

ГЛУБОКОЕ БУРЕНИЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПАЛЕОКЛИМАТА

Н.И.ВАСИЛЬЕВ

Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В.Плеханова

Бурение скважин с полным отбором керна в ледниках является единственным способом получения образцов льда для изучения строения, структуры, вещественного состава и динамики ледовых отложений. Большой вклад в разработку теоретических основ и технологии бурения скважин во льду внесли российские ученые. С помощью разработанного российскими учеными оборудования пробурено большое количество скважин в ледниках Арктики и Антарктики, что позволило выполнить большое количество уникальных исследований в области гляциологии, палеоклиматологии, биологии и др. Выдающиеся результаты в бурении скважин позволили нашей стране занять лидирующее положение в мире в области глубокого бурения льда. Об эффективности и надежности разработанных технологий можно судить по стабильности, с которой проходило бурение самой глубокой в мире скважины 5Г-1 на станции Восток в Антарктиде.

Важнейшим и наиболее эффективным способом изучения строения, структуры, вещественного состава и динамики ледовых отложений в полярных областях является бурение скважин с полным отбором керна, что дает возможность проводить кристалломорфологические исследования льда с больших глубин, геофизические наблюдения в скважинах, изучать химический состав льда, содержание изотопов кислорода и углерода, различных включений (земная и космическая пыль, вулканический пепел, бактерии, споры растений и др.). Бурение скважин в ледниках и подледниковых породах в перспективе имеет также большое значение для проведения геологоразведочных работ и дальнейшей эксплуатации месторождений полезных ископаемых, скрытых ледниковыми толщами.

Специфика условий Антарктиды — значительная удаленность, полное бездорожье, крайне суровый климат — предъявляют особые требования к буровому оборудованию, технологии, организации работ и подготовке персонала. Основные требования к буровому оборудованию — низкая энергоемкость, минимально возможный вес, высокое качество керна. Отличительной особенностью технологии бурения льда является получение непрерывного керна, необходимого для проведения всесторонних научных исследований, что требует больших затрат времени на проведение спуско-подъемных операций. Исходя из этих требований, наибольшее распространение для бурения скважин во льду получил способ бурения колонковыми буровыми снарядами на грузонесущем кабеле. Применение гибкой буровой колонны — грузонесущего кабеля — позволило существенно снизить вес поверхностного бурового оборудования по сравнению с бурением на трубах за счет применения легких лебедок для грузонесущего кабеля и повысить скорость спуско-подъемных операций.

Разрушение льда в процессе бурения можно выполнять двумя способами: тепловым и механическим. При тепловом способе бурения лед на забое плавится под воздействием термобуровой коронки, при механическом — за счет разрушения льда коронками резцового типа. Наиболее значимый вклад в развитие теплового способа бурения внесли российские ученые, в частности СПГГИ (ТУ) [7, 18] и ААНИИ [8, 10]. Тепловой способ бурения привлекает в первую очередь относительной простотой буровых снарядов. Однако плавление льда на забое требует

большого количества энергии, что связано с фазовым переходом между твердым и жидким состоянием. Для плавления льда требуется в десятки раз большее количество энергии, чем при его механическом разрушении, что приводит к использованию грузонесущих кабелей большего диаметра, чем для механического бурения. Оборудование для бурения скважин тепловым способом получается значительно более тяжелым и энергоемким, кроме того, качество керна при механическом бурении выше, чем при термобурении.

Исходя из явных преимуществ, последнее время бурение глубоких скважин выполняется только электромеханическими снарядами на грузонесущем кабеле.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию технологии и технических средств для бурения глубоких скважин во льду ведутся в СПГГИ (ТУ) в тесном контакте с ААНИИ с 1967 г. В работах по созданию и внедрению в практику технологии и технических средств для бурения и исследования скважин в ледовых толщах принимал широкий круг российских ученых и полярных исследователей: С.С.Абызов, Н.И.Барков, В.Н.Бахтюков, К.В.Блинов, Н.Е.Бобин, В.Н.Васильев, Р.Н.Вострецов, Л.К.Горшков, А.А.Гусев, Д.Н.Дмитриев, А.Н.Дмитриев, Э.А.Загривный, В.М.Зубков, Е.С.Короткевич, Б.Б.Кудряшов, А.В.Красилев, В.Я.Липенков, Н.Н.Меньшиков, С.В.Митин, Б.С.Моисеев, В.А.Морев, В.М.Пашкевич, Ю.А.Рыдван, Л.М.Саватюгин, Н.И.Слюсарев, Г.Н.Соловьев, Г.К.Степанов, П.Г.Талалай, В.Ф.Фисенко, В.К.Чистяков, В.М.Шашкин, А.М.Шкурко и др. Наиболее значимый вклад внес профессор Б.Б.Кудряшов, который был бессменным научным руководителем данного направления с 1967 по 2002 г.

Созданы основы теории теплового [8, 18] и механического [4, 5, 9] разрушения льда, методики расчета технологических параметров бурения [5, 8, 17, 21]. Обоснован выбор рецептуры незамерзающей заливочной жидкости для предотвращения сужения ствола скважины под воздействием горного давления [1, 11, 19, 20] и повышающейся с глубиной естественной температуры льда, существенно изменяющей его вязкопластические свойства. Разработаны принципиально новые полуавтономные электротепловые и электромеханические буровые снаряды на грузонесущем кабеле (ТЭЛГА [12], ТБЗС [13], ТБС-ВЧ [7], КЭМС [14]), комплексы стационарного и передвижного бурового оборудования [8], системы контроля и автоматизированного управления процессом бурения. Разработаны и освоены специальные методики и аппаратура комплекса геофизических исследований скважин [2, 6] в экстремальных условиях полярных ледников.

Отличительной особенностью этих работ является их ярко выраженная практическая направленность. Начиная с 13-й Советской антарктической экспедиции (САЭ, 1967) сотрудники кафедры технологии и техники бурения скважин, а также других кафедр СПГГИ участвовали практически во всех Советских и затем Российских антарктических экспедициях (РАЭ) как в зимовочных, так и в сезонных составах. В ледниковом покрове Антарктиды (станция Восток, обсерватория Мирный, гляциологический профиль Мирный–Восток-1), а также в леднике архипелага Северная Земля пробурено, в общей сложности, более 18 тыс. метров с полным отбором ледяного керна.

Условно к глубоким относятся скважины, глубина которых превышает 1000 м, при этом скважина должна быть заполнена незамерзающей жидкостью, для предотвращения деформации стенок скважины под действием горного давления льда. Даже в таком холодном месте, как станция Восток, глубина «сухой» скважины не может превышать 1000 м, так как в очередном рейсе снаряд не может достигнуть забоя из-за катастрофического уменьшения диаметра скважины. Таким образом, «сухие» скважины считаются глубокими после 500 м.

Бурение глубоких скважин является сложным многофакторным процессом, эффективность выполнения которого во многом зависит от четкой организации

работ и бесперебойного снабжения электроэнергией и надежной работы всего используемого оборудования, включающего наземный комплекс, буровые снаряды и геофизические приборы.

НАЗЕМНОЕ БУРОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В наземный комплекс для бурения льда (рис. 1) входят следующие основные элементы: буровое здание, буровая лебедка, пульт управления, мачта и механизмы для обслуживания бурового снаряда, вспомогательные приспособления и инструменты.

В российских буровых комплексах мачта жестко крепится к основанию и может быть приведена в горизонтальное положение при выполнении монтажных и ремонтных работ. Все операции по обслуживанию бурового снаряда на поверхности при сооружении скважины проводятся при нахождении его в вертикальном положении. Для извлечения керна и шлама при механическом бурении или талой воды при тепловом бурении используются специальные устройства, позволяющие проводить операции по отсоединению колонковой трубы и фильтров со шламом от бурового снаряда и поузловую сборку и разборку бурового снаряда.

Буровое здание предназначено для защиты буровиков, приборов и оборудования от внешней среды. В суровых климатических условиях Центральной Антарктиды, особенно на станции Восток, российские специалисты используют буровые здания, собранные из теплозащитных панелей, которыми закрывается также и мачта. Как стационарные буровые здания, так и передвижные буровые комплексы собираются на базе стандартных саней, используемых для перемещения грузов в транспортных походах. В таких буровых зданиях обеспечиваются комфортные условия работы как в сезонные, так и в зимние периоды, когда температура атмосферного воздуха опускается ниже -50°C .

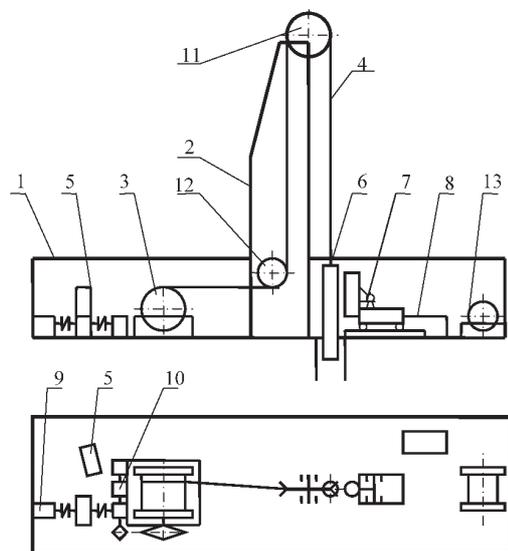


Рис. 1. Буровой комплекс на станции Восток:

1 – буровое здание; 2 – буровая мачта; 3 – буровая лебедка; 4 – грузонесущий кабель; 5 – пульт управления; 6 – буровой снаряд; 7 – устройство для монтажа бурового снаряда; 8 – генератор постоянного тока; 9 – основной привод буровой лебедки; 10 – привод равномерной подачи; 11 – верхний ролик; 12 – нижний ролик; 13 – геофизическая лебедка

БУРОВЫЕ СНАРЯДЫ

Термобуровой снаряд ТЭЛГА-14М (рис. 2а) предназначен для бурения сухих скважин.

Формирование забоя происходит с помощью кольцевой коронки, а талая вода удаляется с забоя за счет призабойной циркуляции воздушного потока. Циркуляционная система снаряда состоит из водоподъемных трубок, водосборного бака, системы обогрева и турбокомпрессора, создающего разрежение в баке для подъема воды. За счет резкого падения скорости потока в водосборном баке происходит гравитационное разделение: вода аккумулируется в нижней части бака, а воздух выбрасывается в затрубное пространство. После заполнения керноприемной трубы керном или водосборного бака водой, снаряд отрывается от забоя, ножи кернорвального устройства врезаются в керн, отрывают его от забоя и удерживают в керноприемной трубе при подъеме на поверхность. На поверхности керн извлекается из керноприемной трубы, из водосборного бака сливается вода.

Термобуровой колонковый снаряд ТБЗС-152М (рис. 2б). Отличие снаряда ТБЗС (рис. 2б) от снарядов для бурения «сухих» скважин типа ТЭЛГА заключается в использовании для удаления воды с забоя призабойной циркуляции заливочной жидкости, с чем связан ряд конструктивных отличий отдельных узлов бурового снаряда. Контроль за работой бурового снаряда в скважине ведется по показаниям забойных датчиков и приборов, включенных в цепи питания нагревательных элементов и насоса.

В *термобуровом снаряде ТБС-112ВЧ* (рис. 2в) с целью снижения потерь энергии в грузонесущем кабеле электроэнергия к забою подается по схеме «источник питания – повышающий трансформатор – грузонесущий кабель – понижающий трансформатор – электрические потребители снаряда». Для уменьшения габаритных раз-

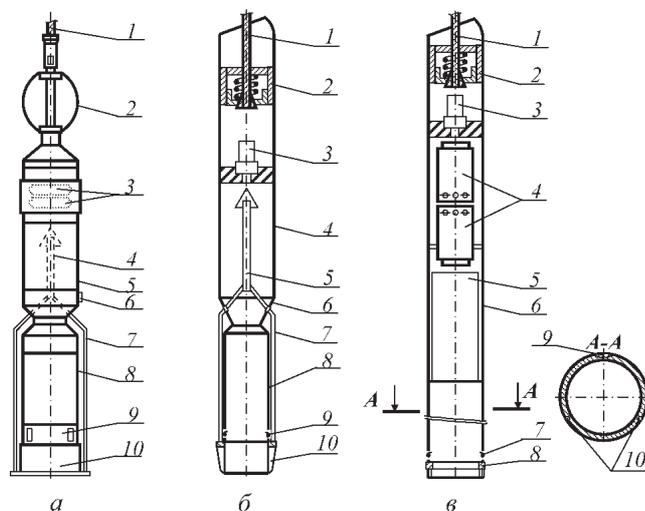


Рис. 2. Схемы термобуровых снарядов:

а – термобуровой снаряд ТЭЛГА-14: 1 – грузонесущий кабель, 2 – центратор, 3 – турбокомпрессор, 4 – центральная водоподъемная труба, 5 – водосборный бак, 6 – сливной клапан, 7 – водоподъемные трубки, 8 – колонковая труба, 9 – кернорватель, 10 – коронка; *б* – термобуровой снаряд ТБЗС-152М: 1 – грузонесущий кабель, 2 – кабельный замок, 3 – насос, 4 – центральная водоподъемная труба, 5 – водосборный бак, 6 – сливной клапан, 7 – водоподъемные трубки, 8 – колонковая труба, 9 – кернорватель, 10 – коронка; *в* – высокочастотный термобуровой снаряд ТБС-112ВЧ: 1 – грузонесущий кабель, 2 – кабельный замок, 3 – насос, 4 – трансформаторы, 5 – водосборный бак, 6 – колонковая труба, 7 – кернорватель, 8 – коронка

меров понижающих трансформаторов, устанавливаемых в термобуровом снаряде, используется переменный ток с частотой 1250 Гц.

Одним из принципиальных отличий снаряда ТБС-112ВЧ от снаряда ТБЗС-152М является работа системы удаления воды из скважины. Талая вода, попадая в бак, замерзает, так как бак не обогревается. На поверхности бак с замерзшей водой извлекается снаряда и заменяется пустым. Благодаря этому экономится большое количество энергии и снижается количество токоведущих жил в грузонесущем кабеле, а следовательно, уменьшаются его диаметр и вес.

Колонковый электромеханический буровой снаряд КЭМС-112 (рис. 3). Одной из основных задач создания эффективной технологии бурения глубоких скважин являлась разработка колонкового электромеханического снаряда для сквозного бурения ледников с выходом в подстилающие горные породы и, в частности, для завершения сверхглубокой скважины на станции Восток, проходка которой началась термобуровыми снарядами.

Работа электромеханического снаряда основывалась на общеизвестных принципах:

- передача вращения от вала погружного электродвигателя породоразрушающему инструменту через двухступенчатый планетарный редуктор и колонковую трубу;
- нейтрализация реактивного момента распорным механизмом, исключающим возможность вращения корпуса электродвигателя и грузонесущего кабеля;
- сбор шлама в процессе бурения осуществляется путем использования принудительной призабойной циркуляции с помощью специального насоса.

Подача на забой обеспечивается дополнительным приводом буровой лебедки с выбранной механической скоростью.

Надежное удаление разрушенной породы с забоя является необходимым условием эффективности процесса бурения. Экспериментальные исследования по удалению и аккумуляции шлама позволили обосновать наиболее надежную конструкцию, представляющую собой проточный коаксиальный сепаратор, оборудованный турбулизирующими и преломляющими поток окнами и фильтровальной сеткой, что отличает его от всех существующих конструкций механических снарядов для бурения скважин во льду.

Полевые испытания созданного оборудования проводились в 1984, 1986 и 1988 гг. на леднике Вавилова (арх. Северная Земля), где в 1988 г. была пробурена скважина глубиной 461 м. На глубине 457 м буровой снаряд вошел в подледниковые породы, бурение по которым производилось стандартной коронкой СА-1. Средняя механическая скорость бурения по сцементированному льду моренным отложениям и по горной породе, представленной мерзлой

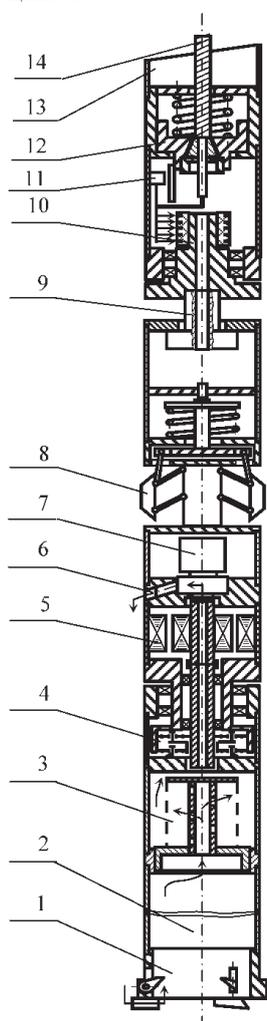


Рис. 3. Схема колонкового электромеханического бурового снаряда КЭМС-112:

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

глиной с включением большого количества обломочного материала осадочного происхождения, составила 1,5 м/ч. Всего по подледниковым породам пройдено 4 м, выход керна 100 %.

ЗАЛИВОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ

В качестве основного компонента заливочной жидкости, применяемой при бурении глубоких скважин во льду, используются различные виды авиационного топлива (табл. 1) [20].

Ввиду низкой плотности жидких нефтяных топлив при заполнении ими скважин во льду не обеспечивается полная компенсация горного давления ледяной толщи. Для утяжеления столба жидкости в практике бурения используются различные добавки хлорфторуглеродов (фреон-11, фреон-141b) и этиленовых углеводородов (перхлорэтилен, трихлорэтилен) (табл. 2) [20].

Авиационное топливо Jet A-1 является в настоящее время наиболее распространенным за рубежом реактивным топливом и выпускается в ряде стран Европы (Англии, Германии, Швейцарии) и США. Авиационное топливо JP-8 выпускается в США и по своим свойствам близко топливу Jet A-1.

Для глубокого бурения при температуре льда ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в Горном институте разработана рецептура низкотемпературной заливочной жидкости на углеводородной основе [1]. В качестве углеводородной основы было выбрано авиационное топливо марки ТС-1 по ГОСТ 102227-86, а в качестве утяжелителя был применен фреон-11 (CFC-11). При добавлении в керосин фреона одновременно с повышением плотности снижается вязкость смеси, что положительно сказывается на работе циркуляционной системы снаряда.

В 1987 г. в Монреале и в 1990 г. в Лондоне были приняты международные протоколы, согласно которым производство хлорфторуглеродов, которые способны разрушать озоновый слой, было сокращено на 50 % к 1995 г. и полностью прекращено к 2000 г. Учитывая это с 1995 г. на станции Восток используется дихлорфторэтан (HCFC 141b) вместо CFC-11.

Таблица 1

Свойства топлив, применяемых при бурении скважин во льду

Показатели	DF-A	ТС-1	Jet A-1	JP-8
Технические условия (страна)	FSVV-F-800 (США)	ГОСТ 10227-86 (Россия)	ASTM D1655 (США)	MJL T-83133 (США)
Плотность (числитель, $\text{кг}/\text{м}^3$ при температуре (знаменатель, $^{\circ}\text{C}$))	820,3/(15)	776–786/(20)	775–840/(15)	775–830/(15)
Кинематическая вязкость (числитель, $10^{-4}\text{ м}^2/\text{с}$ при температуре (знаменатель, $^{\circ}\text{C}$))	1,32/(37,8) 4,1/(-17,8) 8,42/(-32,0)	1,27–1,48/(20) 4,0–5,5/(-40)	<8/(-20)	–
Температура начала кристаллизации, $^{\circ}\text{C}$	–46	–60	–47	–46
Температура застывания, $^{\circ}\text{C}$	–57	–	–51	–
Температура вспышки (не ниже), $^{\circ}\text{C}$	38	28	38	–

Таблица 2

Свойства утяжелителей заливочных жидкостей на основе нефтяных топлив

Показатели	Фреон-11	Фреон-141b	Фреон-122	Перхлор-этилен	Трихлор-этилен
Химическая формула	CCl_2F	C_2HClF	$\text{C}_2\text{HCl}_2\text{F}_2$	C_2Cl_4	C_2HCl_3
Плотность при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	1487	1247,5	1569	1625	1464
Динамическая вязкость при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, мПа·с	0,444	0,8 (0°C)	–	0,88	0,58
Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	–111	–103	–140	–22	–86,4
Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$	23,7	31,7	71,8	121,2	87,2
Температура вспышки, $^{\circ}\text{C}$	не воспл.	не воспл.	не воспл.	не воспл.	32
ПДК, $\text{мг}/\text{м}^3$	5000	500	700	10	10

ГЛУБОКИЕ СКВАЖИНЫ НА СТАНЦИИ ВОСТОК

Основные работы по бурению и исследованию глубоких скважин во льду проводились российскими специалистами на станции Восток в Антарктиде. Начиная с 1967 г. по сегодняшний день пробурено 5 скважин различной глубины (рис. 4).

Скважина № 1Г (рис. 4а). В 1970 г. в период работы 15 САЭ на станции Восток было начато бурение первой глубокой скважины тепловым способом термобуровым снарядом ТЭЛГА-14. В мае 1972 г. скважина 1Г достигла глубины 952,5 м, что является до настоящего времени мировым рекордом бурения «сухих» скважин в ледниках. Из-за обрыва грузонесущего кабеля в очередном рейсе бурение этого ствола скважины было прекращено, и с устья скважины начато бурение нового ствола 1Г-2б. Бурение этого ствола скважины было закончено после ряда аварий в 19 САЭ в 1974 г. на глубине 905 м.

Скважина 3Г (рис. 4б). После неудачных попыток начать бурение глубокой скважины 2Г с помощью термобурового снаряда ТБЗС-152 в 20, 21 и 22-й САЭ буровые работы на станции Восток были приостановлены на один год для анализа полученных результатов, доработки технологии бурения с использованием заливочной жидкости и модернизации бурового снаряда. В ходе этих работ были внесены серьезные изменения в конструкцию отдельных узлов бурового снаряда и разработана система контроля и управления работой бурового снаряда.

В 25-й САЭ в 1980 г. было начато бурение глубокой скважины 3Г усовершенствованным термобуровым снарядом ТБЗС-152М. До глубины 112 м использовался термобуровой снаряд ТЭЛГА-14М, затем бурение продолжено снарядом ТБЗС-152М. При односменной работе к концу 25-й САЭ скважина достигла глубины 1351 м, а в сезонный период в 26-й САЭ глубины 1501 м. В эту экспедицию впервые было использовано небольшое количество утяжелителя СФС-11.

В 26 САЭ с глубины 1501 м бурение скважины 3Г было продолжено высокочастотным буровым снарядом ТБС-112ВЧ. В 30-й САЭ скважина достигла рекордной на то время глубины – 2202 м, а в 31-й САЭ на глубине 1943 м произошла авария, грузонесущий кабель был оторван от кабельного замка снаряда, и дальнейшие буровые работы в скважине 3Г были прекращены.

Скважина 4Г (рис. 4в). Бурение скважины 4Г было начато 3 июля 1983 г. на новом буровом комплексе, строительство которого было закончено в 28-й РАЭ. До глубины 120 м использовался снаряд ТЭЛГА-14М, затем бурение было продолжено термобуровым снарядом ТБЗС-152-2М с использованием заливочной жидкости.

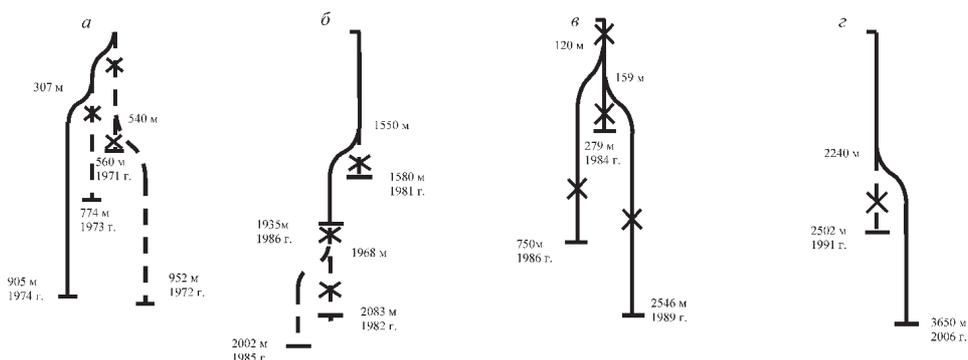


Рис. 4. Схемы глубоких скважин на станции Восток:

а – 1Г; б – 3Г; в – 4Г; г – 5Г

К середине зимовочного периода 34-й РАЭ после ряда аварий, повлекших за собой работы по отклонению от аварийных стволов, скважина 4Г достигла глубины 2428 м, и бурение было продолжено электромеханическим снарядом КЭМС-112. На глубине 2546 м буровой снаряд оказался прихваченным на забое скважины. При попытке ликвидации аварии грузонесущий кабель лопнул на поверхности, и скважина была полностью потеряна. Причины этой аварии стали ясны лишь в процессе буровых работ в 40-й РАЭ при бурении скважины 5Г механическим буровым снарядом.

Скважина 5Г (рис. 4г). В январе 1990 г. буровой комплекс был передвинут с устья аварийной скважины 4Г на 25 м в западном направлении, и 20 февраля была забурена скважина 5Г. До глубины 120 м использовался снаряд ТЭЛГА-14М для прохождения снежно-фирновой проницаемой зоны, затем бурение было продолжено снарядом ТБЗС-152М. В течение двух зимовочных периодов 35-й и 36-й РАЭ проходка скважины велась без серьезных осложнений, все системы бурового снаряда функционировали в нормальном рабочем режиме.

В конце декабря 1991 г. во время подъема снаряда из скважины он оказался прихваченным на отметке 2259 м (глубина скважины в этот момент была равной 2502,7 м). Все попытки по извлечению снаряда из скважины оказались безуспешными, и грузонесущий кабель был оторван от кабельного замка снаряда.

В 37-й РАЭ (1992 г.) было выполнено отклонение ствола скважины от аварийного участка снарядом ТБЗС-132 с двухметровой колонковой трубой при общей длине 6 м. После проходки 14 м в интервале 2232–2246 был получен керн полного диаметра, и новый ствол получил название 5Г-1. С глубины 2249,5 м бурение продолжено снарядом ТБЗС-132 с трехметровой колонковой трубой при общей длине 8 м.

Начиная с 1992 г. бурение скважины и исследования керна проводились в рамках Международного Соглашения между Россией, Францией и США. Получаемый керн распределялся поровну между участниками соглашения. В соответствии с этим Соглашением французская сторона оказывала техническую и материальную поддержку буровых работ, американская — занималась помощью в доставке на станцию людей и грузов. В течение последних месяцев 1992 г. и зимовочного периода 38-й РАЭ (1993 г.) бурение проводилось без особых осложнений, и скважина успешно достигла глубины 2755,3 м. На этом бурение скважины термобуровыми снарядами было закончено. В дальнейшем использовался электромеханический буровой снаряд КЭМС-132. В сезоне 39-й РАЭ не удалось доставить на станцию Восток топливо для работы в зимовочный период и зимовочный состав станции, из-за чего было принято решение законсервировать станцию Восток на год до ноября 1993 г.

В 40-ю РАЭ (1995 г.) бурение было возобновлено электромеханическим снарядом. За зимовку скважина была углублена с 2755 м до 3109 м. В дальнейшем работы проводились только в сезонные периоды, и к концу января 1998 г. (сезон 43-й РАЭ) была достигнута глубина 3623 м. После окончания работ в сезоне 43-й РАЭ скважина была законсервирована. Буровые работы в скважине 5Г-1 были успешно возобновлены через 8 лет в сезоне 51-й РАЭ, и в конце января 2006 г. была достигнута глубина 3650 м.

Перед началом бурения механическим способом участок скважины в интервале 2200–2755 м был расширен до диаметра 139 мм. В процессе бурения механическим способом (максимальный наружный диаметр коронки по резцам 135 мм) пройденные участки скважины периодически расширялись.

В настоящее время скважина 5Г-1 является самой глубокой в мире скважиной во льдах и представляет собой сложное многоступенчатое сооружение. В верхней

части скважины установлена пластиковая обсадная колонна до глубины 120 м с внутренним диаметром 165 мм. До глубины 2200 м скважина пройдена термобуром ТБЗС-152 с наружным диаметром коронки 152 мм и ее минимальный диаметр равен 153 мм. Минимальный диаметр скважины по интервалам глубин составляет: 2200÷3095 м – 139 мм; 3095÷3321 м – 138,4 мм; 3321÷3500 м – 137,9 мм; 3500÷3650 м – 136,2 мм. Общий объем заливочной жидкости (смесь авиационного топлива ТС-1, СФС и фреона F-141b) в скважине составляет около 60 м³. Уровень заливочной жидкости в январе 2006 г. находился на глубине 95 м, ее средняя плотность равнялась 928 кг/м³. До глубины 2200 м скважина практически вертикальна, затем угол отклонения оси скважины от вертикали изменяется в пределах от 6 до 8°.

Забой скважины 5Г-1 (3650 м) находится примерно на 100 метров выше поверхности подледникового озера, обнаруженного в районе станции Восток [16]. Исходя из практических и экономических соображений (связанных с организацией и логистическим обеспечением бурения новой скважины), а также учитывая геополитические интересы России в Антарктиде, наиболее целесообразно использовать для изучения озера Восток уже существующую скважину 5Г-1. В рамках совместного проекта СПГГИ и ААНИИ разработана экологически чистая технология проникновения в подледниковое озеро Восток [15, 22]. Государственная экологическая экспертиза РФ вынесла по проекту положительное заключение, которое было утверждено Министерством природных ресурсов РФ 26 марта 2001 г. В соответствии с разработанной технологией осталось пробурить 70 м, после чего можно будет приступать к непосредственному вскрытию подледникового озера.

Выдающиеся результаты в бурении скважин как тепловым, так и механическими способами позволили нашей стране занять лидирующее положение в мире в области глубокого бурения льда. Об эффективности и надежности разработанных технологий можно судить по стабильности, с которой проходило бурение глубокой скважины 5Г-1.

Исследования глубоких скважин на станции Восток и непрерывной колонки ледяного керна, извлеченного из скважины 5Г-1, возраст которого превышает 500 тыс. лет, уже позволили получить значительные научные результаты:

- учеными России (ААНИИ, Институт географии РАН), Франции (Лаборатория гляциологии и геофизики окружающей среды Национального центра научных исследований) и США (Университет Майами) по изотопным и гляциологическим исследованиям ледяного керна впервые установлена цикличность изменения климата на Земле, прослежены четыре ледниковых и межледниковых периода;

- разработана методика асептического отбора микробиологических проб из керна льда и доказана на уровне научного открытия (Диплом № 16) длительность анабиоза микроорганизмов более 200 тысяч лет (СПГГИ совместно с Институтом микробиологии РАН и ААНИИ);

- впервые для центральной части Антарктиды получены данные о температурном режиме ледникового покрова, которые легли в основу математического моделирования процессов тепломассопереноса в леднике.

Продолжение бурения скважины 5Г-1 и проникновение в подледниковое озеро позволит получить уникальные материалы для исследований в области палеоклиматологии, микробиологии, гляциологии, геофизики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. № 992562 СССР. Промышленная жидкость для бурения в низкотемпературных ледовых отложениях. Кудряшов Б.Б., Пашкевич В.М. Чистяков В.К. Опубли. 1983. Бюл. № 4. С. 117.

2. *Блинов К.В., Вострецов Р.Н., Дмитриев Д.Н.* Распределение температуры в толще ледникового покрова Антарктиды по профилю обс. Мирный – ст. Восток // *Материалы гляциологических исследований*. М.: МГИ, 1987. Вып. 60. С. 159–163.
3. *Бобин Н.Е., Васильев Н.И., Кудряшов Б.Б., Степанов Г.К., Талалай П.Г.* Механическое бурение скважин во льду: Учебное пособие. Л.: ЛГИ, 1988. 90 с.
4. *Васильев Н.И., Зубков В.М.* Экспериментальные исследования процесса резания льда // *Записки Горного института*. СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). 2001. Т. 148 (2). С. 130–133.
5. *Васильев Н.И.* Некоторые особенности процесса колонкового бурения скважин полуавтономными снарядами на грузонесущем кабеле // *Антарктика*. М.: Наука, 1989. Вып. 28. С. 161–166.
6. *Вострецов Р.Н., Дмитриев Д.Н., Путиков О.Ф.* Основные результаты геофизических исследований глубоких скважин и ледяного керна в Восточной Антарктиде // *Материалы гляциологических исследований*. М.: МГИ, 1984. Вып. 51. С. 172–178.
7. *Загрянный Э.А., Моисеев Б.С., Шкурко А.М.* Результаты полевых испытаний высокочастотного термобурового комплекса ТБС-112 ВЧ при бурении глубокой скважины в низкотемпературном ледниковом покрове (станция Восток) // *Записки ЛГИ*. Л.: ЛГИ, 1983. Т. 105. С. 103–107.
8. *Кудряшов Б.Б., Чистяков В.К., Литвиненко В.С.* Бурение скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород. Л.: Недра, 1991. 295 с.
9. *Кудряшов Б.Б., Чистяков В.К., Морев В.А.* Бурение ледникового покрова Антарктиды тепловым способом // 25 лет Советской антарктической экспедиции. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 149–158.
10. *Морев В.А.* Электротермобуры для бурения скважин в ледниковом покрове // *Материалы гляциологических исследований*. М.: МГИ, 1976. Вып. 28. С. 118–120.
11. *Пашкевич В.М., Чистяков В.К.* О разработке специальных буровых растворов для бурения ледникового покрова Антарктиды // *Записки ЛГИ*. Л.: ЛГИ, 1982. Т. 93. С. 72–78.
12. Патент РФ № 1149670 от 11.08.94. Устройство для электротермического бурения-плавления скважин во льду с отбором керна. Кудряшов Б.Б., Чистяков В.К., Шкурко А.М., Земцов А.А.
13. Патент РФ № 1513981 от 11.08.94. Устройство для электротермического бурения плавления скважин во льду. Земцов А.А., Кудряшов Б.Б., Шкурко А.М., Чистяков В.К.
14. Патент РФ № 1472613 от 20.07.94. Колонковый электромеханический буровой снаряд. Кудряшов Б.Б., Васильев Н.И., Чистяков В.К., Уфаев В.В.
15. Патент РФ № 2182225 от 10.05.2002. Термобуровой пробоотборник. Кудряшов Б.Б., Васильев Н.И., Дмитриев Д.Н., Барков Н.И., Веркулич С.Р., Саватюгин Л.М.
16. *Попков А.М., Веркулич С.Р., Масолов В.Н., Лукин В.В.* Сейсмический разрез в районе станции Восток (Антарктида) – результаты исследований 1997 г. // *Материалы гляциологических исследований*. М.: МГИ, 1999. Вып. 86. С. 152–159.
17. *Талалай П.Г.* Тепловой режим разрушения льда при вращательном бурении // *Записки Горного института*. СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2001. Т. 148 (2). С. 130–133.
18. *Чистяков В.К., Саламатин А.Н., Фомин С.А., Чугунов В.А.* Тепло-массоперенос при контактном плавлении. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1984. 176 с.
19. *Чистякова В.К., Талалай П.Г., Яковлева А.А.* Промывочные среды для бурения скважин в мерзлых породах. М.: Геоинформмарк, 1999. 78 с.
20. *Talalay P.G., Gundestrup N.S.* Hole fluids for deep ice core drilling // *Memoir of National Institute Polar Research*. Tokyo: National Institute Polar Research, 2002. Special Issue 56. P. 148–170.
21. *Vasiliev N.I.* Some features of ice drilling technology by drill on a hoisting cable // *Memoir of National Institute Polar Research*. Tokyo: National Institute Polar Research, 2002. Special Issue, 56. P. 136–141
22. *Verkulich S.R., Kudryashov B.B., Barkov N.I., Vasiliev N.I., Vostretsov R.N., Dmitriev A.N., Zubkov V.M., Krasilev A.V., Talalay P.G., Lipenkov V.Ya., Savatyugin L.M.* A Project of Penetration and Exploration of Sub-glacial Lake Vostok, Antarctica // *Memoir of National Institute Polar Research*. Tokyo: National Institute Polar Research, 2002. Special Issue, 56. P. 245–252.

N.I.VASILIEV

DEEP DRILLING IN ANTARCTIC ICE SHEET AS METHOD OF
PALEOCLIMATE INVESTIGATIONS

Core drilling in ice sheets is the only mean of the sampling for studying of ice masses structure, material constitution and dynamics. Russian scientists made a substantial contribution in developing of ice drilling theory and technology. By the instrumentality of Russian equipment the large quantity bore-holes has been drilled in Arctic and Antarctic glaciers letting many investigations in glaciology, paleoclimatology, biology and other fields. Due to our breakthroughs Russia became one of the leaders in the in the domain of deep ice drilling. The high-performance «off-the-shelf» technology is reliable and quite stable what was confirmed by drilling of the deepest 5G-1 bore-hole at Vostok station in Antarctica.