

## DEEP AND SUPERDEEP SCIENTIFIC DRILLING ON CONTINENTS

V. S. POPOV,  
A. A. KREMENETSKII

*The world's deepest borehole (12,3 km) has been drilled in the Kola Peninsula, Russia. The results of deep (3–7 km) and superdeep (>7 km) scientific continental drilling compels the revision of many geological concepts.*

**Самая глубокая в мире скважина (12,3 км) пробурена в России на Кольском полуострове. Результаты глубокого (3–7 км) и сверхглубокого (более 7 км) научного бурения на континентах заставляют пересмотреть многие геологические концепции.**

© Попов В.С., Кременецкий А.А., 1999

## ГЛУБОКОЕ И СВЕРХГЛУБОКОЕ НАУЧНОЕ БУРЕНИЕ НА КОНТИНЕНТАХ

В. С. ПОПОВ,  
А. А. КРЕМЕНЕЦКИЙ

Московская государственная геологоразведочная академия

### ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ

Земля как объект исследования геологии доступна для прямого наблюдения только с поверхности, а о составе и строении земных глубин можно судить лишь по косвенным данным. Поэтому геологи стремятся проникнуть как можно дальше в глубь Земли с помощью бурения.

Буровые скважины чаще всего проходят для поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, для извлечения из недр воды, нефти и газа, для инженерных изысканий и других прикладных целей. Кроме этого, в последние десятилетия бурение все шире используется как метод решения фундаментальных научных проблем современной геологии. Результаты научного бурения во многом оказались неожиданными и заставили пересмотреть теоретические представления, которые до этого казались очевидными и незыблемыми.

Начало систематического научного бурения относится к 60-м годам. В 1968 году в США было спущено на воду специальное буровое судно “Glomar Challenger” и началась реализация международной программы глубоководного бурения в океанах. В 1985 году на смену пришло новое, более мощное буровое судно “JOIDES Resolution” и программа океанского бурения была продолжена. За тридцать лет в Мировом океане пробурили сотни скважин, которые пересекли рыхлые осадки океанского дна и углубились в подстилающие базальты. Самая глубокая скважина, пробуренная в Тихом океане к югу от берегов Коста-Рики, достигла 2105 м ниже океанского дна. Результаты океанского бурения открыли новую страницу в геологии, поскольку раньше прямых данных о строении дна океанов практически не было. О научном бурении в океанах следует подробнее рассказать в отдельной статье. Здесь же мы коснемся современного состояния научного бурения на континентах [1–4].

В отличие от относительно мелких (обычно менее 1 км) скважин, которые бурят при поисках и разведке твердых полезных ископаемых, скважины научного бурения на континентах, как правило, относятся к категориям глубоких (3–7 км) и сверхглубоких (более 7 км). В этом отношении они сопоставимы лишь со скважинами, пробуренными для поисков,

разведки и эксплуатации глубоко залегающих месторождений нефти и газа, известных, например, на юге США. За последние 30 лет в штатах Техас и Оклахома пробурено более 350 скважин глубиной 6,5–7,0 км, 50 скважин глубиной более 7 км, 4 скважины достигли глубины более 9 км. Самая глубокая скважина Берта Роджерс (9583 м) была пробурена в 1973–1974 годах всего за 502 дня. Столь высокая скорость проходки обусловлена как возможностями американской техники, так и тем, что бурение осуществлялось без отбора керна, то есть без подъема образцов горных пород на поверхность. Отбор керна требует большого дополнительного времени, но совершенно необходим при научном бурении. Поэтому глубокие и сверхглубокие поисковые и разведочные скважины имеют ограниченное значение как источники научной информации.

Первая программа систематического сверхглубокого континентального бурения с научными целями разработана и осуществлена в Советском Союзе. основополагающие идеи этой программы были сформулированы в 1960–1962 годах, а в мае 1970 года на севере Мурманской области в 10 км от города Заполярного началось бурение Кольской сверхглубокой скважины. Ее проектная глубина была определена в 15 км. В 1991 году бурение прекратили на глубине 12 261 м. Кольская скважина до сих пор остается самой глубокой в мире. В 1977 году было начато бурение Саатлинской скважины в Куринской впадине на территории Азербайджана. Проектная глубина этой скважины была 11 км, но по некоторым причинам бурение остановили на глубине 8324 м, не выполнив всех научных задач.

В последующие годы в СССР пробурили еще 10 научных скважин глубиной от 4 до 9 км; характеристика части из них приведена в табл. 1. Для выполнения программы комплексного изучения недр Земли и сверхглубокого бурения в 1986 году было создано специальное государственное научно-производственное предприятие (ГНПП) «Недра» (Ярославль). В настоящее время в России продолжается бурение только одной Уральской сверхглубокой скважины.

Успехи Советского Союза стимулировали разработку программ научного континентального бурения в Германии, Франции, США, Канаде, Японии, Великобритании и других странах. Одним из наиболее известных результатов явилось бурение немецкой сверхглубокой скважины КТБ-Оберпфальц в Баварии (1990–1994 годы), которая достигла глубины 9101 м.

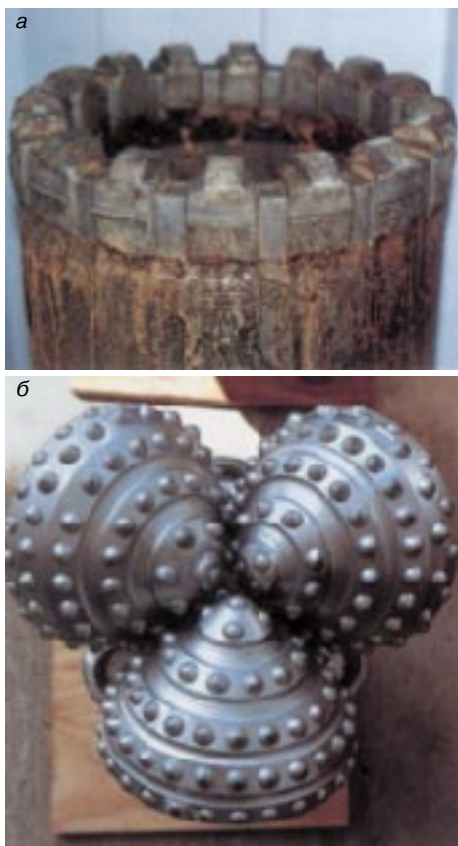
### КАК БУРЯТ СВЕРХГЛУБОКИЕ СКВАЖИНЫ

Существуют разные способы бурения. Если глубина скважин невелика (сотни метров), то двигатель, находящийся на поверхности, вращает колонну стальных буровых труб; на нижнем конце трубы крепится буровая коронка, армированная твердыми сплавами или алмазами (рис. 1). Вращаясь коронка вырезает цилиндрический столбик породы, который постепенно заполняет специальную внутреннюю (колонковую) трубу. При бурении без отбора керна часто используют буровые головки, которые представляют собой систему нескольких вращающихся конусов, армированных твердыми сплавами (см. рис. 1). Если стенки скважины неустойчивы, в

Таблица 1. Характеристика некоторых глубоких и сверхглубоких скважин

Скважина	Регион	Преобладающие породы	Годы бурения	Глубина, м		Температура на забое, °С
				проектная	реальная	
Берта Роджерс	Оклахома, США	Осадочные	1973–1974		9 583	260
Кольская	Кольский полуостров, Россия	Магматические и метаморфические	1970–1991	15 000	12 261	212
Саатлинская	Куринская впадина, Азербайджан	Осадочные и вулканические	1977–1990	11 000	8 324	148
Криворожская	Кривой Рог, Украина	Метаморфические	1984–1993	12 000	5 382	85
Воротилловская	Поволжье, Россия	Породы ударного метаморфизма	1989–1992	6 000	5 374	96
Тырныаузская	Северный Кавказ, Россия	Граниты	1987–1990	4 000	4 001	223
Уральская	Средний Урал, Россия	Осадочные и вулканические	1985*	15 000	5 355	81
Тимано-Печорская	Северо-восток европейской части России	Осадочные	1984–1993	7 000	6 904	129
Тюменская	Западная Сибирь, Россия	Осадочные и вулканические	1987–1996	8 000	7 502	230
КТБ-Оберпфальц	Бавария, Германия	Осадочные и метаморфические	1990–1994	10 000	9 901	300

\*Бурение продолжается.



**Рис. 1.** Буровая коронка (а) и шарошечная головка (б), которые применялись при бурении сверхглубокой скважины КТБ-Оберпфальц в Германии (по Э. Лаушу, 1996)

нее опускают стальную обсадную трубу. В процессе бурения насос постоянно закачивает в скважину специальный глинистый раствор, необходимый для придания устойчивости стенкам, охлаждения инструмента, выноса мелких частиц породы (шлама) и для других целей. Время от времени колонну буровых труб поднимают на поверхность с помощью лебедки, установленной на буровой вышке, выгружают керн, если необходимо, заменяют изношенную коронку на новую и опять опускают буровой снаряд на забой.

Бурение сопровождается измерениями физических свойств пород вдоль ствола скважины. Для этого на специальном кабеле в скважину опускают приборы, которые фиксируют температуру, электропроводность, магнитную восприимчивость, радиоактивность и другие свойства пород. Этот процесс называют каротажем скважин.

Как показывает опыт бурения в США и других странах, увеличивая мощность двигателей и давление насосов, нагнетающих буровой раствор, повышая грузоподъемность лебедок и прочность сталь-

ных буровых труб, таким способом можно бурить скважины глубиной до 9–10 км. Для более глубоких скважин нужны нетрадиционные инженерные решения. Многие из них были предложены и реализованы в ходе выполнения программ сверхглубокого научного бурения.

Так, если забой скважины находится на многокилометровой глубине, целесообразно использовать забойные двигатели, установленные не на поверхности, а в нижней части буровой колонны, которая при этом сама не вращается. Забойные двигатели представляют собой миниатюрные турбины или винтовые механизмы, которые приводятся во вращение буровым раствором, нагнетаемым под давлением в скважину.

Для того чтобы уменьшить вес колонны буровых труб длиной в несколько километров, их изготавливают из специальных легких, но достаточно прочных и термостойких сплавов. Например, при бурении Кольской скважины использовали алюминиевые сплавы, которые в 2,4 раза легче стали. Для этих же целей предлагается применять трубы из титановых сплавов.

Когда скважина достигает большой глубины, возникает значительная разница между гидростатическим давлением столба бурового раствора и литостатическим (горным) давлением, обусловленным весом горных пород. В результате стенки скважины могут быть разрушены, что приводит к серьезным осложнениям при бурении. Для того чтобы уравновесить горное давление, увеличивают плотность бурового раствора примерно до  $2 \text{ г/см}^3$ , добавляя в него специальные наполнители.

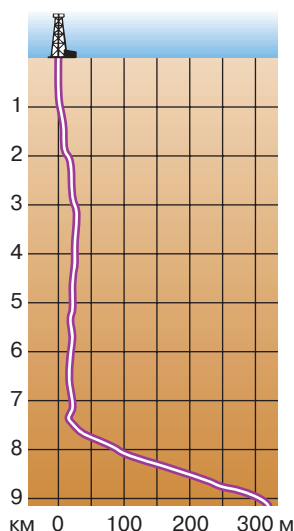
Одна из наиболее сложных технических задач заключается в том, чтобы обеспечить надежную работу бурового оборудования при высоких температурах, существующих в сверхглубоких скважинах (см. табл. 1). Это касается металлических деталей, их соединений, смазок, бурового раствора и измерительной аппаратуры. Хотя на забое, то есть в самой нижней точке скважины Солтон-Си в США на глубине 3220 м была зафиксирована температура  $355^\circ\text{C}$ , а в другой скважине, пробуренной до 1440 м в одной из молодых вулканических структур на западе США, измеренная температура достигала  $465^\circ\text{C}$ , современные технические средства не позволяют бурить сверхглубокие скважины при столь высоких температурах в течение длительного времени, поскольку термостойкость существующего бурового оборудования не превышает  $200\text{--}300^\circ\text{C}$ . Самые большие проблемы возникают с измерительной аппаратурой, особенно с электроникой, которая отказывает уже при  $150^\circ\text{C}$ . Водные буровые растворы сохраняют технологические свойства до  $230\text{--}250^\circ\text{C}$ . При более высокой температуре приходится переходить на нефтяную основу растворов и применять более сложные смеси. Высокая температура земных

недр остается одним из главных факторов, ограничивающих глубину научного бурения.

Серьезные технические трудности связаны с самопроизвольным искривлением глубоких скважин в процессе бурения из-за неравномерного разрушения пород на забое, геологических неоднородностей разреза и других причин. Например, забой Кольской скважины на глубине около 12 км отклонился от вертикали на 840 м. Существуют технические приемы удержания скважины в вертикальном положении. Так, благодаря удачной конструкции специального приспособления скважина КТБ-Оберпфальц в Германии оставалась до глубины 7500 м самой вертикальной скважиной в мире. Однако глубже это приспособление вышло из строя из-за высокой температуры и давления, и скважина пошла своим путем; в результате на глубине 9101 м она отклонилась от вертикали на 300 м (рис. 2).

Сверхглубокое бурение требует создания специальной измерительной аппаратуры, контролирующей условия вдоль ствола и на забое. Обычная технология каротажа с датчиками, которые опускают в скважину на термостойком кабеле, мало пригодна для этих целей. Разработана телеметрическая и другая электронная аппаратура, которая крепится на буровом снаряде, а также автономные измерительные приборы, которые опускаются вниз и выносятся наверх потоком бурового раствора. Сигналы датчиков могут передаваться не по проводам, а гидравлическим способом путем создания импульсов давления в буровом растворе.

Глубокие и сверхглубокие скважины имеют телескопическую конструкцию. Бурение начинают с самого большого диаметра (92 см в Кольской сква-



**Рис. 2.** Схематический разрез, иллюстрирующий искривление скважины КТБ-Оберпфальц в Германии (по Э. Лаушу, 1996)

жине, 71 см в скважине КТБ-Оберпфальц), а затем переходят на меньшие. Нижняя часть Кольской скважины пробурена диаметром 21,5 см, а диаметр скважины КТБ-Оберпфальц на забое был 16,5 см.

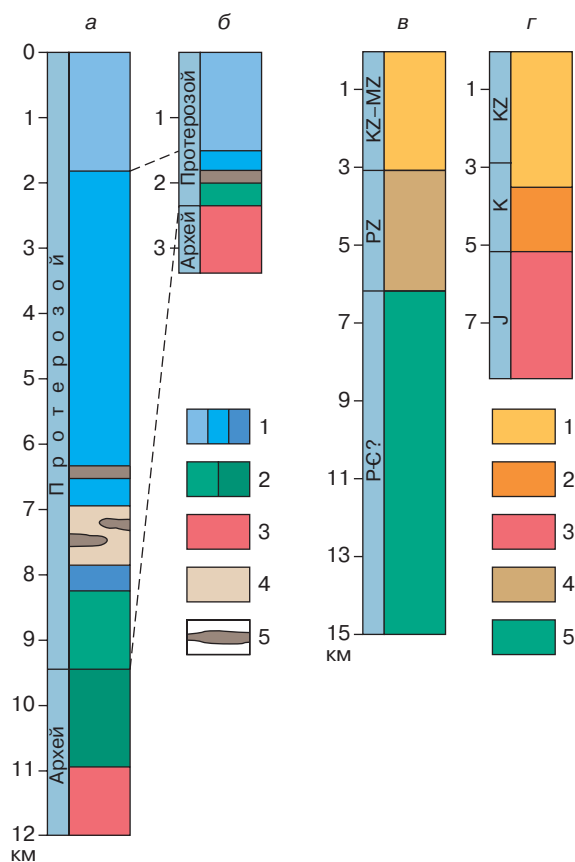
Механическая скорость бурения (углубления) сверхглубоких научных скважин составляет 1–3 м/ч. За один рейс между спуско-подъемными операциями углубляются на 6–10 м. Средняя скорость подъема колонны буровых труб равна 0,3–0,5 м/с. Не менее 10% времени тратится на измерения в скважине. В целом бурение одной сверхглубокой скважины занимает годы (см. табл. 1) и стоит очень дорого. Например, бурение сверхглубокой скважины в Германии обошлось в 583 млн немецких марок. Затраты на сверхглубокое бурение в нашей стране были не меньше.

При бурении глубоких скважин нередко возникают аварии, вызванные мертвым прихватом бурового снаряда и другими причинами. На устранение аварий требуется много времени, зачастую их вообще невозможно устранить, приходится начинать бурение нового ствола. Поэтому многокилометровый столбик керна диаметром от 5 до 20 см, который является одним из основных, но не единственным результатом научного бурения, становится поистине драгоценным. КERN тщательно документируют и хранят в специальных помещениях. Его изучением занимаются большие коллективы специалистов, которые проводят разнообразные исследования. Например, материал, полученный при бурении немецкой сверхглубокой скважины, изучали около 400 ученых, результаты этих исследований изложены в 2000 научных публикаций!

После того как бурение сверхглубокой скважины закончено, она превращается в постоянно действующую лабораторию. Специалисты следят за изменением режима земных недр вдоль ствола скважины и в околоскважинном пространстве, проводят различные эксперименты. Такие лаборатории созданы на базе Кольской и Воротиловской скважин в России и скважины КТБ-Оберпфальц в Германии.

## НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СВЕРХГЛУБОКОГО БУРЕНИЯ

Ни одна из сверхглубоких скважин не подтвердила полностью геологического разреза, который предполагался до начала бурения; во многих случаях расхождения оказались кардинальными (рис. 3). Сам этот факт подтверждает приблизительный характер современных знаний о глубинном строении континентальной земной коры и доказывает необходимость глубокого научного бурения. Так, Криворожская скважина была пробурена в центре железорудного бассейна с целью доказать, что железистые кварциты, выходящие на поверхность в виде полосы протяженностью около 120 км, погружаются до глубины 6–8 км, а затем, изгибаясь, снова выходят на поверхность. Результаты бурения показали, что



**Рис. 3.** Сопоставление проектных (а, в) и реальных (б, г) разрезов Криворожской (а, б) и Саатлинской (в, г) скважин

Криворожская скважина: 1 – метаморфизованные осадочные породы, 2 – метаморфизованные магматические породы основного состава, 3 – метаморфизованные гранитные породы, 4 – железистые кварциты, 5 – пласты и линзы железных руд.  
Саатлинская скважина. Возрастные группы пород: KZ – кайнозой и MZ – мезозой, PZ – палеозой, PС? – предполагаемый докембрий, К – меловая система, J – юрская система (части мезозойской группы); 1 – осадочные породы, 2 – вулканические породы основного и среднего составов, 3 – то же среднего и кислого составов, 4 – сланцы, 5 – кристаллические породы базальтового слоя

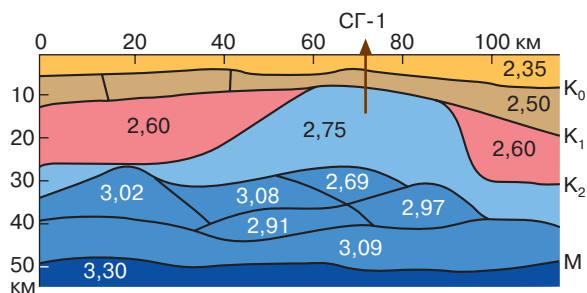
глубинная структура этого бассейна представляет собой не изогнутую складку, а серию параллельных наклонных пластов, уходящих на глубину более 10 км. Надежды на открытие новых рудных залежей на доступных для добычи глубинах не оправдались.

Главная задача, которая стояла перед первыми сверхглубокими скважинами – Кольской и Саатлинской, – заключалась в достижении кровли так называемого базальтового слоя земной коры, который давно уже выделялся по геофизическим данным, указывающим на возрастание скорости прохождения упругих волн и увеличение плотности

горных пород с глубиной. Интерпретируя эти данные, выделяли верхний гранитный слой со скоростями продольных волн 5,5–6,5 км/с и средней плотностью 2,7 г/см<sup>3</sup>, а также нижний базальтовый слой со скоростями 6,7–7,5 км/с и средней плотностью 2,9 г/см<sup>3</sup>. Такие параметры были получены в лабораторных условиях для магматических пород гранитного (SiO<sub>2</sub> > 65 мас. %) и базальтового (SiO<sub>2</sub> < 53 мас. %) составов. Давно стало ясно, что на самом деле оба этих слоя сложены разнообразными по составу породами и приведенные выше характеристики являются интегральными, но прямых сведений о составе базальтового слоя не было. Сверхглубокие скважины были специально заложены в тех местах, где, по геофизическим данным, предполагались выступы базальтового слоя и его кровля достигала глубины 6–7 км от современной дневной поверхности (рис. 4).

Результаты бурения оказались прямо противоположными тому, что следовало из интерпретации геофизических данных. В Саатлинской скважине вместо выступа древних высокоскоростных пород основного состава, бедных кремнеземом (SiO<sub>2</sub>), в интервале 3540–8324 м были вскрыты меловые и юрские (110–150 млн лет) вулканические породы, причем содержание кремнезема в них возрастает с глубиной так, что на уровне базальтового слоя залегают породы, близкие по составу к гранитам. Кольская скважина пересекла кровлю базальтового слоя на глубине 6842 м. Оказалось, что на этой глубине проходит граница между протерозойскими (1,9–1,6 млрд лет) базальтами и подстилающими их архейскими (>2,8 млрд лет) гранитогнейсами.

Изучение керна и материалов каротажа сверхглубоких скважин показало, что сейсмическая поверхность, которая принималась за границу между гранитным и базальтовым слоями, на самом деле фиксирует зону разуплотнения, связанную с увеличением пористости и микротрещиноватости пород



**Рис. 4.** Схематический разрез через Куринскую впадину в районе Саатлинской скважины. Цифрами обозначены предполагаемые плотности пород (в г/см<sup>3</sup>), полученные путем интерпретации геофизических данных. Выступ пород с плотностью 2,75 г/см<sup>3</sup> (верхняя часть базальтового слоя) совпадает с локальным максимумом силы тяжести

в основании гранитного слоя. Формирование такой зоны вызвано тем, что при температуре 60–100°C химически и физически связанная вода и другие летучие соединения переходят в свободное состояние с образованием гидроразрывов и частичным растворением горных пород. Этот эффект затем был обнаружен и в других глубоких и сверхглубоких скважинах. Тем самым было доказано, что волновая картина, которая фиксируется сейсмическими методами, отражает не столько изменение состава пород с глубиной, сколько изменение его напряженного состояния и фильтрационных свойств. Стало ясно, что двуслойная модель строения континентальной земной коры по крайней мере не является универсальной.

Эти результаты важны не только для интерпретации геофизических данных. Они позволили по-новому оценить общие условия формирования глубинной гидросферы Земли и понять природу некоторых явлений, которые ранее оставались необъяснимыми: в частности, появление глубинных зон избыточного давления, не соответствующего весу вышележащих пород, противодействие глинистых толщ уплотнению при их погружении на большие глубины, когда они превращаются из традиционных малопроницаемых водоупоров в пористые коллекторы нефти и газа.

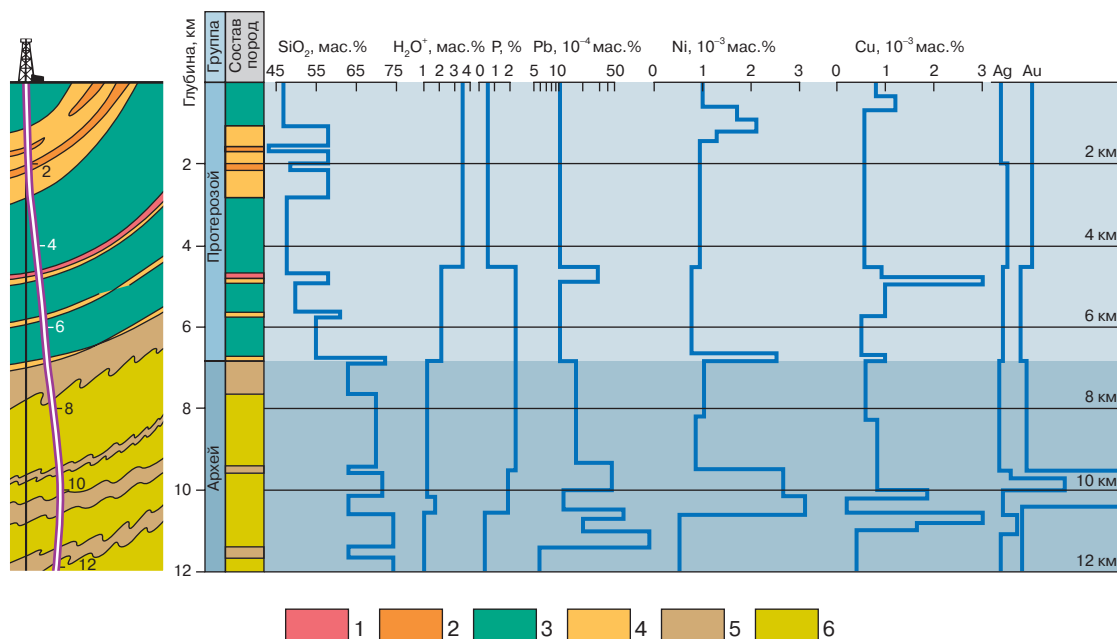
Как следует из материалов бурения Саатлинской скважины, подземные воды могут проникать в изначально сухие кристаллические породы из перекрывающих осадочных толщ (механизм нисходящей фильтрации). Таким путем могут формироваться и глубокие залежи нефти. Тюменская сверхглубокая скважина, пробуренная в 20 км к западу от Уренгоя до глубины 7502 м, подтвердила этот вывод. На глубинах от 6424 м до забоя она вскрыла толщу базальтов, которые в отличие от аналогичных по возрасту и составу пород, обнаженных на поверхности в Восточной Сибири, оказались очень пористыми и микротрещиноватыми, поскольку выделявшаяся при уплотнении вышележащих осадочных толщ вода вступала во взаимодействие с подстилающими сухими базальтами так, что в конце концов они превратились в проницаемые глубинные коллекторы, благоприятные для накопления газоконденсатных и газовых залежей.

Изучение распределения химических элементов в керне глубоких и сверхглубоких скважин привело к выводу, что процессы геохимической миграции с образованием локальных повышенных концентраций тех или иных металлов характерны не только для приповерхностной зоны, но протекают и на глубине многих километров. Так, аномально высокие содержания золота и серебра были установлены в Кольской скважине на глубине около 10 км (рис. 5). Следовательно, руды могут залегать на весьма большой глубине, что согласуется с результатами разведки некоторых известных месторож-

дений, где оруденение прослежено скважинами и горными выработками на несколько километров от дневной поверхности. Так, в пустыне Кызылкумы вблизи золоторудного месторождения Мурунтау, которое является одним из крупнейших в мире, пробурены глубокая скважина, а также четыре скважины-спутника суммарной глубиной 5000 м. С их помощью удалось изучить состав и строение рудомещающих осадочных пород, а на глубине около 4000 м вскрыть купол гранитов. Промышленное золотое оруденение было прослежено до глубины 1100 м. По данным бурения, на глубоких горизонтах месторождения можно ожидать запасы золота, которые оцениваются в 3 тыс. т.

Если целесообразность практического извлечения руд с глубины 5–10 км проблематична, то теоретическое значение геохимических данных, полученных при сверхглубоком бурении, в сочетании с открытиями, которые относятся к сохранению высокой проницаемости и пористости горных пород до 10–12 км, исключительно велико. Эти данные подтверждают возможность широкомасштабной циркуляции нагретых вод, которые взаимодействуют с породами земной коры. Если это так, то источники рудного вещества на месторождениях следует связывать не с гипотетическими подкоровыми глубинами, а с реальными процессами перераспределения химических элементов в верхней и средней частях континентальной коры.

Большой интерес представляют результаты бурения Воротиловской скважины, которая была заложена в 60 км к северо-востоку от Нижнего Новгорода для изучения Пучеж-Катунской астроблемы — кратера, который образовался при падении крупного метеорита. Это событие произошло примерно 200 млн лет назад и сопровождалось мощным взрывом. Горные породы были раздроблены и разбиты многочисленными трещинами до глубины около 3 км. В эпицентре взрыва под воздействием взрывной волны кристаллическая решетка многих минералов оказалась разупорядоченной, и они превратились в аморфные стекла. В момент взрыва температура достигала 2000–3000°C, и после прохождения ударной волны, когда давление резко снизилось, твердые породы плавилась и, возможно, частично испарялись. Позднее взрывной кратер был перекрыт более молодой осадочной толщей. Скважина глубиной 5374 м вскрыла полный вертикальный разрез кратера, что позволило детально изучить все эффекты древнего взрыва, последствия которого поражают воображение. В результате удара метеорита крупный блок земной коры сначала был сильно сжат, а затем выдвинулся вверх почти на 2 км относительно первоначального положения. На поверхности образовался кратер диаметром 80 км, заполненный раздробленным и частично расплавленным материалом. Среди новообразованных минералов были обнаружены и алмазы, которые возникли в момент взрыва из органического углерода,



**Рис. 5.** Схематический разрез Кольской сверхглубокой скважины и распределение некоторых химических элементов по вертикали. Р – закрытая пористость: 1 – пластовые залежи магматических пород среднего и кислого составов, 2 – то же основного состава, 3 – базальты, 4 – осадочные породы, 5 – кристаллические сланцы, 6 – граниты и гнейсы

первоначально заключенного в осадочных породах мишени.

Главная задача бурения Уральской сверхглубокой скважины заключается в получении прямой информации о фундаменте Уральского подвижного пояса. В настоящее время специалисты обсуждают две альтернативные модели. Согласно одной из них, на месте Урала ранее существовал обширный океан. Другая модель предполагает, что Уральский пояс был заложен на континентальном основании. Обе модели имеют далеко идущие геологические следствия. Прямые сведения о составе пород, залегающих сейчас на глубине 10–15 км, внесут ясность в эту проблему.

Теплофизические измерения в глубоких и сверхглубоких скважинах позволили существенно уточнить распределение температур и величину глубинного теплового потока. Оказалось, что температуры и плотность теплового потока во многих случаях заметно превышают те оценки, которые получены экстраполяцией данных по приповерхностной зоне. Так, в Кольской скважине температура на глубине 12 км оказалась равной 212°C вместо предполагавшихся 120°C. Скорее всего, это связано с тем, что нижняя часть разреза этой скважины сложена гранитными породами, которые содержат значительно больше теплотворных радиоактивных элементов (U, Th, K), чем породы базальтового слоя в проектом разрезе. По расчетам температура в районе этой скважины на глубине 30 км равна 460°C, а

на глубине 42 км в основании земной коры достигает 580°C.

Аномально высокие температуры характерны для Тырныузской скважины, пробуренной на Северном Кавказе. Температура на глубине 4 км повышается здесь до 223°C. Эта скважина пересекает граниты, которые были внедрены в земную кору всего 2 млн лет назад в виде магматического расплава с начальной температурой 900–700°C. К настоящему времени граниты не успели окончательно остыть.

Согласно проекту, разработанному в ГНПП «Недра», Тырныузская скважина должна была служить главным элементом опытной геотермальной станции, использующей тепло сухих нагретых гранитов. Для этого предполагалось закачивать в эту скважину холодную воду, а через пробуренную рядом вторую скважину извлекать горячую воду на поверхность. Планировалось зацементировать ствол до глубины 3457 м, ниже пробурить 350–400-метровое наклонное ответвление, а рядом – еще одну скважину для подъема воды. Вода, нагнетаемая под давлением, должна была расширять трещины в граните, увеличивая его проницаемость, нагреваться до 240°C и подниматься наверх. Согласно расчетам, такая конструкция могла обеспечить горячей водой соседний город Тырныуз. К сожалению, из-за возникших экономических трудностей этот интересный проект остается пока нереализованным. Существуют и другие, еще более смелые проекты глубокого

бурения с целью практического использования тепла Земли [5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная техника позволяет бурить скважины на континентах глубиной до 10–15 км. Прямое проникновение на большие глубины требует новых технологий бурения и остается пока делом будущего. Первые впечатляющие научные результаты позволяют надеяться, что необходимые технические средства будут созданы достаточно быстро.

Полученные с помощью глубокого и сверхглубокого бурения новые данные о реальном глубинном строении земной коры, в том числе о явлениях активного взаимодействия вода–порода, которые приводят к формированию неоднородностей типа волноводов и ложных границ, заставили внести серьезные коррективы в интерпретацию геофизических измерений.

Следует подчеркнуть, что сами программы научного бурения являются мощным стимулом технического прогресса и международной кооперации ученых. Например, благодаря такой программе в СССР было создано уникальное буровое оборудование, изготовленное на отечественных заводах, которое позволило пробурить самую глубокую в мире скважину (12,3 км). Опыт бурения сверхглубокой скважины в Германии был очень полезным с точки зрения организации и проведения научных исследований. В ближайшие годы, вероятно, будет реализована широкая международная программа глубокого научного бурения на континентах, сопо-

ставимая по размаху с бурением в океанах. Сейчас стало очевидным, что это совершенно необходимо для дальнейшего развития геологической науки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Резанов И.А. Сверхглубокое бурение. М.: Наука, 1981.
2. Кольская сверхглубокая. М.: Недра, 1984.
3. Казанский В.И. Континентальное научное бурение // Геология руд. месторождений. 1990. № 2.
4. Хахаев Б.Н., Певзнер Л.А., Кременецкий А.А. Континентальное научное бурение в России, состояние и основные направления развития // Разведка и охрана недр. 1994. № 1.
5. Кременецкий А.А. ТЭЦ под землей // Природа и человек. 1995. № 11.

\* \* \*

Виктор Сергеевич Попов, доктор геолого-минералогических наук, профессор, зав. кафедрой петрографии магматических и метаморфических пород Московской государственной геологоразведочной академии. Область научных интересов – магматическая петрология, геохимия и металлогения. Автор около 140 научных работ и учебных пособий.

Александр Александрович Кременецкий, доктор геолого-минералогических наук, профессор Московской государственной геологоразведочной академии, зам. директора Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (Москва). Область научных интересов – глубинная геохимия и металлогения. Автор 83 научных работ.