на середину мая 2000 г.) на вершинах ледников Академии Наук (256 кг/м²) и Ушакова (0,205 ± 0,010 кг/м²). Установлено наличие области фирнового питания на леднике Ушакова на высотах около 350 м над ур. моря.

Установлены автоматические метеостанции на островах Уединения, Ушакова и Комсомолец (мыс Арктический). Получен полный комплекс метеоданных за май 1999 — май 2000 гг. (в частности, интенсивное таяние снежного покрова отмечено с 12 июля по 17 сентября 1999 г.) и обеспечено дальнейшее функционирование автоматической метеостанции на леднике Академии Наук.

Смонтированы спорово-пыльцевые ловушки на островах Комсомолец (ледник Академии Наук) и Голумянный. Отобраны образцы прошлогоднего фирна для спорово-пыльцевого анализа (ледник Академии Наук).

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам экспедиции А.В. Лисицыну, В.М. Зубкову, Б.С. Моисееву, А.В. Красилеву, В.В. Уфаеву, М.А. Анисимову, Л.М. Каплуну, А.В. Логвинову, С.А. Лабинскому, С.А. Кесселю, А.Э. Корыгину, G.B. Stoof, U.E. Kienel, а также В.С. Загороднову, любезно предоставившему первичные данные по температурам в скважине 1986 г., ранее публиковавшиеся только в графическом виде.

SUMMARY

The expedition "Severnaya Zemlya — 2000" was carried out within the framework of the long-term International project "System of the Laptev Sea — 2000". The bore hole was drilled in a on Akademii Nauk glacier (down to depth 504.77 m), the ice core obtained is sampled completely for further comprehensive analysis. Thermometry (indicating a negative temperature gradient

from depths 205 — 210 m and, the continuing warming of a glacier strata from above during the last decades), inclinometry and measuring of hole diameter (indicating negligible slope and variations of hole diameter) were executed. Completion of deep core drilling of a glacier (down to depth 750 m, including sampling of ground from a glacier bedrock) is planned for 2001. The regime observation (April — May, 2000) of temperature (down to depth 13 m in active layer of Akademii Nauk) were held. Core sample with total length > 25 m from a number of holes with depth down to 15 m on Akademii Nauk glacier, sample of snow and firn from Komsomoletz (Akademii Nauk glacier), Uyedineniya and Ushakova (Ushakova glacier) Islands were collected. Stratigraphy of an ice core from bore holes on Akademii Nauk glacier is recorded, indicating that in upper 15 m the basic stratigraphy features are rather constant at least at distances of first hundred meters that, in turn, suggests the representativeness of a single section for the accumulation area as a whole. Snow-pit studies (May, 2000) show that the average winter accumulation in 1999/2000 on top of Akademii Nauk glacier is 256 kg/m^2 and on top of Ushakova glacier is $205 \pm 10 \text{ kg/m}^2$. The firn area on Ushakova glacier (about 350 m a.s.l.) was found. The automatic weather stations (AWS) on Uyedineniya, Ushakova and Komsomoletz (Arktichesky cape) Islands were installed. The total set of meteorological data from May 1999 to May 2000 was obtained (on Akademii Nauk glacier the AWS is working too). The spore-and-pollen traps on Komsomoletz and Golomyanny Islands were installed. Samples of a last year firn for spore-and-pollen analysis (Akademii Nauk glacier) were collected.