ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(9):159-176
ПУБЛИЦИСТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ / PUBLICISTIC ARTICLE

УДК 622.243.5 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_159

ПОЛУВЕКОВОЙ ЮБИЛЕЙ КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ БУРОВОЙ СКВАЖИНЫ СГ-3

П.К. Скуфьин

Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Аннотация: Рассмотрена история бурения в Мурманской области, в раннедокембрийских кристаллических породах Балтийского щита, Кольской сверхглубокой скважины, достигшей в 1990 г. рекордной глубины 12 262 м, а также охарактеризованы основные научные и технические достижения, полученные в процессе реализации этого проекта. СГ-3 полностью выполнила все поставленные перед нею задачи, как в техническом, так и в научном плане. На поверхность удалось поднять 4024 погонных метров керна, в том числе с рекордной глубины. Кроме того, 25 методами выполнен целый комплекс каротажных геофизических работ общей протяженностью 400 тыс. км. Была получена новейшая информация о строении и составе глубинных горизонтов земной коры, что качественно изменило данные прежних глубинных сейсмических исследований. Получены новые сведения по химическому и минеральному составу, а также физическим свойствам глубинных пород, доказано присутствие в них рудной минерализации и металлоносных гидротермальных систем. По всему разрезу скважины выявлены 6 типов рудной минерализации. Установлена высокая проницаемость для флюидов и гидротермальных растворов глубинных зон земной коры, что связано с повышенной пористостью и трещиноватостью горных пород. Доказано, что древнейшие раннедокембрийские метаосадочные породы формировались при активном участии биологических процессов. Анализ опыта глубинного бурения позволил констатировать, что СГ-3 по-прежнему остается самой глубокой скважиной мира.

Ключевые слова: сверхглубокое бурение, Кольская скважина СГ-3, Мурманская область, Балтийский щит, ранний докембрий.

Для цитирования: *Скуфьин П. К.* Полувековой юбилей Кольской сверхглубокой буровой скважины СГ-3 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 9. – С. 159–176. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_159.

Благодарность: Результаты исследований получены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-18-00025).

Введение

За 50 лет до наших дней, 24 мая 1970 г., в день столетнего юбилея со дня рождения В.И. Ленина, на северо-западе СССР случилось событие, не оставившее равнодушным ни одного геолога из многотысячной армии специалистов этой профессии — петрографов, минералогов, геофизиков, рудничных геологов и др.

В Мурманской области, в раннедокембрийских кристаллических породах Балтийского щита началось бурение уникальной Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), рассчитанной на дости-

© П.К. Скуфьин. 2021.

жение глубины 15 км. Этого события с нетерпением ожидали все геологи нашей планеты. При сопоставлении результатов космических исследований с результатами изучения глубинных слоев земной коры бросается в глаза их исключительно резкое несоответствие. Если космическое пространство изучено самыми различными методами на сотни километров от поверхности Земли, то глубина проникновения в недра планеты ограничивается лишь несколькими километрами у буровых скважин, пробуренных в податливых осадочных породах при поисках залежей углеводородного сырья. Геологам в их построениях приходится оперировать косвенными данными о составе и свойствах глубинных пород, изучая выбросы вулканами глубинного материала, захваченного при вулканических взрывах в недрах планеты, или доверять гипотетическим, а нередко и ошибочным глубинным профилям и разрезам в исследованиях специалистов-геофизиков.

Идея исследования земной коры на глубоких горизонтах сверхглубоким бурением возникла и стала воплощаться в СССР в начале 1960-х годов. Главной задачей считалась возможность получения из недр планеты новейшей информации, необходимой для расшифровки глубинных эндогенных процессов и связанного с ними рудогенеза [1]. Научные и организационные основы программы сверхглубокого бурения были разработаны на совместном заседании Президиума АН СССР и коллегии Министерства геологии под председательством академика М.В. Келдыша. В 1962 г. академик Д.И. Щербаков представил доклад Совету Министров СССР, затем программа была утверждена Н.С. Хрущевым.

Практическим воплощением программы сверхглубокого бурения занялся в 1963 г. Межведомственный научный совет по проблеме «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение», объединивший более 200 геологов-специалистов из различных ведомств и организаций. В дальнейшем последовала разработка более широких программ глубокого бурения и региональных геотраверсов, которые определили важнейшие результаты проходки СГ-3 и других сверхглубоких скважин страны. В течение 70-х годов XX в. планировалось научно обосновать модель строения земной коры и верхней мантии. Практическое применение результатов исследования виделось в апробации различных методов прогноза запасов полезных ископаемых. Ожидалось, что данные глубокого бурения, в первую очередь, позволят оценить запасы и ресурсы основных рудных провинций. В дельнейшем планировалось определить перспективы разработки новых рудных месторождений и направления поисковых работ.

Для решения поставленных научных и прикладных задач Советом был разработан современный на тот момент методический подход к изучению глубинного строения земной коры. Такой подход предусматривал одновременное комплексное исследование данных сверхглубокого бурения, сейсмического глубинного зондирования, а также других геофизических и геохимических методов [1]. В процессе выполнения программных работ планировалось получение новейшей информации об особенностях вещественного состава глубинных горных пород и их физических характеристиках. Программа также предусматривала выяснение геологической природы сейсмических границ раздела в верхних и глубинных горизонтах земной коры. Поставленные программой задачи требовали постоянного совершенствования имеющейся техники и технологии глубокого бурения и непрерывной разработки новых направлений их дальнейшего развития.

В программе было запланировано, помимо СГ-3, создание опорной сети сверхглубоких (глубже 5–8 км) скважин, бурение которых намечалось в 1970—1990 гг. в важнейших рудных районах страны.

За эти годы должны были быть пробурены Уральская скважина глубиной 6,3 км, Саатлинская скважина (глубина 8,3 км), Ен-Яхинская скважина под Уренгоем (глубина 8,25 км), Тимано-Печорская скважина (глубина 7 км), Тюменская скважина (глубина 7,9 км) и Шевченковская скважина на З. Украине (глубина 7,5 км). В первую очередь к исполнению работ были намечены СГ-3 и Саатлинская скважина в Азербайджане. Буровых скважин сверхглубокого бурения во всем мире также немного — всего 7 (4 в США и по одной в Швеции, Германии и Казахстане. Ни одна из этих скважин не преодолела глубины 9,5 км.

Таким образом, СГ-3 стала флагманом в опорной сети сверхглубоких скважин страны. В отличие от глубоких скважин, используемых при поисках и разведке нефтяных залежей, задачей СГ-3 было получение достоверной научной информации о строении и составе верхних горизонтов земной коры континентального типа, в частности, зоны перехода между земной корой и верхней мантией (границы Мохоровичича).

СГ-3 была в стране секретным объектом, и мировая общественность впервые узнала об этом грандиозном проекте лишь в 1975 г., когда в «Правде» появилась статья министра геологии СССР А.В. Сидоренко. Ни одной научной публикации в открытой печати до распада СССР так и не появилось, хотя на скважине работали 15 научно-исследовательских лабораторий под эгидой А.В. Сидоренко.

Постепенно страна узнавала подробности реализации уникального проекта. В 1984 г. была выпущена первая монография о Кольской сверхглубокой [1], а в 1998 г. — монография о научных результатах исследований [2]. Колоссальный проект стал знаменем научных и производственных достижений страны. В 1987 г. была даже выпущена специальная почтовая марка, посвященная этому проекту.

В составе большого коллектива геологов-специалистов из различных организаций автор в рамках программы буровых работ проводил многолетние исследования геологии раннедокембрийских пород скважины. Цель публикации — еще раз привлечь внимание научной общественности к важной проблеме — возобновления в масштабах всей планеты глубокого бурения, чтобы решить кардинальную задачу геологии — создать реальную модель строения земной коры и верхней мантии, раскрыть особенности вещественного состава и физических характеристик глубинных пород, разработать современные образцы оборудования и аппаратуры для ведения глубокого бурения и определить оптимальные направления дальнейшего развития этих работ. Решение этих проблем существенно укрепит позиции России как ведущей державы в будущем международном проекте сверхглубокого бурения. Глубокое исследование Земли — единственный способ познания материального состава и сложных природных процессов в абиссальных глубинах планеты, надежного обеспечения ресурсами будущей промышленности, создания гарантий экономического и социального развития общества.

Задачи публикации — осветить историю реализации проекта СГ-3 в четырех аспектах:

- характеристика технологии выполненных работ, с описанием способов и условий проходки ствола скважины;
- результаты выполненных исследований;

• возможности и условия возобновления скважинных работ по сохранившемуся стволу СГ-3;

• возможности и перспективы глубинного исследования планеты с помощью глубокого бурения.

Методология

В основу публикации легли основные базовые принципы методологии познания. Во-первых, принцип единства теории и практики, позволивший оценить результаты, полученные исследователями на Кольской сверхглубокой скважине, с позиции приращения теоретического знания и практического опыта. Во-вторых, принцип объективности, позволивший учесть объективные факторы в процессе подготовки проекта СГ-3, его реализации и ликвидации. В-третьих, принцип конкретности, который позволил выявить конкретные подходы к оценке результатов реализации проекта. В-четвертых, принцип развития, позволивший показать эволюцию процесса формирования знаний о глубоких горизонтах земной коры, менявшихся в процессе обработки информации результатов исследований. В-пятых, принцип закономерности, позволивший оценить связь результатов, полученных по проекту, с общими проблемами изучения земной коры и мантии планеты. В шестых, принцип единства исторического и логического, суть которого заключается в том, что история развития науки служит своеобразным ключом к пониманию логики формирования научных представлений о конкретном процессе как об определенном этапе развития научного познания в целом.

Информационную базу публикации составили накопленные за многие годы работы большого коллектива геологов-специалистов объемные материалы, начиная с первичных записей и зарисовок в полевых дневниках при послойной документации керна непосредственно в кернохранилище на буровой. Богатое собрание образцов магматических и метаморфических пород из керна скважины было детально исследовано самыми разнообразными методами. Тщательному изучению и описанию были подвергнуты многие тысячи изготовленных шлифов и аншлифов из разреза СГ-3. В результате выполненных работ получена детальная характеристика геолого-геохимических особенностей пород скважины, их химического и минерального состава, рудоносности [3, 4]. Получены также результаты измерений абсолютного возраста многих сотен образцов пород. Охарактеризованы химизм и структура минералов.

Также информационную базу публикации пополнили архивные материалы из архива автора, его коллег и из архива СГ-3, в котором были накоплены за длительный срок работы целые пласты документов учетного, описательного, измерительного характера. Весь собранный по проекту материал был архивирован, но доступен для ознакомления и изучения, с возможностью необходимых выписок и выкопировок. В информационную базу вошли также научные труды отечественных и зарубежных ученых, включая исследования автора, информация отечественных и зарубежных компаний, занимавшихся глубинным бурением, научные публикации в периодических изданиях, материалы научно-практических конференций и семинаров, ресурсы Интернет.

Реализация проекта Кольская сверхглубокая буровая скважина

Место заложения СГ-3, по рекомендации академика РАН А.В. Сидоренко, было выбрано Межведомственной комиссией в 1968 г. в Печенгском рудном р-не, где уже десятки лет разрабатываются крупные месторождения Cu-Ni руд,

с примесью Co, Au, Ag, PGE. Скважина расположена в 10 км юго-западнее поселка горняков и металлургов Заполярный (69°23'46''с.ш., 30°36'31''в.д.), от которого до буровой было проложено асфальтированное шоссе. Буровые работы были поручены специально сформированной Кольской ГРЭ численностью около 3 тыс. человек, бессменным руководителем которой стал академик РАЕН Д.М. Губерман.

В организации исследований участвовали 19 НИИ и более 50 крупных предприятий страны. Все буровое оборудование, измерительная аппаратура и материалы были отечественного производства [2]. В безлюдной тундре выросло мощное современное предприятие, был возведен целый комплекс зданий и сооружений с многочисленными производственными и жилыми помещениями, столовой на 120 посадочных мест и медсанчастью (рис. 1).

Производственный комплекс СГ-3 представлял собой высокотехнологичное сооружение с мощным цоколем, на котором была возведена секционная вышка высотой 74 м, с установленным современным оборудованием для ведения буровых работ, спуска и подъема бурового снаряда, удержания всей колонны труб как на весу (при спускоподъемных операциях), так и в процессе бурения [1]. Многочисленные технические и электронные разработки обеспечивали безопасность бурения. Во внутреннем пространстве вышки размещались силовая и технологическая оснастка, энергетические и насосные агрегаты, система автоматизации, управления и контроля бурового процесса, а также комплекс лабораторной техники. При бурении СГ-3 был задействован целый ряд новейших измерительных приборов, контролировавших самые разнообразные процессы, с поверхности и до самого забоя скважины. Традиционный каротаж с приборами, опускаемыми в скважину на термостойком кабеле, оказался малоэффективным. Современные компактные

Рис. 1. Кольская сверхглубокая буровая скважина (СГ-3)

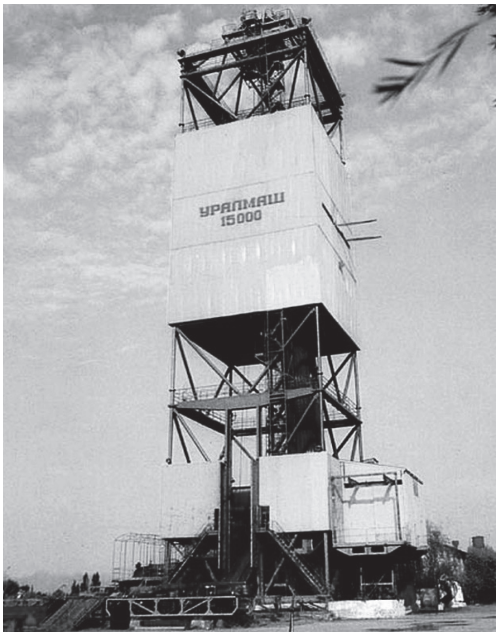

Рис. 2. Буровая установка «Уралмаш-15 000»

телеметрические и электронные датчики могли перемещаться с глубины в потоке глинистого промывочного раствора, доставляя на поверхность результаты замера различных физических свойств глубинных горных пород. Доставленный на поверхность образец керна прямо в руках у геолога распадался в мелкую дресву вследствие разуплотнения и активного газовыделения при резкой смене давления. Монолитный образец можно было получить лишь при постепенном подъеме бурового керноотборника, когда происходило замедленное разуплотнение пород.

До 1975 г. в течение 4 лет бурение скважины велось серийной буровой установкой «Уралмаш-4Э», которую в СССР применяли при бурении скважин на углеводородное сырье. Начиная с глубины 7263 м и до отметки 12 262 м проходка осуществлялась специально разработанной отечественной буровой установкой «Уралмаш-15000», весом 15 000 т, с грузоподъемностью лебедки для спускоподъемных операций 400 т (рис. 2).

Сверхглубокая скважина представляла собой многокилометровую телескопическую конструкцию [2]. Начальный диаметр устья ствола составлял 92 см, а конечный — 21,5 см. Направляющая колонна скважины (так называемый кондуктор) имела диаметр 720 мм до отметки 39 м. Первая техническая колонна (стационарная обсадная) диаметром 324 мм имела длину 2000 м. Вторая техническая колонна (съемная обсадная) метражом в 8770 м имела диаметр 245 мм; колонна сплошь была размечена магнитными метками, что давало возможность проводить замеры физических свойств глубинных пород по всей длине колонны. Радиоактивные метки на забойной трубе позволяли замерять температуру забойной среды бурения.

С глубиной уплотнившиеся кристаллические породы гарантировали длительную устойчивость не обсаженного ствола скважины. Бурение продолжалось открытым стволом, вплоть до рекордной отметки.

При проектной глубине 15 км к 1990 г. скважина должна была достигнуть отметки 13 км. 6 июня 1979 г. буровой снаряд достиг глубины 9584 м, в результате чего была превышена рекордная глубина 9583 м, ранее принадлежавшая нефтяной скважине «Берта-Роджерс» в США. В дальнейшем рекордная глубина проходки все нарастала. Буровикам постоянно приходилось преодолевать сложные условия бурения, возрастающие с глубиной. Температура на забое на глубине 12 км достигала 220 °С, что вызывало порчу приборов и механизмов (обычная электроника отказывала уже при 150 °С), приводило к постоянным авариям, обрывам буровой колонны и потере бурового оборудования.

Аварийные ситуации при вертикальном бурении осложнялись также посто-

янным дополнительным искривлением скважины из-за неравномерного распределения плотности пород в пространстве. В результате забой СГ-3 на глубине 12 км имел в проекции на горизонтальную плоскость отклонение 840 м от запланированного положения.

Потерянные участки буровой колонны длиной в несколько километров цементировались, вертикальная проходка ствола скважины продолжалась, с отклонением бурового инструмента в месте обрыва. В результате ниже базовой глубины 7 км были пройдены пять параллельных обводных стволов скважины, и структура СГ-3 получила облик перевернутой кроны дерева с многочисленными ответвлениями. Одно из этих ответвлений в 1990 г. и достигло рекордной отметки 12 262 м. Коллектив СГ-3 провел подготовку к бурению на глубину 13—14 км, но буровой снаряд снова оборвался, и по решению ельцинского правительства буровые работы были прекращены.

В 1991 г. предприятию был присвоен статус Научно-производственного центра «Кольская сверхглубокая». В 1995—2007 гг. НПЦ функционировал уже в новом статусе Кольской глубинной геолаборатории, на базе которой ученые более 20 стран выполняли уникальные исследования по международным проектам ЮНЕСКО и Международного геологического союза. К сожалению, в дальнейшем, в связи с финансовыми проблемами, окончательно был решен вопрос о закрытии Кольской глубинной геолаборатории, хотя разработанные специалистами проекты дальнейших исследований могли принести стране многомиллионные прибыли при достаточно небольших затратах: к моменту закрытия бюджет Кольской глубинной геолаборатории составлял всего 3 млн руб. в год. В 2008 г. здание буровой было законсервировано, оборудование демонтировано и частично расхищено на металлолом, производственные сооружения превратились в руины (рис. 3, 4). С закрытием проекта страна отказалось от плодотворной идеи создания на базе СГ-3 уникальной лаборатории по изучению геологических процессов в нижних горизонтах земной коры, причем на базе лаборатории можно было открыть научно-производственный центр для обучения специалистов глубинному бурению.

Кольская сверхглубокая скважина по-прежнему остается самой глубокой скважиной в мире (12 262 м). За рубе-

Рис. 3. Вид на руины Кольской сверхглубокой скважины СГ-3

Рис. 4. Заваренное отверстие ствола скважины СГ-3

жом целый ряд скважин, пробуренных под острым углом к поверхности, по длине превосходят Кольскую сверхглубокую. В 2008 г. в нефтяном бассейне Аль-Шахин была пробурена под острым углом к поверхности земли скважина Maersk Oil BD-04A, длина которой — 12 290 м. В январе 2011 г. длина нефтяной скважины, также пробуренной под острым углом на газонефтяном месторождении Одопту-море, составила 12 345 м. Наконец, в июне 2013 г. длина скважины Z-42 Чайвинского месторождения, также пробуренной под острым углом, составила 12 700 м.

Все эти достижения никоим образом не могут претендовать на преодоление рекордного достижения СГ-3. Бурить под острым углом в податливых непрочных осадочных породах можно и на 15 000 м. А скважина СГ-3 реально доставила на глубину 12 262 м работающее промышленное оборудование. Никто и нигде во всем мире не смог повторить этот результат.

Вместе с геологами-специалистами СГ-3 (гл. геолог Ю.Н. Яковлев, геолог Ю.П. Смирнов) и Геологического ин-та КолНЦ РАН (Т.Б. Баянова, В.Р. Ветрин, Ф.Ф. Горбацевич и др.) автор в течение многих лет (1999—2016) принимал непосредственное участие в изучении геологии раннедокембрийских пород скважины, причем исследования касались гнейсо-гранитов архейского фундамента [5], но в основном — супракрустальных пород Печенгского комплекса, полный разрез которого вскрыт СГ-3 в интервале 0—6842,0 м [3].

Кроме того, детально были исследованы вспомогательные структурные скважины IX (глубина 1300 м) и X (глубина 1100 м), позволявшие прослеживать породы из разреза СГ-3 по восстанию [3].

Кольская сверхглубокая скважина пробурена в С-В части раннепротерозойской Печенгской структуры, сложенной вулканогенно-осадочными породами Печенгского комплекса (возраст 2550—1940 млн лет), разрез которого формируют 4 вулканогенные свиты (ВС), в основании которых — маломощные осадочные свиты (ОС). Снизу вверх следуют: I ВС, II ВС, III ВС и IV ВС (рис. 5).

Вулканиты Печенгского комплекса можно считать породами-гомологами,

учитывая изменение их состава по латерали и условий метаморфизма с глубиной. В процессе исследований необходимо было установить, насколько глубинные образцы вулканитов из разреза СГ-3 и из приповерхностных скважин IX и X соответствуют по составу и петрофизическим характеристикам своим поверхностным гомологам, в чем их сходство, и в чем проявляются черты различия, обусловленные воздействием на глубинные образцы повышенных давлений и высоких температур.

Разрезы и поверхностных, и глубинных пород самых молодых III ВС и IV ВС представлены однообразной толщей слабо метаморфизованных шаровых лав толеитового состава. Вулканиты этого уровня идентичны по химизму и петрофизическим свойствам. Поэтому

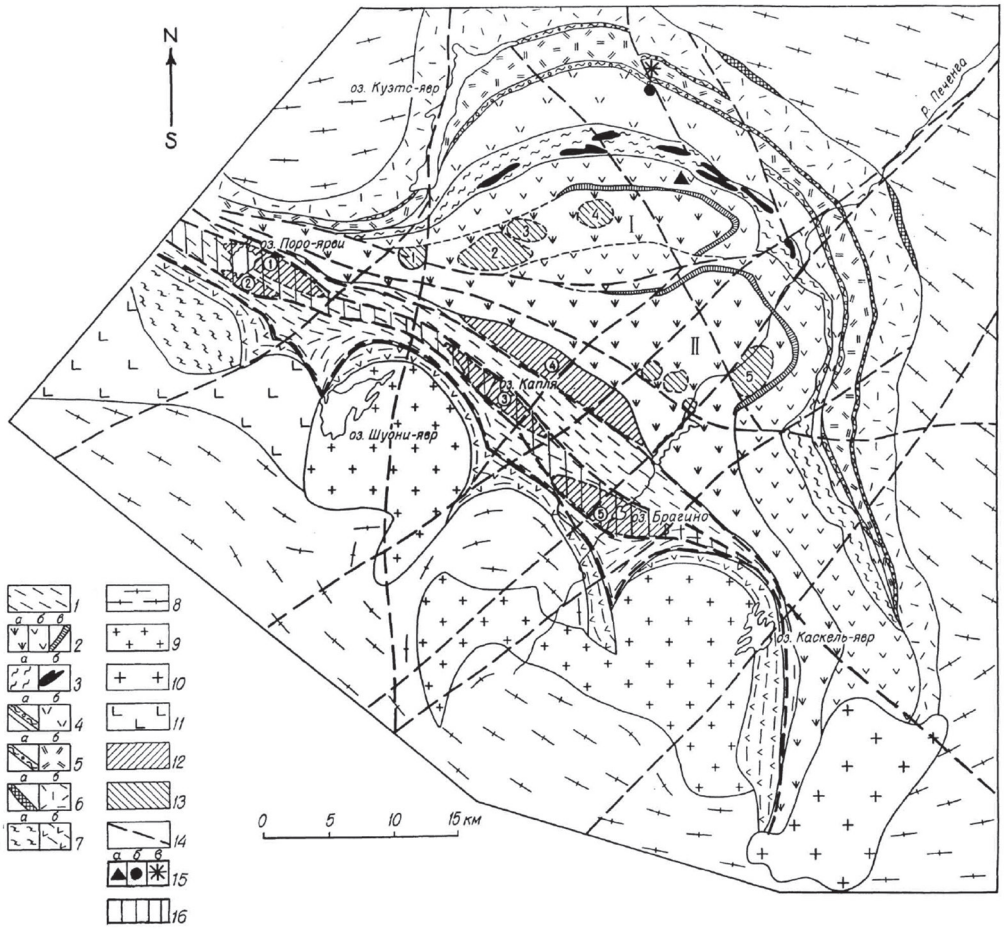

Рис. 5. Схема геологического строения Печенгской структуры [3, с. 78]: 1 — Южнопеченгский комплекс; 2—6 — Печенгский комплекс: 2 — IV ВС: а, б, в — подсвиты; 3 — IV ОС: метаосадки (а), рудоносные интрузии (б); 4 — породы III ОС (а) и III ВС (б); 5 — породы II ОС (а) и II ВС (б); 6 — породы I ОС (а) и I ВС (б); 7 — гнейсо-сланцы (а), амфиболиты (б); 8 — гнейсо-граниты архейского фундамента; 9 — плагиограниты (1940 млн лет); 10 — микроклиновые граниты (1762 млн лет); 11 — габбро; 12 — вулканические центры в Южнопеченгской зоне; 13 — вулканические центры в Северопеченгской зоне; 14 — разломы; 15 — положение СГ-3 (а) и структурных скважин IX (б) и X (в); 16 — Пороярвинский приразломный прогиб

исследования были сконцентрированы на изучении разреза пород более древних I и II ВС, сложенных переслаивающимися вулканогенными породами различного состава. Было проведено сопоставление их свойств с целью определения отличительных особенностей поверхностного, приповерхностного и глубинного режимов раннедокембрийского минерагенеза.

В результате петрогеохимических исследований было установлено, что породы I ВС и II ВС в различных структурно-тектонических зонах имеют определенные различия в химическом составе и различные фациальные характеристики. Состав глубинных вулканитов I ВС аналогичен составу поверхностных и приповерхностных гомологов, что указывает на изохимичность метаморфизма, от поверхностной пренит-пумпеллиитовой до глубинной амфиболитовой фаций метаморфизма. Глубинные образцы лишь несколько обеднены окисным железом. В то же время изучение вулканитов II ВС указывает на существенное различие состава глубинных и приповерхностных пород и их поверхностных гомологов. По сравнению с поверхностными образцами, происходит усреднение, гомогенизация состава пород из более глубоких горизонтов разреза СГ-3. Вулканиты нижних горизонтов II ВС, по сравнению с поверхностными гомологами, обогащены Al_2O_3, отчасти щелочами, но обеднены окисным железом и кремнекислотой. В то же время в вулканитах верхних горизонтов II ВС резко (с 20 до 70%) возрастает доля субщелочных пород, преимущественно щелочных базальтов, за счет значительного обогащения щелочами исходных ферробазальтов, доля которых в поверхностных гомологах составляет более 50%. Целый ряд факторов позволяет связывать повышенную щелочность пород этого уровня с дислокационным метаморфизмом в зоне влияния крупного Лучломпольского разлома глубокого заложения.

Обсуждение. Результаты реализации проекта Кольская сверхглубокая скважина

СГ-3 полностью выполнила все поставленные перед нею задачи, как в техническом, так и в научном плане. На поверхность удалось поднять 4024 погонных метров керна, в том числе с рекордной глубины. Кроме того, 25 методами выполнен целый комплекс каротажных геофизических работ общей протяженностью 400 тыс. км.

В процессе исследований был получен целый ряд важных сведений о земных недрах планеты. Результаты оказались во многом неожиданные для российского и мирового научного сообщества. Их осмысление происходит до сих пор. Наиболее неожиданным результатом оказалась высокая проницаемость для флюидов и гидротермальных растворов глубинных зон земной коры. Ранее считалось, что с глубиной монолитность горных пород должна возрастать, что должно приводить к уменьшению их проницаемости, а также пористости и трещиноватости [6]. Однако реальная густота трещин и высокая пористость горных пород по мере продвижения бурения вглубь сохранялась, а на некоторых участках даже увеличивалась. По этим трещинам на большой глубине циркулировали под высоким давлением флюидные потоки и перегретая вода, что противоречило всем прогнозам и никак не объяснялось теорией строения Земли.

Открытие глубинных трещиноватых зон привело, среди прочего, к изменению планов 1960–70-х годов захоронения жидких радиоактивных отходов и ядовитых веществ в глубоких и сверхглубоких шахтах. Предполагалось, что

захоронение отходов в малоподвижных глубинных слоях земной коры безопасно. Однако результаты, полученные при бурении СГ-3, привели к полному отказу от подобных проектов, поскольку, циркулируя по трещинам, высокотемпературные, под высоким давлением, гидротермальные воды за считанные годы разнесли бы радиоактивность и ядовитые соединения на все тысячекилометровое окружающее пространство, и в результате отравили бы глубинные воды России и других стран.

В результате проходки Кольской скважины впервые были получены важные сведения о строении и температурных характеристиках глубинных зон земной коры, физических свойствах и геохимических особенностях глубинных пород, доказано присутствие в них рудной минерализации и металлоносных гидротермальных систем.

Во многом неожиданные результаты были получены при измерении реальных температур гидротермальных потоков на сверхглубинах. В те годы ученые исходили из предположений, что по мере продвижения в глубь земной коры в пределах гранито-гнейсового фундамента Балтийского щита температура увеличивается со скоростью 10 °С на 1000 м [1]. Однако измененная температура оказалась гораздо выше: на глубине 10 000 м она достигла отметки 180 °С (вместо ожидаемых 80—100 °С), а на глубине 1200 м — 210 °С (вместо ожидаемых 100—120 °С). Современные теории объясняют это явление высокой тектонической активностью в глубинных зонах земной коры [4].

Результаты бурения опровергли существовавшие представления о строении земной коры в районе заложения скважины и на всем Балтийском щите. Составленные геофизиками проектные геологические разрезы ни в одном случае не были подтверждены. Опытнейший геофизик, Н.В. Шаров, сотрудник Геологического института КолНЦ РАН, десятки лет работавший на Балтийском щите, предельно низко оценил результаты сейсмогеологических исследований на кристаллических щитах мира: «При глубинном бурении получены прямые данные о составе и строении земной коры до глубины 12 км, которые показали, что мы ничего не знаем о континентальной коре. Глубокие скважины показали, что неоднородности, фиксируемые по геофизическим данным в верхней части кристаллической коры, обусловлены изменениями не только состава глубинных пород, но и их физического состояния. Поэтому определение даже приближенного состава пород по значениям только скорости распространения упругих волн не может быть однозначным» [7, с. 256].

Проектный разрез СГ-3, составленный по данным сейсмических исследований, прогнозировал, что на глубине 4 км буровой снаряд скважины выйдет из раннепротерозойских пород Печенгской структуры и войдет в гранито-гнейсы архейского фундамента [2]. Пройдя трехкилометровый слой гранито-гнейсов и слой базальтов, представленный амфиболитами, относительно маломощный в районе скважины, бурение должно было достигнуть метаморфизованных пород мантии. Однако на деле среднепротерозойские породы Печенгского комплекса простирались до глубины 6842 м и лишь затем сменились архейскими гранитами и гранито-гнейсами. Породы базальтового слоя вообще не были обнаружены — до самой рекордной глубины буровой снаряд пробивался через архейские гранитоидные породы. Оказалось, что уплотненные на глубине за счет повышенных PT-условий глубинные породы радикально изменили свои физические свойства, и при сейсмологических исследованиях восприни-

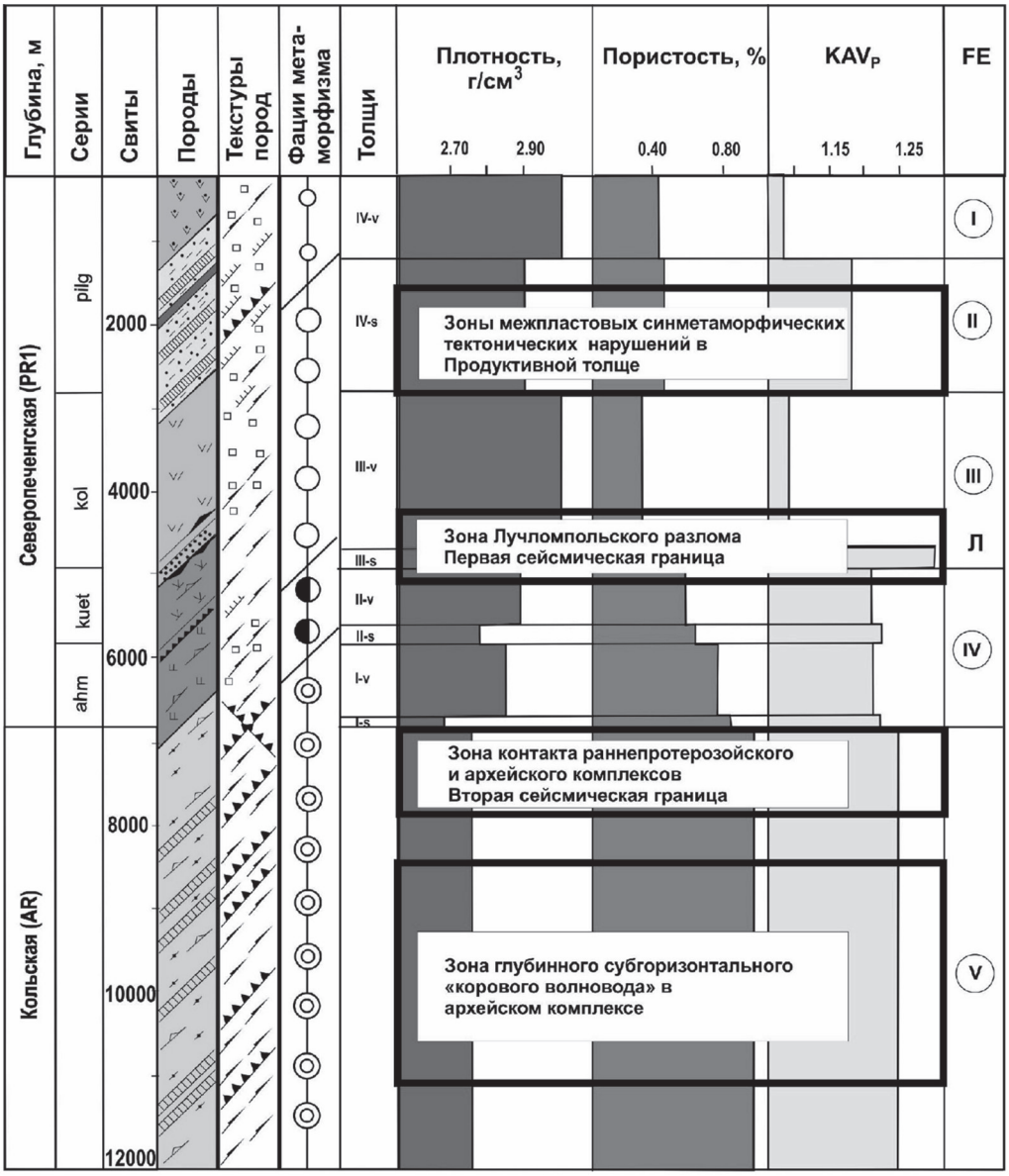

Рис. 6. Формализованный разрез Кольской СГ-3 с зонами тектонических нарушений [8]

мались учеными-геофизиками как более плотные, по сравнению со стандартными гранито-гнейсами и амфиболитами. Эти ошибочные представления о глубинном строении Балтийского щита были положены в основу проектного разреза скважины СГ-3 [1].

В действительности вместо предполагаемой на семикилометровой глубине «поверхности Конрада» (кровля базальтового слоя) был выявлен лишь субгоризонтальный «коровый волновод», своеобразная зона разуплотнения, по которой происходили крупные пологие пере-

мещения тектонических блоков земной коры; аналогичные зоны разуплотнения были установлены и на других участках разреза СГ-3 [8]. Субгоризонтальное перемещение тектонических блоков по этим зонам обеспечило чешуйчато-надвиговое строение всего Лапландско-Печенгского мегаблока (рис. 6).

Петрофизические исследования глубинных горизонтов континентальной земной коры были выполнены многими исследователями на образцах керна СГ-3 [8]. Они позволили провести интерпретацию геофизических данных и сопоставить физические параметры глубинных горных пород с поверхностными аналогами. Самым эффективным методом оказался структурно-петрофизический анализ, суть которого заключается в определении и сравнении абсолютных значений плотности, пористости, объемной анизотропии упругих свойств (скоростей ультразвуковых волн, модулей упругости и др.). Структурно-петрофизический анализ комплексно дополняется тектонофизическими и микроструктурными исследованиями. Результаты отражаются на подробных геологических картах и схемах.

В разрезе СГ-3 рудная минерализация установлена на всей 12-километровой протяженности [8, 9]. В зависимости от состава рудных элементов и минеральных парагенезисов в глубинном разрезе выделены 6 основных типов рудной минерализации: сульфидная медно-никелевая и платинометальная (950—1800 м), приуроченная к метаперидотитам и филлитам продуктивной толщи, аналогичная рудам Печенгского рудного поля; этот факт доказывает выдержанность Cu-Ni оруденения по падению пород на глубину 1,8 км; сульфидная железная пирит-пирротиновая (1200—2800 м) в метаосадках продуктивной толщи; оксидная железная (6200—12 200 м) в архейских амфибол-биотитовых гнейсо-сланцах; оксидная железо-титановая (8500—11 800 м) в габброидных интрузиях, залегающих в архейских гранито-гнейсовых породах; сульфидная медно-цинковая (6300—12 000 м) в архейских метабазитах; самородная золотая (9500—11 000 м) в архейских гнейсах и амфиболитах. Золото было обнаружено с помощью нейтронно-активационного анализа, и подтверждено минераграфическими исследованиями [9, 10]. Верхний рубеж золотоносного горизонта совпадает с зоной крупного разлома (9,5—9,7 км), который четко отслеживается переходом от биотит-амфиболовых гнейсов к железистым кварцитам.

Кроме того, в архейских гнейсо-гранитах фундамента были обнаружены углеводородные газы, в первую очередь — существенные концентрации метана. Среди прочего, это является одним из аргументов в пользу абиогенного происхождения углеводородного сырья.

Впервые доказано существование на абиссальных глубинах в фундаменте Балтийского щита значительных скоплений высокоминерализованных термальных вод. Больше всего минерализованных вод, находящихся под большим давлением, обнаружено на глубинах более 6500 м, в зонах тектонических подвижек, обладающих повышенной проницаемостью. Неожиданностью стало и открытие того, что в зонах интенсивной циркуляции не только снижалась температура гидротермальных потоков, но и повышалось содержание цветных и редких металлов: меди, никеля, свинца, цинка и др. Это позволяет сделать вывод о принципиальной возможности появления в глубинных горизонтах земной коры крупных месторождений низко- и высокотемпературных металлических руд, что является важным фактором в разработке металлогенических прогнозов поиска рудных залежей на большой глубине.

В результате комплексного изучения керна установлено, что глубинные метаосадочные гнейсы и гранито-гнейсы формировались при активном участии биологических процессов. Изотопный анализ углерода выявил два источника его происхождения: первый имеет мантийное происхождение, второй — биогенное, причем биогенный углерод существенно преобладает в протерозойских метаосадочных породах. В последних также установлены микроорганизмы, возраст которых — более 2 млрд лет [2]. Таким образом, фактически подтверждена идея В.И. Вернадского о наличии на Земле раннедокембрийских биосфер.

Кроме того, в результате проведения скважинного гаммакаротажа удалось установить вертикальную зональность распределения концентраций урана, тория и калия. Это открытие, подтвержденное другими геофизическими методами, является важным вкладом в разработку общей термической модели формирования земной коры в раннем докембрии. Выполнение целого комплекса разнообразных геофизических исследований позволило специалистам-геофизикам Кольской сверхглубокой, опираясь на сеть пробуренных сверхглубоких (глубже 7 км) скважин в других регионах страны, отслеживать в трехмерном пространстве детали изменения геофизических параметров и на этой основе строить объемные пространственные модели напряженных состояний земной коры, а также прогнозировать изменение этих состояний. Пространственное моделирование глубинных напряжений давало возможность достоверного прогноза сейсмологической активности и сдвигов тектонических блоков за многие тысячи километров от скважины.

Такие исследования крайне важны для стран, расположенных в сейсмически опасных зонах, прежде всего — для Японии. Эти государства наиболее заинтересованы в исследованиях, связанных с изучением и прогнозированием крупных землетрясений, катастрофических подвижек тектонических блоков и других природных катаклизмов, вызываемых импульсной разрядкой напряжений в земных недрах планеты. Очевидно, что продолжение исследования на Кольской сверхглубокой скважине, недальновидно остановленное в конце прошлого века, позволило бы решить многие проблемы безопасности людей, живущих в сейсмически нестабильных зонах планеты. Возобновление глобальных геофизических исследований помогло бы также решить комплекс научных и прикладных задач, связанных с разработкой механизмов отслеживания изменений геофизических параметров в толщах гидросферы и литосферы — включая, среди прочего, приемы обнаружения субмарин и других подводных объектов.

Следует особо подчеркнуть, что, несмотря на то, что в процессе глубинного бурения было получено много ценнейших сведений о строении земной коры, специалисты-геофизики все еще далеки от понимания сущности важнейшей поверхности раздела нижних горизонтов земной коры — поверхности Мохоровичича, и тем более от четкого понимания природы и особенностей самой мантии. Попытка успешного решения этой проблемы напрямую зависит от продолжения широкомасштабных работ по проекту сверхглубокого бурения.

Предложения по направлению будущих исследований

Возможности и условия возобновления скважинных работ по сохранившемуся стволу СГ-3. Специалисты оценивают стоимость восстановления СГ-3 —

около 100 млн руб. У скважины сохранился рабочий ствол (рис. 6) диаметром 20 см до глубины 4 км, далее рабочий ствол диаметром 10 см продолжается до глубины 8 км. Специальное подъемное оборудование не сохранилось, но необходимую исследовательскую аппаратуру можно спускать на глубину с помощью обычного каротажного подъемника.

Реальное проникновение на глубину более 12 км при бурении и преодолении крепчайших монолитных горных пород наивысшей XII категории по буримости в современных условиях сопоставимо по затратам с выполнением крупной космической программы. Советская Россия, выполняя престижный проект СГ-3, практически не считалась с затратами, и в результате выполнение проекта обошлось стране в полмиллиарда рублей. Возобновление проекта вертикального бурения в монолитных породах до глубины 13—14 км в настоящее время потребует колоссальных усилий и затрат в несколько млрд долларов. Однако интерес научной общественности, значительное совершенствование техники и технологии глубокого бурения, а также углубляющийся кризис, связанный с дефицитом разведанных и прогнозных ресурсов минерального сырья, требуют скорейшей разработки международного проекта сверхглубокого бурения.

Усилия по восстановлению научной значимости СГ-3 позволят продолжить изучение глубинных слоев литосферы. В перспективе научные исследования дадут возможность построения объемных геофизических моделей перемещения гигантских блоков земной коры, что позволит достаточно надежно предсказывать крупные землетрясении, катастрофические сдвиги геологических блоков, а также решать множество других важных научных проблем. В настоящее время интерес к возрождению этого уникального проекта проявляют десятки исследовательских центров в России и за рубежом.

Возможности и перспективы исследования глубинных недр планеты с помощью глубокого бурения

Можно констатировать, что закрытие Кольской сверхглубокой скважины — крайне опрометчивое и непродуманное решение. Характерно, что если во время бурения СГ-3 и в период обработки полученных материалов в печати появлялись десятки публикаций по этим вопросам, то в последние годы разрозненные публикации чаще касаются сугубо технических проблем, например, использования технологии глубокого бурения при проходке ультраглубоких горных туннелей [11; 12], применения нейтронной томографии для изучения отдельных образцов разреза СГ-3 [13] или использования имитационного анализа для компенсации отклонений ствола скважин при глубинном бурении [14]. Часть появившихся публикаций касаются проблем переинтерпретации ранее опубликованных материалов в свете новых гипотез и представлений [4, 15]. Таким образом, уникальный опыт, полученный при бурении СГ-3, используется для решения прикладных проблем добычи полезных ископаемых со сверхглубин. Появление таких публикаций вполне объяснимо, поскольку природные ресурсы были и остаются основным фактором социально-экономического развития территорий, в том числе — Арктики [16, 17].

Однако тревожный для развитых стран факт резкого сокращения разведанных и прогнозных запасов полезных ископаемых, в частности углеводородного сырья и металлических руд, заставил ряд крупнейших государств, и прежде всего Китай, по-новому оценить

возможность и необходимость скорейшей разработки проектов сверхглубокого бурения. В 2016 г. Китайская геологическая служба приступила к реализации проекта Deep Geological Survey Project для непрерывного изучения глубин планеты. Основное внимание уделяется национальной стратегии в области энергоресурсов [18]. Специалисты по глубинному бурению из Геологической службы Китая считают: «Глубокое бурение есть способ понять материальный состав, структуру и динамичный процесс внутренних сфер Земли» [19, с. 153]. Еще конкретнее вопрос поставлен китайскими геологами-инженерами: «Глубокое бурение становится прямым и наиболее эффективным средством эксплуатации глубинных минеральных ресурсов. Для определения предела глубины бурения в земной коре мы впервые с помощью трехосной серверной системы провели испытания для случая деформации скважин при высоких P-T условиях» [20, с. 990].

Специалисты-буровики из Геологической службы Китая пока сконцентрировали свое внимание на глубоком бурении в китайских нефтяных бассейнах. Однако месторождения металлических руд во всем мире связаны в основном со щитами — участками платформы, на которых раннедокембрийский кристаллический фундамент выходит на поверхность планеты. Богатейшие месторождения металлических руд и благородных металлов на крупных кристаллических щитах разведаны в интрузивных породах и в глубокометаморфизованных метаосадочных формациях. В Китае нет таких крупных щитовых структур, как Канадский или Балтийский щиты. Однако значительные выходы древнего фундамента известны на Ляодунском и Шаньдунском полуостровах, а также на Цзяннанском щите Южно-Китайской платформы. Если Китай с его неисчерпаемыми ресурсами начнет глубокое поисково-разведочное бурение на этих территориях, рекордные достижения СГ-3 будут вскоре перекрыты.

Определенные сдвиги в этом направлении уже происходят, причем застрельщиками инициативы возобновления сверхглубокого бурения выступает Россия. Так, в Росгеологии еще в 2018 г. был разработан проект бурения четырех сверхглубоких скважин глубиной до 7 км, первая из которых будет пробурена на Северном Кавказе, чтобы проверить гипотезу о крупных месторождениях углеводородного сырья на глубине.

Сам символ Кольской сверхглубокой скважины постепенно глубоко проникает в человеческое сознание. Заместитель губернатора Мурманской области О. Кузнецова во время брифинга 20.05.2020 г. сообщила, что правительство области приняло решение о восстановлении СГ-3 и о передаче ее в федеральную собственность в статусе туристического объекта [21]. В Арктике снимаются полнометражные художественные и документальные фильмы о Кольской сверхглубокой, нередко с мистическим оттенком, когда всячески муссируются сфабрикованные сведения о якобы разбуженной в результате бурения преисподней.

Заключение

Проект сверхглубокого бурения «Кольская буровая скважина СГ-3» выполнен на достаточно высоком уровне. Основная задача, стоявшая перед создателями проекта, — познание строения глубинных недр планеты, — решена успешно. Созданы предпосылки для разработки фундаментальных основ теории формирования земной коры в раннем докембрии.

Не вызывает сомнения факт того, что Кольская сверхглубокая скважина буквально открыла новую эру в изучении

континентальной земной коры. В процессе исследований был получен целый ряд важных сведений о строении земных недр. Результаты оказались во многом неожиданны, они еще недостаточно систематизированы. Ряд вопросов в силу объективных причин нуждается в дальнейшем изучении, в частности, познание сущности важнейшей поверхности раздела мантии и нижних горизонтов земной коры — поверхности Мохоровичича, и тем более четкого понимания природы и особенностей самой мантии. Попытка успешного решения этой проблемы напрямую зависит от продолжения широкомасштабных работ по глубокому бурению.

Помимо важнейших научных результатов, способствующих коренному переосмысливанию теории строения земных недр, был накоплен уникальный опыт глубинного бурения, который успешно используется в настоящее время. Континентальное и шельфовое сверхглубокое бурение постепенно становится новым направлением, органично сочетающим теоретические достижения геологии и практические навыки бурильщиков. Возможность изучения земных недр откроет для специалистов-геологов новые, еще не познанные закономерности развития Земли, которые позволят на практике выявить особенности сверхглубоких геологических процессов, включая процессы образования руд и других полезных ископаемых. Исследование земной коры с помощью сверхглубокого бурения обусловлено не только стремлением человечества к познанию, но и к удовлетворению основных потребностей в получении ресурсов и гарантий экономического и социального развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кольская* сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения сверхглубокой скважины / Под ред. Е. А. Козловского. — М.: Недра, 1984. — 490 с.

2. *Кольская* сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / Под ред. В. П. Орлова, Н. П. Лаверова. — М.: МФ «Технонефтегаз», 1998. — 260 с.

3. *Скуфьин П. К.* Вулканиты основании разреза печенгского комплекса (нижний протерозой, Кольский полуостров) на поверхности и в глубинных условиях (в разрезе СГ-3) // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. — 2013. — Т. 88. — № 6. — С. 77—92.

4. *Яковлев Ю. Н.*, *Яковлева А. К.*, *Серов П. А.* Новые данные о строении и составе архейского комплекса разреза СГ-3 // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 88—98.

5. *Skuf'in P. K.*, *Vetrin V. R.* Kola Superdeep Borehole // Major geological sights of the Kola Peninsula. Apatity, 2002, pp. 60—73.

6. *Friend C. R. L.*, *Nutman A. P.* Tectono-stratigraphic terranes in Archaean gneiss complexes as evidence for plate tectonics: The Nuuk region, southern West Greenland. Gondwana Research. 2019, vol. 72, pp. 213—237.

7. *Шаров Н. В.* Сопоставление геофизических разрезов земной коры с результатами бурения глубоких скважин на Фенноскандинавском щите // Геофизический журнал. — 2012. — Т. 34. — № 4. — С. 253—264.

8. *Лобанов К. В.*, *Горностаева Т. А.*, *Прокофьев В. Ю.*, *Чичеров М. В.* Космический полет СГ-3 в недра планеты Земля // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2020. — № 17. — С. 322—327.

9. *Козловский Е. А.*, *Губерман Д. М.*, *Казанский В. И.* Рудоносность глубинных зон древней континентальной земной коры (по материалам Кольской сверхглубокой скважины) // Советская геология. — 1988. — № 9. — С. 3—11.

10. *Лобанов К. В.*, *Казанский В. И.*, *Чичеров М. В.* Золотая минерализация в разрезе Кольской сверхглубокой скважины и на поверхности в Печенгском рудном районе / Материалы международной конференции «Золото Фенноскандинавского щита». — Петрозаводск: КНЦ РАН, 2013. — С. 121—125.

11. *Zhu H., Yan J., Liang W.* Challenges and development prospects of ultra-long and ultra-deep mountain tunnels // Engineering. 2019, vol. 5 (3), pp. 384—392.

12. *Ahmed A., Lew M. T., Diwakar P., Kumar A. S., Rahman M.* A novel approach in high performance deep hole drilling of Inconel 718 // Precision Engineering. 2019, vol. 56, pp. 432—437.

13. *Kichanov S. E.*, *Kozlenko D. P.*, *Ivankina T. I.*, *Rutkauskas A. V.*, *Lukin E. V.*, *Savenko B. N.* The neutron tomography studies of the rocks from the Kola superdeep borehole // Physics Procedia. 2015, vol. 69, pp. 537—541.

14. *Gerken J. F., Klages N., Biermann D., Denkena B.* In-process compensation of straightness deviation in BTA deep hole drilling using experimental and simulative analysis // Procedia CIRP. 2020, vol. 93, pp. 1417—1422.

15. *Горбацевич Ф. Ф.*, *Ветрин В. Р.*, *Ковалевский М. В.* Кристаллическая земная кора по данным бурения Кольской сверхглубокой скважины // Природа. — 2020. — № 8 (1260). — С. 13—21.

16. *Skufina T. P.*, *Samarina V. P.*, *Krachunov H.*, *Savon D. Yu.* Problems of Russia's Arctic development in the context of optimization of the mineral raw materials complex use // Eurasian Mining. 2015, no. 2 (24), pp. 18—21.

17. *Skufina T., Baranov S., Samarina V., Samarin A.* Natural resources as a factor of socio-economic development of the Arctic territories: theoretical components of the research problem // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, vol. 302, no. 1.

18. *Li X., Guo Z., Hu Y., Liu X., Wan Y., Luo R., Sun Y., Che M.* High-quality development of ultra-deep large gas fields in China: Challenges, strategies and proposals // Natural Gas Industry B. 2020, vol. 7, no. 5, pp. 2505—2513.

19. *Lü Q., Yan J., Chen X., Hou H., Wan W., Hu Y.* Progress of deep geological survey project under the China geological survey // China Geology. 2020, vol. 3 (1), p. 153—172.

20. *Zhao Y. S., Feng Z. J., Xi B. P., Yang D., Liang W. G., Wan Z. J.* Limit of crustal drilling depth // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017, vol. 9 (5), pp. 989—992.

21. *Власти* Мурманской области планируют сделать Кольскую сверхглубокую скважину туробъектом: Сайт ТАСС. URL: https://tass.ru/obschestvo/8520227. ГИАБ

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Скуфьин Петр Константинович — д-р геол.-минерал. наук,
профессор, ведущий научный сотрудник,
Геологический институт Кольского научного центра РАН,
e-mail: skuf@geoksc.apatity.ru.