

Результаты и особенности бурения скважины 5Г и первого вскрытия озера Восток

© 2012 г. Н.И. Васильев¹, В.Я. Липенков², А.Н. Дмитриев¹, А.В. Подоляк¹, В.М. Зубков²

¹Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (СПГИ), Санкт-Петербург;

²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

vasilev_n@mail.ru

Статья принята к печати 19 сентября 2012 г.

Вскрытие, гидроразрыв, глубокое бурение, ледниковый покров, ледяной керн, параметры процесса бурения, подледниковое озеро Восток, скважина.

Borehole, deep drilling, drilling parameters, hydrofracturing, ice core, ice sheet, subglacial Lake Vostok, unsealing.

Приводятся сведения об истории бурения глубокой скважины 5Г на российской станции Восток и обсуждаются технологические параметры вскрытия подледникового озера Восток. Описаны конструкция скважины и даны технические характеристики скважинного и поверхностного оборудования. Рассмотрены особенности бурения глубоких скважин на разных глубинах. На основе большого объёма экспериментальных данных, накопленных при бурении глубокой скважины на станции Восток, обсуждаются процессы, протекающие на забое скважины: разрушение–резание льда, очистка забоя и вынос шлама, аккумуляция шлама в фильтре. Рассмотрены факторы, наиболее влияющие на эффективность бурения скважин во льду. К ним относятся крупность кристаллов льда и его температура. При росте размеров кристаллов льда свыше 10 мм резко уменьшается крупность шлама, а при повышении температуры льда выше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ значительно ухудшается очистка забоя от шлама и снижается плотность шлама в фильтре шламосборника. В результате, бурение за рейс падает, появляется нестабильность в работе бурового снаряда вплоть до полной остановки бурения. Экспериментально установлены значения основных параметров процесса бурения – скорости вращения буровой коронки и расхода заливочной жидкости в циркуляционной системе снаряда. Внесены существенные изменения в конструкции коронки и циркуляционной системы, включая фильтры, что позволило стабилизировать процесс бурения даже вблизи поверхности подледникового озера. В заключительной части статьи описан процесс вскрытия подледникового озера Восток и дан предварительный анализ полученных результатов. Рассмотрены условия возникновения трещины гидроразрыва в массиве льда, окружающем скважину, и влияние этого эффекта на высоту подъёма озёрной воды после вскрытия озера Восток.

Введение

Бурение глубоких скважин на станции Восток в Антарктиде ведётся с 1970 г. До 1993 г. применялись, в основном, термобуровые снаряды, при разработке и использовании которых наши учёные добились значительных успехов. Одна из целей такого бурения – получение керна подледниковых пород, что потребовало перехода на бурение механическим способом. Поэтому в сезон 39-й САЭ (1993 г.) буровой комплекс на станции Восток переоборудовали для продолжения работ с использованием электро-механического бурового снаряда. Механический способ бурения скважин во льду выгодно отличается от теплового способа намного меньшим энергопотреблением, более высокой скоростью бурения и лучшим качеством получаемого керна. Изменение конечной задачи буровых работ в связи с открытием озера Восток, в воду которого должна была войти скважина, а также ощутимые изменения физико-механических свойств льда на глубинах свыше 3000 м потребовали внесения серьёзных изменений в технологию работ и планы их проведения.

Скважина 5Г

Бурение глубокой скважины 5Г было начато в 35-й САЭ (1990 г.) тепловым способом снарядами типа ТЭЛГА и ТБЗС [3, 4]. В 38-й РАЭ (1993 г.) скважина достигла глубины 2755 м. В период 40-й РАЭ (1995 г.) бурение скважины 5Г-1 было продолжено с глубины 2755 м электромеханическим снарядом [7, 9, 10] и без каких-либо серьёзных осложнений доведено до глубины 3109 м. Затем, в сезонные периоды 41, 42 и 43-й РАЭ (1995/96, 1996/97 и 1997/98 гг.), скважина 5Г-1 была пробурена в интервале глубин с 3109 до 3623 м. После сезонных работ в 1998 г. бурение скважины было приостановлено на восемь лет и возобновлено лишь в сезоне 51-й РАЭ в январе 2005 г., когда скважина достигла глубины 3650 м. Несмотря на значительное время простоя, деформаций стенок скважины не было отмечено благодаря практически полной компенсации горного давления льда давлением столба заливочной жидкости по всему стволу скважины.

При продолжении буровых работ в 52-й РАЭ (октябрь 2007 г.) из-за допущенных ошибок на глубине 3666 м произошла авария, в результате которой снаряд

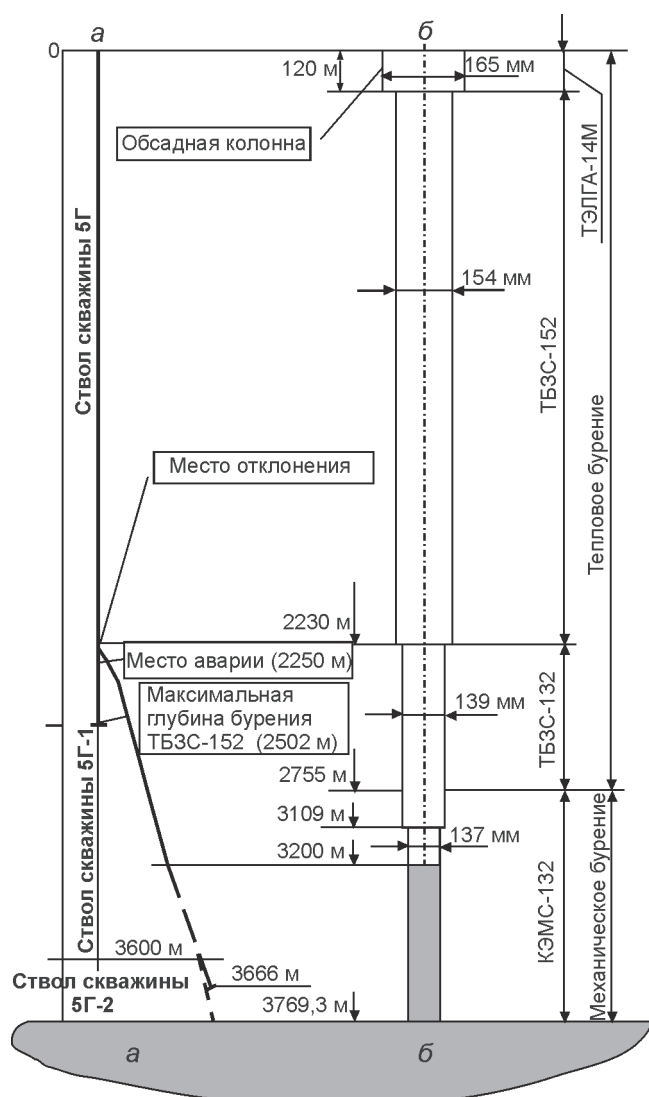


Рис. 1. Схема скважины 5Г:
а – проекция на вертикальную плоскость; б – конструкция скважины

Fig. 1. Schematic of borehole 5G:
а – vertical plane projection; б – borehole design

был оставлен на забое. В сезон 54-й РАЭ (январь 2009 г.) после неудачных попыток извлечь заклиненный снаряд на глубине 3600 м было выполнено отклонение от аварийного ствола и образован новый ствол скважины 5Г-2. В сезон 55-й РАЭ скважина 5Г-2 достигла глубины 3650 м, в сезон 56-й РАЭ – 3720 м, а в сезонный период 57-й РАЭ 5 февраля 2012 г. было впервые вскрыто подледниковое озеро Восток на глубине 3769,3 м. Вода поднялась в скважину и остановилась на глубине примерно 3200 м (по керну).

В настоящее время глубокая скважина на станции Восток представляет собой сложную многоступенчатую конструкцию (рис. 1). В её верхней части установлена обсадная колонна до глубины 120 м с

внутренним диаметром 165 мм. До глубины 2502 м бурение скважины вели термобуром ТБЗС-152 при минимальном диаметре скважины 153 мм. При очередном подъёме на глубине 2250 м снаряд заклинился в скважине. Кабель был оторван от места заделки в снаряде, после чего на глубине 2230 м было выполнено отклонение и начато бурение нового ствола скважины 5Г-1 термобуровым снарядом ТБЗС-132 с наружным диаметром коронки 132 мм.

Первоначально в диапазоне глубин с 2200 м до 2755 м скважина, пробуренная термобуровым снарядом ТБЗС-132, имела минимальный диаметр 133 мм. Перед началом бурения механическим способом этот участок скважины был расширен до диаметра 139 мм. В процессе дальнейшего бурения механическим способом пробуренные участки скважины периодически расширялись, в результате чего скважина имеет ступенчатую форму. Общий объём заливаемой жидкости (смесь авиационного топлива ТС-1 и фреона F-141b), находящейся в скважине, составляет около 60 м³. Уровень заливаемой жидкости на 20 июля 2012 г. находился на глубине 42 м, её средняя плотность составляла 905 кг/м³. До глубины 2200 м скважина практически вертикальна, затем угол отклонения оси скважины от вертикали изменяется в пределах 6–8°.

Оборудование

Буровой комплекс скважины 5Г-1. Буровой комплекс на станции Восток (рис. 2) включает в себя буровое здание 1, вышку 5, лебёдку 3 с грузонесущим кабелем 7, пульт управления 2, буровой снаряд 8, устройство для монтажа бурового снаряда 9 и генератор постоянного тока 10 для питания привода буровой лебедки. Система питания бурового снаряда и управления его работой может эксплуатироваться при температуре до –60 °С при давлении до 40 МПа в скважине, залитой незамерзающей жидкостью.

Техническая характеристика бурового комплекса

Буровое здание:	
длина, м	18
ширина, м	4
высота, м	3
Высота вышки, м	15
Потребляемая мощность, кВт:	
генератор постоянного тока	20
электродвигатель лебедки	20
система обогрева	12
освещение	5
Средняя скорость спуско-подъёмных операций при глубине скважины 4000 м, м/с	0,7
Грузонесущий кабель:	
наружный диаметр, мм	16
разрывное усилие, кН	97
число токоведущих жил	8
удельное сопротивление одной токоведущей жилы, Ом/км	9

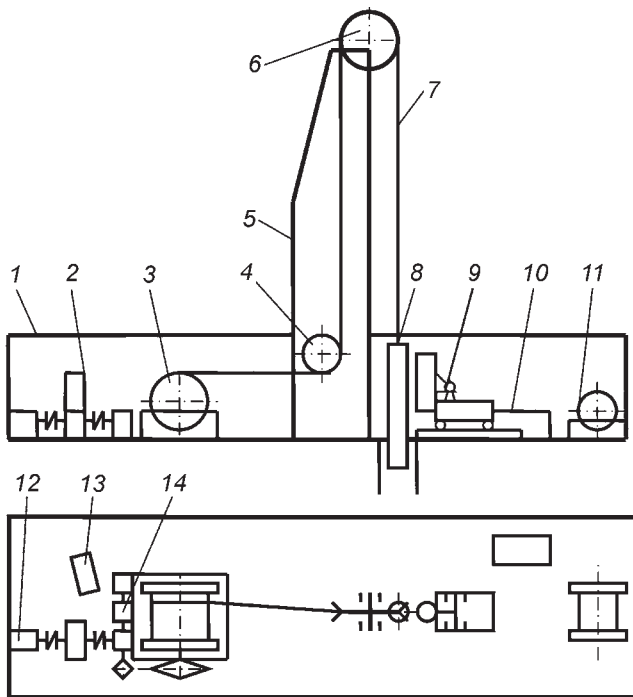


Рис. 2. Буровой комплекс на станции Восток:
 1 – буровое здание; 2 – пульт управления; 3 – буровая лебёдка; 4 – нижний ролик; 5 – буровая мачта; 6 – верхний ролик; 7 – грузонесущий кабель; 8 – буровой снаряд; 9 – устройство для монтажа бурового снаряда; 10 – генератор постоянного тока; 11 – геофизическая лебёдка; 12 – основной привод буровой лебёдки; 13 – пульт управления; 14 – привод равномерной подачи
Fig. 2. Drilling complex 5G at Vostok Station:
 1 – drill building; 2 – desk control; 3 – winch; 4 – the lower roller; 5 – drill mast; 6 – the upper roller; 7 – carrying cable; 8 – drill; 9 – drill assembling devise; 10 – d.c. generator; 11 – geophysical winch; 12 – the main winch transmission; 14 – even transmission

Обсадная колонна. В верхней части скважины установлена обсадная колонна из пластиковых труб, аналогичная обсадным колоннам, применявшимся при бурении в Гренландии и на Куполе С. Обсадная колонна установлена перед переходом на механическое бурение при глубине скважины 2755 м. На нижнем конце колонны закреплён алюминиевый башмак, который нагревался при постановке колонны на уступ. После бурения 0,5 м нагрев башмака прекращался и нижняя часть колонны оказывалась замороженной в лёд. Затем над башмаком в затрубном пространстве образовалась ледяная пробка высотой примерно 2 м, что гарантировало изоляцию проницаемого снежно-фирнового слоя от скважины.

Электро-механический буровой снаряд. Базовая комплектация колонкового электро-механического снаряда КЭМС-132 (рис. 3) включает в себя коронку 1, колонковую трубу 2, шламоборный отсек с фильтром для сбора шлама 3, редуктор 4, приводной электродвигатель 5, насос 7, создающий обратную циркуляцию про-

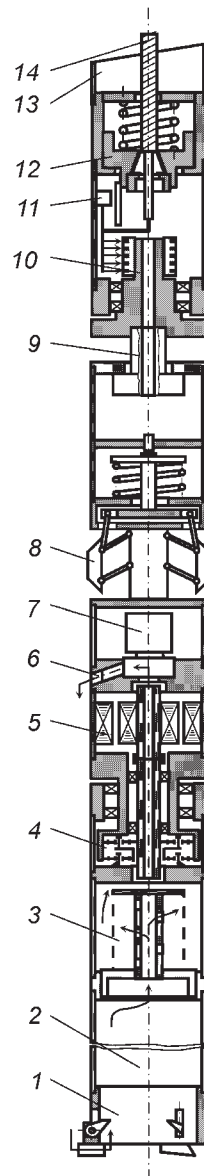


Рис. 3. Схема колонкового электро-механического бурового снаряда КЭМС-132:

1 – коронка; 2 – колонковая труба; 3 – шламоборник; 4 – редуктор; 5 – электродвигатель; 6 – датчик расхода заливочной жидкости; 7 – насос; 8 – распорное устройство; 9 – ударное устройство; 10 – токосъёмник; 11 – датчик нагрузки на забой; 12 – кабельный замок; 13 – верхний шламоборник; 14 – грузонесущий кабель

Fig. 3. Design of the electromechanical core drill KEMS-112:

1 – drill head; 2 – core barrel; 3 – chip collector; 4 – gear box; 5 – electric motor; 6 – drill fluid flow sensor; 7 – pump; 8 – antitorque; 9 – hammering device; 10 – current collector; 11 – bottomhole pressure sensor; 12 – cable clamp; 13 – the upper chip collector; 14 – carrying cable

мывочной жидкости, распорное устройство 8 для восприятия реактивного момента на невращающейся части снаряда, ударное устройство 9, электроотсек 10 с кабельным замком 12 для подсоединения грузонесущего кабеля 14. Электро-механический буровой снаряд работает следующим образом. Вращение от ротора электродвигателя 5 через редуктор 4 передаётся колонковой трубе с закреплённой на ней коронкой 1. Шлам, образующийся в процессе бурения, потоком заливочной жидкости увлекается в шламоборный отсек 3 и остаётся в фильтре. Заливочная жидкость, поднимаясь по центральным отверстиям валов редуктора и приводного двигателя, выбрасывается в затрубное пространство насосом 7. Коньки распорного устройства 8, контактируя со стенками скважины, не позволяют вращаться верхней части бурового снаряда при бурении.

Техническая характеристика бурового снаряда КЭМС-132

Диаметр коронки, мм:	
наружный	132–138
внутренний	106
Длина колонковой трубы, м	
	3
Приводной двигатель:	
напряжение питания, В	~220
частота вращения ротора, об/мин	2800
частота вращения коронки, об/мин	90–220
Механическая скорость бурения, м/ч:	
по льду	До 20
по подледниковым породам	До 1,5
Общая длина, м	
	8–13
Масса, кг	
	240

Результаты

Начало бурения скважины механическим способом характеризовалось постепенным увеличением объёма бурения (рис. 4), что первоначально связывали с наработкой опыта членами буровой бригады. Затем бурение стабилизировалось и средний объём бурения за рейс составил около 2,8 м (цикл буровых работ, в который входит подготовка снаряда на поверхности, спуск в скважину, углубка скважины, срыв керна, подъём снаряда на поверхность, извлечение керна и шлама и другие вспомогательные операции). С 2930 м началась увеличивающаяся с глубиной нестабильность процесса бурения. Происходили неожиданные заклинивания коронки даже при очень низких скоростях подачи бурового снаряда на забой (1 м/ч). Одновременно с этим постепенно снижалось бурение за рейс. Повышение плотности заливочной жидкости за счёт добавки утяжелителя в начале сезона 41-й РАЭ позволило несколько стабилизировать процесс, однако в

конце сезона, несмотря на все принятые меры, объём бурения стал резко падать и в конце концов бурение практически остановилось. В следующем сезоне в конструкцию бурового снаряда внесли ряд изменений и бурение удалось продолжить, однако к концу сезона снова проявилась тенденция к снижению бурения за рейс вплоть до полной его остановки. Максимальная длина отдельных рейсов начинала катастрофически падать, часто без видимых причин коронка зашламовывалась практически в самом начале рейса.

При бурении глубоких скважин как в Антарктиде, так и в Гренландии исследователи всех стран столкнулись с серьёзными осложнениями уже на глубинах свыше 2500 м, а на глубинах более 3000 м осложнения становились столь значительными, что бурение практически прекращалось. Это явление даже получило название – «проблема бурения тёплого льда», так как с увеличением глубины температура льда повышается. Пример подобных осложнений – снижение бурения за рейс скважины на Куполе С по европейской программе EPICA [8]. Снижение бурения за рейс началось уже при достижении глубины 2500 м, затем с ростом глубины стало резко снижаться, а по достижении 3000 м на деле остановилось. При касании забоя на любых скоростях подачи коронка зашламовывалась и бурение останавливалось. После анализа ситуации заключили, что из-за высокой температуры лёд становится очень пластичным и налипает на резцы и корпус коронки. Во избежание этого в зону забоя каждый рейс добавлялось небольшое количество этиленгликоля, однако серьёзных изменений добиться не удалось. На наш взгляд, связывать возникающие проблемы в процессе бурения только с повышением

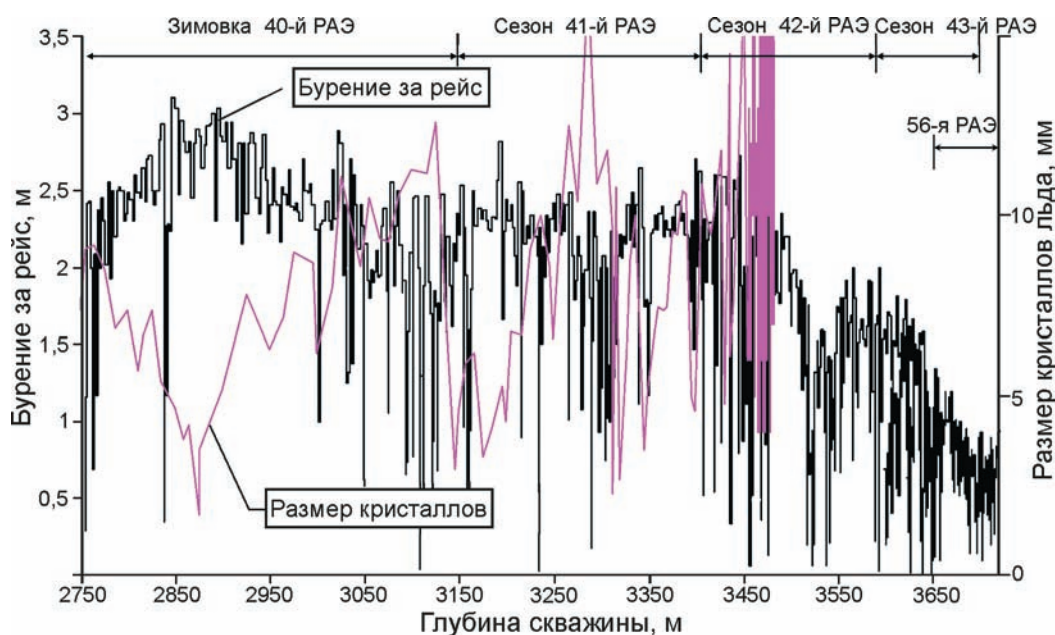


Рис. 4. Результаты бурения скважины 5Г-1 механическим способом

Fig. 4. Drill run advance during the coring of hole 5G-1 with electromechanical drill

температуры льда нельзя. На глубине 2700 м температура льда равна примерно $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на глубине 3600 м – ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того, температура льда с глубиной повышается постепенно, а изменения бурения за рейс характеризуются определённой периодичностью. Анализ причин осложнений, возникших в процессе бурения, показал чёткую связь с изменением кристаллической структуры буримого льда и его физико-механических свойств [5].

Все участки скважины, где отмечались проблемы в бурении, соответствуют интервалам керна, сложенного относительно крупнокристаллическим льдом (см. рис. 4). Устанавливается чёткая корреляция между объёмом бурения за рейс и размерами кристаллов. С глубины 2755 м до глубины 2840 м бурение за рейс постепенно увеличивается, что сопровождается уменьшением размеров кристаллов льда. Глубже размеры кристаллов возрастают и объём бурения постепенно снижается. На глубине 3080 м средние размеры кристаллов превысили 10 мм, поэтому до глубины 3120 м процесс бурения был крайне нестабильным. Примерно с глубины 3480 м размеры кристаллов льда начинают превышать 20 мм и в бурении наметилась стабильная тенденция к полному прекращению процесса углубки.

Для выяснения причин появившейся нестабильности процесса бурения рассмотрим все его составные части. Работа бурового снаряжения на забое состоит из следующих основных процессов: 1) разрушение–резание льда; 2) очистка забоя и вынос шлама; 3) аккумуляция шлама в фильтре. Эти три процесса взаимосвязаны и, безусловно, влияют друг на друга. К основным факторам, влияющим на работу бурового снаряжения на забое, относятся: геометрические характеристики резцов; скорость вращения буровой коронки (скорость резания); внедрение резцов в лёд (толщина снимаемой стружки); конструкция фильтров и каналов для выноса шлама; параметры насоса, создающего призабойную циркуляцию промывочной жидкости.

Анализ процесса резания льда и образования шлама показал, что с ростом среднего размера кристаллов при постоянной скорости вращения коронки и механической скорости бурения (скорость, с которой увеличивается глубина скважины в процессе разрушения породы или льда) крупность шлама снижается. При бурении мелкокристаллического льда шлам состоит в основном из частиц размером более 1–2 мм даже при механической скорости бурения менее 5 м/ч. При резании крупных монокристаллов (более 10 мм) шлам состоит из частиц менее 0,5 мм с большой долей мелкодисперсных фракций. Попадая в фильтр, мелкодисперсный шлам образует на сетке фильтра слой, который даже при незначительной толщине создаёт большие сопротивления для потока заливочной жидкости. Это вызывает снижение её расхода, что в свою

очередь способствует образованию шламовых пробок у резцов и остановке бурения даже при незначительной его скорости. Процесс образования шламовых пробок усугубляется тем, что лёд имеет относительно высокую температуру и при большой свободной поверхности частиц шлама, на которой должна быть плёнка воды, обладает значительной способностью к слипанию отдельных частиц.

Крупность шлама влияет, в основном, на снижение бурения за рейс из-за увеличения гидравлических сопротивлений в фильтре шламособорника, но неожиданные остановки бурения возникают в первую очередь из-за недостаточного расхода заливочной жидкости. Как в российском буровом снаряжении, так и в буровом снаряжении, который использовался в программе EPICA, расход заливочной жидкости составляет около 40 л/мин. При бурении с механической скоростью 10 м/ч концентрация шлама в потоке заливочной жидкости примерно равна 2%, а при бурении твёрдых пород рекомендуемая концентрация шлама в нём должна быть ниже 5%. Как показывает практика, при бурении скважин во льду до глубины 3000 м механическая скорость бурения может быть значительно больше 10 м/ч, при этом проблем в удалении шлама с забоя не возникает. Таким образом, решение этой проблемы мы видим в увеличении расхода промывочной жидкости минимум в два раза. Данные выводы были сделаны уже к концу сезонных работ в 43-й РАЭ, но из-за остановки бурения и произошедшей в 52-й РАЭ аварии реализованы эти решения были лишь после выполнения отклонения и восстановления рабочего состояния скважины в сезон 56-й РАЭ. После внесения серьёзных изменений в конструкцию насосного узла бурового снаряжения расход заливочной жидкости увеличился до 120 л/мин. Были внесены также принципиальные изменения в конструкцию буровой коронки, позволившие увеличить крупность шлама в три раза.

Коронка (рис. 5) представляет собой объединение трёх однорезцовых коронок. Каждый резец формирует свой забой, ширина которого составляет 1/3 ширины общего кольцевого забоя. Толщина срезаемого слоя в три раза больше, чем у обычных резцов, что влечёт за собой увеличение крупности шлама и соответственно бурения за рейс. Кроме того, более крупный шлам характеризуется меньшей суммарной поверхностью, что уменьшает риск слипания частиц шлама, особенно на глубинах более 3000 м, где лёд имеет относительно высокую температуру. Однако продолжение бурения на глубинах свыше 3650 м показало, что внесённых изменений в конструкцию бурового снаряжения недостаточно. На этих глубинах начало проявляться повышение температуры льда, а при приближении к поверхности озера температура льда стала практически равна температуре плавления. Это привело к тому, что при

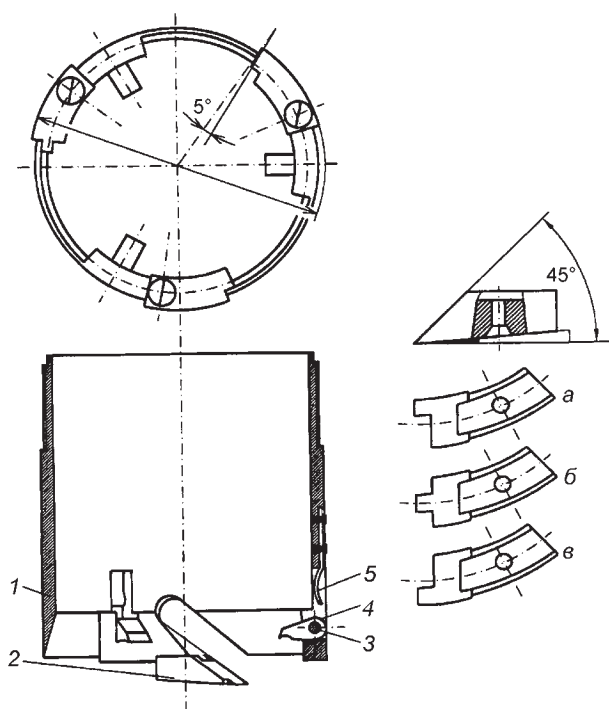


Рис. 5. Усовершенствованная буровая коронка, адаптированная для бурения «тёплого» крупнокристаллического льда:

1 – корпус коронки; 2 – резцы (*a–в* – модификации отдельных резцов); 3 – ось кернорвательной собачки; 4 – кернорвательная собачка; 5 – пружина

Fig. 5. The improved drill head adapted for drilling the «warm» coarse-crystalline ice.

1 – drill head body; 2 – ice cutters (*a–в* – three different types of cutters); 3 – axis of the core catcher; 4 – core catcher; 5 – spring

малейшем сжатии шлама (например, при входе в центральную шламоподъёмную трубу и в самом фильтре) образовывались уплотнённые пробки шлама, в результате прекращалась циркуляция жидкости и коронка зашламовывалась. Как уже отмечалось, температура льда на этих глубинах близка к точке его плавления, поэтому шлам при малейшем силовом воздействии слипается в слабопроницаемые пробки. Подобное явление наблюдается при формировании снежков из сырого снега. Справиться с этим осложнением удалось благодаря внесению значительных изменений в конструкцию фильтра шламособорника. Самой эффективной получилась конструкция, которая представляет собой комбинацию стандартного фильтра снаряда КЭМС-132 и фильтра снаряда ЕРІСА, позволившую так организовать поток жидкости в фильтре, что шлам равномерно распределялся по всему его объёму.

В результате внесённых изменений процесс бурения скважины полностью стабилизировался. Описанная конструкция была применена за 10 м до поверхности озера. Удалось обеспечить равномерное распределение шлама в фильтре шламособорника, но углубка за рейс не превышала 1 м.

Вскрытие подледникового озера Восток

К непосредственному проникновению в оз. Восток можно отнести бурение последних 10 м. Окончательная модернизация циркуляционной системы выполнена при достижении глубины 3762 м. Начиная с глубины 3760 м, в каждом рейсе отмечалось незначительное количество воды, что выражалось в оледенении коронки, примораживании керна к колонковой трубе и неподвижных, примороженных к корпусу кернорвательных ножей. Наиболее чётко процессы, происходившие перед проникновением в озеро, проявились в рейсах 164–166, выполненных 04 февраля 2012 г. в интервале глубин 3764,45–3765,91 м.

В рейсе 164 пробурили 0,5 м, но керна не был оторван от забоя. В рейсе 165 было пробурено 0,9 м и сорван керна длиной 1,46 м, состоящий из двух кусков. Сначала был сорван керна длиной около 0,75 м, а после повторного опускания снаряда на забой сорван второй кусок керна длиной 0,71 м. При срыве обоих образцов значительно усилилось натяжение кабеля. Поверхность нижнего образца керна была эродирована водой. По всей поверхности и на обоих торцах наблюдались примороженные комочки шлама. Вся коронка была покрыта тонким слоем льда. В следующем рейсе 166 сразу после постановки на забой процесс бурения прекратился из-за резкого возрастания момента на валу приводного двигателя (прекратилось вращение вала приводного двигателя в связи с резким возрастанием момента сопротивления вращению из-за перекрытия циркуляционных каналов). Коронка покрылась тонким слоем замёрзшей воды. На входе в фильтры образовалась пробка из смёрзшегося шлама, а в нижнем фильтре обе сетки были покрыты слоем льда, в результате в фильтре, как в стакане, осталась заливочная жидкость. Поскольку в фильтре использована мелкая сетка (размер ячейки 0,25 мм), вода через неё практически не проходит.

Появление воды можно объяснить водопритоком из озера в момент образования трещины гидроразрыва при срыве керна. Процесс образования трещин гидроразрыва при бурении скважин и добыче нефти и газа в настоящее время хорошо изучен и широко используется для повышения нефтеотдачи пластов [1, 2, 6]. При подъёме снаряда с такой глубины максимальная скорость его движения не превышает 0,3 м/с, что недостаточно для создания значительного разрежения у забоя под снарядом. При срыве керна буровой снаряд движется под действием силы, возникающей при растяжении грузонесущего кабеля. Скорость движения бурового снаряда в момент срыва может превысить 1 м/с, что приведёт к созданию разрежения под снарядом до 5 бар, вполне достаточного для появления трещины гидроразрыва и вызова водопритока в скважину. Исходя из того, что нижний образец керна в рейсе 165

был полностью в воде, можно предположить, что объём воды, попавшей в скважину, был не менее 3 л. Если в очередном рейсе вблизи поверхности озера отмечался тяжёлый срыв керна, то следующий рейс, как правило, был короткий и на поверхности коронки присутствовал тонкий слой льда. В рейсе 169 был сорван длинный керн (0,92 м). В предпоследнем рейсе 170 было пробурено всего 0,4 м, керн не получен.

Все характеристики технологического процесса во время последнего 171-го рейса, в ходе которого было вскрыто оз. Восток, зафиксированы станцией контроля параметров бурения и записаны на компьютере (рис. 6). После бурения 0,4 м момент на коронке (валу приводного двигателя) резко снизился до нуля, а датчик нагрузки на забой показал практически мгновенное её увеличение. Такая ситуация прогнозировалась при подготовке к проникновению. Вода вошла в скважину под давлением и приподняла снаряд, так как при перепаде давлений в 0,1 МПа на снаряд должна была действовать подъёмная сила около 1200 Н.

Момент вскрытия озера был зафиксирован 05 февраля 2012 г. в 20 час. 21 мин. по московскому времени. Лебёдка была включена на подъём через 4 секунды после срабатывания датчиков. Через 63 секунды из скважины начала выливаться жидкость. Она вытекала 4 минуты 55 секунд, а затем её уровень стал быстро понижаться. За это время из скважины вытекло примерно от 1,5 до 2,5 м³ жидкости, 250 л было откачено насосом в бочку. Скорость подъёма снаряда в районе забоя составляла 0,27 м/с. Примерно через 1 минуту скорость подъёма воды сравнялась со скоростью подъёма снаряда, о чём свидетельствует снижение показаний датчика нагрузки на забой. В дальнейшем влияние поднимающейся воды отмечалось увеличением показаний датчика при снижении скорости вращения лебёдки в процессе укладки кабеля у реборд. Это влияние ощущалось примерно 17 минут и прекратилось после достижения глубины 3400 м.

Извлечённый из скважины буровой снаряд (рис. 7) был покрыт слоем льда. Толщина слоя льда на колон-

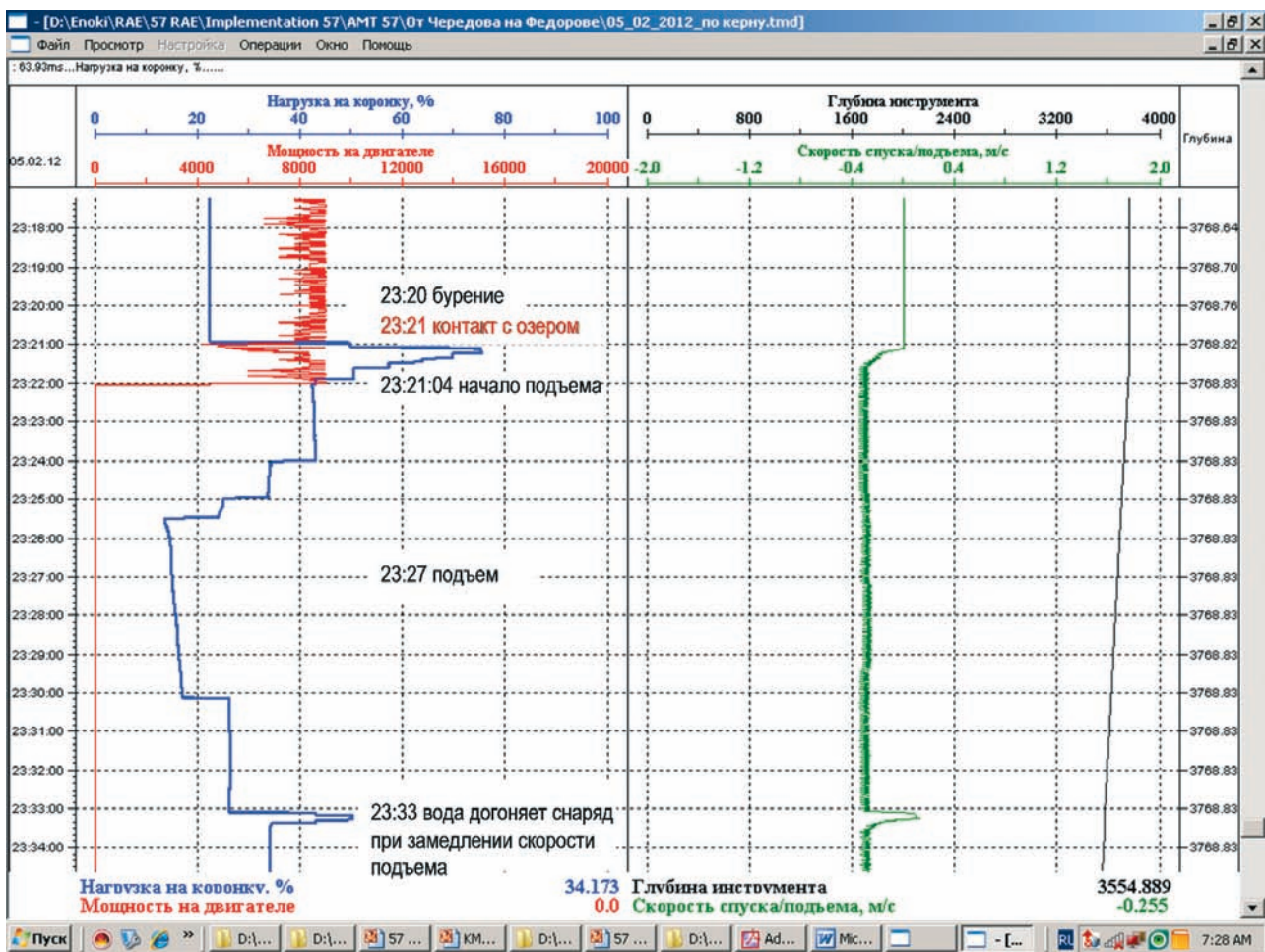


Рис. 6. Диаграммы изменения параметров бурения скважины 5Г-2 в последнем рейсе 171, завершившимся вскрытием подледникового озера Восток

Fig. 6. Record of the drilling characteristics during the last drilling run 171, ended with Lake Vostok unsealing



Рис. 7. Отдельные узлы бурового снаряда после извлечения из скважины

Fig. 7. Ice-coated units of the drill pulled out from the hole

ковой трубе была около 5 мм, на узлах диаметром 108 мм слой сплошного льда достигал 15 мм, все отсеки были заполнены монолитным льдом. Для снятия колонковой трубы пришлось отогреть место её соединения со шламовым отсеком. В фильтры попало незначительное количество воды, так как входное отверстие было перекрыто керном, верхняя часть которого была вдавлена в съёмную втулку. Керн был раздроблен и покрыт толстым слоем замороженной воды. Сверху и снизу керна были нераздробленные куски длиной около 150 мм, а середина представляла собой мелко наколотый лёд. Подобным образом керн разрушался при ударе о промывочную жидкость в тех редких случаях, когда он выпадал из колонковой трубы у поверхности. По имеющимся разрушениям можно предположить, что сила, действовавшая на керн, была не менее 1000 Н. Сразу после подъёма бурового снаряда на поверхность была снята только колонковая труба. Основную часть бурового снаряда оставили для оттаивания и последующей разборки и чистки.

Согласно выполненным замерам, в мае 2012 г. после замерзания воды, поднявшейся в скважину, уровень жидкости оказался на глубине 42,7 м, а поверхность замёрзшей воды – на глубине примерно 3200 м (при пересчёте по длине керна). При проникновении в озеро предполагалось обеспечить давление жидкости на забое примерно на 3 бара меньше, чем давление озёрной воды для её подъёма в скважину на высоту 30 м.

Давление жидкости в скважине контролировалось двумя способами: датчиком давления прибора КМТ и с помощью отбора проб жидкости с разных глубин с последующим расчётом давления столба жидкости. Нижний график (рис. 8) показывает распределение дифференциального давления в скважине перед моментом вскрытия озера, верхний – после достижения жидкостью устья скважины при подъёме после вскрытия. При построении графиков учитывалось, что после измерений плотности жидкости 15 января

2012 г. в скважину в интервал глубин 3300–3630 м было залито 350 кг фреона. Уровень жидкости в скважине перед последним рейсом был на глубине 62 м. В результате стравливания в скважину грузонесущего кабеля уровень (расстояние от пола буровой до поверхности жидкости) должен был подняться до 38 м.

Значительную высоту подъёма воды после вскрытия озера можно объяснить возникновением трещины гидроразрыва (возможно, нескольких трещин) в интервале глубин 300–3000 м. Начиная с 40-й РАЭ подобные явления периодически наблюдались в скважине [9], что проявлялось в виде снижения уровня жидкости при добавлении в скважину утяжелителя.

Объяснение и обоснование процесса образования трещины гидроразрыва – отдельные задачи, которые будут решены в ближайшее время при использовании большого объёма наблюдений, проводившихся в скважине с 1994 г., а также материалов экспериментальных исследований, выполненных в сезонах 56 и 57-й РАЭ.

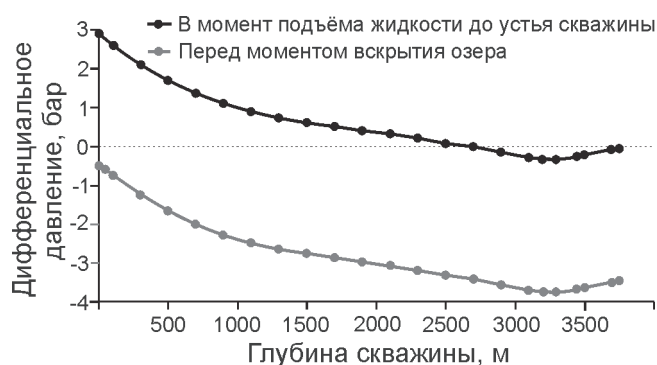


Рис. 8. Диаграммы дифференциального давления, полученные расчётным путём по значениям плотности промывочной жидкости

Fig. 8. Differential pressure in borehole calculated from the data on the drilling fluid density

Заключение

В ходе бурения глубокой скважины на станции Восток накоплен большой объём данных, на основе которых можно с большой достоверностью моделировать процессы, протекающие в скважине во время бурения и вскрытия подледниковых водоёмов. Корректировка технологических параметров бурения и внесённые в конструкцию бурового снаряжения дают уверенность в том, что при бурении скважины на глубинах ниже 3000 м можно достичь такой же производительности, как и на более высоких горизонтах. При повторном вскрытии оз. Восток производительность буровых работ будет не менее 400 м в сезон. Таким образом, за два сезона скважина будет надёжно подготовлена к повторному вскрытию.

На основании предварительного анализа результатов вскрытия оз. Восток можно утверждать, что заливочная жидкость не попала в воду озера и давление воды в озере у подошвы ледника, как и предполагалось ранее, практически равно горному давлению льда.

При бурении скважины появление трещины гидроразрыва не влечёт за собой серьёзных осложнений, хотя и нежелательно. Однако при вскрытии подледникового водоёма это становится значимым фактором и при повторном проникновении необходимо скорректировать распределение плотности заливочной жидкости по глубине скважины, исключив возможность образования трещины гидроразрыва при любом подъёме уровня жидкости. Следует также по возможности уменьшить диаметр грузонесущего кабеля, так как от этого зависит величина колебания уровня жидкости при спуско-подъёмных операциях.

Важнейший этап дальнейших исследований — изучение эффекта гидроразрыва в толще льда, оказывающего существенное влияние на обеспечение устойчивости стенок скважины и безопасности вскрытия подледниковых водоёмов.

Настоящая работа выполнена в рамках Проекта 2 «Комплексные исследования уникального подледникового озера Восток, включающие проникновение в озеро с отбором проб озёрной воды, и гляциологические исследования Антарктики» подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан».

Литература

1. *Баикатов А.Д.* Прогрессивные технологии сооружения скважин. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 554 с.
2. *Желтов Ю.П., Христианович С.А.* О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Изв. АН СССР, ОТН. 1955. № 5. С. 3—41.
3. *Кудряшов Б.Б., Чистяков В.К., Морев В.А.* Бурение ледникового покрова Антарктиды тепловым способом // 25 лет Советской антарктической экспедиции. Л.: Гидрометеоздат, 1983. С. 149—158.

4. *Кудряшов Б.Б., Чистяков В.К., Литвиненко В.С.* Бурение скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород. Л.: Недра, 1991. 295 с.
5. *Липенков В.Я., Полякова Е.В., Дюваль П., Преображенская А.В.* Особенности строения антарктического ледникового покрова в районе станции Восток по результатам петроструктурных исследований ледяного керна // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 76. С. 68—77.
6. *Максимович Г.К.* Гидравлический разрыв нефтяных пластов. М.: Гостоптехиздат, 1957. 98 с.
7. Патент РФ № 1472613 от 20.07.94. Колонковый электро-механический буровой снаряд / Б.Б. Кудряшов, Н.И. Васильев., В.К. Чистяков, В.В. Уфаев.
8. *Augustin L., Panichi S., Frascati F.* EPICA Dome C 2 drilling operations: performances, difficulties, results // Annals of Glaciology. 2007. V. 47. P. 68—72.
9. *Kudryashov B.B., Vasiliev N.I., Vostretsov R.N., Dmitriev A.N., Zubkov V.M., Krasilev A.V., Talalay P.G., Barkov N.I., Lipenkov V.Ya., Petit J.R.* Deep ice coring at Vostok Station (East Antarctica) by an electromechanical drill // Mem. Natl. Inst. Polar Res.: Spec. Issue. 2002. 56. P. 91—102.
10. *Vasiliev N.I.* Some features of ice drilling technology by drill on a hoisting cable // Mem. Natl. Inst. Polar Res.: Spec. Issue. 2002. 56. P. 136—141.

Summary

We present here a brief description of the drilling operations in the deep 5G hole at the Russian Vostok Station with more detailed account of the final stage of this long-term project successfully ended on February 5, 2012 with the first Lake Vostok unsealing. Relevant information on the borehole design and the technical characteristics of the downhole and surface drilling equipment is given. The peculiarities of the drilling process are discussed in connection with changing properties of the penetrated ice. The data analysis allows defining the main factors that influence the efficiency of the electromechanical drill system at great depths. It is shown that the elevated temperature of ice and its coarse-crystalline texture are mainly responsible for the significant slowing-down of ice coring in the bottom sections of ice sheets observed at Vostok and at another drilling sites in Antarctica and Greenland as well. Based on the large amount of experimental data obtained in the course of the deep drilling at Vostok, we discuss the processes which occur in the borehole during the ice drilling and unsealing the sub-ice water bodies. In particular, we investigate the conditions for occurrence of hydraulic fracturing in the hole and the possible effect of the hydrofrac on the height of the water column that have risen in hole 5G after the Lake Vostok unsealing. Finally we formulate the drill equipment requirements and process specifications that would ensure the best performance of an electromechanical drill and trouble-free drilling operations at different depths in a borehole up to the bottom of ice sheet.