

УДК: 622.243.5(1-924.19)(045)

DOI: 10.37482/issn2221-2698.2021.44.267

Пятидесятилетняя годовщина начала бурения Кольской сверхглубокой скважины *

© **ЛОБАНОВ Константин Валентинович**, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник

E-mail: lobanov@igem.ru

Институт геологии рудных месторождений, петрографии минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

© **ЧИЧЕРОВ Михаил Владимирович**, научный сотрудник

E-mail: chicher@igem.ru

Институт геологии рудных месторождений, петрографии минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

© **ШАРОВ Николай Владимирович**, доктор геолого-минералогических наук

E-mail: sharov@krc.karelia.ru

Институт геологии Карельского научного центра Российской академии наук, Петрозаводск, Россия

Аннотация. Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) — выдающееся достижение советской науки и техники, пробурена в докембрийских кристаллических породах и достигла глубины 12 262 м. Она являлась одной из серии сверхглубоких скважин, запланированных в рамках программы «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение». Для достижения рекордных глубин было создано уникальное отечественное буровое оборудование и материалы, способные работать в условиях высоких температур и давлений. Была разработана принципиально новая технология проходки скважин с помощью гидравлических забойных двигателей. Несмотря на сложные условия бурения и неоднократные аварии, СГ-3 выполнила практически все поставленные перед ней задачи. Скважина пройдена с полным отбором керна, который подвергся комплексному изучению. Это позволило изучить глубинное строение земной коры и пересмотреть интерпретацию данных глубинных сейсмических исследований. Установлено, что изменение физических свойств пород на больших глубинах ошибочно интерпретировалось как смена их состава. Она позволила оценить перспективы глубоких горизонтов Печенгской структуры в отношении медно-никелевого оруденения, вскрыв неизвестное ранее тело рудоносных гипербазитов. Были получены новые сведения по температурному градиенту, который оказался существенно выше предполагавшегося, а также вертикальной метаморфической зональности по разрезу скважины. Исследован состав и физические свойства пород на глубоких горизонтах. В разрезе скважины выявлены зоны тектонических нарушений и шесть типов рудной минерализации. Получены новые данные о процессах рудообразования на больших глубинах, что является важным вкладом в теорию формирования месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова: Кольская сверхглубокая скважина, новые технологии бурения, глубинная структура земной коры, рудная минерализация.

The 50th Anniversary of the Start of Drilling the Kola Superdeep Well

© **Konstantin V. LOBANOV**, D.Sc. of Geologo-Mineralogical Sciences, Corresponding Member of RAS, Chief Researcher

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

© **Mikhail V. CHICHEROV**, Research Officer

* Для цитирования: Лобанов К.В., Чичеров М.В., Шаров Н.В. Пятидесятилетняя годовщина начала бурения Кольской сверхглубокой скважины // Арктика и Север. 2021. № 44. С. 267–284. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2021.44.267

For citation: Lobanov K.V., Chicherov M.V., Sharov N.V. The 50th Anniversary of the Start of Drilling the Kola Superdeep Well. *Arktika i Sever* [Arctic and North], 2021, no. 44, pp. 267–284. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2021.44.267

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

© **Nikolay V. SHAROV**, D.Sc. of Geologo-Mineralogical Sciences

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

Abstract. The Kola Superdeep Well (SG-3) is an outstanding achievement of Soviet science and technology, drilled in Precambrian crystalline rocks and reached a depth of 12262 m. It was one of a series of super deep wells planned within the framework of the program “Earth's Interior Exploration and Superdeep Drilling”. In order to achieve record depths, unique domestic drilling equipment and materials capable of working at high temperatures and pressures were created. A fundamentally new technology for drilling wells using hydraulic downhole motors was developed. Despite difficult drilling conditions and repeated accidents, SG-3 has fulfilled almost all the tasks assigned to it. The well was penetrated with full core sampling, which was subjected to comprehensive study. This made it possible to study the deep structure of the Earth's crust and to revise the interpretation of depth seismic data. It was found that changes in the physical properties of rocks at great depths had been erroneously interpreted as a change in their composition. It made it possible to assess the prospects of deep horizons of the Pechenga structure for copper-nickel mineralisation by uncovering a previously unknown body of ore-bearing hyperbasites. New information was obtained on the temperature gradient, which turned out to be significantly higher than expected, as well as on the vertical metamorphic zoning along the borehole section. The composition and physical properties of rocks in deep horizons were investigated. Tectonic fault zones and six types of ore mineralisation were identified in the borehole section. New data on ore formation processes at great depths have been obtained, which is an important contribution to the theory of mineral deposit formation

Keywords: *Kola superdeep well, new drilling technology, deep structure of the Earth's crust, ore mineralization.*

Введение

24 мая 2020 г. российская и мировая геологическая наука отметила знаменательную дату — 50 лет с начала бурения Кольской сверхглубокой скважины в Печенгском районе Мурманской области, начало проходки самой глубокой в мире научной скважины, достигшей рекордной глубины 12 262 м. Бурение СГ-3 в недрах Земли советскими буровиками и геологами сопоставимо только с космическим полётом и является величайшим достижением мировой геологической науки в XX в.

Проблема изучения континентальной земной коры с помощью сверхглубокого бурения возникла и обсуждалась в СССР в конце 50-х — начале 60-х гг. Главной его задачей считалась «возможность получить непосредственно с больших глубин фактический материал, крайне необходимый для познания эндогенных процессов и связанных с ними месторождений полезных ископаемых» [11].

Научные основы программы сверхглубокого континентального бурения были определены на совместном заседании Президиума АН СССР и коллегии Министерства геологии и охраны недр СССР, проходившем под председательством президента АН СССР академика М.В. Келдыша. Сама программа была утверждена Председателем Совета министров СССР Н.С. Хрущёвым на основе решения по докладу академика-секретаря Отделения геолого-географических наук АН СССР Д.И. Щербакова в 1962 г. Программа сверхглубокого бурения СССР была ответом на Программу океанического бурения США.

Программа океанического бурения США

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

В 1958 г. в США появилась программа сверхглубокого бурения «Мохол». Это один из самых смелых послевоенных проектов. Программа была призвана обогнать СССР в научном соперничестве, установив мировой рекорд в сверхглубоком бурении. Название проекта происходит от слова «Мохоровичич» — фамилии хорватского учёного, который выделил поверхность раздела между земной корой и мантией — границу Мохо. Создатели программы решили бурить скважины в океане, где, по данным геофизиков, земная кора значительно тоньше, чем на материках. С 1961 по 1966 гг. при глубине океана 3 500 м вблизи острова Гваделупа в Карибском море с буровой баржи CUSS1 геологи пробурили пять скважин, самая глубокая из них вошла в дно на 183 метра. В этом месте под осадочными породами ожидали встретить верхний слой земной коры — «гранитный», но поднятый керн содержал океанические базальты. Пройти земную кору и выйти к мантии не удалось. Надо было спустить трубы на несколько километров в воду, пройти 5 км океанского дна и достичь верхней мантии. Учёные считали, что в земной коре сверху располагаются молодые породы, снизу — древние. Однако лишь сверхглубокое бурение могло дать истинную картину строения и состава внешней оболочки Земли и верхней мантии [6, 7].

В 1968 г. в США было спущено на воду судно «Гломар Челенджер», специально построенное для реализации программы глубоководного бурения. Планировалось пробурить всю земную кору и получить образцы пород верхней мантии. Представления о мантии строились на косвенных данных — скорости распространения сейсмических волн в недрах, изменение которой интерпретировалось как граница слоёв горных пород разного возраста и состава.

Результат бурения обескуражил и в то же время окрылил учёных, они стали готовить новую фазу бурения. Но когда стоимость проекта превысила 100 млн долларов, конгресс США прекратил финансирование. Проект «Мохол» не ответил ни на один из поставленных вопросов, но он показал главное — сверхглубокое бурение в океане возможно. В США подготовили новую программу изучения океанского дна (Deep Sea Drilling Project). Построенные специально для этого проекта судно «Гломар Челленджер» и сменившее его в 1985 г. судно «Джойдес Резолюшн» с 1968 г. пробурили в дне различных океанов и морей почти 800 скважин, достигнув максимальной глубины 1 741 м ниже дна океана. К середине 1980-х гг. результаты морского бурения подтвердили теорию тектоники плит.

Программа сверхглубокого бурения СССР

Советский Союз создал программу «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение», но не в океане, а на континенте. Несмотря на многовековую историю бурения скважин, континентальное сверхглубокое бурение являлось совершенно новым делом, так как работы планировались на недостижимых ранее глубинах — более 7 километров. Председатель Совета министров СССР Н.С. Хрущёв утвердил эту программу, руководствуясь скорее политическими мотивами, нежели научными, так как не хотелось отстать от США.

Для организации, координации и практического руководства работами по глубинному изучению земных недр в 1963 г. был образован Межведомственный научный совет по программе «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение», который объединил около 200 учёных и специалистов из научных и производственных организаций различных министерств и ведомств. Первым председателем этого совета был Министр геологии СССР, академик АН СССР А.В. Сидоренко. Затем его возглавил доктор технических наук Н.С. Тимофеев, а в 1974 г. председателем совета был назначен Министр геологии СССР Е.А. Козловский. С 1965 по 1971 гг. начальником Управления научно-исследовательских организаций Мингео был Г.И. Горбунов, а его заместителем с 1966 г. стал Н.П. Лаверов, который затем с 1972 по 1983 гг. возглавлял это Управление. Он курировал отраслевые геологические работы Министерства геологии СССР и активно участвовал в программе «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение» и выборе мест заложения сверхглубоких скважин.

Программой работ на 70-е гг. 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 определение направления поисковых и разведочных работ на основные виды полезных ископаемых в перспективных районах страны.

Был разработан принципиально новый технический и методический подход к решению регионального глубинного строения земной коры и верхней мантии, основанный на комплексировании данных сверхглубокого и глубокого бурения (по существующей классификации к глубоким относятся скважины глубиной 3 000–6 000 м, а к сверхглубоким — глубиной 6 000 м и более), а также сейсмического глубинного зондирования и других геофизических и геохимических методов. Для территории СССР была разработана система взаимной увязки данных геофизических профилей, опирающихся на опорные сверхглубокие скважины. По программе были намечены в первую очередь Кольская (СГ-3) и Саатлинская (СГ-1) сверхглубокие скважины [6, 7].

Программа сверхглубокого бурения развивалась одновременно с программой освоения космоса СССР и была как бы космическим полётом в недра планеты Земли, что сопоставимо по объёму научных исследований, разработке нового оборудования и финансированию. Программа «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение» на континенте представлялась совершенно новым делом. Результаты научного бурения во многом оказались

неожиданными и заставили пересмотреть теоретические представления, которые до этого казались очевидными и незыблемыми. В программе была поставлена цель получения представления о разрезе земной коры, начиная от осадочного чехла и кончая «базальтовым» слоем и границей Мохоровичича [2, 3]. Глубина планируемых скважин оценивалась в 15 км. Места расположения скважины были выбраны так, чтобы каждая скважина полностью вскрывала какой-либо сейсмический слой, наиболее развитый в месте бурения, все скважины в сумме позволили бы получить представление о различных слоях и типах континентальной коры.

Осадочный слой должны были вскрыть скважины в Прикаспии, где толщина его максимальная. Скважина на Урале предназначалась для исследования строения осадочного слоя в геосинклинальном прогибе, где он изменён процессами вулканизма, метаморфизма и гидротермальной деятельности. Скважина на Кольском полуострове планировалась для вскрытия «базальтового» слоя. Для изучения состава «базальтового» слоя в двух различных по тектонической истории зонах (межгорная Куринская впадина и Курильская гряда) планировались ещё две скважины. Скважина на Южных Курилах в случае успешного бурения должна была достичь раздела Мохоровичича.

Важным шагом на пути к изучению глубинного строения недр было создание в 1964 г. во Всесоюзном научно-исследовательском институте буровой техники (ВНИИБТ) лаборатории по бурению на мантию, которую возглавил Н.С. Тимофеев. В течение 1964–1966 гг. был проведён научный анализ технических проблем строительства сверхглубоких скважин и намечены стратегические пути решения стоящих задач. Проанализированы все типы геологических условий, характерные для земной коры: изверженные породы, осадочные отложения, комбинации осадочных и изверженных пород, условия минимальной мощности земной коры [11].

Для последовательного наращивания технического потенциала, в соответствии с принципом от простого к сложному, целесообразно решать проблему с соблюдением очередности бурения скважин, а именно в последовательности названных разрезов земной коры. Было решено начать бурение Кольской скважины (СГ-3) в кристаллических породах Балтийского щита.

ВНИИБТ был разработан технический проект первого этапа бурения (до 7 000 м) Кольской скважины. Буровую установку «Уралмаш-15000» разработали специалисты завода «Уралмаш». Была обоснована перспективность технологии бурения гидравлическими забойными двигателями с применением, впервые в мире, в области техники и технологии бурения сверхглубоких скважин бурильных труб из лёгких алюминиевых сплавов, которые изготавливались на оборонных предприятиях авиационной промышленности. Разработан принципиально новый технологический подход, при котором конструкция скважины формировалась непосредственно в ходе строительства скважины на основании текущей информации о геологическом разрезе [17].

Головной организацией в осуществлении намеченных задач было определено Мингео СССР, а для реализации программы привлечено более 150 научных и производственных организаций этого министерства, АН СССР, академий союзных республик, Минвуза СССР и Минвуза РСФСР, отраслевых министерств и ведомств. После обсуждения на межведомственном научном совете по проблеме «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение» технические требования были переданы научно-исследовательскому институту тяжёлого машиностроения для разработки технической документации и последующего изготовления на заводе «Уралмаш» двух опытных экземпляров буровой установки для сверхбольших глубин.

Кольская сверхглубокая скважина

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) задумывалась в качестве фундаментального научно-исследовательского проекта, нацеленного на изучение недр Земли и процессов, идущих в них. Одна из основных задач бурения скважины заключалась в достижении гипотетического «базальтового» слоя земной коры. Предположение, что континентальная кора состоит из верхнего «гранитного» и нижнего «базальтового» слоёв, строилось на основе сейсмических данных, свидетельствующих об увеличении плотности горных пород с глубиной.

Место заложения СГ-3 в 1968 г. было выбрано Межведомственной комиссией под руководством академика В.И. Смирнова (рис. 1). В начале её предполагалось пробурить в архейских гнейсах вблизи п. Лиинахамари на побережье Баренцева моря, но затем был принят другой вариант, решающий практическую задачу по определению перспектив нижних горизонтов Печенгского рудного поля в отношении сульфидных медно-никелевых руд. СГ-3 была заложена в северо-западной части Кольского полуострова, в 10 км к западу от г. Заполярного (69°25 с.ш., 30°44 в.д.), где развиты древнейшие на Земле рудоносные тектонические структуры раннего протерозоя и архея. При проектной глубине 15 км к 1990 г. скважина должна была достигнуть глубины 13 км [6].



Рис. 1. Межведомственная государственная комиссия по выбору места заложения СГ-3. Справа налево: начальник Кольской ГРЭ Д.М. Губерман на месте заложения СГ-3, академик В.И. Смирнов, начальник управления научно-исследовательских организация Министерства геологии СССР Г.И. Горбунов, его заместитель Н.П. Лаверов. Фото Д.Ф. Сабурова, Кольская ГРЭ, 1968 г.

Бурение Кольской скважины было поручено специально организованной Кольской геологоразведочной экспедиции объединения «Волгокамскгеология» (с 1986 г. — объединение «Недра») Мингео СССР. На скважине одновременно работали до 3 000 специалистов и

16 научно-исследовательских лабораторий. Начальником Кольской ГРЭ стал Д.М. Губерман, в команду геологов вошли геологи В.С. Ланев, Ю.П. Смирнов и другие [6]. Бурение было начато 24 мая 1970 г. не только с научной целью — изучить древнейшие породы нашей планеты и идущие в них процессы, но и обнаружить новые залежи медно-никелевых руд Печенгского рудного поля [3, 6, 7].

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:

- Изучить глубинное строение никеленосного Печенгского комплекса и архейского кристаллического основания Балтийского щита, выяснить особенности проявления на больших глубинах геологических процессов, включая процессы рудообразования.
- Выяснить геологическую природу сейсмических границ в континентальной земной коре и получить новые данные о тепловом режиме недр, глубинных водных растворах и газах.
- 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.
- Усовершенствовать имеющиеся и создать новые технологии и технические средства для бурения и комплексных геофизических исследований сверхглубоких скважин.

Основой решения этих вопросов должны быть результаты изучения керна геологическими, петрографическими, минералогическими, геохимическими методами с применением оптических, рентгеновских, микрозондовых, термических, химико-аналитических, спектроскопических, и других способов анализа. Важной задачей являлась отработка технико-технологических решений бурения скважин на сверхбольшие глубины.

Выбор места заложения скважины СГ-3 определили результаты глубинного сейсмического зондирования по профилю Баренцево море — Печенга — Ловно, выполненного в 1958–1962 гг. [8]. Определено, что под центральной и северо-восточной частями Печенгской структуры верхняя граница «базальтового» слоя находится на наименьшей глубине. Эта часть Балтийского щита изучена глубинным сейсмическим зондированием. Имеются детальные магнитные и гравиметрические карты, а также результаты бурения скважин. Предполагалось, что до глубины 5 км идёт гранитная толща, после неё ожидали встретить более прочные и более древние базальтовые породы. Здесь геотермический градиент ниже, чем в других геологических регионах, и составляет 1,0–1,2°С на 100 м глубины, что существенно облегчало условия бурения скважины. Кроме того, кристаллические горные породы имеют высокую прочность, что предполагает применение упрощённой конструкции скважины.

Вначале бурение велось серийной буровой установкой «Уралмаш-4Э», которую применяли для разведки и добычи нефти и газа. Проходка до глубины 7 263 м заняла 4 года (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Буровые установки СГ-3 — «Уралмаш-4Э» 1970 г. (а), «Уралмаш-15000» 1984 г. (б). Фото Д.Ф. Сабурова, Кольская ГРЭ, 1972 г. и 1977 г.

Первый этап бурения был завершён в мае 1975 г., когда скважина достигла глубины 7 263 м. К этому времени был пересечён разрез раннепротерозойской северопеченгской вулканогенно-осадочной серии пород, и скважина вошла в подстилающие их архейские гнейсы. Успешное осуществление первого этапа бурения оказало решающее влияние на разработку оптимального пути развития сверхглубокого бурения. Одним из важнейших технических достижений первого этапа бурения была отработка технологии проводки скважин в кристаллических породах до 7 км при помощи бурового оборудования и инструмента отечественного производства [6]. Далее был почти годовой перерыв для замены буровой установки. Буровая установка «Уралмаш-4Э» была разобрана, а на её месте смонтирован специально созданный комплект бурового оборудования «Уралмаш 15000» грузоподъёмностью 400 т с максимальной автоматизацией и бесступенчатым регулированием основных технических процессов.

В 1976 г. после окончания монтажа бурового комплекса начался второй этап бурения. На СГ-3 для оценки готовности к продолжению бурения приехали Председатель президиума Кольского научного центра АН СССР Г.И. Горбунов и руководитель Управления научно-исследовательских организаций Министерства геологии СССР Н.П. Лавёров (рис. 3). Именно с помощью этой установки велось дальнейшее бурение, и она позволила проникнуть вглубь земной коры на 12 262 метра. В июне 1979 г. скважина побила рекорд в 9 583 метра, принадлежащий скважине США, достигнув глубины 9 584 метра. В 1983 г. скважина достигла глубины 12 066 м. По состоянию на 01.05.1991 г. глубина скважины составляла 12 262 м. [7].



Рис. 3. Г.И. Горбунов, Председатель президиума Кольского филиала АН СССР и Н.П. Лавёров, руководитель Управления научно-исследовательских организаций Мингео СССР, на скважине СГ-3 в 1976 г.
Фото Н.П. Лавёрова, 1973 г. и 1976 г.

В процессе второго этапа бурения СГ-3 был решён ряд сложных технических проблем. Так, на глубинах более 8 км контролировать работу долота по наземным датчикам и приборам оказалось практически невозможным. Исследования выявили перспективность гидравлического канала связи для передачи информации от забойных датчиков на поверхность методом частотной модуляции импульсов давления в жидкости [6]. Наиболее важными были требования обеспечения максимального отбора керна и сохранения вертикальности ствола. 27 декабря 1983 г. глубина скважины достигла 12 000 м, буровики готовились к бурению до проектной глубины (рис. 4).



Рис. 4. Этапы бурения СГ-3, 10000 м (а), приём и укладка керна (б), 12 000 м (в).
Фото Д.Ф. Сабурова, Кольская ГРЭ, 1980 г., 1982 г., 1983 г.

После достижения рекордной глубины 12 066 метров бурение было приостановлено, так как шла подготовка к XXVII сессии Международного геологического конгресса, который должен был проходить в 1984 г. в Москве. Выдающиеся достижения Советского Союза в области глубинного исследования недр Земли привлекли широкое внимание геологов, инженеров, технологов и других специалистов как у нас в стране, так и за рубежом. Было решено сообщить на специальной сессии Конгресса основные результаты изучения СГ-3 и показать участникам конгресса работу скважины в натуре и поднятые из глубины образцы керна. Была организована специальная экскурсия министров геологии многих стран мира на СГ-3. Кольская сверхглубокая скважина была признана самым выдающимся достижением мировой науки XX в. [7]. Она была внесена в книгу рекордов Гиннеса как мировое достижение [6, 9].

В 1990 г. была достигнута максимальная глубина — 12 262 м., не превзойдённая до сих пор. Однако резкое сокращение финансирования не позволило продолжить работы. Бурение прекратили в 1992 г. Предполагалось, что Кольская сверхглубокая скважина после завершения бурения будет превращена в уникальную лабораторию для исследования с помощью специальных приборов глубинных процессов, протекающих в земной коре. Однако в 1995 г. все научные работы из-за отсутствия финансирования были прекращены, а сама скважина законсервирована [9, 10].

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

Особенности технологии бурения СГ-3

Бурение Кольской скважины было осуществлено с применением только отечественной техники и технологии. Всё оборудование для бурения было сделано на предприятиях оборонной промышленности СССР, так же как при работе по проектам создания атомного оружия и космических кораблей. Была создана уникальная буровая установка «Уралмаш 15000» грузоподъёмностью 400 т, при давлении нагнетания бурового раствора 40 МПа, с максимальной автоматизацией процессов бурения. Установка была рассчитана для проходки скважин до глубины 15 км [6].

Промышленность освоила производство более 30 новых видов буровой техники. Впервые в мире в буровой установке было применено автоматизированное оборудование с использованием турбинного бурения: когда вращается не вся колонна, а только буровая головка. Через колонну под давлением подавался буровой раствор, вращающий стоящую внизу многоступенчатую турбину длиной 46 м, с буровой коронкой диаметром 214 мм. Через все секции турбины проходила труба — керноприёмник, где собирался керн выбуренной породы. Для того чтобы создать буровую колонну большой длины, были разработаны несколько типов буровых труб из лёгких сплавов на основе алюминия, в том числе допускающие эксплуатацию на больших глубинах, в условиях высоких температур. Буровая колонна такой длины, собранная целиком из стальных труб, просто оборвалась бы под собственным весом (рис. 5). Всего в процессе бурения было использовано более 50 км легкосплавных труб.

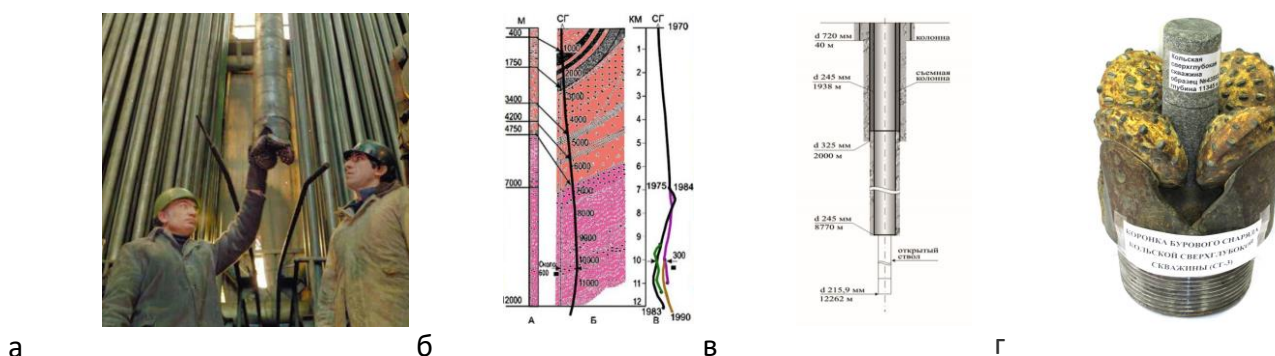


Рис. 5. Буровая СГ-3, спуск турбобура (а), схематический разрез скважины (б), фактическая конструкция скважины (в), буровая коронка с керном (г). а — фото Д.Ф. Сабурова, Кольская ГРЭ, 1977 г., г — фото К.В. Лобанова 2019 г.

Для бурения скважины были сконструированы породоразрушающие инструменты и забойные двигатели для глубинных условий с буровыми твёрдосплавными коронками. Одна коронка служила около 4 часов с проходкой 7–10 метров. При глубине скважины более 8 000 м на спуск и подъём колонны уходило до 18 часов с автоматической разборкой её на секции. На СГ-3 впервые в мире использовалась система контроля и управления процессом буровых

работ. Информационно-измерительная система включала в себя три основные программно-аппаратные подсистемы: подготовка к рейсу, контроль бурения, итоги рейса. С учётом особенностей бурения в породах основной задачей системы являлось распознавание критических технологических ситуаций [6–10].

27 сентября 1984 г. бурение СГ-3 было продолжено. Пробурили очередной 9-метровый интервал, однако на глубине более 12 км произошла авария — оборвалась буровая колонна. При подъёме произошёл прихват бурильной колонны. В скважине остались турбобур и 5 км бурильных труб. Лишь спустя 7 месяцев бурение возобновили заново с глубины 7 000 м.

Подобных сложностей, совершенно неожиданных, в процессе бурения Кольской скважины и с отбором керна возникло немало. До глубины примерно 7 км скважина пересекала прочные, сравнительно однородные протерозойские вулканогенно-осадочные породы, и поэтому ствол скважины был ровный, почти соответствующий диаметру буровой коронки. Однако глубже 7 км пошли менее прочные, трещиноватые, переслаивающиеся архейские породы — гнейсы, амфиболиты. Бурение осложнилось, а ствол принял овальную форму, появилось множество каверн, участились аварии. После крупнейшей аварии 1984 г. — снова подошли к глубине 12 км только через 6 лет.

Всего в скважине было пробурено 12 обходных стволов. Четыре из них имели протяжённость от 2 200 м до 5 000 м. Разветвлённость скважины огорчила буровиков, но обрадовала геологов, которые неожиданно получили объёмную картину внушительного массива древних архейских пород, сформировавшихся более 2,5 млрд лет назад. Ниже 7 км скважина представляет собой многоствольную горную выработку, первый ствол которой закончен на глубине 11 662 м, второй, пройденный из первого с глубины 9 378 м, достиг 12 066 м, третий, начатый на глубине 7 010 м из первого, завершился на 12 262 м и, наконец, четвёртый, забурённый в третьем на глубине 9 649 м, достиг 11 882 м (рис. 5, б) [4]. Это было причиной длительности последней фазы бурения, так как за месяц проходило до 60 м.

Керноотборный снаряд МАГ 195/60 (магазинный) представляет собой устройство, которое присоединяется к валу турбобура и снабжено системой гидротранспорта керна по приёмной трубе в керносорник. Эти снаряды с системой гидротранспорта способны вместить до 20 м керна диаметром 60 мм. Более 70% интервала бурения пройдено с отбором керна при среднем его выносе 40,1% в целом по скважине. Продолжительность одного спуско-подъёма инструмента при глубине 12 000 м — 21 ч [11].

Ствол СГ-3 имеет диаметр и круглую форму сечения только в верхних интервалах — до 6 000 м. Кавернозные зоны в стволе были только в зонах тектонических нарушений, где он имел сложную изометричную форму. На глубинах более 7 000 м ствол скважины имел эллипсоидную форму сечения. Кавернозные зоны были приурочены к тектоническим нарушениям. В верхних интервалах ствол скважины в основном устойчив к гидродинамическим и механическим воздействиям, а в породах архея внешние воздействия привели к об-

рушениям стенок скважины и значительным изменениям её радиальных размеров. В 1992 г. была проведена уникальная операция по монтажу в стволе СГ-3 обсадной колонны для продолжения бурения скважины до глубины 13 км. К сожалению, несмотря на это, дальнейшее бурение было прекращено.

Геологические результаты бурения

Главной задачей бурения Кольской сверхглубокой скважины являлось изучение глубинного строения и рудоносности древней континентальной коры: получение глубинного геологического разреза; всестороннее исследование вещественного состава горных пород и характера их изменения с глубиной; выяснение особенностей проявления эндогенных геологических процессов в глубоких частях земной коры и связи с ними процессов рудообразования; выяснение геологической природы глубинных геофизических границ и геофизических параметров геологических толщ [7]. Основой решения этих вопросов являлись данные, полученные при изучении керна, который отбирался по разрезу скважины непрерывно и изучался комплексно: различными методами. В результате была получена уникальная информация, зачастую существенно менявшая представления о глубинном строении недр.

Проходка СГ-3 опровергла существовавшие ранее представления о строении земной коры в районе Печенгской структуры. Проектный разрез скважины, составленный по данным сейсмических исследований, прогнозировал, что на глубине 4 км скважина выйдет из вулканогенно-осадочных пород Печенгской структуры и войдёт в гранито-гнейсы архейского фундамента. После разбурённого трёхкилометрового слоя гранито-гнейсов скважина должна была погрузиться в базальтовый слой. Однако породы Печенгской структуры простирались до глубины 6 842 м, и лишь затем сменились архейскими гранито-гнейсами. А базальтовый слой вообще не был обнаружен: до самой рекордной глубины бур пробивался через архейские гранитоидные породы.

При исследовании образцов керна было установлено, что уплотнённые гранитоиды при сейсмологических исследованиях воспринимались геофизиками в качестве более плотных, по сравнению со стандартными породами. Это новая геологическая информация, которая позволяет по-другому интерпретировать данные глубинных геофизических исследований (рис. 6).

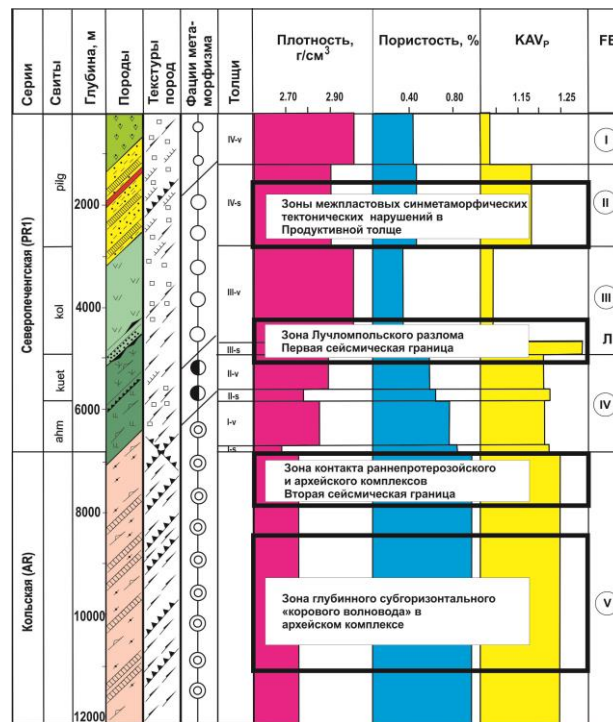


Рис. 6. Формализованный разрез Кольской сверхглубокой скважины с зонами тектонических нарушений [10].

Скважина расположена на Северном крыле Печенгской структуры с таким расчётом, чтобы оценить перспективы глубоких горизонтов в отношении медно-никелевого оруденения, 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. Что касается первой задачи, то она была успешно решена. На глубине 1,5–1,7 км в средней части продуктивной толщи скважина обнаружила ранее неизвестное тело никеленосных гипербазитов. Но предположение о наличии на глубине 7,5–8,5 км поверхности Конрада не подтвердилось. Подошва северопеченгской серии была пересечена на отметке 6,8 км и до рекордной глубины в 12 км скважина прошла по гнейсам и амфиболитам кольской серии, т. е. по «гранитному» слою земной коры. Установлено, что гранитоиды на больших глубинах при сейсмологических исследованиях воспринимались геофизиками в качестве более плотных, по сравнению со стандартными породами [6, 7].

Важное место в структуре Печенгского рудного поля занимают межпластовые тектонические зоны синметаморфического расщепления, которые привели к формированию чешуйчато-блоковых структур [2–5, 9]. В разрезе СГ-3 и на поверхности выделены четыре тектонических зоны. Значения петрофизических параметров пород в межпластовых тектонических зонах характеризуются наиболее высокой плотностью, пористостью и KAV_p.

Петрологические исследования керн СГ-3 доказали синхронность среднепротерозойского метаморфизма и чешуйчато-надвиговых перемещений пород. Определение температур метаморфизма по составам сосуществующих минералов и минеральным ассоциациям подтверждает общее повышение интенсивности процесса с глубиной. Средняя температура метаморфизма вулканитов в верхней части разреза СГ-3 — 300°C (пренит-пумпеллитовая фация), а конец зеленосланцевой фации (4 900 м) — 450°C. В

интервале эпидот-амфиболитовой фации (4 900–6 000 м) она составляет 550°C, а в пределах амфиболитовой фации (низы северопеченгской серии и архейская кольская серия) температуры метаморфизма от 550 до 650°C (6 000–12 000 м). В разрезе не установлено метаморфического перерыва между низами северопеченгской и кольской серий: по минеральным ассоциациям и те, и другие породы отвечают амфиболитовой фации и обладают кристаллически-сланцеватыми текстурами. Это позволяет предполагать, что гранитизация происходила в температурных границах амфиболитовой фации [1, 4, 5, 9].

Не менее интересными и неожиданными оказались непосредственные измерения температуры на больших глубинах. Предполагалось, что в тектонически спокойных районах, к которым относится Балтийский щит, температура с глубиной растёт незначительно (примерно 8–10°C на 1 км). Однако реальная температура в скважине на глубине 10 км достигла 180°C, а на глубине около 12 км значения температур достигли 212°C, вместо предполагавшихся 120°C [13]. Была выяснена роль мантийного и радиогенного источников в общем глубинном потоке тепла.

Кольская сверхглубокая скважина дала обширный материал по рудной минерализации на различных глубинах. Изучение показало присутствие минерализации в древней континентальной земной коре на всём интервале в 12 км (рис. 7).



Рис. 7. Вертикальная рудная зональность в разрезе СГ-3 [10].

Выделены шесть типов минерализации: сульфидная медно-никелевая и платинометальная, сульфидная железная, оксидная железная, оксидная железо-титановая, сульфидная медно-цинковая и золото-серебряная. На глубине 1 600–1 900 м был выявлен интервал промышленных Cu-Ni руд, изучение которых позволило выявить новые месторождения. Большой интерес вызвало открытие в интервале 9 500–11 000 м ранее неизвестного типа Au-Ag минерализации.

Возможно, это связано с повышенной тектонической активностью в глубинных горизонтах земной коры. В зонах циркуляции подземных вод, зафиксированных на больших глубинах (6,5–11,5 км и более), происходило отложение низкотемпературной гидротермальной минерализации (медной, медно-цинковой, никелевой).

Принципиально новыми оказались и данные о процессах рудообразования в глубинных слоях земной коры. На глубинах 9–12 км встретились высокопористые трещиноватые породы, насыщенные подземными сильно минерализованными водами. Эти воды — один из источников рудообразования. Раньше считалось, что такое возможно лишь на значительно меньших глубинах. Обнаруженные в скважине низкотемпературные ассоциации рудных минералов свидетельствуют о принципиальной возможности появления на этих глубинах их промышленных скоплений, не говоря уже о высокотемпературных рудных образованиях. Этот вывод имеет фундаментальное значение для развития учения о полезных ископаемых и поисков рудных залежей на больших глубинах [2]. Новые данные о рудообразовании на больших глубинах были зарегистрированы в качестве научного открытия № 28 в области наук о Земле.

Заключение

Кольская сверхглубокая скважина — выдающееся достижение мировой и российской геологической науки в развитии континентального бурения. Она была пробурена в рамках программы «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение». Все работы по этой программе были осуществлены с применением только отечественной техники и технологии. Всё оборудование для бурения было сделано на предприятиях оборонной промышленности СССР, так же как при работе по проектам создания атомного оружия и космических кораблей. Была создана уникальная буровая установка «Уралмаш 15000».

Впервые в мире СГ-3 была пробурена с применением новейших отечественных технических средств, научного изучения глубинного строения земных недр. Были использованы новые материалы и технологии бурения, также создано уникальное буровое оборудование, позволяющее добраться до прежде недостижимых глубин. Вот уже 50 лет этот результат остаётся непревзойдённым. СГ-3 является прорывом в недра планеты Земля и может быть сопоставима только с полётом в космос.

Совместная работа около 200 учёных и специалистов из научных и производственных организаций различных министерств и ведомств позволила получить прямой вещественный материал с таких глубин и провести измерения различных параметров непосредственно в толще земной коры до глубины 12 262 м с использованием нового научного оборудования, способного работать в условиях высоких температур и давлений. Полученные образцы горных пород с больших глубин по своему значению сопоставимы с образцами с Луны.

Геолого-геофизическая информация о глубинном строении Балтийского щита существенно скорректировала теоретические представления, господствовавшие до бурения

скважины. На основании изучения минерально-геохимического состава пород керна и проведения комплекса исследований в стволе СГ-3 были получены данные о вещественном составе и физическом состоянии глубинных пород.

Геофизическая граница, дающая наибольшее отражение при сейсмическом зондировании, где породы «гранитного» слоя переходят в более прочный «базальтовый слой», в разрезе СГ-3, свидетельствует, что там расположены менее прочные и менее плотные трещиноватые породы — архейские гнейсы. 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 получены при оценке температур на больших глубинах. Предполагалось, что в гранито-гнейсовом фундаменте Балтийского щита температура с глубиной растёт незначительно (примерно на 8–10°C на 1 км). Реальная температура в СГ-3 на глубине 10 км достигла 180°C, а на глубине около 12 км — 212°C, вместо ожидаемых 120°C.

Изучение СГ-3 показало присутствие рудной минерализации в древней континентальной земной коре на всём интервале в 12 км. Выделены шесть типов минерализации: сульфидная медно-никелевая и платинометальная, сульфидная железная, оксидная железная, оксидная железо-титановая, сульфидная медно-цинковая и золото-серебряная. Принципиально новыми оказались и данные о процессе рудообразования в глубинных слоях земной коры. Так, на глубинах 9–12 км встретились высокопористые трещиноватые породы, насыщенные подземными сильно минерализованными водами. Эти воды — один из источников рудообразования. Раньше считали, что такое возможно лишь на значительно меньших глубинах.

Благодарности и финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта 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» и бюджетных тем Института.

Литература

1. Глаголев А.А., Генкин А.Д., Казанский В.И., Боронихин В.А., Гордиенко Л.П., Красивская И.С., Кузнецов А.В., Лобанов К.В., Носик Л.П., Прохоров К.В. Изучение эндогенных процессов по материалам сверхглубокого бурения // Эндогенные рудные районы и месторождения. Москва: Наука, 1987. С. 129–144.
2. Казанский В.И., Кузнецов О.Л., Кузнецов А.В., Лобанов К.В., Черемисина Е.Н. Глубинное строение и геодинамика Печенгского рудного района: опыт исследования Кольской сверхглубокой скважины // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36. № 6. С. 500–519.
3. Казанский В.И., Лобанов К.В. Глубинное строение и рудоносность древней континентальной земной коры (по результатам исследований Кольской сверхглубокой скважины) // Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. Москва: ИГЕМ РАН, 2004. С. 24–43.

4. Казанский В.И., Лобанов К.В. Структурно-геофизическая позиция, глубинное строение и условия локализации уникального Печенгского рудного поля (Балтийский щит) // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. Москва: ИГЕМ РАН, 2004. С. 187–205.
5. Казанский В.И., Лобанов К.В., Шаров Н.В. От разреза Кольской сверхглубокой скважины к глубинным моделям Печенгского рудного района: к 10-летию открытия № 28 в области наук о Земле // Вестник Российской Академии естественных наук. 2007. Т. 7. № 2. С. 3–7.
6. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинной структуры континентальной коры бурением Кольской сверхглубокой скважины / Под ред. Е.А. Козловского. Москва: Недра, 1984. 490 с.
7. Кольская сверхглубокая: Научные результаты и опыт исследований / Под ред. В.П. Орлова, Н.П. Лаверова. Москва: МФ «ТЕХНОНЕФТЕГАЗ», 1998. 260 с.
8. Литвиненко И.В., Ленина И.С. Некоторые результаты изучения сейсморазведкой глубинного строения Печенгской структуры // Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита. Ленинград: Недра, 1968. С. 139–147.
9. 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 // Современные проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. Москва: ИГЕМ РАН, 2010. С. 258–300.
10. 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.
11. Повалихин А.С. 50 лет научному прорыву в исследовании Земли. Кольская сверхглубокая скважина: путь к энергетическому и сырьевому обеспечению человечества // Инженер-нефтяник. 2020. № 1. С. 5–16.
12. Хитаров Н.И. К вопросу проведения сверхглубокого бурения на территории Советского Союза // Советская геология. 1961. № 6. С. 134–138.

References

1. Glagolev A.A., Genkin A.D., Kazanskiy V.I., Boronikhin V.A., Gordienko L.P., Krasivskaya I.S., Kuznetsov A.V., Lobanov K.V., Nosik L.P., Prokhorov K.V. Izuchenie endogennykh protsessov po materialam sverkhglubokogo bureniya [Study of Endogenous Processes Based on Superdeep Drilling Materials]. *Endogennyye rudnyye rayony i mestorozhdeniya* [Endogenous Ore Regions and Deposits], Moscow, Nauka Publ., 1987, pp. 129–144.
2. Kazanskiy V.I., Kuznetsov O.L., Kuznetsov A.V., Lobanov K.V., Cheremisina E.N. Glubinnoe stroenie i geodinamika Pechengskogo rudnogo rayona: opyt issledovaniya Kol'skoy sverkhglubokoy skvazhiny [Deep Structure and Geodynamics of the Pechenga Ore Region: the Experience of Researching the Kola Superdeep Well]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geologiya Rudnykh Mestorozhdeniy], 1994, vol. 36, no. 6, pp. 500–519.
3. Kazanskiy V.I., Lobanov K.V. Glubinnoe stroenie i rudonosnost' drevney kontinental'noy zemnoy kory (po rezul'tatam issledovaniy Kol'skoy sverkhglubokoy skvazhiny) [Deep Structure and Ore Content of the Ancient Continental Crust (Based on the Results of Studies of the Kola Superdeep Well)]. *Problemy rudnoy geologii, petrologii, mineralogii i geokhimii* [Problems of Ore Geology, Petrology, Mineralogy and Geochemistry]. Moscow, IGEM RAN Publ., 2004, pp. 24–43.
4. Kazanskiy V.I., Lobanov K.V. Strukturno-geofizicheskaya pozitsiya, glubinnoe stroenie i usloviya lokalizatsii unikal'nogo Pechengskogo rudnogo polya (Baltiyskiy shchit) [Structural-Geophysical Position, Deep Structure and Localization Conditions of the Unique Pechenga Ore Field (Baltic Shield)]. *Kрупные i superkrupnye mestorozhdeniya: zakonomernosti razmeshcheniya i usloviya obrazovaniya* [Large and Super-Large Deposits: Distribution Patterns and Formation Conditions]. Moscow, IGEM RAN Publ., 2004, pp. 187–205.
5. Kazansky V.I., Lobanov K.V., Sharov N.V. Ot razreza Kol'skoy sverkhglubokoy skvazhiny k glubinnym modelyam Pechengskogo rudnogo rayona: k 10-letiyu otkrytiya № 28 v oblasti nauk o Zemle [From the Kola Superdeep Borehole Section towards Depth Models of the Pechenga Ore District: 10th An-

- niversary of the Discovery No. 28 in Earth Sciences]. *Vestnik Rossiyskoy Akademii estestvennykh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences], 2007, vol. 7, no. 2, pp. 3–7.
6. Kozlovskiy E.A. *Kol'skaya sverkhglubokaya. Issledovanie glubinnoy struktury kontinental'noy kory bureniem Kol'skoy sverkhglubokoy skvazhiny* [Kola Superdeep. Investigation of the Deep Structure of the Continental Crust by Drilling the Kola Superdeep Borehole]. Moscow, Nedra Publ., 1984, 490 p. (In Russ.)
 7. Orlov V.P., Laverov N.P. *Kol'skaya sverkhglubokaya: Nauchnye rezultaty i opyt issledovaniy* [Kola Superdeep: Scientific Results and Research Experience]. Moscow, MF "TEKHNONEFTEGAZ" Publ., 1998, 260 p. (In Russ.)
 8. Litvinenko I.V., Lenina I.S. *Nekotorye rezultaty izucheniya seysmorazvedkoy glubinnogo stroeniya Pechengskoy struktury* [Some Results of Seismic Exploration of the Deep Structure of the Pechenga Structure]. *Geologiya i glubinnoe stroenie vostochnoy chasti Baltiyskogo shchita* [Geology and Deep Structure of the Eastern Part of the Baltic Shield]. Leningrad, Nedra Publ., 1968, pp. 139–147. (In Russ.)
 9. Lobanov K.V., Kazanskiy V.I., Kuznetsov A.V., Zharikov A.V. *Integral'naya geodinamicheskaya model' Pechengskogo rudnogo rayona na osnove korrelyatsii geologicheskikh, petrologicheskikh i petrofizicheskikh dannykh po Kol'skoy sverkhglubokoy skvazhine i opornomu profiluyu na poverkhnosti* [Integral Geodynamic Model of the Pechenga Ore Region Based on the Correlation of Geological, Petrological and Petrophysical Data on the Kola Superdeep Well and the Reference Profile on the Surface]. *Sovremennye problemy rudnoy geologii, petrologii, mineralogii i geokhimii* [Modern Problems of Ore Geology, Petrology, Mineralogy and Geochemistry]. Moscow, IGEM RAN Publ., 2010, pp. 258–300.
 10. Lobanov K.V., Chicherov M.V., Chizhova I.A., Gornostaeva T.A., Sharov N.V. *Glubinnoe stroenie i rudoobrazuyushchie sistemy Pechengskogo rudnogo rayona (arkticheskaya zona Rossii)* [Depth Structure and Ore-Forming Systems of the Pechenga Ore Region (Russian Arctic Zone)]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economy], 2019, no. 3, pp. 107–122.
 11. Povalikhin A.S. *50 let nauchnomu proryvu v issledovanii Zemli. Kol'skaya sverkhglubokaya skvazhina: put' k energeticheskomu i syr'evomu obespecheniyu chelovechestva* [Fifty Years since the Scientific Breakthrough in the Earth's Studying. Kola Super-Deep Well is a Way to Energy and Mineral Provision of the Mankind]. *Inzhener-neftyanik* [Petroleum Engineer], 2020, no. 1, pp. 5–16.
 12. Khitarov N.I. *K voprosu provedeniya sverkhglubokogo bureniya na territorii Sovetskogo Soyuza* [On the Issue of Superdeep Drilling on the Territory of the Soviet Union]. *Sovetskaya geologiya* [Soviet Geology], 1961, no. 6, pp. 134–138.

Статья принята 02.03.2021