

Кристаллическая земная кора по данным бурения Кольской сверхглубокой скважины

Ф.Ф.Горбачевич¹, В.Р.Ветрин¹, М.В.Ковалевский¹

¹Геологический институт Кольского научного центра РАН (Апатиты, Россия)

Научное бурение — наиболее эффективное средство получения сведений о земной коре. Кольская сверхглубокая скважина — самая глубокая в мире, значительно продвинувшая наши представления о земных недрах. На основе знаний, полученных при исследовании ее керна и разреза, а также моделирования условий глубинных давлений и температур, разработана модель изменений плотности и скорости сейсмических волн в верхней, средней и нижней кристаллической коре.

Ключевые слова: Кольская сверхглубокая скважина, кристаллическая земная кора, плотность, скорость сейсмических волн.

Прошло 50 лет с момента, когда был забит колышек на месте будущей Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) — самой глубокой в мире. Результатами исследований, проведенных по разрезу и керну этой скважины, может по праву гордиться российская наука. Знание состава, структуры и эволюции земной коры и процессов, которые приводят к ее изменению, крайне важно. Их изучение способствует разумному потреблению земных ресурсов, бережному отношению к природе и ее рациональному использованию.

Научное бурение — наиболее прямое средство получения сведений о кристаллической коре Земли и в особенности об изменениях окружающей среды в прошлые геологические эпохи. Такой метод помогает понять ныне происходящие геологические процессы, улучшить методы прогноза опасных природных явлений и планировать мероприятия по смягчению их последствий.

Советский Союз и Российская Федерация имели высокий приоритет в осуществлении глубокого бурения: было пробурено 11 глубоких и сверхглубоких исследовательских скважин в наиболее важных геологических структурах. За рубежом также осуществлялись проекты научного бурения. Самым значимым из них стала сверхглубокая скважина КТВ Hauptbohrung (Хауптборунг) в Германии, достигшая глубины 9101 м.

Кольская сверхглубокая

Уникальный научно-технический проект «Кольская сверхглубокая» стартовал в 1970 г. Скважина пробурена в северо-восточной части Балтийского щита (69°25′с.ш., 30°44′в.д.). В июне 1990 г. ее забой достиг глубинной отметки 12 262 м (рис.1).

Исследование разреза скважины проводилось специалистами ведущих научных центров России, а также в рамках проектов Международной программы по геологической корреляции (МПК-ЮНЕСКО). Среди них следует отметить объемный проект 408-МПК ЮНЕСКО «Породы и минералы на большой глубине и на поверхности» (1998–2002). Накопленные в ходе работ над ним теоретические и экспериментальные данные в последующем были дополнены исследованиями международного проекта ИНТАС-01-0314 «Геодинамика в разрезе Кольской сверхглубокой скважины» (2003–2005).

При выполнении этих проектов получены уникальные научные материалы — главным образом благодаря наличию практически непрерывного столба керна Кольской скважины, вплоть до глубины 12260 м. Эта коллекция керна — единственная в мире по полноте, качеству сохраненного материала, разнообразию представленных кристаллических пород из различных свит и толщ. Еще одна особенность проекта — детальная изученность геоло-

гическими и геофизическими методами района бурения и данной части Балтийского щита.

Проект «Кольская сверхглубокая» позволил впервые получить объемную геолого-геофизическую информацию о строении, свойствах и состоянии кристаллической коры Балтийского щита. По результатам сейсмических исследований и изучения глубинных пород здесь принята пятислойная модель строения с весьма сложной слоисто-блоковой структурой, которая отражает многоэтапность тектономагматической и метаморфической переработки геологических толщ. Помимо базовых верхней, средней и нижней коры выделен слой с пониженными скоростями прохождения упругих волн, залегающий в низах верхней коры, и переходный корово-мантйный слой.

На северо-западе Кольского п-ова нижняя граница верхней коры проводится на глубинах 10–15 км. Далее, до 20–21 км и 37–40 км, выделена средняя кора предположительно диоритового состава и базитовая нижняя кора, которая через переходный слой мощностью около 5 км, граничит с верхней мантией.

Кольская сверхглубокая скважина пересекала палеопротерозойский осадочно-вулканогенный комплекс и внедрилась в неоархейские метаморфизованные породы фундамента Печенгской рифтогенной структуры. Ранее полагали, что до глубины 5–7 км залегает так называемый гранитный слой, а затем скважина должна была войти в базальтовые породы. Реальное геолого-структурное строение Печенгской рифтогенной структуры свидетельствует о длительном (в течение миллиардов лет) процессе погружения первоначально находившихся на поверхности пород и о последующих их многоэтапных метаморфических преобразованиях.

Протерозойский (печенгский) комплекс вскрыт скважиной в интервале 0–6842 м. Он представлен ритмично чередующимися осадочными и вулканогенными породами с подчиненными комагматичными телами габбро-верлитов, а также пластовыми телами габбро-диабазов и дацит-андезито-



Феликс Феликсович Горбачев, доктор технических наук, геофизик, ведущий научный сотрудник Геологического института Кольского научного центра РАН. Область научных интересов — глубинное строение земной коры, распространение продольных и поперечных волн в твердом теле, свойства и структура горных пород.
e-mail: gorich@geoksc.apatity.ru



Валерий Романович Ветрин, кандидат геолого-минералогических наук, геолог, ведущий научный сотрудник того же института. Специалист в области глубинного строения земной коры, петрологии, геохронологии протерозойских и архейских комплексов северо-запада Балтийского щита.
e-mail: vetrin@geoksc.apatity.ru



Михаил Васильевич Ковалевский, кандидат технических наук, геофизик, старший научный сотрудник того же института. Круг научных интересов — распространение продольных и поперечных волн в твердом теле, свойства и структура горных пород, программирование.
e-mail: koval@geoksc.apatity.ru

вых порфиритов. В протерозойской части разреза Кольской сверхглубокой скважины выделяются четыре серии, в пределах которых вскрыты свиты с осадочными и вулканогенными породами. Временной интервал формирования протерозойского комплекса составляет 2.32–1.97 млрд лет назад [1].

Архейские породы вскрыты скважиной на глубинах 6842–12262 м в фундаменте палеопротерозойской Печенгской структуры. Они образованы главным образом чередующимися толщами метавулканитов дацит-плагиориодацитового состава и метаосадочных пород, представленных гнейсами с высокоглиноземистыми минералами. Наиболее древние породы архейского комплекса имеют возраст около 2.83 млрд лет [2].

Изучение структуры архейской части разреза позволило выявить периодичность отложения основных пород во временном разрезе, охватывающем период 2.83–2.80 млрд лет назад. Наиболее распространены в этой части разреза три группы пород: гнейсы, амфиболиты и сланцы. Обобщенное распределение мощностей слоев для всех по-



Рис.1. Кольская Сверхглубокая. 1986 г.

Фото Д.Ф.Сабурова

род из этой части разреза показывает преобладание породных интервалов в 10–15 м и 15–20 м. Анализ гистограмм распределения гнейсов, амфиболитов и сланцев позволяет сделать вывод, что циклы отложения данных пород имели тенденцию к «укорачиванию», или уменьшению мощностей, со временем.

Палеогеодинамические нарушения и современные напряжения по разрезу Кольской сверхглубокой

Палеогеодинамические подвижки зафиксированы как в протерозойской, так и в архейской части разреза. В интервале 1.7–1.9 км на участке сульфидного медно-никелевого оруденения наблюдается высокое вывалообразование, значительно (до 70 см) увеличившее диаметр скважины. Это связано с палеогеодинамическими событиями, которые при внедрении рудных масс сопровождалось сдвигом породных пачек.

Крупнейшее палеогеодинамическое нарушение в разрезе — Лучломпольский разлом, главный тектонический шов которого вскрыт скважиной

на глубине около 4600 м. Напряженно-деформированное состояние пород околоскважинного массива в зоне разлома (на глубинах 3.91–5.33 км) осложнено разрывными нарушениями, а также чередованием пачек высокоанизотропных и низкоанизотропных пород. Это выражается в образовании значительных вывалов из стенок скважины. Геодинамическая схема тектонического расчленения сдвиговой зоны Лучломпольского разлома показывает, что краевые части пачек обладают более высокой упругой анизотропией по сравнению со средними.

Сопоставление данных, полученных на образцах с земной поверхности и отобранных по профилю через Лучломпольский разлом с данными изучения керна скважины в этой зоне, позволяет заключить, что глубинные породы более неоднородны. Вероятно, палеонапряжения на глубине изменяли направление и величину в условиях различных сдвиговых деформаций. Самый анизотропный интервал протерозойской части разреза (с максимальной кавернозностью стенок скважины) приходится на лучломпольскую свиту и верхнюю часть пирттярвинской (4.7–5.2 км).

Современные напряжения в районе Печенгского геологического блока и Кольской СГ-3 определяются раздвижением континентальных плит срединно-океанических рифтовых зон Атлантического и Ледовитого океанов и давлением Африканской литосферной плиты на Евразийскую. Ориентация максимальных сжимающих напряжений в Печенгском геоблоке преимущественно субмеридиональная. Установлено, что по разрезу Кольской сверхглубокой скважины горизонтальные тектонические напряжения изменяются от 7 МПа вблизи поверхности до 125 МПа на глубине 11.5 км. Среднее отношение действующих горизонтальных напряжений (включающих величину бокового отпора, возникающего при действии вертикальной компоненты, и тектоническую составляющую) к вертикальным оценивается величиной 0.7–0.8. Резкие изменения значений горизонтальной компоненты напряжений по глубине обусловлены структурными неоднородностями и упругой анизотропией пород (рис.2).

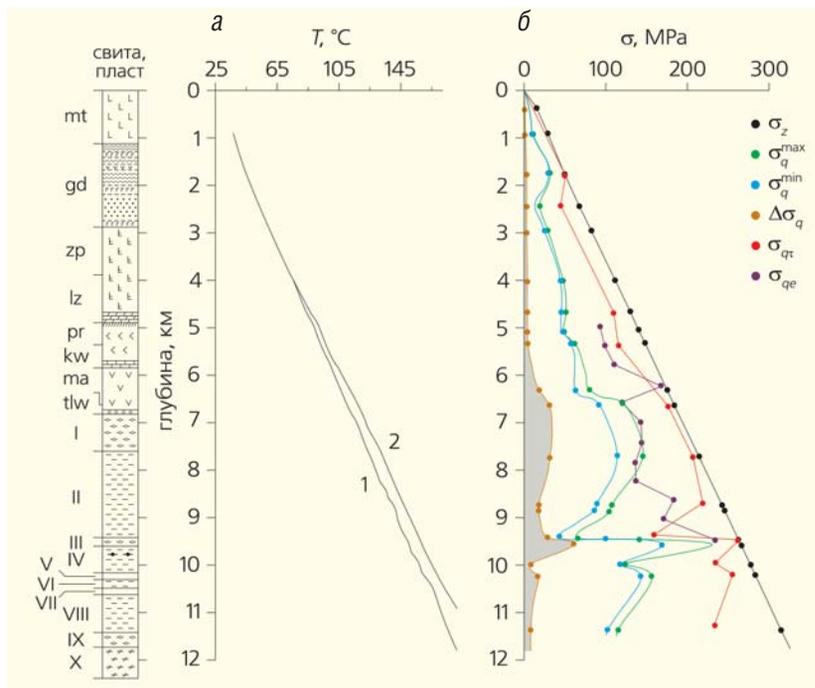


Рис.2. Зависимость температуры (а) и вертикальной и горизонтальной компонент поля напряжений (б) от глубины по разрезу Кольской сверхглубокой скважины [2, 3]. Измерения температуры выполнены 02.03.1984 (1) и 13.05.1984 (2). Составляющие поля напряжений: σ_z — вертикальная, σ_q^{\max} , σ_q^{\min} — горизонтальные, полученные расчетом; $\Delta\sigma_q = \sigma_q^{\max} - \sigma_q^{\min}$; σ_{qt} — горизонтальная, с учетом действия тектонических сил, оцененных по методу нагружения образцов; σ_{qe} — горизонтальная, с учетом действия тектонических сил, оцененных по методу насыщения образцов. В колонке приведены отложения свит: mt — матертинская, gd — ждановская, zp — заполярнинская, lz — лучломпольская, pr — пирртиярвинская, kw — кувернеринюкская, ma — маярвинская, tlw — телевинская; I–X — толщи архейской части разреза скважины.

Физические свойства горных пород по разрезу скважины

Определение физических свойств горных пород выполнено по всему разрезу, вскрытому скважиной. Образцы архейской части, измеренные при атмосферном давлении и температуре, отличаются тенденцией к повышению эффективной пористости с глубиной. Плотность таких образцов, наоборот, с глубиной снижается. Данная тенденция противоречит известной закономерности увеличения плотности пород при всестороннем давлении. Совокупность единичных определений скорости распространения продольных волн в образцах указывает на еще более существенную зависимость от глубины. В большей степени она характерна для лейкократовых разновидностей пород. Такая тенденция объясняется эффектом внутренней дезинтеграции межзеренных контактов при освобождении породы от геостатических напряжений [4].

Подобная дезинтеграция ставит принципиальное ограничение на извлечение поликристаллических пород с больших глубин. Например, подъем (без создания специальных снарядов, позволяющих сохранять условия *in situ* при доставке образца на поверхность) лейкократовых разновидностей (гнейсов, гранитов, мигматитов) с глубин, превышающих 13 км, возможен только в виде шлама. Важное практическое следствие эффекта дезинтеграции — возможность создания безлюдных технологий извлечения некоторых полезных ископаемых и подземных полостей на глубинах, недоступных для пребывания человека.

Микротрещины на границах зерен минералов, по спайности и внутри зерен присутствуют почти во всех кристаллических породах. Кроме них в свитах и толщах имеются мелко- и крупномасштабные неоднородности и трещины. Каждое такое нарушение принимает участие в формировании суммарной нелинейности деформации массивов при изменении их напряженного состояния. Таким образом, отклонение от закона Гука — не исключение, а правило для неоднородных, гетерогенных, трещиноватых сред

(горных пород). Соответственно, переход к квазигидростатическому напряженному состоянию в массивах кристаллических пород становится неизбежным. По нашему мнению, глубина такого перехода может быть зарегистрирована сейсмическими методами. Акустополаризационные определения характеристик упругой анизотропии в образцах СГ-3 позволили выявить широкое распространение новых явлений, таких как эффект линейной акустической анизотропии поглощения и эффект деполаризации сдвиговых волн [5]. Результаты определений показали высокий уровень упругой анизотропии пород в целом по разрезу скважины. Характеристики анизотропии (B_s , A_p , ϵ_{1133}) обнаруживают явную корреляцию с величиной диаметра каверн P в скважине (рис.3). Полученные данные показывают, что зоны потери устойчивости связаны с прослоями пород низкой прочности, а также (в большей мере) с существенной анизотропией их упругих свойств (а не с неоднородностью поля современных напряжений).

Приложение всестороннего давления к образцам из керна СГ-3 приводит к существенным изменениям их упругих свойств. Сначала при нагружении образцы деформируются нелинейно, что обусловлено закрытием микротрещин под действием давления. В пределах нелинейного участка деформирования (до 150–200 МПа) скорости распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн в глубинных образцах возрастают в 1.6–1.7 раза. На квазилинейном участке градиент повышения скорости при росте давления в среднем составляет примерно 1.7% на 100 МПа для продольных волн и около 1.3% для поперечных. Нагрев породы, как отобранной на поверхности, так и глубинной, снижает скорость продольных и поперечных волн примерно на 0.7–0.8% на каждые 100°C.

Изменение скорости распространения продольных и поперечных волн в протерозойских и архейских породах СГ-3 с глубиной неоднократно изучалось методами акустического каротажа (АК) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП).

В целом средняя скорость распространения продольных колебаний в породах архейского комплекса составляет 6.2 км/с для продольных волн и 3.6 км/с для поперечных. Повышение давления и температуры с увеличением глубины по разрезу СГ-3 не оказывает существенного влияния на величины V_p и V_s , получаемые методами ВСП и АК.

Наличие Лучломпольского разлома в разрезе Кольской сверхглубокой скважины и наклон элементов залегания (слоистости, сланцеватости, полосчатости) пород благоприятны для миграции глубинных флюидов к земной поверхности. Изучение структуры, анизотропии и проницаемости пород по разрезу скважины при определенных РТ-условиях показали, что зоны проницаемости пород приурочены к двум важным структурным элементам. Верхняя зона тяготеет к Лучломпольскому разлому, нижняя — к контакту протерозойского и архейского комплексов. По данным исследования, именно Лучломпольский разлом служит про-

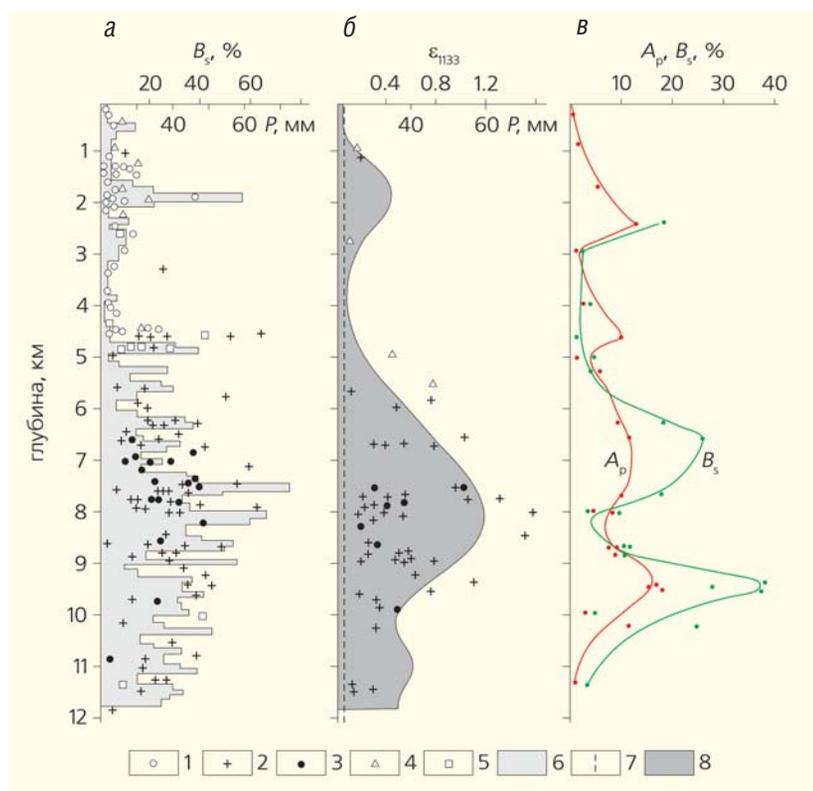


Рис.3. Распределение единичных значений показателя B_s (а), коэффициентов ϵ_{1133} (б) и A_p (в) упругой анизотропии образцов пород по разрезу СГ-3 [5]. 1 — метадиабазы, перидотиты; 2 — амфиболиты, сланцы; 3 — гнейсы, граниты, мигматиты; 4 — филлиты, туфы; 5 — метапесчаники, метаалевролиты; 6 — средний интервальный поперечный размер скважины; 7 — огибающая наибольшего размера диаметра каверн (P); 8 — граничная линия $\epsilon_{1133} = 0.05$. Данные (а, б) получены при измерениях на образцах в лабораторных условиях; (б, в) определены при условиях *in situ*.

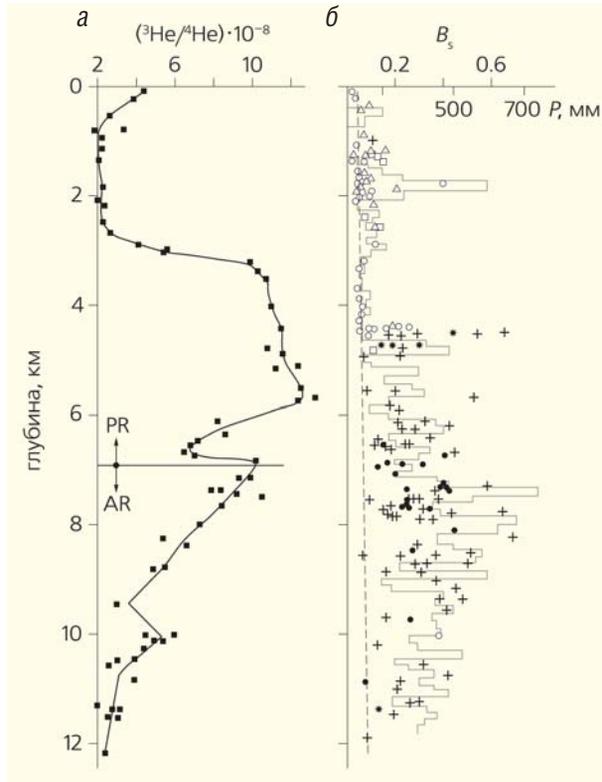


Рис.4. Распределение величины отношения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ (а), единичных значений показателя упругой анизотропии B_s и кавернзности P (б) пород по разрезу Кольской скважины [6].

водящей зоной, по которой поступают флюиды с примесью мантийной компоненты (${}^3\text{He}$) (рис.4).

В процессе бурения скважины происходили аварии с обрывом части буровой колонны. При этом дальнейшее бурение производилось в обход потерянной части. В итоге на глубинах 7–12 км образовалось несколько параллельных стволов (рис.5). Таким образом, Кольская сверхглубокая представляет собой многоствольное сооружение, которое позволило представить объемное геолого-геофизическое строение массива на глубинах 6.5–10.5 км.

При бурении в анизотропных породах ствол скважины, как правило, отклоняется от вертикали в направлении перпендикуляра к плоскости анизотропии (плоскости слоистости, сланцеватости или полосчатости). Анализ траекторий стволов СГ-3 показывает, что на разных глубинах (в пределах различных свит и толщ) плоскость упругой анизотропии пород занимает разное положение. Во всем разрезе выделено 10 интервалов (этажей), различающихся параметрами пространственного положения плоскости анизотропии. Точки поворота этих плоскостей практически выдерживаются по глубине вне зависимости от номера ствола и времени его проводки (см. рис.5). Исследование

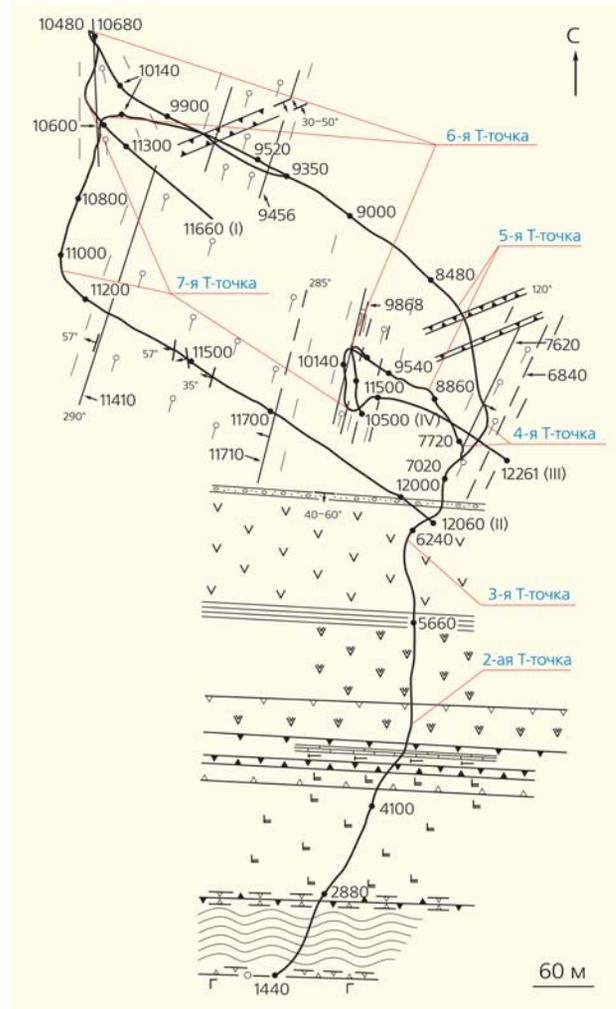


Рис.5. Проекция на горизонтальную плоскость траектории стволов Кольской СГ-3 [4].

параметров траекторий разнесенных стволов скважины позволило разработать модель блоковой структуры массива, показывающую ориентацию этих блоков в пространстве (рис.6).

Моделирование условий, отвечающих свойствам средней кристаллической коры и ее состоянию, позволяет «продолжить» разрез СГ-3 на глубину 10–25 км. Согласно геологической оценке, метаморфизованные породы района оз. Чудзъявр сформировались при РТ-условиях, адекватных условиям средней коры. Исследования образцов, здесь отобранных, выполнены акустополаризационным методом оценки упругой анизотропии пород. Диапазон изменений плотности составляет 2.61–2.97 г/см³. Скорость распространения продольных и поперечных волн лежит в пределах 5.8–6.4 км/с и 3.4–3.6 км/с соответственно.

Для моделирования условий, в которых находятся породы нижней коры региона, были прове-

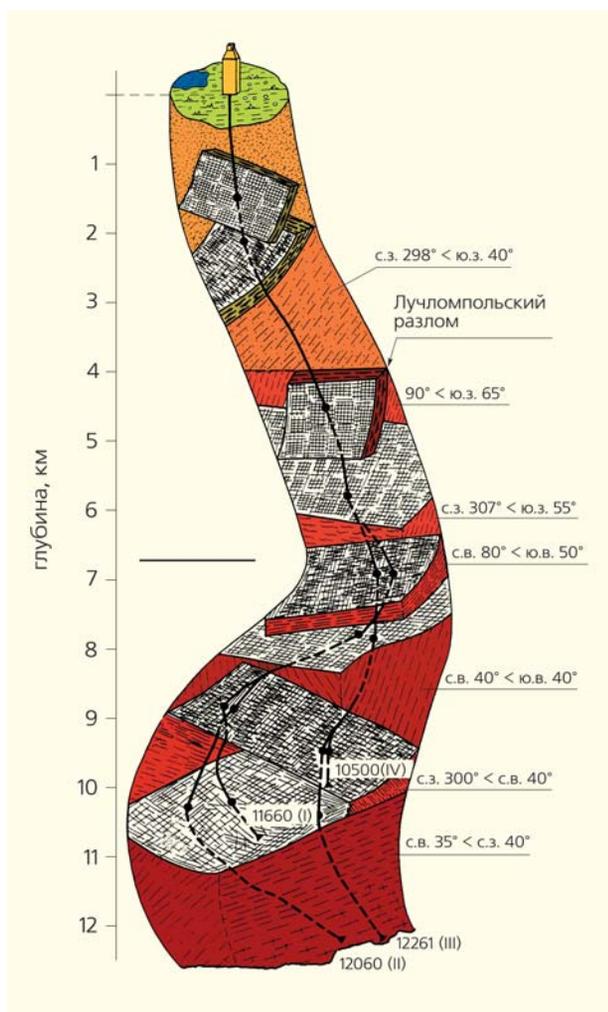


Рис.6. Объемная структурно-блоковая модель разреза Кольской сверхглубокой [4].

дены исследования упруго-анизотропных свойств образцов гранатовых гранулитов, отобранных из ксенолитов в трубке взрыва на о.Еловом в Кандалакшском заливе Белого моря. По оценке, первоначально эти породы находились на глубинах 25–40 км. Методом акустополярископии показано, что упругая анизотропия глубинных пород сравнительно невелика. Средние значения плотности составляют 2.49–3.20 г/см³, а скорости распространения продольных и поперечных колебаний — 6.5–6.7 км/с и 3.7–3.8 км/с соответственно.

На основе экспериментальных и расчетных данных, полученных на разрезе СГ-3, в районе оз.Чудзъявр и на образцах ксенолитов с о.Елового, разработана модель изменения плотности и скорости продольных и поперечных волн в верхней, средней и нижней кристаллической коре Кольско-Норвежского блока до глубины примерно 40 км (рис.7).

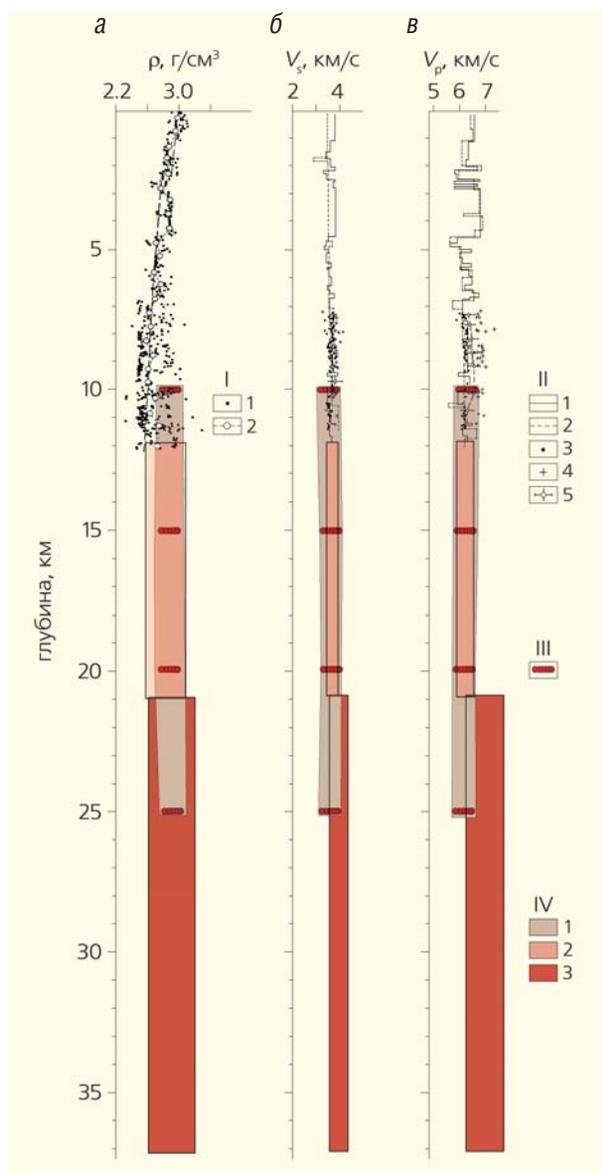


Рис.7. Распределение величин плотности ρ (а), скорости распространения поперечных V_s (б) и продольных V_p (в) волн по разрезу Кольской СГ-3 (экспериментальные данные) и в пределах кристаллической коры (расчетные) [7, 8, с изменениями]. I — плотность: 1 — единичные значения, измеренные на отдельных образцах керна; 2 — среднеинтервальные значения. II — скорость распространения продольных и поперечных волн: 1 — метод вертикального сейсмического профилирования (ВСП), 2 — метод акустического каротажа (АК), 3–5 — расчетный метод (РМ): 3 — для пород гнейсогранитного состава, 4 — для амфиболсодержащих пород, 5 — доверительные пределы средних по интервалам. III — вариации плотности, скорости распространения продольных и поперечных волн для интервала 10–25 км; величины ρ , V_s , V_p рассчитаны для образцов: 31115, 35400, 36058, 38098S, 43560, 43726. IV — данные для разных интервалов глубин: 1 — 1025 км (СГ-3), 2 — 12–21 км (оз.Чудзъявр), 3 — 21–37 км (о.Еловый).



Рис.8. Кольская сверхглубокая в наши дни.

Здесь и далее фото Ю.Антипычева

Вариации плотности и скорости продольных и поперечных волн обусловлены главным образом изменениями минерального состава пород. На глубинах, адекватных нижней коре, происходит замещение плагиоклаза и кварца более плотными гранатом и пироксеноподобным минералом. Относи-

тельное снижение скоростей продольных и поперечных волн с увеличением глубины от 5 до 37 км (под влиянием возрастающих давления и температуры), согласно расчетам, составляет около 2%.

* * *

Проект «Кольская сверхглубокая» продолжался более 25 лет. Он потребовал очень больших трудовых затрат и сплоченной работы множества научных коллективов с применением уникальных высоких технологий. Опубликованы капитальные монографии в нашей стране и за рубежом. Кольская сверхглубокая скважина перешла в режим геолоборатории в 1995 г. (рис.8, 9).

При изучении разнообразных свойств керна и структуры скважины были открыты новые, ранее неизвестные явления. Например, линейная акустическая анизотропия поглощения в породах, которая впервые была зафиксирована в нижней части разреза. Ее наличие зарегистрировано в 90% образцов метаморфических пород с глубин 4.5–12.06 км.

В породах Кольской сверхглубокой скважины довольно часто регистрируется явление деполяризации сдвиговых волн. Оно наблюдается при их распространении через кристаллические зерна (слой) с разноориентированными элементами уп-



Рис.9. Запечатанное устье Кольской сверхглубокой скважины. 2015 г.

ругой симметрии. Деполяризация сдвиговых волн позволяет оценить угол разориентировки элементов упругой симметрии в зернах (слоях) моно- и полиминеральных горных пород.

Еще одно новое явление — дезинтеграция кристаллических пород при их освобождении от литостатических напряжений. Она получила практическое и теоретическое обоснование и поставила принципиальное ограничение на извлечение поликристаллических пород с больших глубин.

Сверхглубокие скважины, аналогичные Кольской СГ-3, — дорогостоящие объекты, которые могут быть сооружены в странах с высоким научно-техническим и экономическим потенциалом. На земном шаре Кольская СГ-3 пока остается единственной в своем роде. Необходимо продолжать исследования материала, полученного при ее бурении, новыми, более информативными методами, с учетом того, что со всего разреза скважины поднято и сохранено около 4 тыс. м керна. ■

Авторы считают своим приятным долгом выразить безмерную благодарность всем коллегам, принимавшим участие в проекте «Кольская сверхглубокая», а также Российскому фонду фундаментальных исследований (проекты 94-05-16034-а, 97-05-64167-а, 00-05-64057-а, 03-05-64159-а, 07-05-00100-а, 10-05-00082-а, 13-05-00125-а и 16-05-00026-а), при поддержке которого получена большая часть приведенных результатов.

Литература / References

1. Кольская сверхглубокая. М., 1984. [Kola superdeep. Moscow, 1984. (In Russ.).]
2. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования. М., 1998. [Kola superdeep. Scientific results and research experience. Moscow, 1998. (In Russ.).]
3. Горбачевич Ф.Ф., Савченко С.Н. Современные напряжения в северной части Балтийского щита по данным исследований печенгского геоблока и разреза Кольской сверхглубокой скважины. Геофизический журнал. 2009; 31(6): 42–54. [Gorbatsevich F.F., Savchenko S.N. Current stresses in the northern part of the Baltic Shield based on research data from the Pechenga geoblock and the Kola superdeep borehole section. Geophysical Journal. 2009; 31 (6): 42–54. (In Russ.).]
4. Структура литосферы российской части Баренц-региона. Ред. Н.В.Шаров, Ф.П.Митрофанов, М.Л.Верба, К.Гиллен. Петрозаводск, 2005. [The structure of the lithosphere in the Russian part of the Barents region. N.V.Sharov, F.P.Mitrofanov, M.L.Verba, K.Gillen (eds.). Petrozavodsk, 2005. (In Russ.).]
5. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия горных пород. Апатиты, 1995. [Gorbatsevich F.F. Acoustopolariscopy of rocks. Apatity, 1995. (In Russ.).]
6. Gorbatsevich F.F., Ikorsky S.V., Zharikov A.V. Structure and permeability of deep-seated rocks in the Kola superdeep borehole section (SG-3). Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2010; 7(2(158)): 145–152.
7. Горбачевич Ф.Ф., Ветрин В.Р., Тришина О.М., Ковалевский М.В. Модель изменений свойств и состояния пород верхней, средней и нижней континентальной коры Кольско-Норвежского блока, Кольский полуостров. Физика Земли. 2014; (4): 56–69. [Gorbatsevich F.F., Vetrin V.R., Trishina O.M., Kovalevsky M.V. Model of changes in properties and state of rocks of the upper, middle and lower continental crust of the Kola-Norwegian block, Kola Peninsula. Physics of the Earth. 2014; (4): 56–69. (In Russ.).]
8. Структура, свойства, состояние пород и геодинамика в геопространстве Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). Ред. Ф.Ф.Горбачевич. СПб., 2015. [Structure, properties, state of rocks and geodynamics in the geospace of the Kola superdeep well (SG-3). F.F.Gorbatsevich (ed.). Sankt Petersburg, 2015. (In Russ.).]

Crystalline crust according to the drilling of the Kola superdeep well

F.F.Gorbatsevich¹, V.R.Vetrin¹, M.V.Kovalevsky¹

¹Institute of Geology of Kola Science Center of the Russian Academy of Science (Apatity, Russia)

Scientific drilling is the most efficient means of obtaining knowledge about the Earth's crust. The Kola superdeep well (SG-3) is the world deepest borehole drilled in crystalline rocks. Based on the knowledge gained in the study of the core and borehole section, as well as modeling the conditions of deep pressures and temperatures, we developed the model of changes in the density and velocity of seismic waves in the upper, middle and lower crystalline crust.

Keywords: Kola superdeep well, crystalline earth crust, density, seismic wave velocity.