

УДК 622.243.5

50 лет научному прорыву в исследовании Земли.

Кольская сверхглубокая скважина: путь к энергетическому и сырьевому обеспечению человечества

А.С. Поваляхин - доктор техн. наук

Мировой опыт строительства скважин глубиной свыше 9000 м ограничивается реализованными проектами глубокого и сверхглубокого бурения в СССР, КТБ (ФРГ) и программ бурения в океане Монол, DSDP, ODP (США) и некоторых других проектов (таблица 1).

Сверхглубокое бурение представляет собой многоцелевую проблему, затрагивающую интересы большинства наук о Земле.

Основные цели строительства сверхглубоких скважин:

- выяснение особенностей проявления геологических процессов, включая процессы рудообразования;
- выяснение геологической природы сейсмических границ раздела в континентальной земной коре и получение данных о тепловом и водном режиме недр;
- получение информации о составе горных пород и их физико-механическом состоянии, особенно в зоне между «гранитными» и «базальтовыми» слоями земной коры;

- усовершенствование имеющихся техники и технологии и создание новой техники и технологии сверхглубокого бурения и комплексного оборудования для проведения геофизических исследований в скважине.

В основе данной статьи материалы из доклада Н.И. Андрианова, М.И. Ворожбитова, Д.М. Губермана и Б.Н. Хахаева «Сверхглубокое бурение для изучения земной коры»), результаты диссертационных исследований О.К. Рогачёва «Исследование и совершенствование забойных средств контроля и управления искривлением скважин» (ВНИИБТ, М., 1976 г.). Значительное количество материала было использовано из монографии «Кольская сверхглубокая», М.: Недра, 1984 по редакции профессора Е.А. Козловского.

В статье особое внимание уделено технологическим мероприятиям по предупреждению искривления ствола скважины, которые применялись при бурении сверхглубокой скважины на Кольском полуострове. Рассмотрены также другие аспекты технологии сверхглубокого бурения.

Технологии, реализованные в процессе проводки этой уникальной скважины, были разработаны отечественными учёными и инженерами и многие до сих пор не имеют аналогов в мировой практике бурения.

Таблица 1. Сверхглубокие скважины.

Номер скважины	Название скважины	Период бурения	Глубина, м
СГ-1	Аралсорская	1962-1971	6800
СГ-2	Биикжальская	1962-1971	6028
СГ-3	Кольская	1970-1992	12 262
СГ-4	Уральская	1985-2004	6015
СГ-5	Тимано-Печорская	1984-1993	6904
СГ-6	Тюменская	1987-1996	7502
СГ-7	Ен-Яхинская	2000-2006	8250
СГ-8	Криворожская	1984-1993	5382
СГ-9	Днепроовско-Донецкая	1983-н/д	5691
СГ-10	Мурунтауская	1984-н/д	3000
1	Шевченковская	1975-1982	7520
СГ-1	Саатлинская	1977-1990	8324
-	Цистердорф (Австрия)	н/д	8553
-	Берта Роджерс (США)	1973-1974	9583
-	КТБ Оберпфальц (ФРГ)	1987-1995	9101

Программа сверхглубокого бурения

Развитие науки и техники во второй половине XX века во многом определялось соперничеством между геополитическими блоками, возглавляемыми СССР и США. Если достижения в космосе широко освещались, то технологическая гонка в сверхглубоком бурении шла не так явно, но не менее напряжённо.

Начатый США в 1961 г. проект «Мохол» («Mohole») был направлен на достижение путём глубоководного бурения границы мантии Земли. С 1961 г. по 1966 г. при глубине океана 3 500 м вблизи о. Гуадалупе было пробурено несколько скважин глубиной до 183 м, но пройти земную кору и выйти к мантии не удалось. В 1968 г. в Соединённых Штатах было спущено на воду судно «Гломар Челленджер» («Glomar Challenger»), специально построенное для реализации программы глубоководного бурения, осуществлялась подготовка к сверхглубокому бурению в ФРГ.

В 1960-1962 гг. Академией наук СССР, Министерством геологии и Государственным комитетом по топливной промышленности при Госплане СССР были разработаны предложения об организации изучения глубинного строения Земли. На основе этих предложений Государственным комитетом Совета Министров СССР по координации научно-исследовательских работ была согласована и утверждена первая программа по изучению недр Земли в процессе сверхглубокого бурения.

Для организации, координации и практического руководства работами по глубинному изучению земных недр в 1963 г. был образован Межведомственный научный совет по проблеме «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение», который объединил крупных ученых и специалистов научных и производственных организаций различных министерств и ведомств. Первым (до 1965 г.) председателем Межведомственного научного совета был Министр геологии СССР, член-корреспондент, а затем академик АН СССР А.В. Сидоренко, затем им стал профессор, доктор технических наук Н.С. Тимофеев, внесший большой вклад в организацию работ по созданию буровой техники и технологии проводки скважин, а также бурению Кольской сверхглубокой скважины на первом этапе.

В 1974 г. председателем научного Совета по проблеме глубинного изучения Земли и сверхглубокого бурения

был назначен в то время заместитель Министра, а затем Министр геологии СССР Е.А. Козловский. В течение многих лет большую работу по координации исследований, направленных на реализацию программы сверхглубокого бурения, вёл ученый секретарь Межведомственного научного совета по этой проблеме Н.И. Андрианов.

Программой работ на 70-е годы намечались: разработка модели строения земной коры и верхней мантии, а также новых методов прогноза месторождений полезных ископаемых, составление прогнозных карт с количественной оценкой природных ресурсов и запасов, определение направления поисковых и разведочных работ на основные виды полезных ископаемых в перспективных районах страны.

В развитие данной проблемы был разработан принципиально новый технический и методический подход к решению регионального глубинного строения земной коры и верхней мантии, основанный на комплексировании данных сверхглубокого и глубокого бурения, а также сейсмического глубинного зондирования и других геофизических и геохимических методов исследований. Для территории СССР была разработана система взаимной увязки данных геофизических профилей, опирающаяся на опорные сверхглубокие скважины.

По программе к бурению были намечены в первую очередь Кольская и Саатлинская сверхглубокие скважины.

Головной организацией в осуществлении намеченных задач было определено Мингео СССР, а для реализации программы привлечено более 150 научных и производственных организаций этого министерства, институты АН СССР, академий союзных республик, Минвуза СССР и Минвуза РСФСР, отраслевых министерств и ведомств.

Техническая реализация программы началась в проблемной лаборатории сверхглубокого бурения во Всесоюзном научно-исследовательском институте буровой техники (ВНИИБТ) Министерства нефтяной промышленности СССР. Лаборатория, руководимая Н.С. Тимофеевым, разработала предложения по созданию техники и технологи бурения скважин на глубину до 15 тыс. м.

Задачи Кольской сверхглубокой скважины

Кольская сверхглубокая скважина задумывалась в качестве фундаментального научно-исследовательского проекта, нацеленного на изучение недр нашей планеты



А.В. Сидоренко



Е.А. Козловский



Н.И. Андрианов



Николай Степанович Тимофеев

и процессов, идущих в них (хотя предполагался и практический результат – обнаружение новых залежей медно-никелевых руд). Одна из основных задач бурения скважины заключалась в достижении гипотетического базальтового слоя земной коры. Предположение о том, что континентальная кора состоит из верхнего гранитного и нижнего базальтового слоёв строилось на основе сейсмических данных, свидетельствующих об увеличении плотности горных пород с глубиной.

Главные задачи бурения Кольской скважины состояли в изучении глубинного строения и рудоносности древней континентальной коры, а именно [1]:

- получение глубинного геологического разреза;
- всестороннее исследование состава горных пород и характера изменения их физических свойств с глубиной;
- выяснение особенностей проявления эндогенных геологических процессов в глубоких частях земной коры и связи с ними процессов рудообразования;
- выяснение геологической природы глубинных геофизических границ и геофизических параметров геологических толщ горных пород.

Основой решения этих вопросов должны быть результаты изучения ядра геологическими, петрографическими, минералогическими, геохимическими методами с применением оптических, рентгеновских, микронзондовых, термических, спектроскопических, химико-аналитических и других способов анализа.

Важной задачей являлась отработка технико-технологических решений бурения скважин на большие и сверхбольшие глубины.

Выбор места бурения

Кольская сверхглубокая скважина (государственный индекс – СГ-3) заложена в северо-западной части Кольского полуострова в 10 км от города Заполярный с координатами устья 69° 25' с.ш. и 30° 44' в.д., где развиты древнейшие на Земле рудоносные тектонические структуры раннего протерозоя и архея.

Эта часть Балтийского щита изучена глубинным сейсмическим зондированием. Имеются детальные магнитные и гравиметрические карты, а также результаты бурения скважин.

Учитывалось, что за многие миллионы лет была разрушена поверхность Балтийского щита, особенно в северо-восточной его части. При этом были обнажены древние архейские образования планеты, не затронутые мощными процессами эрозии.

Предполагалось, что до глубины 5 км идёт гранитная толща, после неё ожидали встретить более прочные и более древние базальтовые породы.

Предполагалось также, что на Балтийском щите геотермический градиент ниже, чем в других геологических регионах и составляет 1,0-1,2 °С на 100 м глубины, что существенно облегчало условия бурения скважины. Кроме того, кристаллические горные породы Балтийского щита имеют высокую прочность, что предполагает применение упрощённой конструкции скважины.

Выбору места для бурения сверхглубокой скважины также способствовало и то, что здесь находится печенгский прогиб балтийского щита. И именно здесь расположены крупные медно-никелевые месторождения.

Организация работ

Бурение Кольской скважины было поручено специально организованной Кольской геологоразведочной экспедиции (Кольская ГРЭ) объединения «Волгокамскгеология» (с 1986 г. – объединение «Недра») Мингео СССР.

На скважине одновременно работали до 3 000 специалистов и 16 научно-исследовательских лабораторий. Начальником Кольской ГРЭ стал советский ученый Давид Миронович Губерман, начальником буровой установки – Алексей Батищев, главным инженером – Иван Васильченко, в команду геологов вошли геологи Юрий Кузнецов, Юрий Смирнов и Владимир Ланев [2].

Научная программа сверхглубокого бурения

Н.А. Беляевский и В.В. Федьинский в программе сверхглубокого бурения поставили задачу – получить при помощи ограниченного числа скважин представление о разрезе земной коры, начиная от осадочного чехла и кончая «базальтовым» слоем и границей Мохоровичича [3]. Глубина планируемых скважин оценивалась ими в 15 км. Места расположения скважины были выбраны таким образом, чтобы каждая скважина



Давид Миронович Губерман

полностью вскрывала какой-либо сейсмический слой, наиболее развитый в месте бурения, а все скважины в сумме позволили бы получить представление о различных слоях и типах континентальной коры. Осадочный слой должны были вскрыть скважины в Прикаспии, где толщина его максимальная. Скважина на Урале предназначалась для исследования строения осадочного слоя в геосинклинальном прогибе, где он видоизменен процессами вулканизма, метаморфизма и гидротермальной деятельности. Скважина в Карелии планировалась для вскрытия «базальтового» слоя. Для изучения состава «базальтового» слоя в двух различных по тектонической истории зонах (межгорная Курильская впадина и Курильская гряда) планировались еще две скважины. Скважина на Южных Курилах в случае успешного бурения должна была достичь раздела Мохоровичича, т.е. подошвы земной коры.

Важным шагом на пути к изучению глубинного строения недр было создание в 1964 г. во Всесоюзном научно-исследовательском институте буровой техники (ВНИИБТ) Проблемной лаборатории по бурению на мантию, которую возглавил профессор Николай Степанович Тимофеев (1912—1973 гг.), а его сподвижником для решения этой проблемы был член-корр. РАН Белоусов Владимир Владимирович.

Коллектив лаборатории в течение 1964–1966 гг. провел научный анализ технических проблем строительства сверхглубоких скважин и наметил стратегические пути решения стоящих задач. Были проанализированы все типы геологических условий, характерные для земной коры: изверженные горные породы, осадочные отложения, комбинации осадочных и изверженных горных пород, условия минимальной мощности земной коры, где возможно вскрытие поверхности Мохоровичича. Был сделан вывод о том, что для последовательного наращивания технического потенциала в соответствии с принципом от простого к сложному целесообразно решать проблему с соблюдением очередности бурения скважин, а именно в последовательности 1—3—2—4 названных разрезов земной коры. Так появилось решение о первоочередности бурения Кольской скважины (СГ-3) в кристаллических породах Балтийского щита, а затем – Саатлинской для вскрытия и изучения комбинированного геологического разреза.

Специалистами ВНИИБТ был закончен и утвержден Министерством геологии СССР технический проект первого этапа бурения (до 7000 м) Кольской скважины СГ-3 (авторы проекта Н.С. Тимофеев, М.И. Ворожбитов, Д.М. Губерман, О.Ю. Бергштейн, Р.В. Вугин, В.О. Белоруссов, А.Н. Кечекезян). Проект обустройства скважины был разработан Гипрогеолстроем (гл. инженер проекта Г.И. Соколов), институтом ВНИИнефтемаш создан манифольд высокого давления (зав. лабораторией А.С. Николич) и циркуляционная система промысловой жидкости (зав. отделом М.Ш. Вартолетов). Институтом "ВНИИКАнефтегаз" в это же время был разработан комплекс измерительной аппаратуры технологического назначения для буровой установки (гл. инженер проекта В.С. Басович), а институтом "ВНИИэлектропривод" совместно с НИИтяжмаш и заводом "Уралмаш" – проект электрической части буровой установки (ведущие специалисты – Б.М. Парфенов и М.В. Мамкин).

Буровую установку «Уралмаш-15000» разработала конструкторская группа завода «Уралмаш» под руководством Г.В. Алексеевского. Мощные насосы (1820 л.с.)

спроектировали Ю.С. Корнильцев, Л.Н. Горонович, В.В. Герасимов, вышку – А.Г. Спириуков, лебедку – В.А. Малофеева, механизмы автоматизации спуско-подъемных операций – В.Н. Грамолин, талевую систему – В.И. Разуваев, вертлюг – А.И. Лазарев и В.А. Казанцев [4].

Н.С. Тимофеев и сотрудники Проблемной лаборатории ВНИИБТ обосновали перспективность технологии бурения гидравлическими забойными двигателями.

Значительным шагом в выборе стратегических решений в области техники и технологии бурения сверхглубоких скважин можно считать применение бурильных труб из легких алюминиевых сплавов (ЛБТ). При этом удалось получить решающее преимущество по сравнению с типовой технологией бурения, которое состояло в значительном снижении веса бурильной колонны.

В пользу технологии турбинного бурения в сочетании с ЛБТ были следующие доводы:

- возрастание с ростом глубины сил сопротивления в скважине в меньшей степени увеличивает напряженное состояние бурильной колонны, чем при стальных бурильных трубах (СБТ);

- примерно в 2,0–2,5 раза уменьшаются прижимающие усилия бурильной колонны к стенке ствола и примерно в 2 раза снижаются силы трения в скважине;

- одноразмерная по наружному диаметру бурильная колонна способствует снижению гидравлических сопротивлений;

- повышается усталостная прочность бурильной колонны, снижаются отрицательные последствия вибраций;

- сокращается время спуско-подъема бурильного инструмента.

Вместе с тем большая глубина скважины ставит жесткие ограничения на использование труб ЛБТ из-за сравнительно низкой термостойкости и прочности алюминиевых сплавов. Кольская скважина пробурена при помощи ЛБТ из сплавов повышенной (более 200 °С) термостойкости и повышенной прочности. В создании таких труб участвовали коллективы ВНИИБТ (В.Ф. Штамбург, Р.А. Утешев), ВНИИТнефть (Г.М. Фаин, А.С. Неймарк), ВИЛС, ВИАМ в тесном содружестве с заводом КМЗ им. В.И. Ленина [3].

Оценивая принципы выбора конструкции скважин, сотрудники Проблемной лаборатории ВНИИБТ в 1966 г. пришли к выводу о необходимости коренного изменения подхода к проектированию конструкции сверхглубоких скважин. Это было связано с отсутствием точных сведений о геологических и физико-механических характеристиках горных пород и условиях их залегания при глубинах, превышающих достигнутые показатели на тот момент времени. Проблема состояла в том, что из-за низкой достоверности исходных геологических данных отсутствовала возможность определить необходимое число обсадных колонн и глубину их спуска. Поэтому был разработан принципиально новый технологический подход, при котором конструкция скважины формировалась непосредственно в ходе строительства скважины на основании текущей информации о геологическом разрезе.

Такая технология упреждающего проектирования конструкции скважины заключается в следующем.

Диаметр направления и кондуктора выбирается с учетом возможного спуска промежуточных обсадных колонн.

Бурение пилотного ствола осуществляется до границы несовместимого по условиям бурения интервала. Затем пилотный ствол расширяется под спуск промежуточной

обсадной колонны. Углубление скважины продолжается после спуска и цементирования промежуточной обсадной колонны.

Таким образом, к 1966 г. Проблемной лабораторией ВНИИБТ были сформулированы основные принципы технологии бурения на недоступные ранее глубины, которые базировались на использовании отечественного способа бурения забойными двигателями, применении легкосплавных бурильных труб (ЛБТ), на технологии проводки скважины методом опережающего ствола. Это позволило обосновать технические требования для специальной буровой установки.

После всестороннего обсуждения на межведомственном научном совете по проблеме «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение» Государственный комитет по науке и технике СССР технические требования были переданы Научно-исследовательскому институту тяжелого машиностроения для разработки технической документации и последующего изготовления на заводе «Уралмаш» двух опытных экземпляров буровой установки для сверхбольших глубин. Разработкой уникального оборудования руководили главный инженер проекта буровой установки Г.В. Алексеевский и главный конструктор Отдела буровых установок В.В. Рудоискатель.

Научно-исследовательские работы по созданию технических средств для бурения на недоступные ранее глубины развернулись во ВНИИБТ – генеральном проектировщике Кольской и Саатлинской скважин. Успешному решению сложных задач по созданию уникальных технических средств способствовал опыт института по разработке буровой техники для строительства скважин на нефть и газ. Для проходки скважин в крепчайших горных породах было создано несколько типов бурильных головок шарошечного типа с твердосплавным вооружением (конструкторы П.В. Крючков, Я.А. Эдельман, И.И. Барабашкин). Группой специалистов во главе с одним из создателей отечественных турбобуров Р.А. Иоаннесяном сконструированы высокомоментные турбобуры для условий глубинного бурения.

Первый этап проходки Кольской скважины (СГ-3)

Строительство комплекса объектов для бурения Кольской скважины началось в 1968 г., а скважина была забурена 25 мая 1970 г.

Бурение скважины на первом этапе осуществлялось с помощью серийной буровой установки «Уралмаш-4Э» (фото. 1)

Геологический разрез на всем протяжении первого этапа бурения был представлен высокопрочными крутонаклонными пластами слоистых горных пород.

Углубление с отметки 40 м велось опережающим (пилотным) стволом в основном шарошечными бурголовками диаметром 212,7 мм: КС -212.7/60 ТКЗ; 21Н-К 212.7/80 ТКЗ; КС 212.7/60 ТКЗ-Н; КС-212.7/60 ТКЗ-НУ; 15Н-К 214/60 КЗ; 1Н-К 214/60 ТЗ; ИСМ 214.3/60 Т и др. В компоновках для бурения с отбором керна использовался центратор ЦС-212.7 СТ.

Под кондуктор расширение ствола скважины производили расширителем РД-445/640, а под направление – РД-920.

Бурение сплошным забоем осуществлялось трёхшарошечными долотами III215.9 ТКЗ-ГНУ, а расширение ствола под съёмную колонну диаметром 245 мм – расширителем 4РШ 295.3/215.9 ТКЗ.

Принятый для бурения Кольской сверхглубокой скважины турбинный способ с отбором керна потребовал выполнения значительного объёма исследовательских и конструкторских работ для создания соответствующих горно-геологическим условиям бурения турбобуров. Главные направления совершенствования в основном сводились к снижению частоты вращения вала турбобура при сохранении высокой моментной характеристики, повышению термостойкости опорных и уплотнительных элементов турбобура, увеличению безотказности, моторесурса и надёжности.

В решении указанных задач были достигнуты существенные успехи, которые подтверждаются проходкой скважины на рекордную глубину с помощью отечественных забойных двигателей при температуре в скважине свыше 200 °С.

Кольскую сверхглубокую скважину до глубины 8000 м бурили высоко-моментными турбобурами А7Н4С с наклонной линией давления в бесшпиндельном исполнении и аналогичными шпиндельными турбобурами А7Ш.

В процессе проводки Кольской скважин удалось создать турбобур с редуктором, который позволил снизить частоту вращения вала до 100...200 об/мин. Такой режим работы увеличивает ресурс работы долота, повышает его производительность, что особенно важно при бурении на больших глубинах, когда каждый дополнительный метр проходки долотом значительно сокращает время непроизводительных работ по спуску и подъёму бурильной колонны. Сотрудники Пермского филиала ВНИИБТ под руководством Н.Д. Деркача, избрав маслонаполненный вариант выполнения редуктора, добились положительных результатов.

Первый этап бурения был завершён в мае 1975 г., когда скважина достигла глубины 7263 м. К этому времени был пересечён разрез раннепротерозойской печенгской вулканогенно-осадочной серии горных пород и скважина вошла в подстилающие их архейские гнейсы.



Фото 1. Буровая установка «Уралмаш-4Э» (общий вид).

Фактическая конструкция скважины СГ-3:

- направление \varnothing 720 мм – 40 м, ствол \varnothing 920 мм;
- кондуктор \varnothing 324 мм – 2000 м, ствол \varnothing 393,7 мм;
- съемная колонна \varnothing 245,5 мм – 2000 м, ствол \varnothing 295,3 мм;
- открытый ствол \varnothing 215,9 мм – ниже 2000 м.

Успешное осуществление первого этапа бурения Кольской скважины оказало решающее влияние на разработку оптимального пути развития сверхглубокого бурения. Одним из важнейших технических достижений первого этапа бурения была отработка технологии проводки скважин в кристаллических породах до 7 км при помощи бурового оборудования и инструмента отечественного производства.

Результаты первого этапа строительства скважины СГ-3 подтвердили высокую эффективность основных проектных технико-технологических решений.

Второй этап бурения Кольской скважины (СГ-3)

После завершения в 1975 г. первого этапа проводки Кольской скважины буровая установка «Уралмаш-4Э» была демонтирована, а на её месте возведен специально созданный комплект бурового оборудования «Уралмаш 15000» (фото 2) грузоподъемностью 400 т с максимальной автоматизацией и бесступенчатым регулированием основных технических процессов за счёт применения привода на постоянном токе.

Монтаж бурового комплекса был закончен в 1976 г. и начался второй этап бурения.

На Кольской сверхглубокой скважине в процессе работ использовалась система контроля и управления процессом буровых работ. Реализована информационно-измерительная система (ИИС СГ), включающая три основные программно-аппаратные подсистемы: подготовка к рейсу, контроль бурения, итоги рейса. С учётом особенностей бурения в кристаллических породах основной задачей системы контроля являлось распознавание критических технологических ситуаций, таких как посадки и затяжки при СПО, подклинка низа бурильной колонны, подклинка корпуса забойного двигателя, износ опор долота, износ вооружения долота, промыв КНБК, нарушение режима работы насосов, смена разбуриваемых пород.

В процессе второго этапа бурения Кольской скважины был решён ряд сложных технических проблем. Так, на глубинах более 8 км контролировать работу долота по наземным датчикам и приборам оказалось практически невозможным.

Возникла необходимость в поиске новых решений. Исследования выявили перспективность гидравлического канала связи для передачи информации от забойных датчиков на поверхность методом частотной модуляции импульсов давления в жидкости. Обоснование этому методу было дано специалистами ВНИИБТ Варламовым В.П. и Рогачевым О.К. [5].

В интервале 8028–8914 м были испытаны низкооборотные высокомоментные турбобуры А7ГТШ

и ТРМ–195, комплектуемые турбинными и шпindelными секциями турбобура А7Ш. В качестве забойного двигателя был запроектирован винтовой забойный двигатель Д2–172 М.

С глубины 8500 м углубление скважины велось, в основном, редукторным турбобуром. Термостойкость редуктора была повышена до 250 °С.

В качестве промывочной жидкости использовался глинистый раствор на водной основе плотностью 1,1–1,2 г/см³, включающий смазывающие добавки.

Для бурения Кольской скважины созданы и применялись керноотборные устройства трёх типов и их модификации:

- секционное турбодолото КТД4С–195-214/60–80;
- керноотборный снаряд КДМ–195-214/60;
- керноотборный снаряд с гидротранспортом керна МАГ–195–214/60.

Керноотборный снаряд МАГ 195/60 (магазинный) представляет собой устройство, которое присоединяется к валу турбобура и снабжено системой гидротранспорта керна по приёмной трубе в керносорбник. Эти снаряды с системой гидротранспорта, способные вместить до 20 м керна диаметром 60 мм, использовались при бурении Кольской скважины.

Более 70% интервала бурения пройдено с отбором керна при среднем его выносе 40,1% в целом по скважине. С глубин более 5000 м средний выход керна составил около 30%, а с глубины более 9000 м это были порой отдельные куски толщиной 2–3 см, соответствующие наиболее прочным прослойкам.

При бурении СГ–3 на больших глубинах использовали бурильные трубы ЛБТВК–147 из различных алюминиевых сплавов (Д16Т, 01953 и АК4–1) с замками ЗЛК–178 (ранее ЗЛК–172) из стали 40ХН и 40ХМІФА. Применение различных алюминиевых сплавов для изготовления бурильных труб обусловлено различием условий работы труб по интервалам скважины, определяемым главным образом действующими напряжениями и температурой среды. При бурении применяли также стальные высокопрочные бурильные трубы ТБВК–140 из стали 30ХСГСНМ (ТУ 14–3–1002–81)

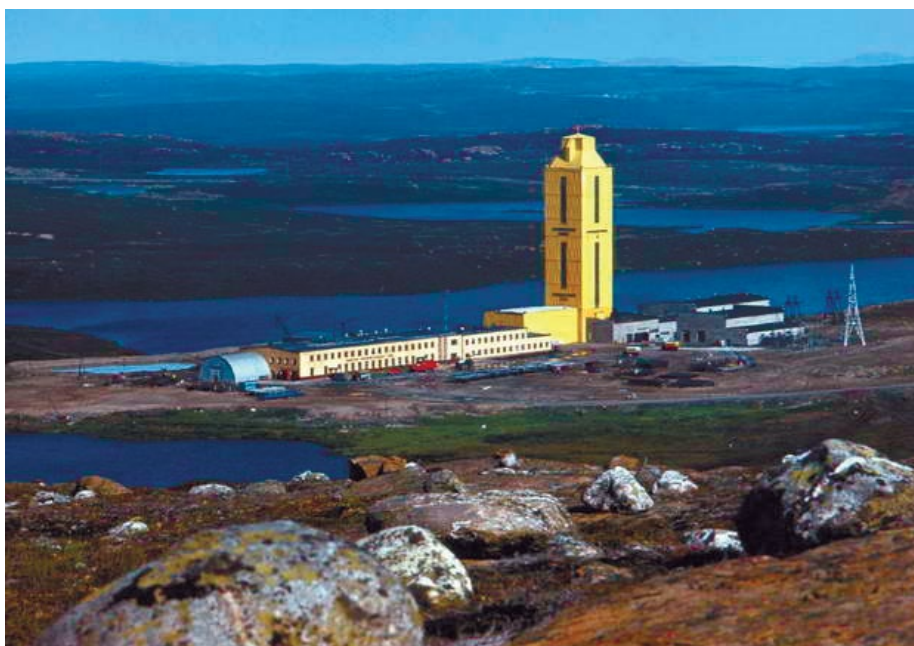


Фото 2. Буровая установка «Уралмаш 15000» (общий вид).

и высокопрочные бурильные замки ЗШК-178 из сталей 40ХН (ГОСТ 4543-71) и 40ХМІФА (ТУ 14-1-2634-78).

В процессе проводки скважины в зависимости от конкретных задач и геолого-технических условий применяли различные компоновки низа бурильной колонны (КНБК). По мере углубления ствола и накопления опыта конструкция КНБК совершенствовалась. Наиболее важными были требования обеспечения максимального отбора керна и сохранения вертикальности ствола. 27 декабря 1983 г. глубина скважины достигла 12000 м, буровики готовились к бурению до проектной глубины (фото 3, 4).

В 1984 г. в Москве состоялся международный геологический конгресс, и многие делегаты конгресса захотели увидеть уникальную буровую на Кольском полуострове и убедиться, что действительно достигнута рекордная глубина бурения. Делегатам показали буровую, при их присутствии поднимали бурильную колонну из скважины, что позволило рассчитать реальную глубину скважины.

Продолжение бурения началось с крупнейшей аварии. 27 сентября 1984 г. пробуравив очередной 9-метровый интервал на глубине более 12 км, что заняло 4 часа, достигли глубины 12066 м. При подъёме произошёл прихват бурильной колонны. В процессе ликвидации прихвата произошёл обрыв бурильной трубы. В скважине остались турбобур и 5 км бурильных труб.

Ликвидировать аварию не удалось, поэтому начали бурить с глубины 7 км обходной ствол. Всего в скважине было пробурено 12 таких обходных стволов. Четыре из них имели протяженность от 2200 м до 5000 м. Разветвленность скважины огорчила буровиков, но обрадовала геологов, которые неожиданно получили объёмную картину внушительного отрезка древних архейских пород, сформировавшихся более 2,5 млрд. лет назад.

В июне 1990 г. СГ-3 достигла глубины 12262 м, скважину решили пробурить до глубины 14 км, но на отметке 8550 м произошел обрыв колонны бурильных труб. Несколько попыток достичь глубины 12262 м не удалось, поэтому в 1992 г. бурение прекратили.

Средние показатели базовых параметров бурового процесса в целом по скважине СГ-3 составили: проходка за рейс – 8 м, механическая скорость – 2 м/ч, приведенная скорость СПО – 0,32 м/с, продолжительность одного спуско-подъёма инструмента при глубине 12000 м – 21 ч. Температура на глубине 12 км достигла 230 °С.

Технология направленного бурения

Основные проблемы, связанные с направленным бурением, заключались в сдерживании темпа искривления скважины, приведение искривленного ствола к вертикали и забуривание обходных стволов в аварийных случаях.

Борьба с искривлением скважины велась непрерывно. В верхних интервалах бурения (до 7000 м) применялся метод жёсткого центрирования КНБК. Расчёты компоновок низа бурильного инструмента с центраторами, позволяющие сохранить направление скважины, были к тому времени разработаны сотрудниками (А.Ф. Фёдоров, К.М. Солодкий) лаборатории наклонно направленного бурения ВНИИБТ.

При дальнейшем увеличении глубины скважины, когда применение компоновок с центраторами стало затруднительным из-за проблем с прохождением полноразмерных центраторов по стволу скважины, использованию маятниковых КНБК в значительной мере помогли рекомендации, разработанные И.Л. Барским и А.Б. Левиной.

Несмотря на использование технологических мероприятий по обеспечению вертикальности в процессе углубления профиль скважины СГ-3 приобретал вид



Фото 3. Глубина 12 000 м достигнута, впереди 15000 м.



Фото 4. Образцы керна с глубины 12 км.

сложной пространственно искривленной кривой, причём ствол осложнялся всё большим количеством уступов и локальных искривлений в точках забуривания обходных стволов и в интервалах приведения ствола скважины к вертикали (рис. 1, 2).

Ниже 7 км скважина представляет собой многоствольную горную выработку, первый ствол которой закончен на глубине 11662 м, второй, пройденный из первого с глубины 9378 м, достиг 12066 м, третий, начатый на глубине 7010 м из первого, завершился на отметке 12262 м и, наконец, четвертый, забуренный в третьем на глубине 9649 м, достиг 11882 м (рис. 2) [6].

Суммарный угол искривления скважины составил около 4-х радиан, а зенитный угол, начиная с отметки 500 м, через каждые 1000 м – 0°; 0,5 ; 5 ; 3,5 ; 5 ; 9,5 ; 4,5 ; 6,5 ; 9,5 ; 12,5 ; 6,5 ; 16 , а на глубине 12000 м превысил 25 [7].

При бурении скважины до глубины 5340 м для ориентированного приведения ствола к вертикали применяли КНБК, включающие либо турбобур с накладкой на шпинделе или с искривленным переводником, либо турбинный отклонитель (ТО).

Плоскость действия ТО ориентировали против кривизны ствола с помощью забойной телеметрической системы СТТ, которая включала забойное передающее устройство, проводной канал связи, кабельный переводник и наземную аппаратуру. В общей сложности в СГ-3 проведено более 100 рейсов с использованием СТТ, задача которых заключалась в приведении искривленного ствола к вертикали.

Вследствие низкой жёсткости на кручение бурильной колонны, составленной из бурильных труб ЛБТ, на глубинах ниже 3000 м возникли существенные проблемы с управлением турбинным отклонителем.

При бурении скважины СГ-3 сотрудником ВНИИБТ Рогачёвым О.К. впервые были проведены экспериментальные исследования процесса управления отклонителем на забое с помощью бурильной колонны [8].

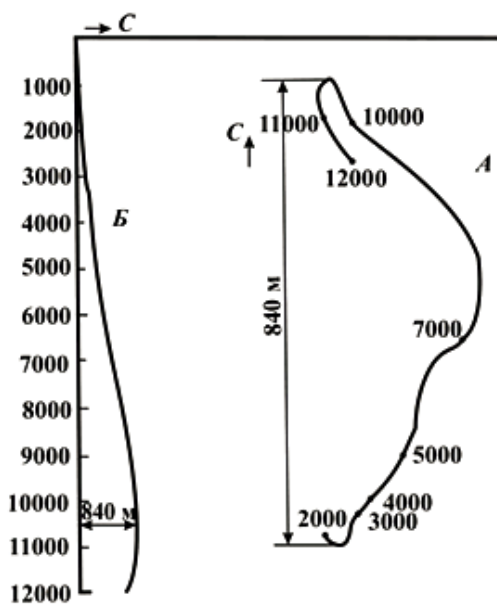


Рис. 1. Вертикальная и горизонтальная проекция ствола скважины СГ-3.

При глубине скважины более 5340 м применение активной компоновки на основе ТО для приведения ствола скважины к вертикали оказалось неэффективным в связи с усложнением операций по ориентированию турбинного отклонителя ТО и значительным повышением затрат времени на их осуществление. При дальнейшем углублении скважины в качестве средства борьбы с искривлением ствола была применена компоновка маятникового типа.

Принципиальная схема КНБК маятникового типа для приведения ствола к вертикали и забуривания обходных ответвлений скважины на больших глубинах приведена на рис. 3.

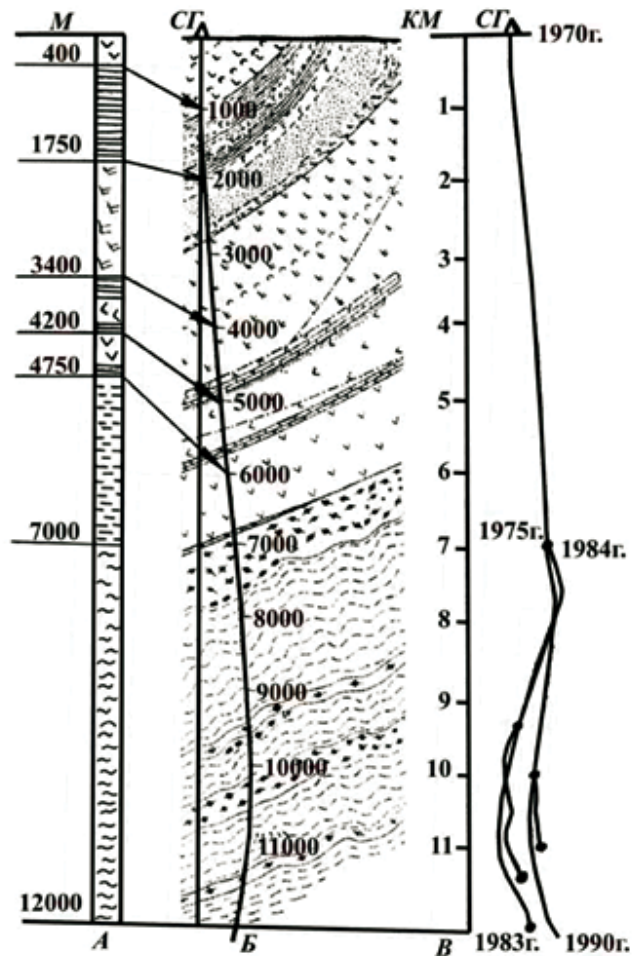


Рис. 2. Прогноз геологического разреза и профиль ствола скважины СГ-3.

А. Прогноз геологического разреза.

Б. Геологический разрез, построенный на основании данных бурения (стрелки от колонки *А* к колонке *Б* указывают, на какой глубине встречены прогнозируемые породы). На этом разрезе верхняя часть (до 7 км – толща протерозоя со слоями вулканических (диабазы) и осадочных пород (песчаники, доломиты). Ниже 7 км – толща архея с повторяющимися пачками пород (в основном гнейсы и амфиболиты) с возрастом – 2,86 млрд. лет.

В. Ствол скважины со многими пробуренными и потерянными обходными стволами (ниже 7 км).

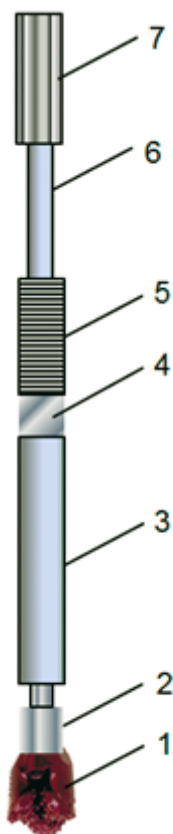


Рис. 3. Компоновка низа буровой колонны (КНБК) маятникового типа.

- 1 – трёхшарошечное долото диаметром 215,9 мм;
- 2 – переводник (прямой или искривленный);
- 3 – турбобур А7Ш (одна секция);
- 4 – датчик турботахометра;
- 5 – свинцовый маятник длиной 14 м;
- 6 – стальная буровая труба СБТ-114×10 (гибкое звено);
- 7 – утяжелённая буровая труба (УБТ) квадратного сечения.

Основные направления повышения эффективности компоновки – максимальное увеличение массы «маятника», повышение боковой фрезерующей способности долота, ограничение механической скорости проходки в интервалах, способствующих интенсивному росту зенитного угла ствола скважины.

При больших глубинах существенной проблемой стал оперативный контроль зенитного угла ствола скважины без использования инклинометров на кабеле. Инженером ВНИИБТ Рогачёвым О.К. был разработан встраиваемый в бурильную колонну угломер, который мог располагаться непосредственно над долотом [8].

Специалистами ВНИИБТ и Кольской геологоразведочной экспедиции была разработана и использовалась с глубины 9745 м телеметрическая система контроля часты вращения турбобура с забойным генератором импульсов давления ГИЗ.03 и наземной приемной аппаратурой УНП-1. Такое решение позволило контролировать и управлять режимом бурения на больших глубинах.

Осложнения, связанные с искажениями профиля и сечения ствола

С глубины 7500 м при подъёме бурильной колонны стали заметно увеличиваться силы сопротивления, достигнув 1000 кН при глубине скважины 8000 м. Суммируясь с собственным весом бурильной колонны, эти нагрузки до предела увеличили напряжённое состояние бурильных труб, ограничив тем самым возможность дальнейшего углубления скважины. Начался поиск главных звеньев в сложной системе этого многофакторного явления. Оказалось, что стандартный подход к механизму трения, лежащий в основе исследуемого вопроса, лишь частично позволял снизить силы сопротивления. Ворожбитову М.И. совместно с сотрудником Кольской ГРЭ Басовичем В.С. удалось выявить существенное влияние малозначимого на первый взгляд фактора – формы сечения ствола.

Практикой строительства направленных скважин установлено, что в месте изменения технологии, режима бурения формируются локальные искривления ствола с кривизной на порядок превышающей общее искривления скважины, что имело место в процессе приведения ствола Кольской скважины к вертикали. [7].

В резко искривленных интервалах в процессе механического воздействия бурильной колонны на стенку скважины формировался ствол эллипсоидного сечения, что способствовало потере устойчивости горных пород под действием горного давления. Неправильная форма сечения ствола, наличие многочисленных каверн порождало «клиновые эффекты» и повышало силы сопротивления.

Интересны сведения В.И. Иванникова о возникновении струйного течения бурового раствора в скважине, которое он зафиксировал при работе на скважине СГ-3. Впервые с проблемой струйного течения столкнулись при бурении Кольской сверхглубокой скважины, когда выход открытого ствола скважины составил более 7000 м. Кавернообразование с глубины 4800 м вызвало аномальный рост сил сопротивления движению бурильной колонны в скважине (при вращении и при подъёме). Введение смазочных добавок в буровой раствор, которые ранее давали снижение сил трения на 30 % и более, перестало оказывать влияние на показатели весовой нагрузки на крюке и крутящего момента на роторе. Контроль содержания твёрдой фазы в буровом растворе показывал, что значительная часть выбуренной породы не выносятся из скважины. Увеличились гидравлические сопротивления в кольцевом зазоре скважины. Обработки бурового раствора понизителями вязкости положительного эффекта не приносили, а напротив, способствовали возрастанию сил сопротивления. Определение объёма циркулирующего в скважине раствора с помощью индикаторов позволило установить, что в кавернозной части скважины возникает струйное течение. Восходящий поток, начиная от забоя, формируется в диаметре долота 215,9 мм, остальной объём раствора в скважине остаётся без движения в виде геля, в котором накапливаются частицы выбуренной породы. Попытки очистить скважину путем увеличения производительности буровых насосов не имели успеха. Струйное течение бурового раствора в кавернозных скважинах создаёт условие для гидродинамического прихвата, суть которого состоит в следующем.

Вынос выбуренной породы в условиях струйного потока идёт с осаждением шлама в застойной зоне, где образуется вязкий шламовый «мешок». Во время циркуляции он

находится в состоянии гидродинамического равновесия с потоком бурового раствора, а после остановки насосов сползает вниз, создавая сальниковую пробку, при затяжке которой возникает прихват. В Кольской сверхглубокой скважине шламовый «мешок» составлял по длине 800–1000 м, что создавало при вращении колонны на глубине 8500 м избыточный момент до 2000 кг·м и избыточную нагрузку при подъеме до 70 тонн.

Таким образом, изменение формы сечения ствола явилось основной причиной потери устойчивости стенки скважины, формированию каверн, что приводило к прихватам бурильной колонны.

Итоги бурения Кольской сверхглубокой скважины

На глубине 4500 м зафиксировано скачкообразное уменьшение плотности, скорости упругих волн в горных породах и при этом увеличилась их пористость и проницаемость. Об этом факте пишет профессор Е.А. Козловский [1]. В интервале от 4500 м до 9000 м пачка горных пород имела меньшую плотность, чем расположенные выше, то есть они находились в разуплотненном состоянии. В интервале 4500-11000 м обнаружены крупные зоны дробления с низкотемпературной гидротермальной минерализацией (сульфиды меди, железа, свинца и др.).

Ранее считалось, что пластовое давление изменяется по закону гидростатики. С глубиной, под действием геостатического давления (вес вышележащих толщ) горные породы сильно уплотняются и лишены пористости и проницаемости, поэтому невозможно образование полезных ископаемых. Буровики из своего опыта также считали, что с глубиной уменьшается механическая скорость разрушения горной породы из-за уплотняющего действия геостатического (горного) давления. Однако данные, полученные при бурении скважины СГ-3, свидетельствуют о том, что давление, при котором происходит сжатие и уплотнение горных пород, представляющее разность между геостатическим и пластовым давлениями, с глубиной перестает наращиваться и на глубине 7-8 км приближается к нулю, благодаря чему горные породы и на больших глубинах сохраняют пористость и проницаемость и находятся в разуплотненном состоянии.

Таким образом, получены новые данные о рудообразовании в глубинных слоях земной коры. На глубинах 9000-12000 м встретились высокопористые трещиноватые породы насыщенные сильно минерализованными водами, что является одним из источников образования руд. На глубинах от 9500 м до 11250 м обнаружили золото, кобальт, никель и другие ценные элементы и минералы (рис. 4).

Изменились представления и о тепловом режиме земных недр. На глубине более 6000 м получен температурный градиент 20 °С на 1 км вместо ожидавшегося (как и в верхней части) 16 °С на 1 км. При этом половина теплового потока имеет радиогенное происхождение.

В результате бурения Кольской скважины (СГ-3) также выявлено:

- граница Конрада (граница раздела гранито-базальтовых горных пород) не обнаружена даже на глубине 12000 м, хотя геологами и геофизиками предполагалась встретить её на глубине 6000–7000 м;

- на глубинах 9000–12000 км находились высокопористые трещиноватые горные породы насыщенные минерализованными водами, которые являются источниками рудообразования, что опровергло мнение геологов, утверждающих ранее о невозможности рудообразования, вследствие уплотнения пород с глубиной;

- установлено, что с глубины примерно 4000 м увеличивается механическая скорость бурения, что связано с увеличением разности между геостатическим (горным) и гидростатическим давлениями, а это в свою очередь с разупрочнением горных пород с глубиной;

- на глубинах 1600–1800 м вскрыты промышленные запасы медно-никелевых руд (новый рудный горизонт).

Важным итогом является уточнение ряда представлений о свойствах горных пород, существовавших только на основе расчётов. Так, не оправдалось предположение об ухудшении буримости с глубиной в твёрдых кристаллических породах. Более сложной оказалась проблема сохранения устойчивости приствольного массива. Пришлось корректировать методы расчёта бурильной колонны с учётом сил трения и температуры. Уточнены представления о процессе отбора керна горной породы,

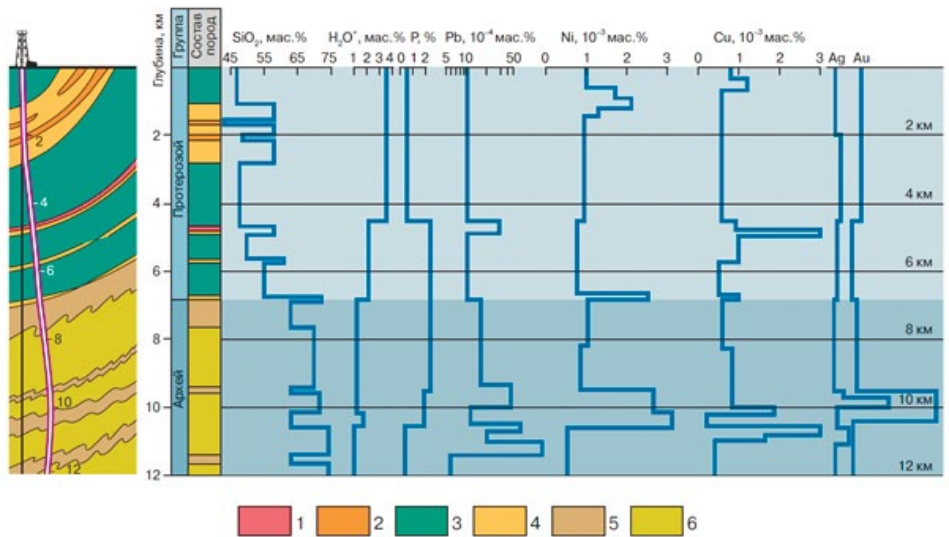


Рис. 4. Схематический разрез Кольской сверхглубокой скважины и распределение некоторых химических элементов по вертикальной глубине [9].

P – закрытая полость:

- 1 – пластовые залежи магматических горных пород среднего и кислого составов;
- 2 – то же основного состава;
- 3 – базальты;
- 4 – осадочные породы;
- 5 – кристаллические сланцы;
- 6 – граниты и гнейсы.

находящейся в сложном пространственно напряженном состоянии.

Новые закономерности установлены для процесса управления и контроля азимута ствола скважины с помощью центраторов при безориентированном бурении в условиях заметного влияния горных пород на искривление скважины. Бурение скважины показало, что для сверхглубокого бурения решающее значение имеет технология предупреждения искривления скважины и формирования ствола без локальных дефектов.

Предполагалось, что Кольская сверхглубокая скважина после завершения бурения будет превращена в уникальную лабораторию для исследования с помощью специальных приборов глубинных процессов, протекающих в земной коре.

Однако в 1995 г. все научные работы из-за отсутствия финансирования были прекращены, а сама скважина законсервирована (фото 5).

Решение о демонтаже уникального бурового оборудования «Уралмаш 15000» было принято летом 2007 г. специальной экспертной комиссией представителей Роснедр и Росимущества.

В феврале 2008 г. бывшее федеральное государственное унитарное предприятие «Кольская сверхглубокая» было приватизировано и превратилось в акционерное общество ОАО «Кольская сверхглубокая», коллектив которого и начал демонтаж оборудования комплекса.

Заключение

Глубина Кольской сверхглубокой скважины СГ-3 12 262 м и выход открытого опережающего ствола более 9500 м являются рекордными показателями до настоящего времени. Необходимо отметить, что достигнутые показатели не являются предельными возможностями отечественного технико-технологического комплекса сверхглубокого бурения, а вызваны преимущественно административно-финансовыми факторами.

С технической точки зрения главный итог работ по бурению скважины СГ-3 заключается

в создании отечественного высокоэффективного технико-технологического комплекса для проходки стволов на сверхбольшие глубины.

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) является прорывом в земной «космос» и входит в десятку выдающихся достижений человечества в XX веке.

Руководитель проекта сверхглубокого бурения Давид Губерман отметил, что «... результаты бурения Кольской скважины дают основание утверждать, что земная кора, толщина которой более 40 километров, насыщена полезными ископаемыми. Значит, человечеству не грозит сырьевой голод.» [06 Сентября 2005 г.].

Решение энергетической и минеральной проблемы человечества заключается в создании и применении технологий, позволяющих осуществлять поиск и разработку глубокозалегающих залежей полезных ископаемых, а также использовать в интересах человечества тепловую энергию Земли, что возможно только с помощью буровых скважин.

Технология глубокого и сверхглубокого бурения и есть тот «ключ», который может открыть доступ человечеству к минеральным ресурсам и тепловой энергии Земли.



Фото 5. Устье Кольской сверхглубокой скважины. Современное состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козловский Е.А. Кольская сверхглубокая. // Наука и жизнь. – М.: Всесоюзное общество «Знание», 1985. – №11.
2. Осадчий А. Легендарная Кольская сверхглубокая. // Наука и жизнь. – М.: АНО Редакция журнала «Наука и жизнь», 2002. – №5.
3. Повалихин А.С., Рогачев О.К., Прохоренко В.В. Развитие сверхглубокого бурения // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море журнал. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2003. – №5. – с. 72-77.
4. Объединенная машиностроительная газета. – Екатеринбург: ООО «Объединённые машиностроительные заводы», 2004. – №28.

REFERENCES

1. Kozlovskij E.A. Kol'skaya sverhglubokaya. // Nauka i zhizn'. – M.: Vsesoyuznoe obshchestvo «Znanie», 1985. – №11.
2. Osadchij A. Legendarnaya Kol'skaya sverhglubokaya. // Nauka i zhizn'. – M.: ANO Redakciya zhurnala «Nauka i zhizn'», 2002. – №5.
3. Povalihin A.S., Rogachev O.K., Prohorenko V.V. Razvitie sverhglubokogo bureniya // Stroitel'stvo neftyanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more zhurnal. – M.: PJSC «VNIIOENG», 2003. – №5. – p. 72-77.
4. Ob"edinennaya mashinostroitel'naya gazeta. – Ekaterinburg: LLC «Ob"edinyonnye mashinostroitel'nye zavody», 2004. – №28.

ЛИТЕРАТУРА (окончание)

5. Ворожбитов М.И., Рогачёв О.К. К вопросу об использовании гидравлического канала связи для контроля за положением отклонителя при бурении глубоких направленных скважин // Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности. – М.: МНП СССР, 1975.- №6.
6. Смирнов Ю.П., Тюремнов В.А., Кузнецова Т.Ю. Корреляционная связь траекторий скважин с анизотропией и симметрией горных пород (на примере Кольской-СГ-3 и Криворожской-СГ-8 сверхглубоких скважин) / доклад на симпозиуме «Неделя горняка - 99». – М.: МГУ, 1999. - с. 142-143.
7. Повалихин А.С., Калинин А.Г., Бастриков С.Н., Солодкий К.М. Бурение наклонных, горизонтальных и многозабойных скважин. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2011. - 645 с.
8. Рогачёв О.К. Исследование и совершенствование забойных средств контроля и управления искривлением скважин (диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук). – М.: ВНИИБТ, 1976. - 151 с.
9. Попов В.С., Кременецкий А.А. Глубокое и сверхглубокое научное бурение на континентах.// Соровский образовательный журнал. – М.: ISSEP, 1999. - №11. – с. 61-68.

REFERENCES (ending)

5. Vorozhbitov M.I., Rogachyov O.K. K voprosu ob ispol'zovanii gidravlicheskogo kanala svyazi dlya kontrolya za polozheniem odklonitelya pri burenii glubokih napravlennykh skvazhin // Avtomatizaciya i telemekhanizaciya neftyanoj promyshlennosti. – M.: MNP USSR, 1975.- №6.
6. Smirnov YU.P., Tyuremnov V.A., Kuznecova T.YU. Korrelyacionnaya svyaz' traektorij skvazhin s anizotropiej i simmetriej gornyh porod (na primere Kol'skoj-SG-3 i Krivorozhskoj-SG-8 sverhglubokih skvazhin) / doklad na simpoziume «Nedelya gornyaka - 99». – M.: MGGU, 1999. - p. 142-143.
7. Povalihin A.S., Kalinin A.G., Bastrikov S.N., Solodkij K.M. Burenie naklonnyh, gorizontaľnyh i mnogozabojnyh skvazhin. – M.: CentrLitNefteGaz, 2011. - 645 p.
8. Rogachyov O.K. Issledovanie i sovershenstvovanie zabojnyh sredstv kontrolya i upravleniya iskrivleniem skvazhin (dissertaciya na soiskanie uchyonoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk). – M.: VNIIBT, 1976. - 151 p.
9. Popov V.S., Kremeneckij A.A. Glubokoe i sverhglubokoe nauchnoe burenie na kontinentah.// Sorovskij obrazovatel'nyj zhurnal. – M.: ISSEP, 1999. - №11. – p. 61-68.