

## Космический полет СГ-3 в недра планеты Земля

**Лобанов К.В., Горностаева Т.А., Прокофьев В.Ю., Чичеров М.В.**

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, lobanov@igem.ru*

**Аннотация.** Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) – выдающееся достижение советской науки и техники, пробурена в кристаллических породах в рамках программы «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение». СГ-3 пройдена с полным отбором керна и достигла глубины 12262 м, что позволило изучить глубинное строение земной коры и пересмотреть интерпретацию данных глубинных сейсмических исследований. Получены новые сведения по температурному градиенту, составу и физическим свойствам пород на глубоких горизонтах. СГ-3 вскрыла новые рудные тела медно-никелевых руд. Выявлены 6 типов рудной минерализации по всему разрезу скважины.

**Ключевые слова:** Кольская сверхглубокая скважина, глубинная структура земной коры, медно-никелевые руды, рудная минерализация.

## SG-3 space flight into the bowels of the planet Earth

**Lobanov K.V., Gornostaeva T.A., Prokofiev V.Yu., Chicherov M.V.**

*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, Moscow, lobanov@igem.ru*

**Abstract.** The Kola super deep borehole (SG-3) is an outstanding achievement of Soviet science and technology, it was drilled in the crystalline rocks as part of the program "Study of the Earth's interior and super-deep drilling". SG-3 was drilled with full core sampling and reached a depth of 12262 m, which allowed us to study the deep structure of the Earth's crust and revise the interpretation of deep seismic data. New data on the temperature gradient, composition, and physical properties of rocks at deep horizons were obtained. SG-3 uncovered new ore bodies of copper-nickel ores. 6 types of ore mineralization were identified throughout the borehole section.

**Key words:** Kola superdeep borehole, deep structure of the Earth's crust, copper-nickel ores, and ore mineralization.

Проблема изучения континентальной земной коры с помощью сверхглубокого бурения возникла в СССР в начале 60-х годов. Главной задачей являлась возможность получить с больших глубин породы необходимые для познания эндогенных процессов и связанных с ними месторождений полезных ископаемых. Научные основы программы сверхглубокого континентального бурения были определены на совместном заседании Президиума АН и коллегии Министерства геологии и охраны недр СССР под председательством академика М.В. Келдыша, а сама программа была утверждена в 1962 г. Н.С. Хрущевым на основании решения Совета Министров СССР по докладу академика Д.И. Щербакова. Содержание последующих более широких программ изучения глубинных недр СССР с помощью сверхглубоких скважин и региональных геотраверсов во многом определили результаты проходки Кольской сверхглубокой скважины.

Программа сверхглубокого бурения развивалась одновременно с программой освоения космоса и была как бы космическим полетом в недра планеты Земля, что сопоставимо как по объемам научных исследований, разработке нового оборудования и финансированию. Результаты научного бурения во многом оказались неожиданными и заставили пересмотреть теоретические представления, которые до этого казались очевидными и незыблемыми (Кольская сверхглубокая..., 1984, 1998).

Для организации, координации и руководства работами по этой программе в 1963 г. был образован Межведомственный научный совет по проблеме «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение», который объединил около 200 ученых и специалистов около 40 организаций различных министерств и ведомств. Программой работ на 70-е годы намечались: разработка модели строения земной коры и верхней мантии, а также новых методов прогноза месторождений полезных ископаемых, составление прогнозных карт с количественной оценкой природных ресурсов и запасов и

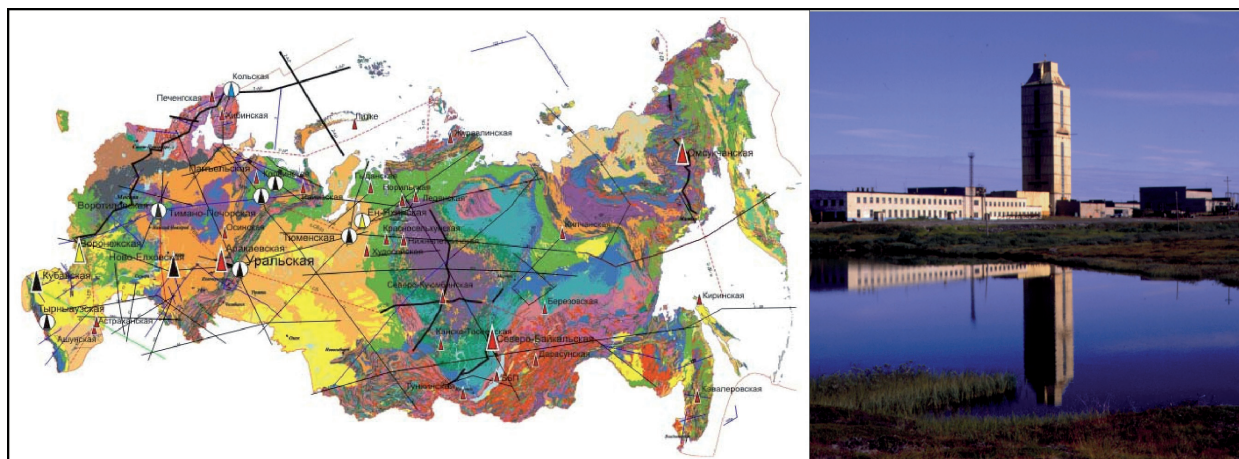


Рис. 1. Схема размещения региональных геотравверсов и сверхглубоких скважин СССР.

Fig. 1. Schematic map of regional geotraverses and super-deep wells of the USSR.

определение направления поисковых и разведочных работ на основные виды полезных ископаемых в перспективных районах страны.

В программе предложен новый технический и методический подход к изучению регионального глубинного строения земной коры и верхней мантии, основанный на комплексировании данных сверхглубокого и глубокого бурения, а также сейсмического глубинного зондирования и других геофизических и геохимических методов (рис. 1).

Место заложения СГ-3 в 1968 г. было выбрано Межведомственной комиссией для решения практической задачи по определению перспектив нижних горизонтов Печенгского рудного поля в отношении медно-никелевых руд. СГ-3 была заложена в северо-западной части Кольского полуострова, где развиты древнейшие на Земле рудоносные тектонические структуры раннего протерозоя и архея. К бурению этой скважины, проектная глубина которой составляла 15 километров, приступили 24 мая 1970 г., а к 1990 г. скважина должна была достигнуть глубины 13 км.

Целью бурения СГ-3 являлось изучение глубинного строения докембрийских структур Балтийского щита, типичных для фундамента древних платформ, и оценка их рудоносности. Основные задачи работ были следующие:

1. Изучить глубинное строение никеленосного Печенгского комплекса и архейского кристаллического основания Балтийского щита, выяснить особенности проявления на больших глубинах геологических процессов, включая процессы рудообразования.
2. Выяснить геологическую природу сейсмических границ в континентальной земной коре и получить новые данные о тепловом режиме недр, глубинных водных растворах и газах.
3. Получить максимально полную информацию о вещественном составе горных пород и их физическом состоянии, вскрыть и изучить пограничную зону между «гранитным» и «базальтовым» слоями земной коры.
4. Усовершенствовать имеющиеся и создать новые технологии и технические средства для бурения и комплексных геофизических исследований сверхглубоких скважин.

На основании результатов глубинного сейсмического зондирования по профилю Баренцево море-Печенга-Ловно предполагалось, что под центральной и северо-восточной частями Печенгской структуры верхняя граница «базальтового» слоя находится на наименьшей глубине (Кольская сверхглубокая..., 1984). Скважина расположена на Северном крыле с таким расчетом, пересечь на отметке 4.7 км контакт раннепротерозойских вулканитов с архейскими гнейсами кольской серии, в интервале 7.5-8.5 км вскрыть поверхность Конрада и проникнуть внутрь «базальтового» слоя. По состоянию на 01.05.1991 г. глубина скважины составляла 12262 м. Бурение осуществлялось с полным отбором керна. Результаты научного бурения во многом оказались неожиданными и заста-

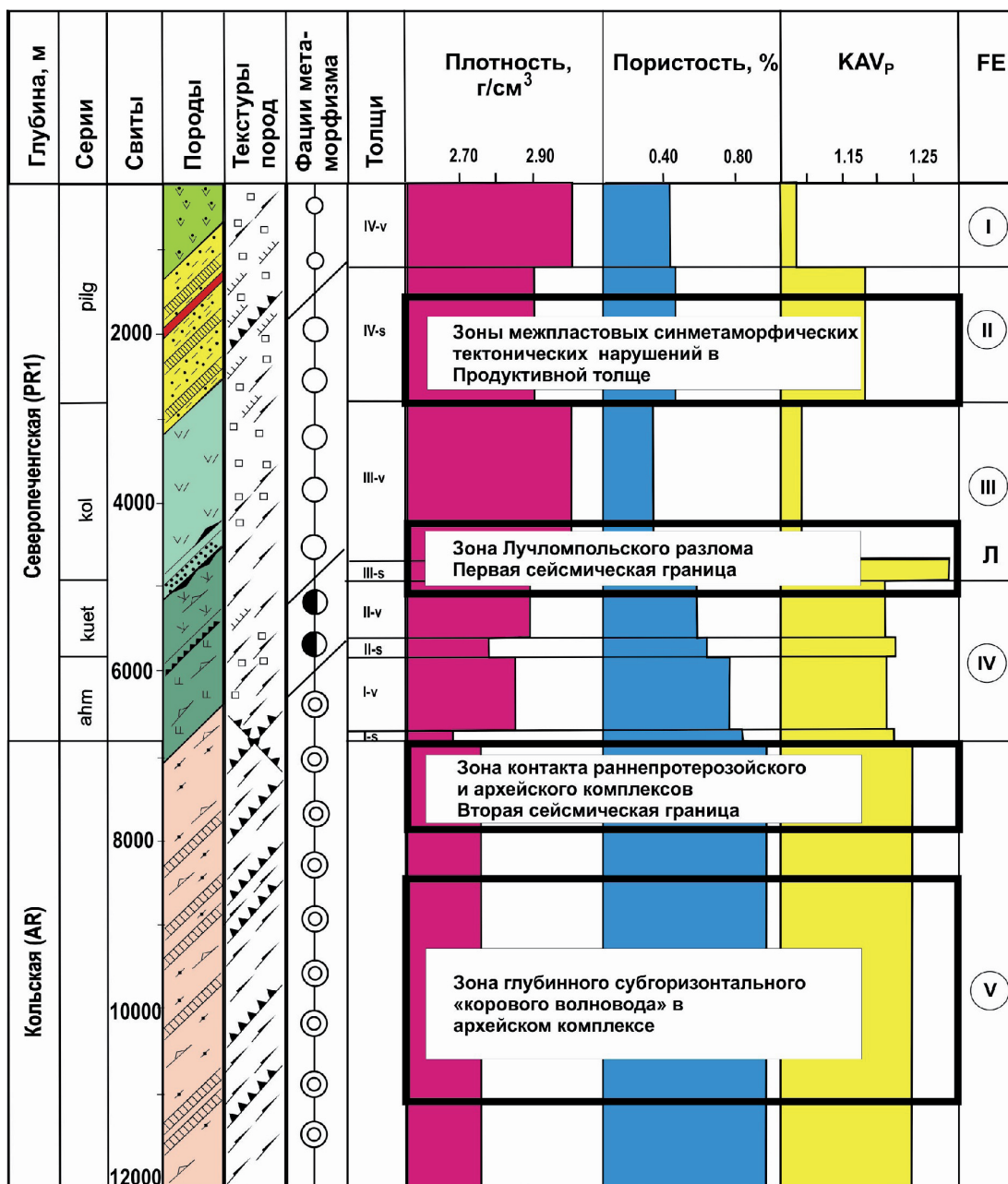


Рис. 2. Формализованный разрез Кольской сверхглубокой скважины с зонами тектонических нарушений (Лобанов и др., 2010).

Fig. 3. Formalized section of the Kola superdeep borehole with zones of tectonic disturbances.

вили пересмотреть теоретические представления, которые до этого казались очевидными и неизменными (Кольская сверхглубокая... 1998).

В результате проходки СГ-3 были опровергнуты более ранние представления о строении земной коры в районе Печенгской структуры. В реальности раннепротерозойские породы простирались до глубины 6842 м и только потом сменились архейскими гранито-гнейсами. Базальтовый слой вообще не был обнаружен – до самой рекордной глубины находятся архейские породы. Установлено, что уплотненные гранито-гнейсы при сейсмологических исследованиях воспринимались геофизиками в качестве более плотных, по сравнению со стандартными породами (рис. 2).

Петрофизические исследования глубоких горизонтов континентальной земной коры были выполнены многими исследователями на образцах ядра СГ-3. Они позволили провести интерпретацию геофизических данных и сопоставить физические параметры горных пород больших глубин

с аналогами на поверхности. Самым эффективным методом оказался структурно-петрофизический анализ, который базируется на определении и сравнении абсолютных значений плотности, объемной анизотропии упругих свойств (скоростей ультразвуковых волн, модулей упругости и др.), пористости, параметров насыщения пород и руд и используется в комплексе с детальным геологическим картированием, тектонофизическими и микроструктурными исследованиями.

Разрез СГ-3 опроверг двухслойную модель земной коры и показал, что сейсмические разделы в недрах – это не границы слоев из пород разного состава. При высоком давлении и температуре свойства пород, резко меняются, так, что гранито-гнейсы, содержащие большое количество тел метаморфизованных гипербазитов, по своим физическим характеристикам становятся похожи на базальты. Поднятые на поверхность с глубины образцы пород испытали декомпрессию и меняли петрофизические параметры. Начиная с 9 километров, толщи оказались очень пористыми и буквально напичканы трещинами, по которым циркулировали водные растворы. Вместо «поверхности Конрада» (кровля базальтового слоя) был выявлен субгоризонтальный «коровый волновод», своеобразная зона разуплотнения, перемещение тектонических блоков по этим зонам обеспечило чешуйчато-надвиговое строение всего Лапландско-Печенгского блока. Новые данные были получены при оценке температур на больших глубинах. Предполагалось, что в гранито-гнейсовом фундаменте температура с глубиной растет незначительно (примерно на 8-10 °С на 1 км). Реальная температура в СГ-3 на глубине 10 км достигла 180 °С, а на глубине около 12 км – 240 °С, вместо ожидаемых 120 °С.

В разрезе СГ-3 рудная минерализация установлена на всем интервале в 12 км. В зависимости от сочетаний рудных элементов, форм их нахождения и минеральных парагенезисов в разрезе выделены 6 основных типов рудной минерализации: 1) сульфидная медно-никелевая и платинометаллическая, 2) сульфидная железная, 3) оксидная железная, 4) оксидная железо-титановая, 5) сульфидная медно-цинковая и 6) самородная золотая. Первые четыре типа сопоставимы с оруденением в протерозойской Печенгской структуре и ее архейском обрамлении по минеральному составу, характеру вмещающих пород и генезису (Лобанов и др., 2019) (рис. 3).

Неожиданным результатом изучения разреза СГ-3 стало открытие повышенных содержания золота в интервале 9500-11000 м сложенном амфиболитами и гнейсами архейского возраста (2.6-2.8 млрд. лет), метаморфизованными в условиях амфиболитовой фации (Козловский и др., 1988). Оно было обнаружено с помощью нейтронно-активационного анализа, и подтверждено результатами минераграфических исследований. В интервале 410 м содержания золота превышают 0.1 г/т, а местами достигают 1-6.7 г/т. В шлифах из керна обнаружены мельчайшие выделения самородного золота представленного (размером до 10 мкм) чешуйками и зернами неправильной формы в биотите, роговой обманке, плагиоклазе. Золото не образует сростаний с другими рудными минералами и содержит до 26 % серебра.

Верхняя граница золотоносного интервала совпадает с крупным разломом (9500-9700 м), который проявлен в кернах скважины резким переходом от пологозалегающих биотит-амфиболитовых гнейсов к крутопадающим железистым кварцитам, горнблендитам, тальк-тремолит-флогопитовым сланцам и дайкообразному телу среднепротерозойских порфиридных гранитов лицько-арагубского комплекса (1.76 млрд. лет). Золотая минерализация пространственно совпадает с зонами регрессивных изменений, что говорит о ее структурном контроле (Лобанов и др., 2013).

Детальные минералогические исследования проводилось в ИГЕМ РАН с помощью сканирующей аналитической электронной микроскопии (СЭМ) (микроскоп JSM-5610LV + ЭДС INCA-450). Поиск золотосодержащих включений проводился в режиме отраженных электронов. Обнаружены частицы золота с серебром, палладием и висмутом размером несколько микрон в ассоциации с халькопиритом. Найдены частицы золота размером до 10 микрон с содержанием серебра до 12 мас. %, которые фиксировались по трещинам в роговой обманке (Лобанов и др., 2019)..

Изучение флюидных включений в кварцевых прожилках из керна в этом интервале выявило включения 4 типов: 1) газовые включения плотной углекислоты (раман-спектроскопия показала наличие в углекислоте по всему изученному разрезу примеси азота (3.3-1.9 мол. %)); 2) двухфазовые

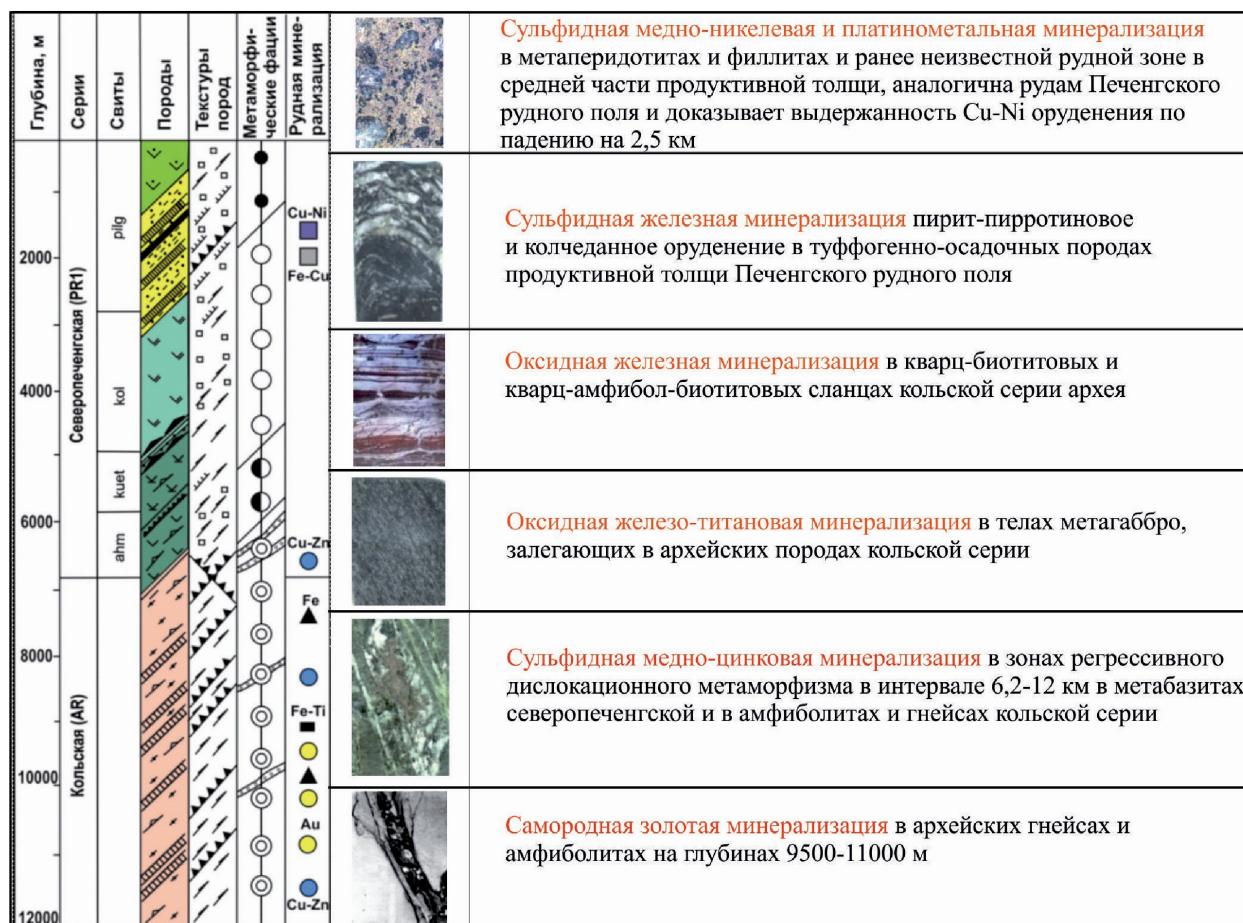


Рис. 3. Вертикальная рудная зональность в разрезе Кольской сверхглубокой скважины.

Fig. 3. Vertical ore zonation in the section of the Kola superdeep borehole.

включения водно-солевых растворов с температурой гомогенизации 137-228 °C и концентрацией солей 21.6-30.2 мас. %-экв.  $\text{CaCl}_2$ ; 3) трехфазовые включения хлоридных рассолов, гомогенизирующиеся в жидкость при температурах 123–381 °C, с концентрацией солей 25.9-45.4 мас. %-экв.  $\text{NaCl}$ , и 4) включения углекислотно-водно-солевых флюидов, с температурой гомогенизации 203–356 °C, концентрацией солей 3.4-18.8 мас. %-экв.  $\text{NaCl}$  и углекислоты 1.3-7.1 моль/кг р-ра. Максимальные концентрации золота установлены во включениях 3 и 4 типов (Прокофьев и др., 2019).

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 55 «Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития» и РФФИ (грант № 18-05-70001) «Изучение геологических и геодинамических обстановок формирования крупных месторождений стратегических металлов Арктической зоны России: выводы для прогнозирования и поисков новых месторождений».

### Литература

1. 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.
2. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинной структуры континентальной коры бурением Кольской сверхглубокой скважины (под ред. Е.А. Козловского). М. Изд-во: Недра. 1984. 490 с.
3. Кольская сверхглубокая: Научные результаты и опыт исследований (под. ред. Орлова В.П., Лаверова Н.П.) М. Изд-во: МФ «ТЕХНОНЕФТЕГАЗ». 1998. 260 с.
4. Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В., Жариков А.В. Интегральная геодинамическая модель Печенгского рудного района на основе корреляции геологических, петрологических и петрофизических данных по Кольской сверхглубокой скважине и опорному профилю на поверхности // Совре-

- 
- менные проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. ИГЕМ РАН. Москва. 2010. С. 258-300.
5. 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.
  6. Лобанов К.В., Чичеров М.В., Чижова И.А., Горностаева Т.А., Шаров Н.В. Глубинное строение и рудообразующие системы Печенгского рудного района (арктическая зона России) // Арктика: Экономика и Экология. 2019. № 3. С. 107–122.
  7. Прокофьев В.Ю., Лобанов К.В., Пэк А.А., Чичеров М.В., Боровиков А.А. Минералообразующие флюиды золотоносного интервала Кольской сверхглубокой скважины // Докл. Академии наук. Геохимия. 2019. Т. 485 № 6. С. 736–740.