



Посвящается 90-летию со дня рождения академика Николая Павловича Лаврова



Посвящается 50-летию с начала бурения СГ-3

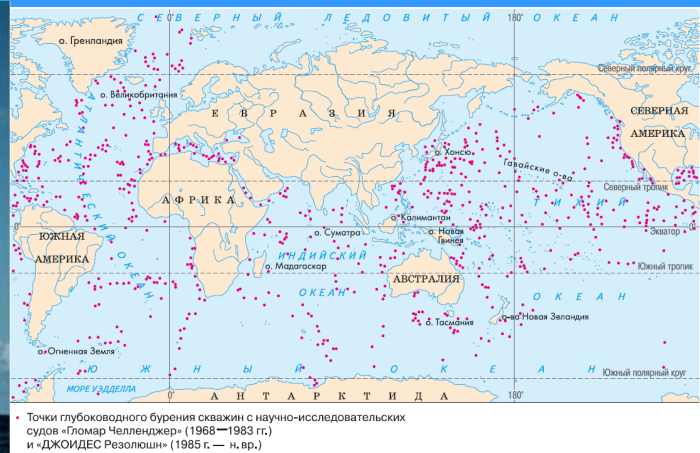
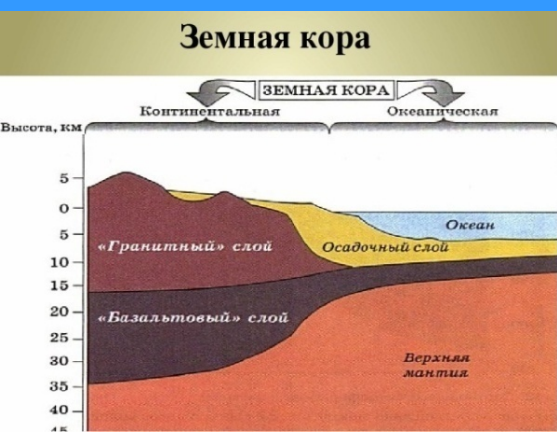
КОСМИЧЕСКИЙ ПОЛЕТ СГ-3 В НЕДРА ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ

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



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геологии рудных месторождений, петрографии минералогии и
геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва, lobanov@igem.ru
06.04.2020 г «XVII Всероссийская (с международным участием) Ферсмановская научная
сессия, посвященной 90-летию Кольского научного центра РАН и 100-летию первой
экспедиции А.Е. Ферсмана в Хибины»

ПРОГРАММА ГЛУБОКОГО ОКЕАНИЧЕСКОГО БУРЕНИЯ США



США планировали пройти скважиной всю земную кору и получить образцы пород верхней мантии. Представления о мантии строились на косвенных данных — скорости распространения сейсмических волн в недрах, изменение которых интерпретировалось как граница слоев горных пород разного возраста и состава.

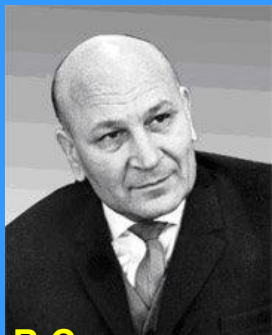
Учёные считали, что земная кора: сверху молодые породы, снизу — древние. Однако лишь сверхглубокое бурение могло дать подлинную картину строения и состава внешней оболочки Земли и верхней мантии.

В 1958 г. в США появилась программа сверхглубокого бурения «Мохол». Это один из самых смелых проектов послевоенной Америки. Проект «Мохол» был призван обогнать СССР в научном соперничестве, установив мировой рекорд в сверхглубоком бурении.

В США осуществлялась программа изучения океанического дна. Построенное специально для этого проекта судно «Гломар Челленджер» за несколько лет пробурило на дне океанов почти 800 скважин, достигнув максимальной глубины 760 м. Результаты морского бурения подтвердили теорию тектоники плит.



ПРОГРАММА СВЕРХГЛУБОКОГО БУРЕНИЯ



А.В.Сидоренко

Проблема изучения континентальной земной коры с помощью сверхглубокого бурения возникла в СССР в 60-х годах. **«Возможность получить непосредственно с больших глубин фактический материал, необходимый для познания эндогенных процессов и связанных с ними месторождений полезных ископаемых».**



Е.А.Козловский

Научные основы программы сверхглубокого континентального бурения определены на совместном заседании Президиума АН СССР и Министерства геологии и охраны недр, под председательством академика М.В.Келдыша. Программа утверждена решением Совета Министров СССР по докладу академика Д.И.Щербакова, Н.С.Хрущевым в 1962 г.

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 организаций различных министерств и ведомств.



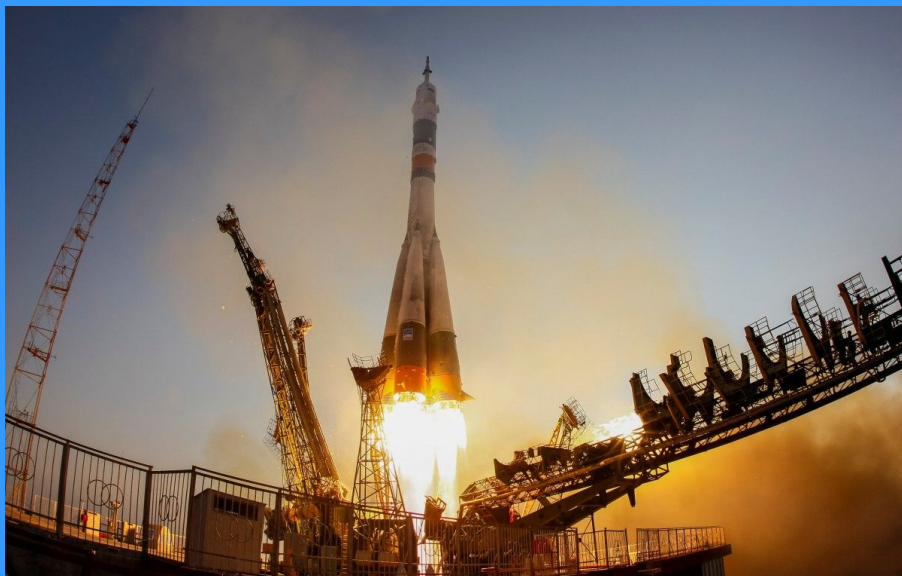
Н.П.Лаверов

Первый председатель Совета - академик АН СССР А.В.Сидоренко, а с 1974 г. Министр геологии СССР Е.А.Козловский. Н.П.Лаверов курировал программу сверхглубокого бурения.

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

ПРОГРАММА СВЕРХГЛУБОКОГО БУРЕНИЯ



Программа сверхглубокого бурения СССР развивалась одновременно с программой освоения космоса и была как бы космическим полетом в недра планеты Земля, что сопоставимо по объему научных исследований, разработке нового оборудования и финансированию.

В Советском Союзе была разработана программа «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение», но не в океане, а на континенте, что представлялось совершенно новым делом.

Результаты научного бурения во многом оказались неожиданными и заставили пересмотреть теоретические представления земной коре, которые до этого казались очевидными и незыблемыми.



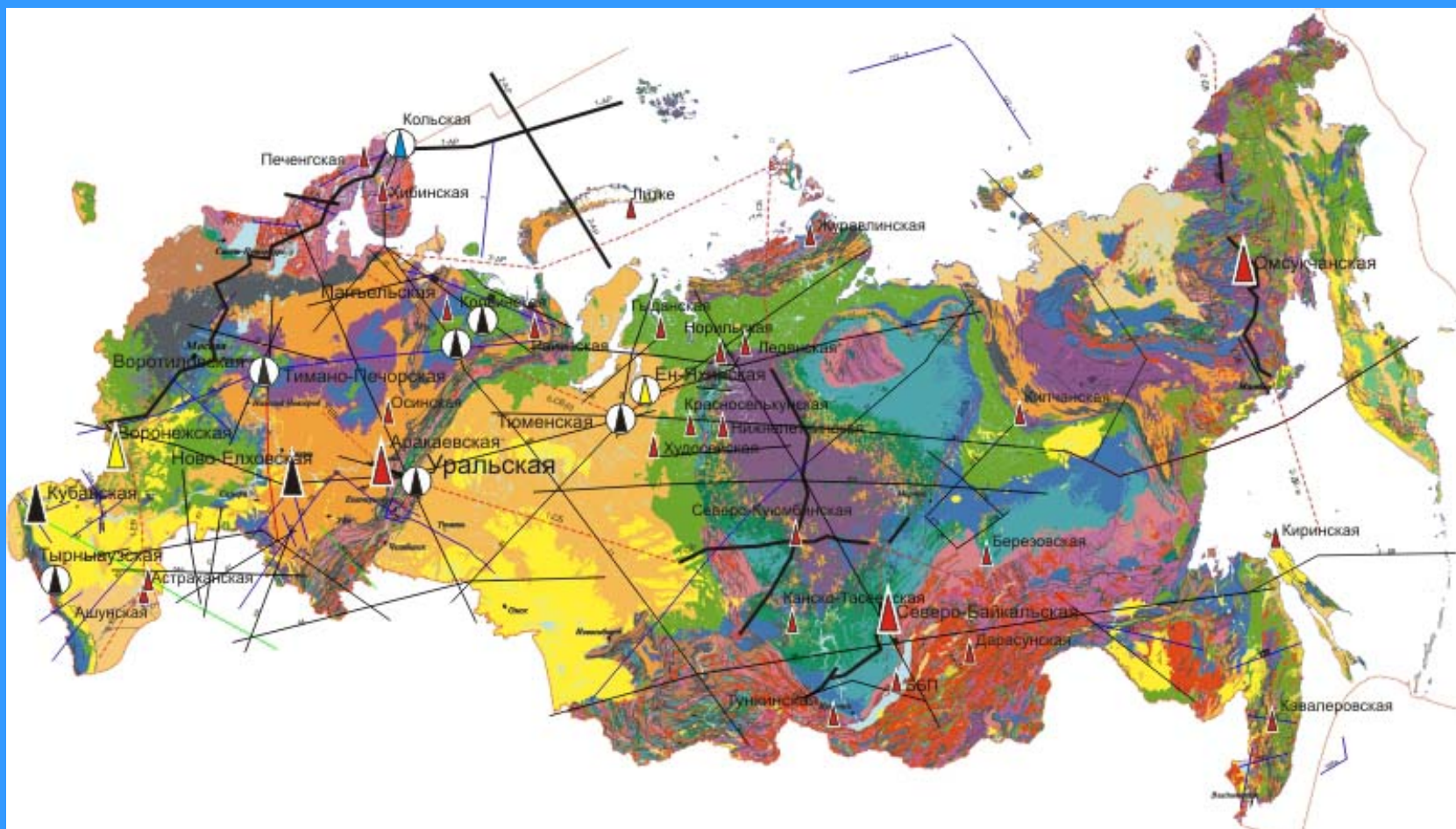
А.В.Сидоренко, Н.П.Лаверов,
О.А.Богатилов



Г.И.Горбунов, Н.П.Лаверов,



СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГЕОТРАВЕРСОВ И СВЕРХГЛУБОКИХ СКВАЖИН СССР



В программе предложен новый технический и методический подход к решению 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.

Были намечены в первую очередь Кольская (СГ-3) и Саатлинская (СГ-1) сверхглубокие скважины.

СВЕРХГЛУБОКИЕ СКВАЖИНЫ СССР



№	Скважина	Район бурения	Сроки работ	Глубина, м	Проект, м
1.	Аралсорская СГ-1	Прикаспийская низменность,	1962-1971	6800	
2.	Биикжальская СГ-2	Прикаспийская низменность	1962-1971	6700	
3.	Кольская СГ-3	Мурманская обл.	1970-1994	12262	15 000
4.	Саатлинская СГ-1	Азербайджан	1977-1990	8324	11000
5.	Днепровско-Донецкая СГ-9	Украина	1961	5691	8000
6.	Мурунтауская СГ-10	Узбекистан	1984	3000	7000
7.	Тимано-Печорская СГ-5	Республика Коми	1984-1993	6904	7000
8.	Тюменская СГ-6	Тюменская обл.	1987-1996	7502	8000
9.	Ново-Елховская	Татарстан	1988	5881	
10.	Воротилловская	Нижегородская обл.	1989-1992	5374	6000
11.	Криворожская СГ-8	Украина	1984-1994	5432	12000
12.	Уральская СГ-4	Свердловская обл.	1985-2004	6015	15000
13.	Ен-Яхтинская СГ-7	Тюменская обл.	2000-2006	8250	8250

Программы научного континентального бурения были разработаны в Германии, Франции, США, Канаде, Японии, Великобритании и других странах.

КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКАЯ СКВАЖИНА



Начальник Кольской ГРЭ «Ярославгазнефтеразведки» экспедиции Д.М.Губерман у колышка на месте будущей скважины СГ-3

Место заложения СГ-3 в 1968 г. было выбрано Межведомственной комиссией.



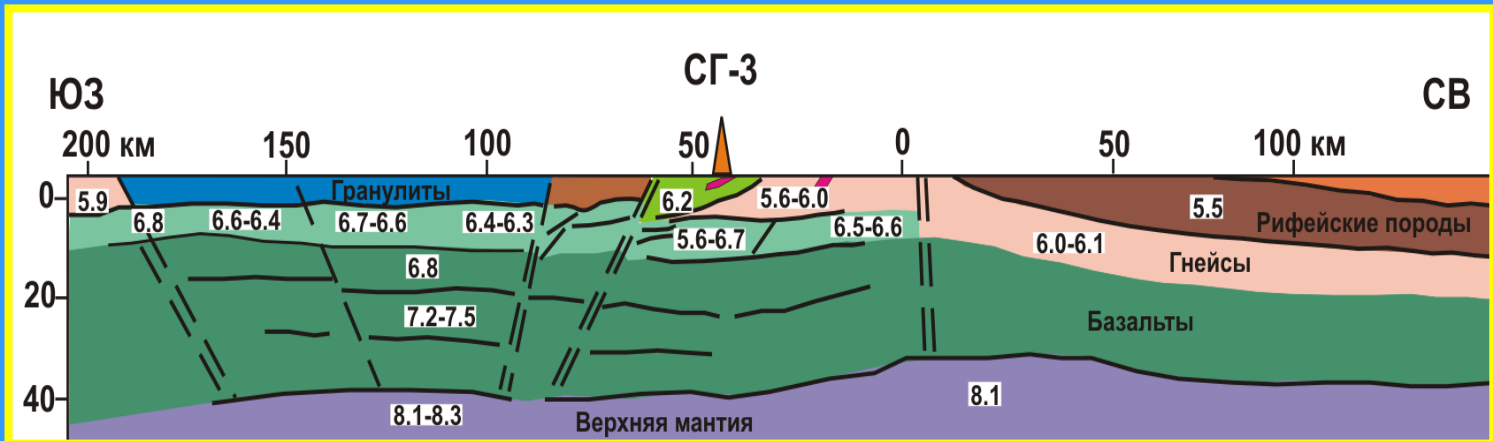
В.И.Смирнов Г.И.Горбунов Н.П.Лаверов

В начале СГ-3 предполагалось пробурить в архейских гнейсах вблизи п. Лиинахамари, чтобы как можно скорее достичь

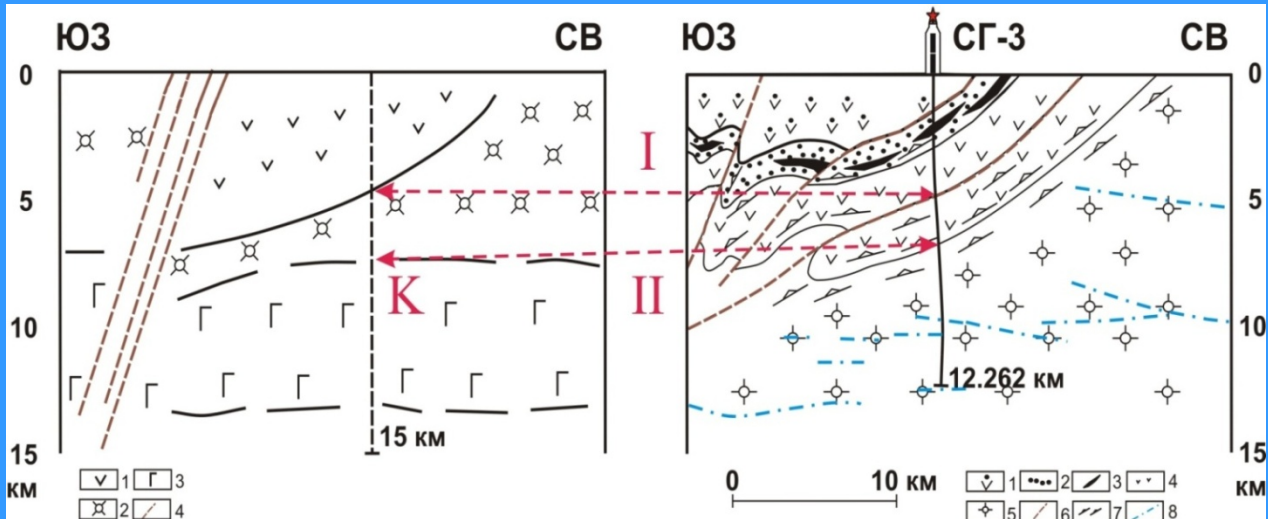
«базальтового» слоя земной коры, но затем был принят другой вариант, решающий практическую задачу по определению перспектив нижних горизонтов Печенгского рудного поля в отношении медно-никелевых руд .

Кольская сверхглубокая скважина заложена в северо-западной части Кольского полуострова, 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.

Бурение Кольской скважины было поручено специально организованной Кольской геологоразведочной экспедиции (Кольская ГРЭ) объединения «Волгокамскгеология» (с 1986 г. - объединение «Недра») Мингео СССР.



Сейсмический разрез континентальной земной коры по профилю Ловно-Печенга-Баренцево море (Литвиненко И.В., Ленина И., 1968), до бурения СГ-3



Сейсмический разрез континентальной земной коры района бурения Кольской сверхглубокой скважины

по сейсмическим данным до бурения СГ-3

по комплексу геофизических данных и результатов исследования (Кольская сверхглубокая, 1984)

КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКОФЯ СКВАЖИНА



Глубина 12262 м

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.

КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКАЯ СКВАЖИНА



Проходка до глубины 7263 м заняла 4 года. Далее бурение продолжили уникальной буровой установкой «Уралмаш-15000». Все работы осуществлялись Кольской геолого-разведочной экспедицией НПО «Недра».

В 1979 года скважина побила рекорд в 9583 метра, принадлежащий скважине США, достигнув глубины 9584 метра. В 1983 г скважина достигла глубины 12066 м. По состоянию на 01.05.1991 г. глубина скважины составила 12262 м. Бурение осуществлялось с полным отбором керна.

Бурение СГ-3 было начато 24 мая 1970 г. серийной буровой установкой «Уралмаш-4Э», которую применяли для бурения скважин при поиске и разведке месторождений нефти и газа.



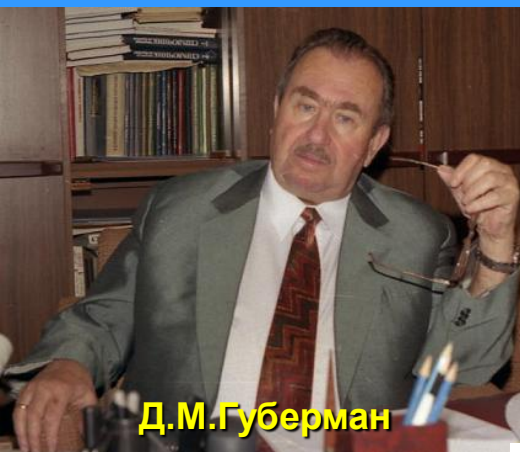
Н.П.Лаверов, Г.И.Горбунов



КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКАЯ СКВАЖИНА



КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКАЯ СКВАЖИНА



Д.М.Губерман



Кернохранилище СТ-3



В.С.Ланев,
Ю.П.Смирнов



Н.П.Лаверов, Г.И.Горбунов

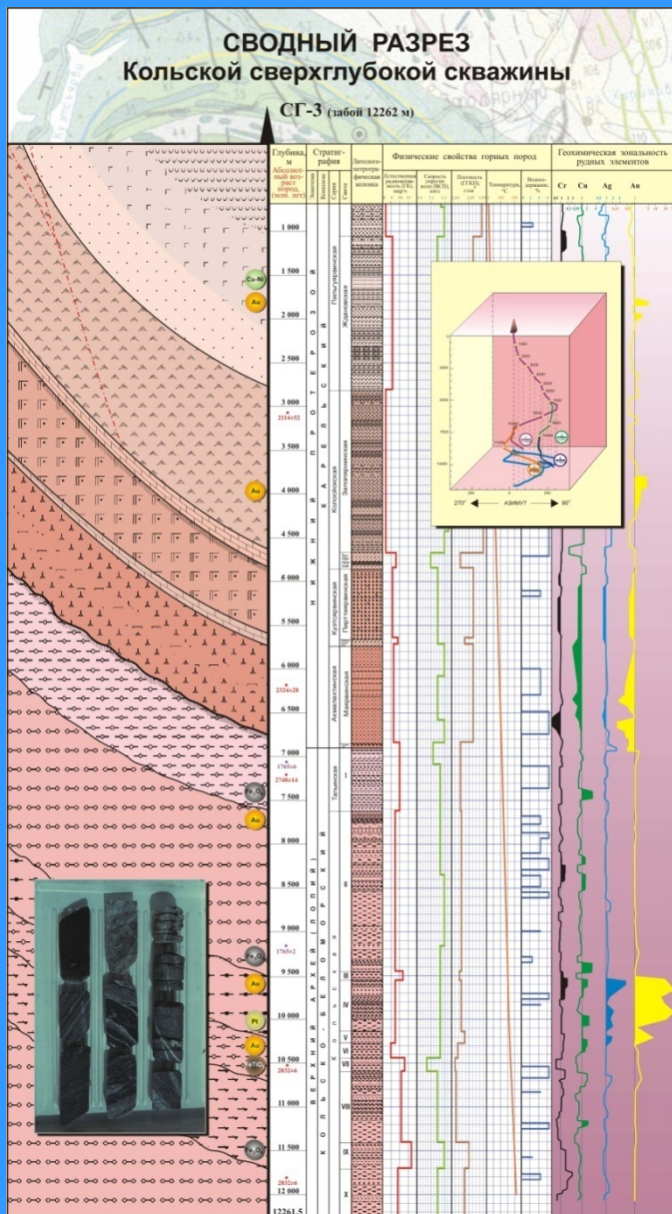


Ю.Н.Яковлев



М.И.Ворожбитов,
Д.М.Губерман,
Е.А. Козловский

КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКАЯ СКВАЖИНА



В результате проходки Кольской сверхглубокой скважины были опровергнуты проектные представления о строении земной коры в районе Печенгской структуры.

Разрез СГ-3, составленный по данным сейсмических исследований, прогнозировал, что на глубине 4 км скважина выйдет из вулканогенно-осадочных пород Печенгской структуры и войдет в гранито-гнейсы архейского фундамента. Разбурив трехкилометровый слой гранито-гнейсов и относительно маломощный на этом участке базальтовый слой, скважина должна была погрузиться в породы мантии.

Породы Печенгской структуры простирались до глубины 6842 м, а затем сменились архейскими гранито-гнейсами. «Базальтовый» слой вообще не был обнаружен – до самой рекордной глубины 12262 м бур пробивался через архейские гранито-гнейсы, содержащие тела основных и ультраосновных пород.

Установлено, что эти породы при сейсмологических исследованиях воспринимались геофизиками в качестве более плотных, по сравнению со стандартными породами.

КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКАЯ СКВАЖИНА



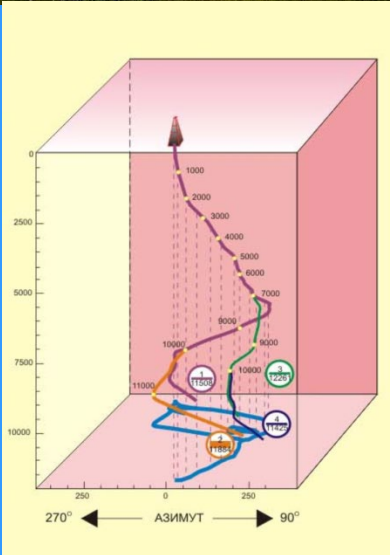
СГ-3 стала самой глубокой скважиной в мире, в которой детально изучен 12-километровый разрез древней континентальной земной коры.

Вместо «поверхности Конрада» (кровля базальтового слоя) был выявлен субгоризонтальный «коровый волновод», зона разуплотнения. Перемещение тектонических блоков по этим зонам обеспечило чешуйчато-надвиговое строение всего Лапландско-Печенгского блока.

На больших глубинах предполагалось, что в гранито-гнейсовом фундаменте Балтийского щита температура с глубиной растет 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 – 240°C, вместо ожидаемых 120°C.

Возможно, это связано с повышенной тектонической активностью в глубинных горизонтах земной коры. В зонах циркуляции подземных вод интервале 6,5-11,5 км и более, происходило формирование низкотемпературной гидротермальной сульфидной минерализации.

На глубине 1600-1900 м был выявлен горизонт промышленных Cu-Ni руд, изучение которых позволило открыть новые месторождения, а в интервале 9500-11000 м выявлен ранее неизвестный тип Au-Ag минерализации и зоны разуплотнения пород – возможные волноводы в древней континентальной земной коре.



Н.П.Лаверов,
Г.И.Горбунов

КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКАЯ СКВАЖИНА



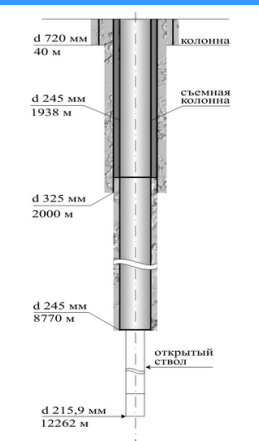
В сентябре 1984 г. на глубине более 12 км произошла авария - оборвалась буровая колонна длиной 5000 м. Лишь спустя 7 месяцев бурение возобновили с глубины 7000 м. До глубины примерно 7 км скважина пересекала прочные протерозойские породы, и ствол скважины соответствовал диаметру буровой коронки.

На глубине более 7 км пошли менее прочные трещиноватые, переслаивающиеся с небольшими очень твердыми прослойками архейские породы - гнейсы, амфиболиты. Ствол принял овальную форму, появилось множество каверн и участились аварии.

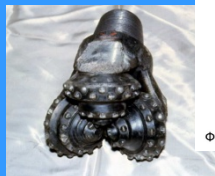
Типичная сложная авария – обрыв колонны буровых труб. Основным методом ее ликвидации – создать уступ чуть выше потерянной части и с этого места вести бурение нового обходного ствола. Всего в скважине было пробурено пять обходных стволов протяженностью от 2200 до 5000 м.

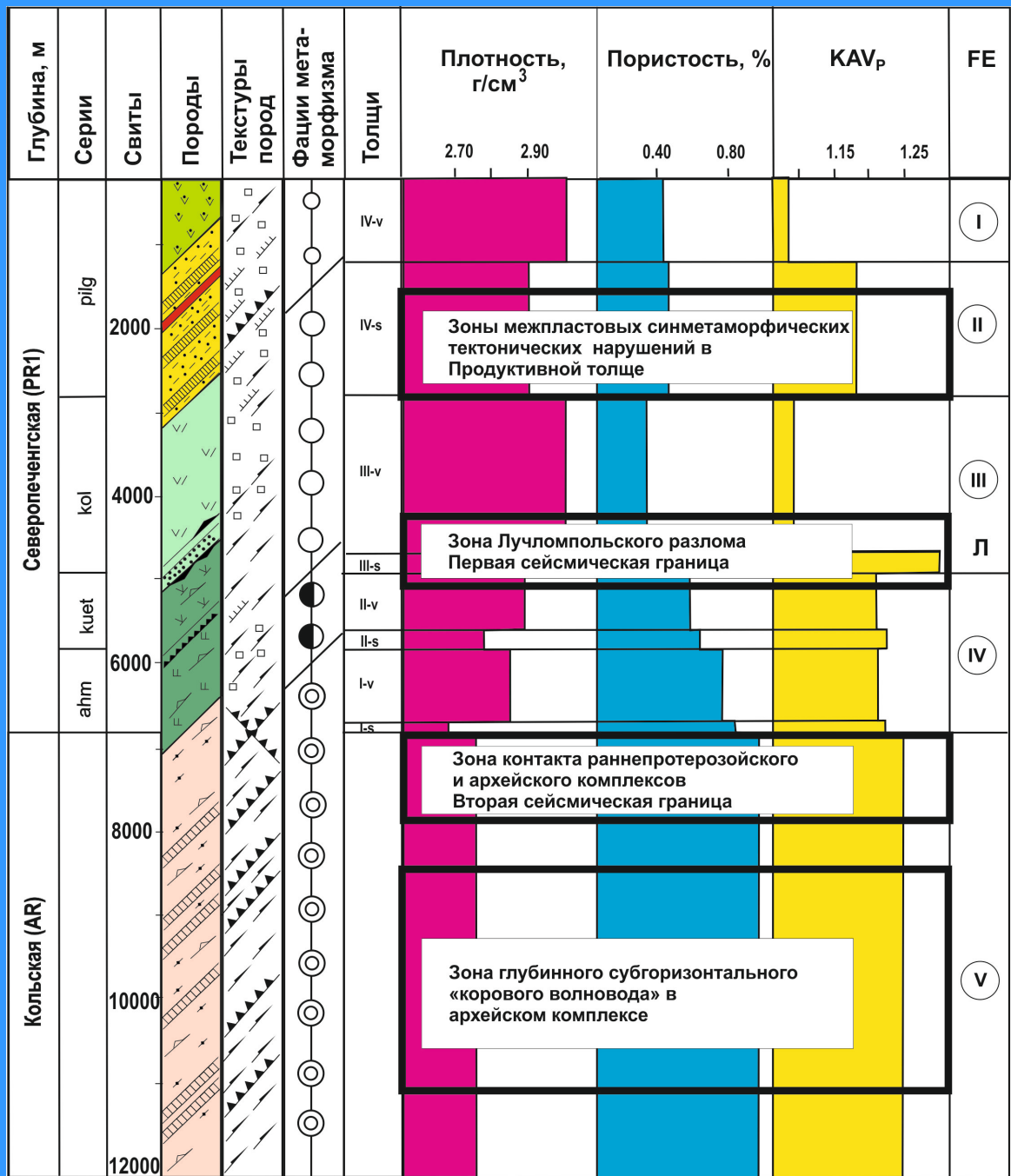
Проходка за один рейс, определяемая износом буровой коронки, составляла обычно 7-10 м. Само бурение занимало 4 часа, а на спуск и подъем 12-километровой колонны, состоящей из 33-метровых свечей, уходило по 16-18 часов.

В 1990 году был достигнут максимум глубины – 12262 м. После еще нескольких аварий убедились, что глубже не пробиться. Все возможности современной техники оказались исчерпаны. Бурение прекратили в 1992 году, скважина была законсервирована.



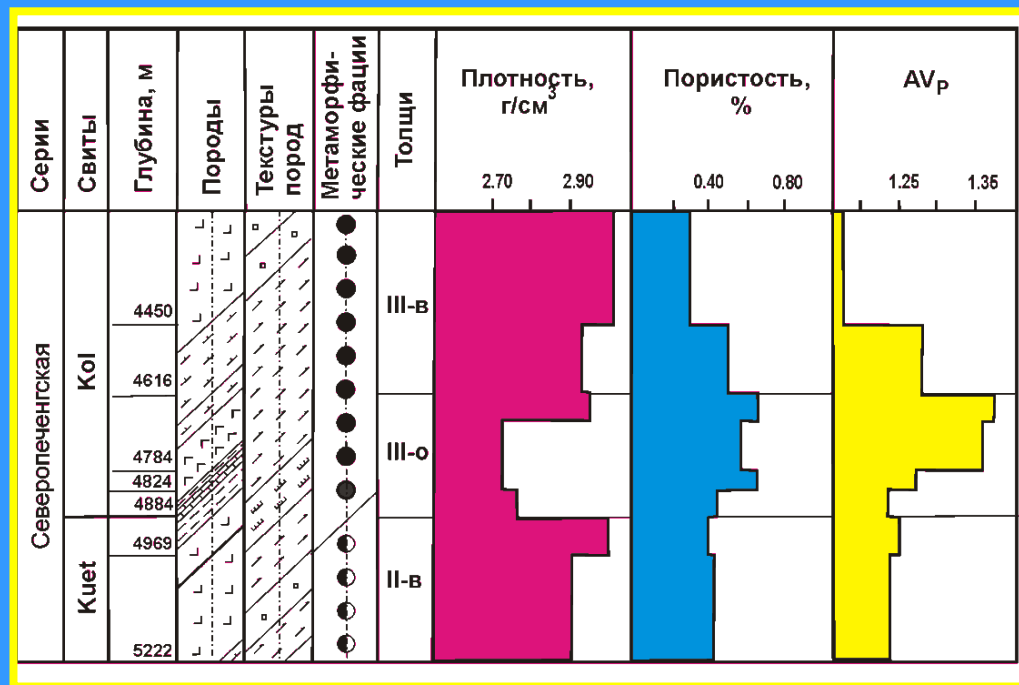
Фактическая конструкция скважины СГ-3



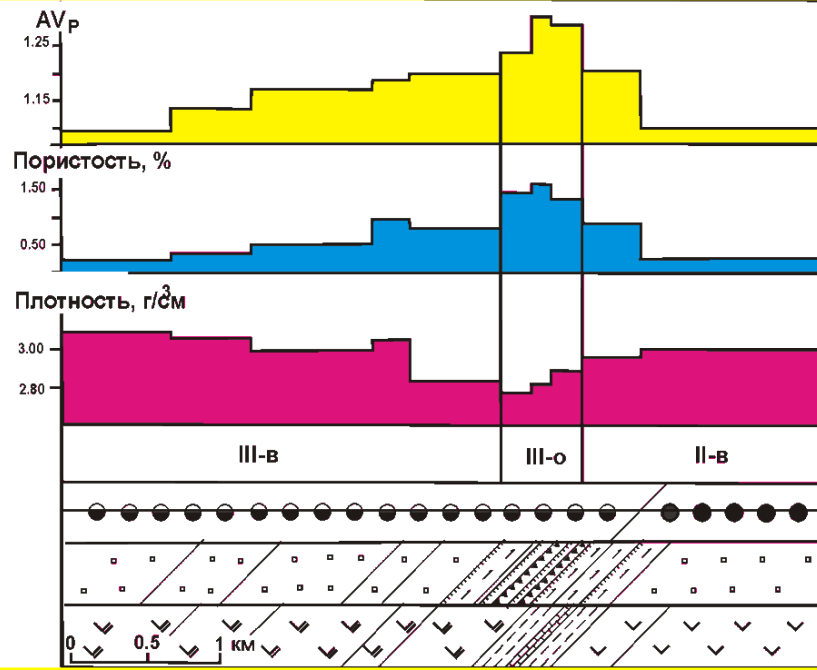


**Формализованный
разрез Кольской
сверхглубокой
скважины с
зонами
тектонических
нарушений
(Лобанов и др.,
2010)**

а

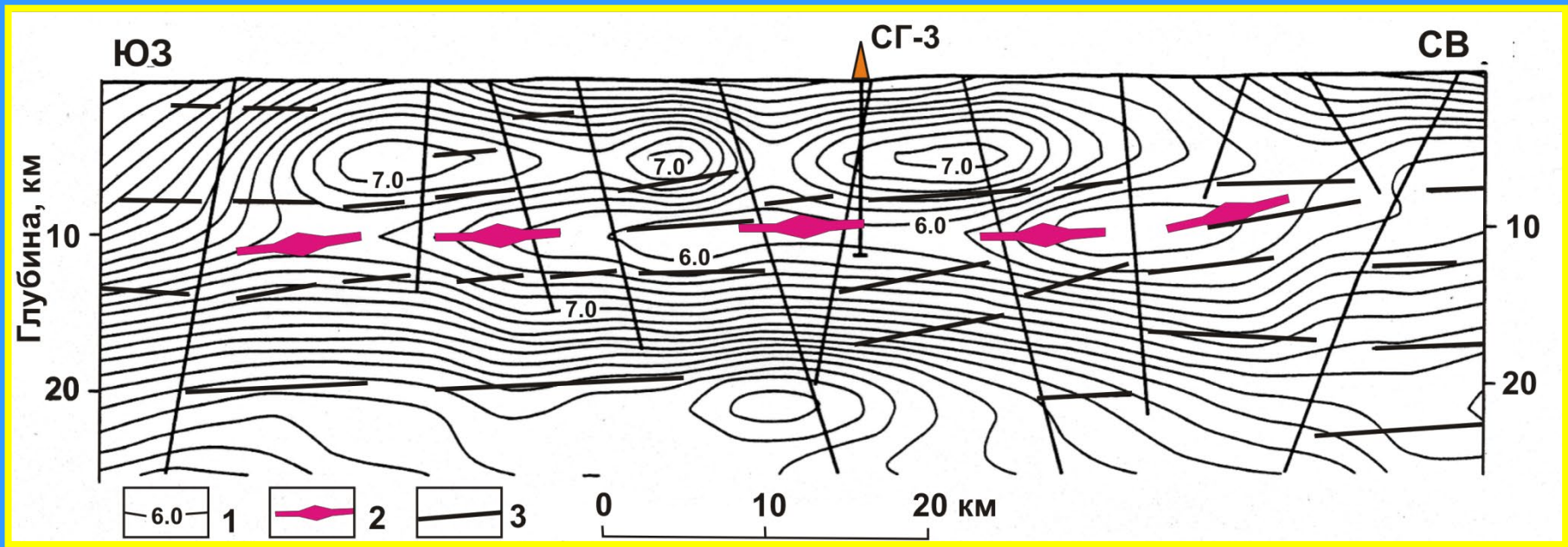


б



Корреляция плотности, пористости и KAV_p в зоне Лучломпольского разлома по разрезу Кольской сверхглубокой скважины (а) и профилю на поверхности (б)

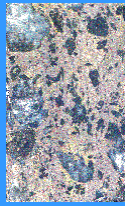
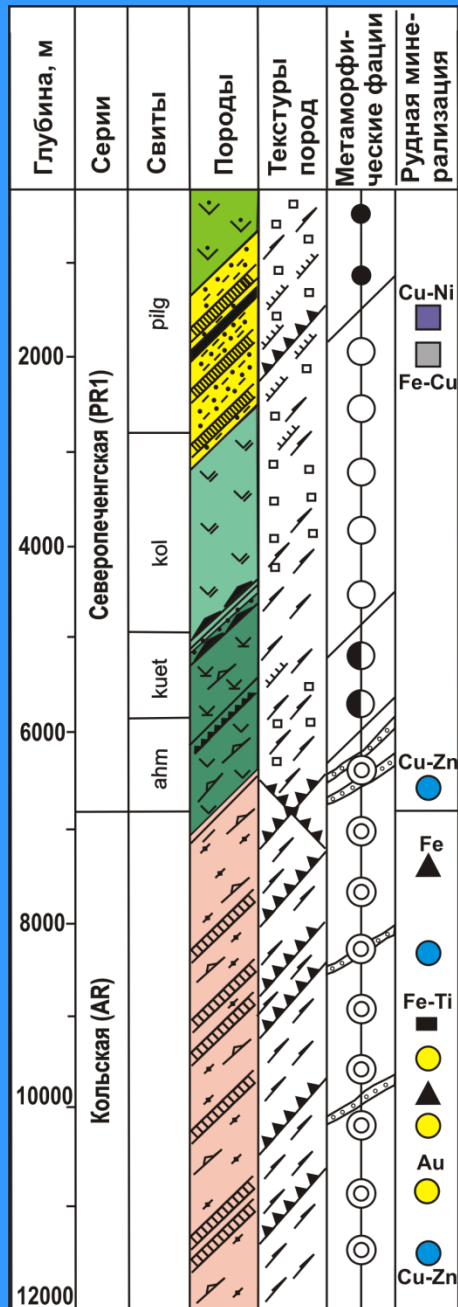
Первая сейсмическая граница



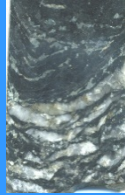
Сейсмогеологический (скорость V_p) и сейсмический (МОВЗ-МРС) разрез через Печенгскую структуру (Шаров и др., 2007).

- 1 – изолинии скоростей V_p в км/с (до глубины 25 км в изолиниях)
- 2 – ось волновода; 3 – границы, установленные по МОВЗ

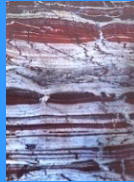
В интервале от 8 до 12 км в архейском комплексе формировались зоны регрессивного метаморфизма и трещиноватости, насыщенные флюидами, которые не могут являться пологими глубинными рефлекторами. Предполагается, что флюидонасыщенные пологие сейсмические границы связаны с наиболее поздними зонами открытой трещиноватости, непосредственно продолжающимися из Балтийского щита в шельф Баренцева моря.



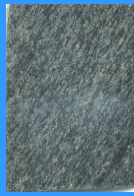
Сульфидная медно-никелевая и платинометаллическая минерализация приурочена к метапериотитам и филлитам и ранее неизвестной рудной зоны в средней части продуктивной толщи, аналогична рудам Печенгского рудного поля и доказывает выдержанность Cu-Ni оруденения по падению на 2,5 км



Сульфидная железная минерализация пирит –пирротинное и колчеданное оруденение в туффогебно-осадочных породах продуктивной толщи Печенгского рудного поля



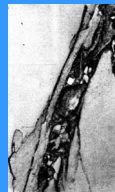
Оксидная железная минерализация приурочена к кварц-биотитовым и кварц-амфибол-биотитовым сланцам кольской серии архея



Оксидная железо-титановая минерализация обнаружена в телах метагаббро, залегающих в архейских породах кольской серии

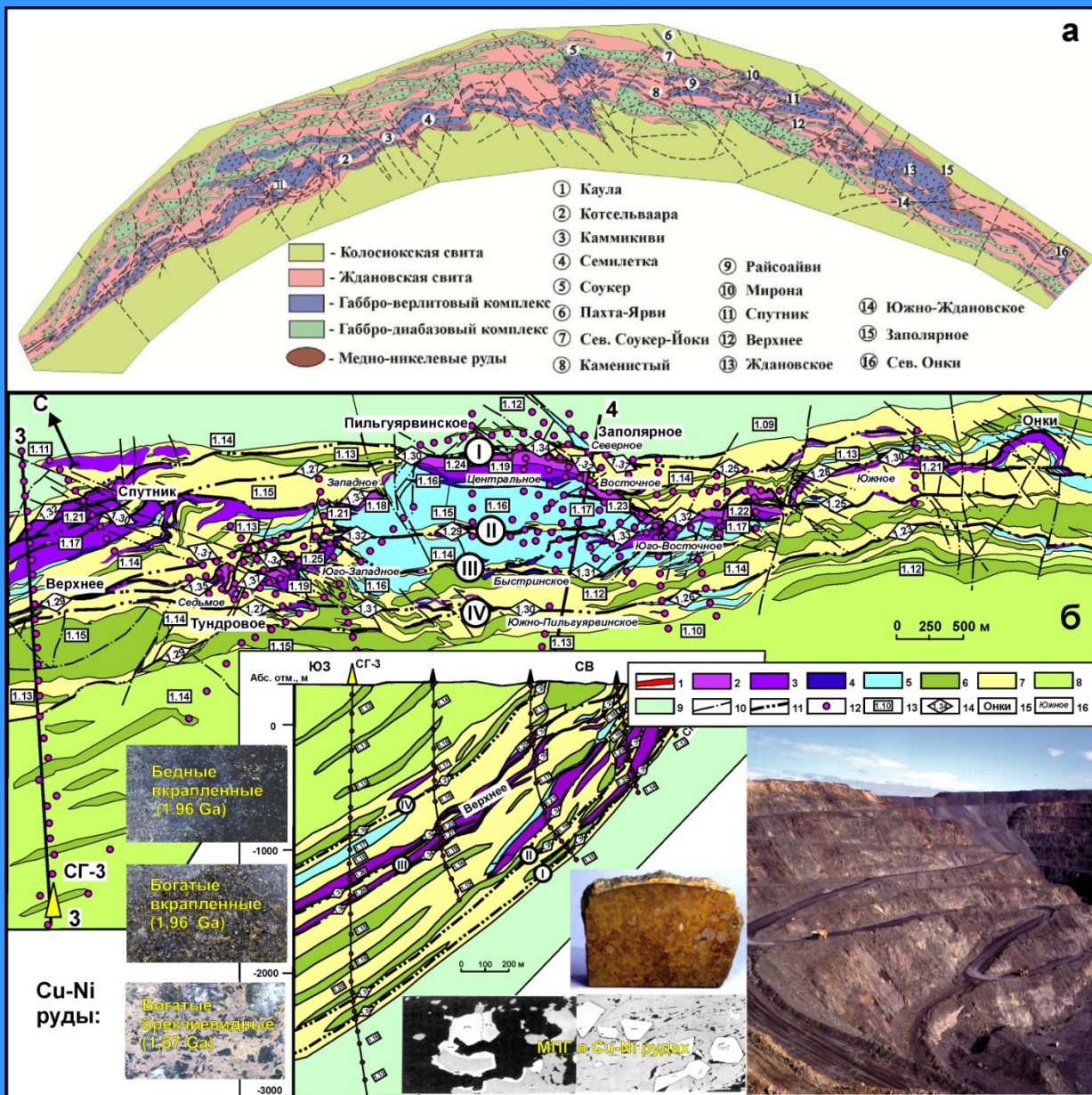


Сульфидная медно-цинковая минерализация установлена в зонах регрессивного дислокационного метаморфизма в интервале 6,2-12 км в метабазитах северопеченгской и в амфиболитах и гнейсах кольской серии

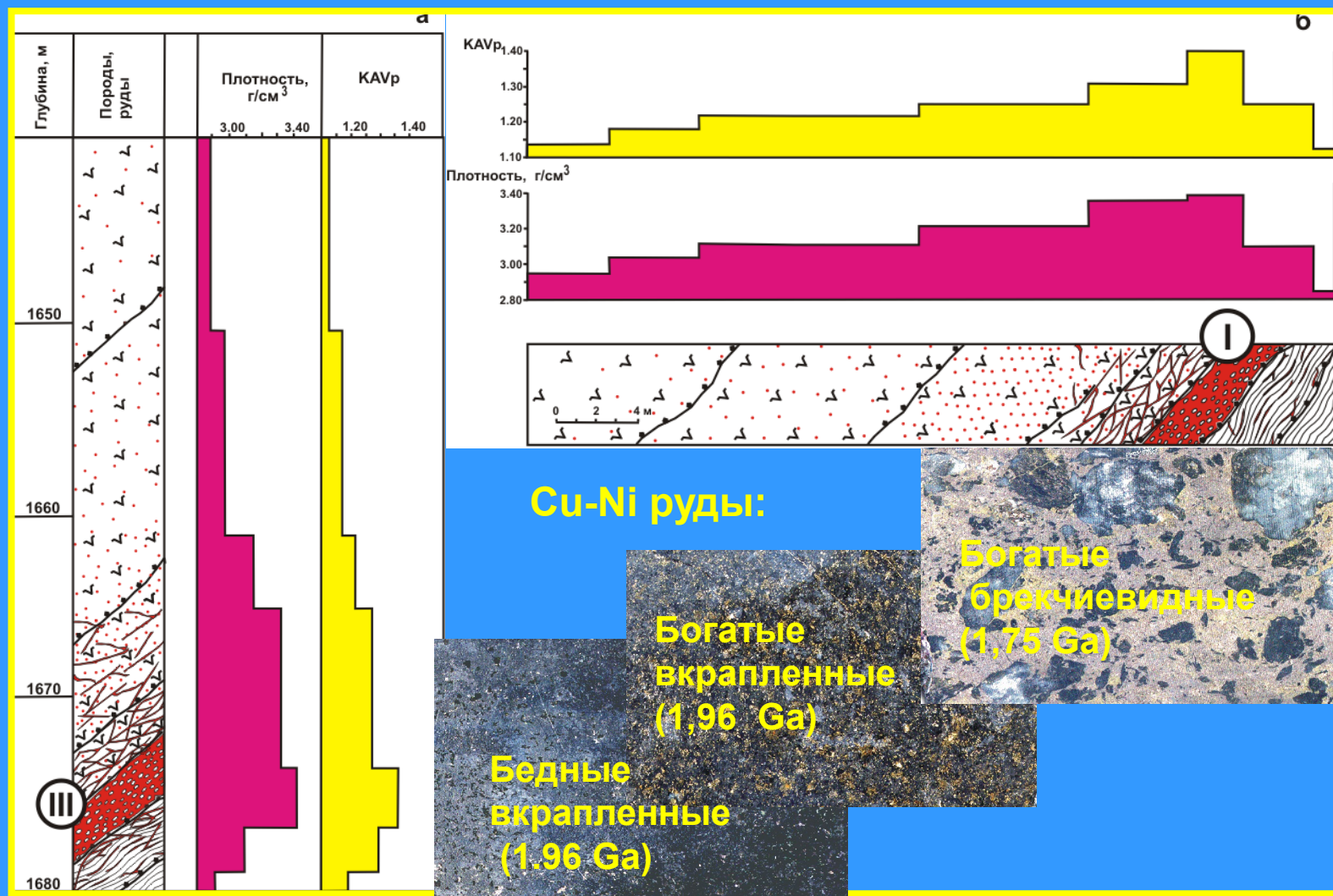


Самородная золотая минерализация в архейских гнейсах и амфиболитах кольской серии на глубинах 9500-11000 м

Вертикальная рудная зональность в разрезе СГ-3



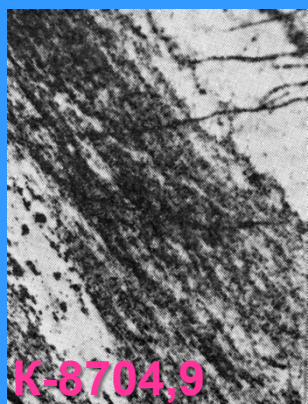
РУДОНОСНЫЕ СТРУКТУРЫ ПЕЧЕНГСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ И ВОСТОЧНОГО РУДНОГО УЗЛА



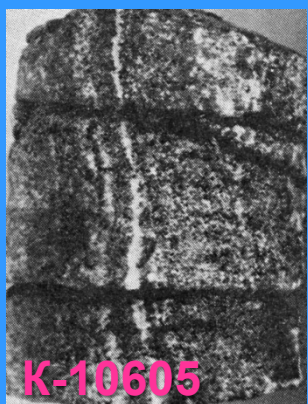
Корреляция плотности и KAVr пород в рудоносных межпластовых тектонических зонах синметаморфического расщепления Восточного рудного узла по разрезу СГ-3 (а) и профилю на поверхности через Центральное рудное тело месторождения Пильгуярвинское (б)



Техногенная рудная минерализация на глубоких горизонтах разреза СГ-3



К-8704,9

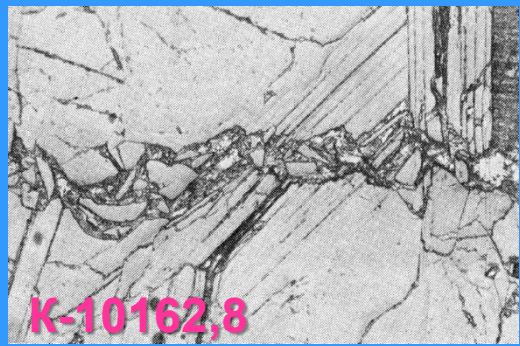


К-10605

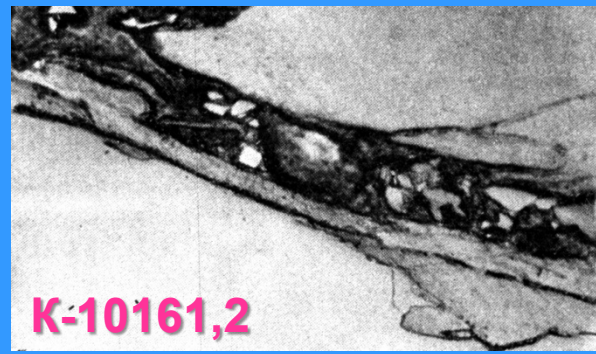


К-11052

Последовательно е дискование керн Кольской свехглубокой скважины. К-8704,9 м – зародышевые техногенные трещины в мигматите. К-10605 м – цилиндрические и клиновидные диски в полосчатом биотит-амфиболовом гнейсе. К-11052 м – тонкие закругленные по периферии диски в мигматите.

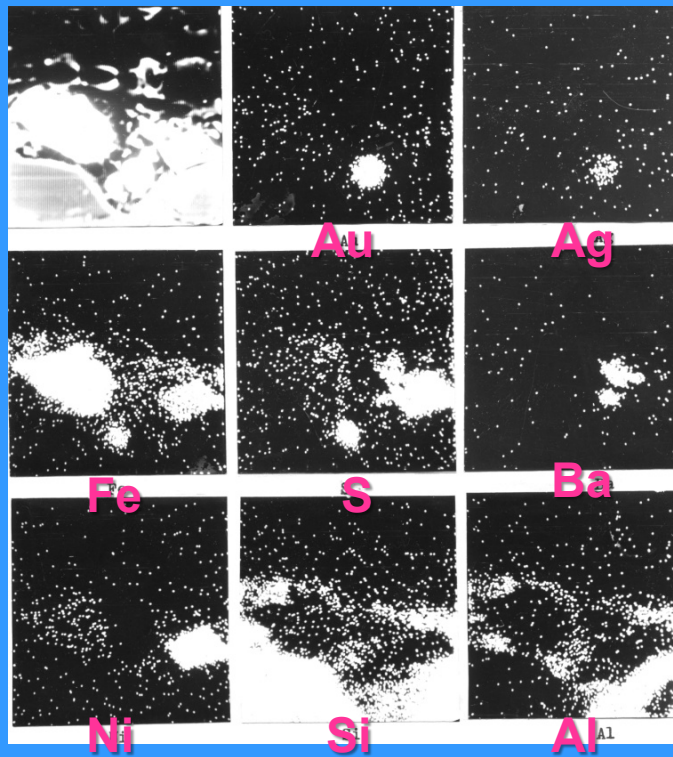


К-10162,8



К-10161,2

Плагиогнейсы из глубоких горизонтов разреза СГ-3 (микробрекчии с графитом, сульфидами и самородными элементами, полированные шлифы: К-10162,8 м, увел. 400; глубина К-10161,2 м, увел. 8)



Картина сканирования самородного золота и железа, пирротина, пентландита и барита в микробрекчии среди плагиогнейса.

Площадь сканирования 100 x 100 мкм, глубина К-10153,6 м;

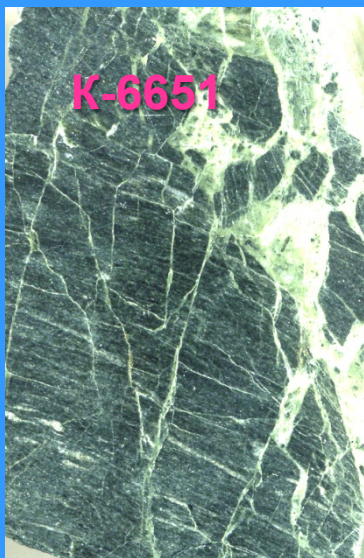


ГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ



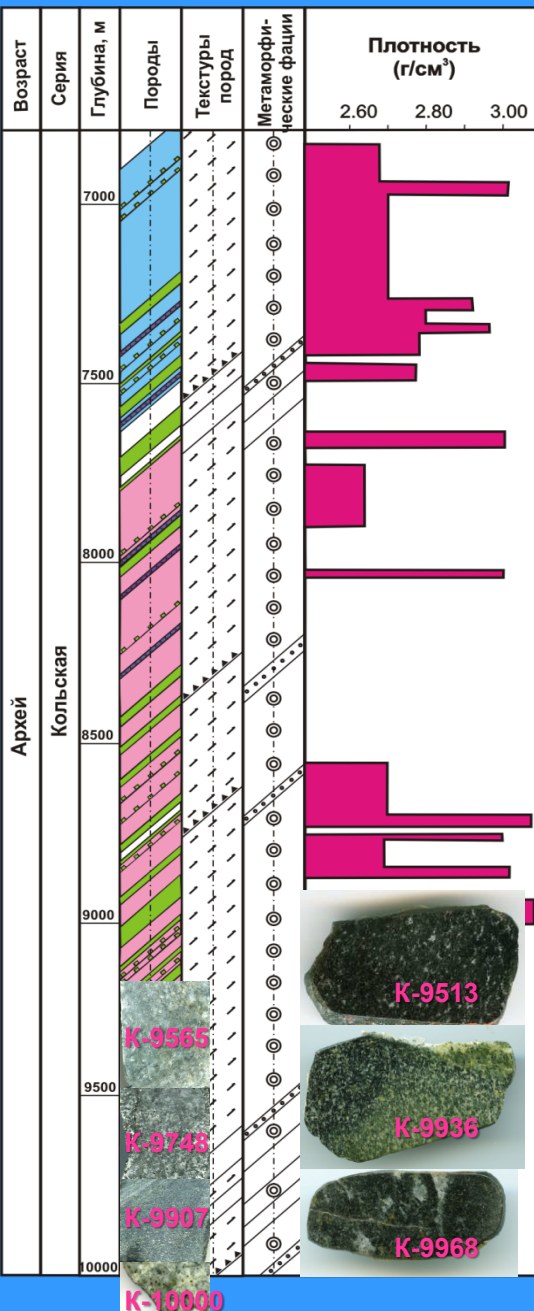
Минерализация установлена в зонах регрессивного дислокационного метаморфизма в интервале 6,2-12 км. Наряду с рассеянной вкрапленностью сульфидов - пирротина, пирита и халькопирита, она представлена хлорит-карбонат-кварцевыми прожилками, в которых наблюдаются более редкие и более разнообразные по составу сульфиды - сфалерит, галенит, борнит, молибденит, аргентопентландит.

В прожилках в metabazитах печенгской серии на глубине 6380 м аргентопентландита, образующего мелкие выделения и реже в пирротине в ассоциации с пентландитом и сфалеритом. Состав аргентопентландита, по данным микрорентгеноспектрального анализа, %: Fe 32,9; Ni 20,7; Ag 13,8; S 32,0; сумма 100,4. Его присутствие свидетельствует об эпигенетическом происхождении гидротермальной сульфидной минерализации.



Температуры образования гидротермальной сульфидной минерализации оценивались по распределению кобальта в сростаниях пирротина и пирита. Значения температур, вычисленные по коэффициенту распределения кобальта в этих сульфидах, в основном укладываются в интервале 184-323° C, т. е. они существенно более низкие, чем температуры, характерные для амфиболитовой фации метаморфизма вмещающих пород.

ЗОЛОТАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ



Золотая минерализация обнаружена с помощью нейтронно-активационного анализа (ВНИИАГГ) и подтверждена результатами минералогических исследований (ИГЕМ). На расстоянии 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 и представленного мелкими (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.

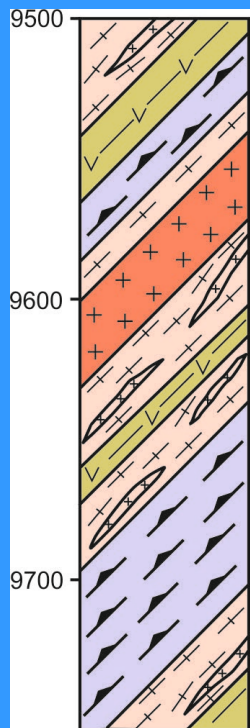
Химический состав самородного золота, %

Номер образца	Глубина, м	Au	Ag	Al	Si	Fe	Сумма
37819	10167,6	85,56	12,12	-	0,57	1,76	100,01
38822	10 556,5	74,49	25,51	-	-	-	100,00
38822	10556,5	73,34	26,66	-	-	-	100,00

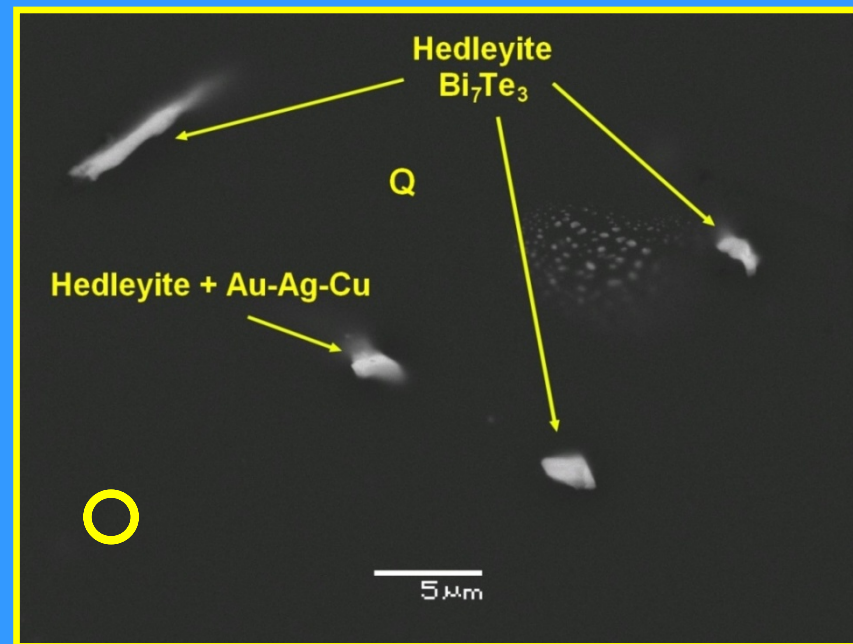
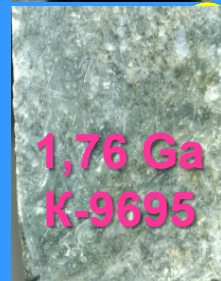
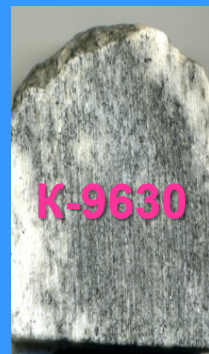
Верхняя граница золотоносного интервала совпадает с крупным разломом, пересекающим породы кольской серии на глубине 9500-9700 м. Он фиксируется по резкому переходу от пологозалегающих биотит-амфиболитовых гнейсов к крутопадающим железистым кварцитам, горнблендитам, тальк-тремолит-флогопитовым сланцам (метаультрабазитам) и дайкообразному телу среднепротерозойских (1,76 млрд. лет) порфиroidных гранитов лицо-арагубского комплекса.

Золотая минерализация пространственно совпадает с зонами регрессивных изменений. Сложное внутреннее строение разлома подтверждают магнитные измерения в скважине. Отсюда следует предположение о структурном контроле этой минерализации.

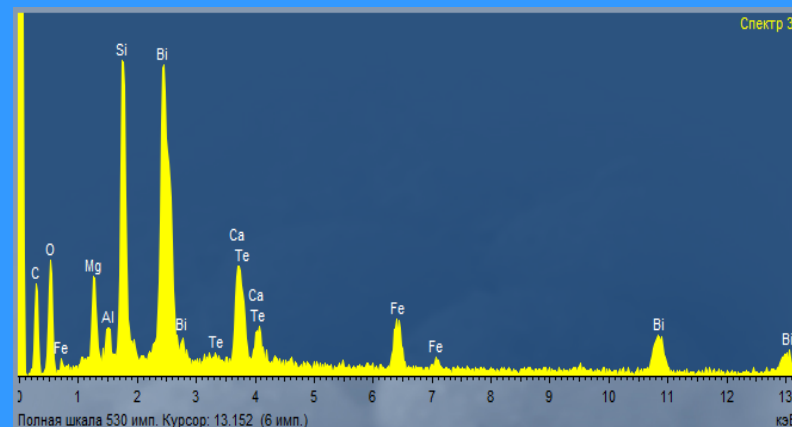
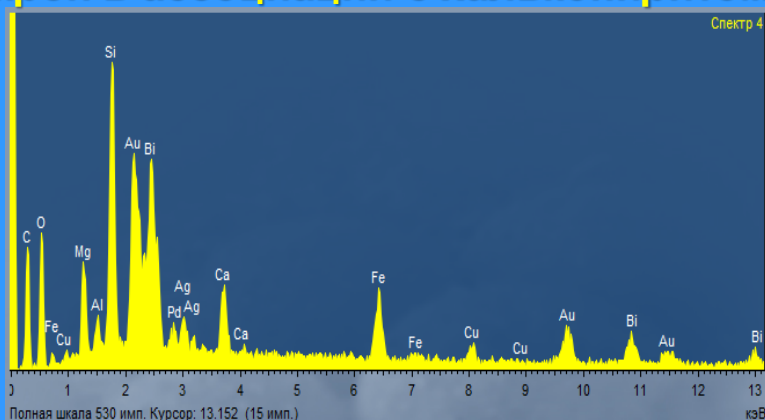
Микровключения золота и серебра в биотит-амфиболовом гнейсе К-9630



Строение
зоны
разлома в
породах
кольской
серии
в интервале
9600-9750 м

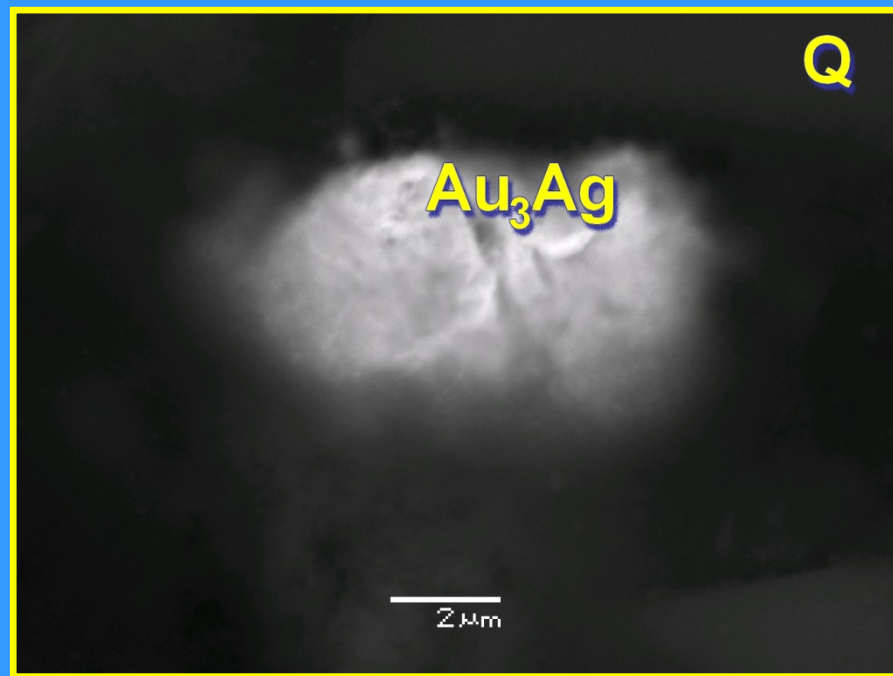
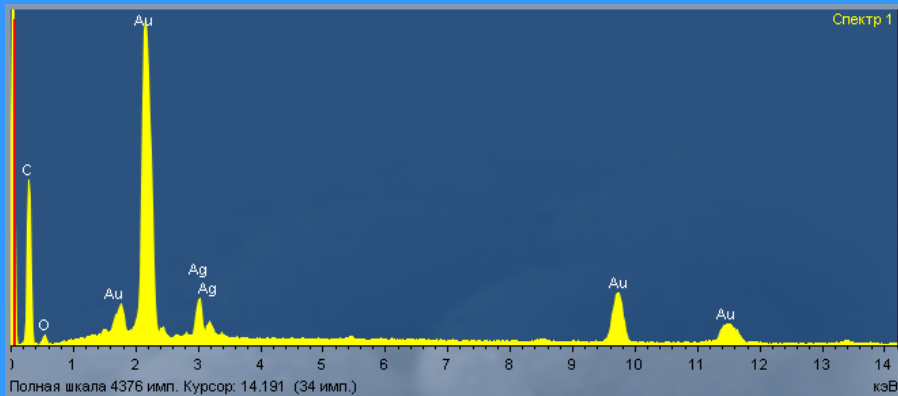
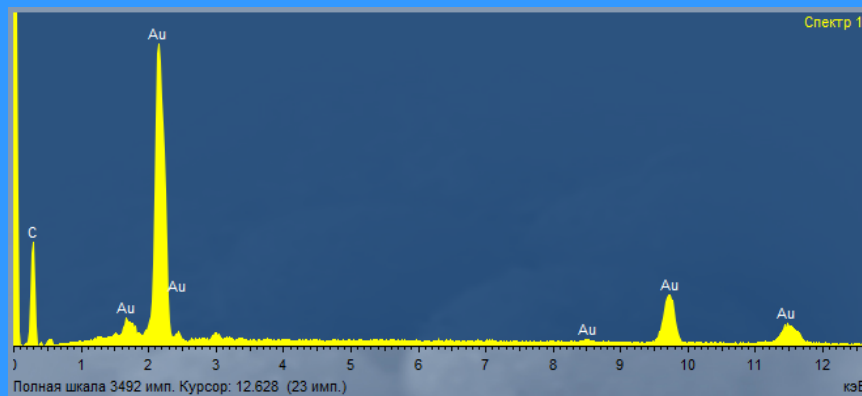
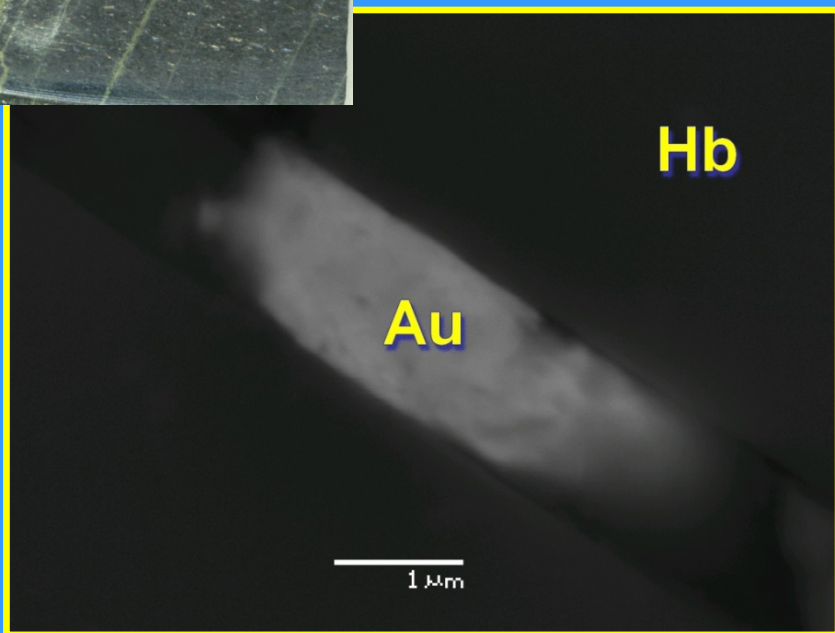


Поиск золотосодержащих включений проводился в режиме отраженных электронов. Обнаружены частицы золота с серебром, палладием и висмутом размером несколько микрон в ассоциации с халькопиритом.



Микровключения золота и серебра в сланцеватом амфиболите К-10176

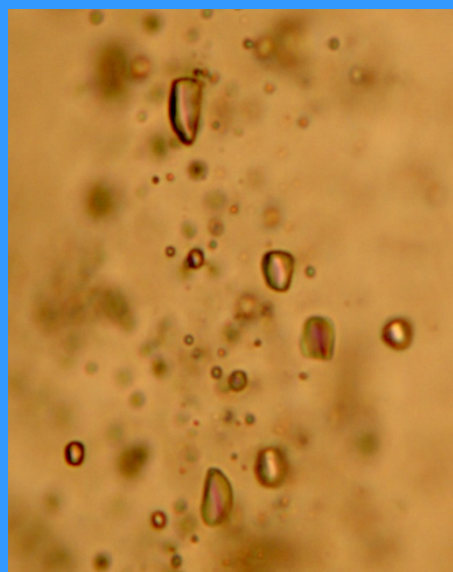
В образцах с глубины 10167 м найдены частицы золота размером до 10 микрон с содержанием серебра до 12 мас. %, которые фиксировались по трещинам в роговой обманке.



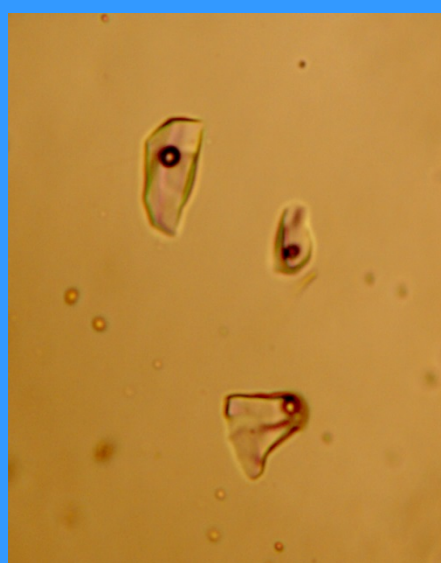


Глубинный флюид СГ-3

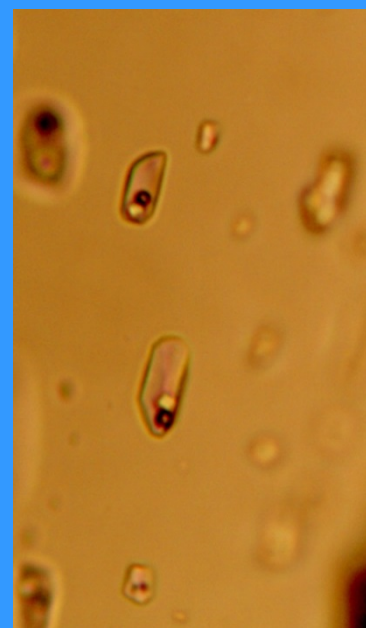
В кварце из золотоносного интервала (9269-10205 м) скважины обнаружены флюидные включения четырех типов.



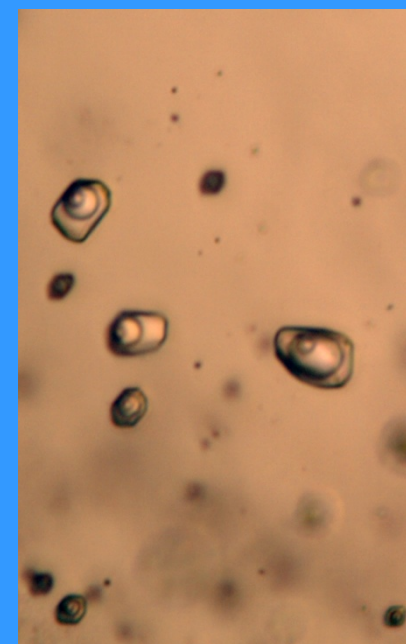
1.
Однофазовые
газовые
включения



2. Двухфазовые
включения
водных
растворов



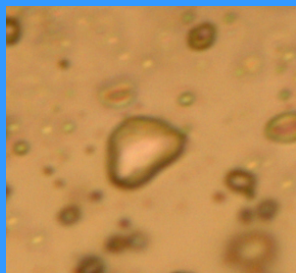
3.
Трехфазовые
включения
рассолов



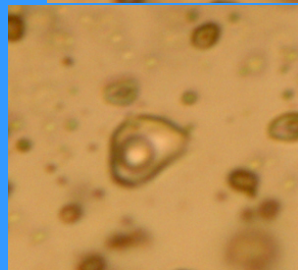
4.
Трехфазовые
углекислотно-
водные
включения

Параметры флюидных включений

Тип 1

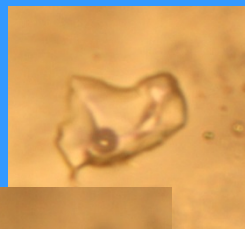


+20 °C



-2 °C

Тип 2



+20 °C



-80 °C



-36 °C

Тип 3



+20 °C

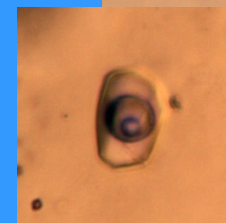


+20 °C

Тип 4



+20 °C



+5 °C

Т гом. -0.6 - +21.2 °C

в жидкость

Т пл. от -56.7 до
-60.3 °C

Плотность

0.37-1.14 г/см³

Т гом. 137-226°C в жидк.

Т пл. льда от -20.7 до
-63.0 °C

Солей 21.6-30.2 мас.% экв. CaCl₂
Плотность 1.02-1.15 г/см³

Т гом 123-381 °C в
жидкость

Т пл. NaCl 123-381 °C

С солей 28.7-45.4 мас. %
экв. NaCl

Плотность 1.09-1.24 г/см³

Т гом. 223-356°C в
жидкость

Т пл. газг от -2.2 до
+8.2 °C

С солей 3.6-18.8 мас.%
экв. NaCl

Плотность 0.92-1.12
г/см³

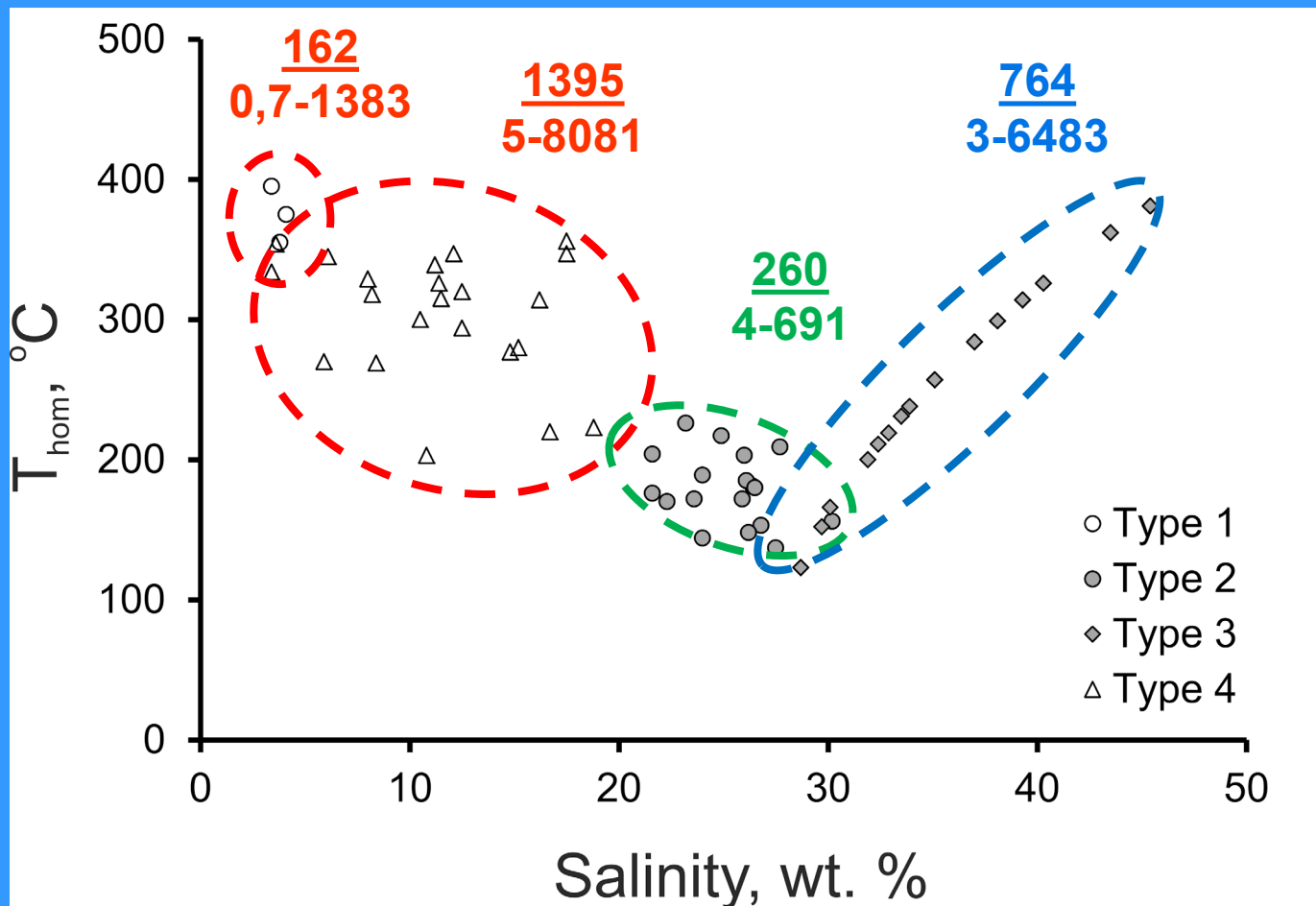
Однофазовые включения типа 1 содержат плотную CO₂.

Двухфазовые включения типа 2 содержат хлоридные рассолы с кальцием и литием, богатые бромом.

Трехфазовые включения типа 3 с кристаллом NaCl содержат хлоридные рассолы с натрием и кальцием.

Трехфазовые включения типа 4 содержат углекислотно-водный флюид.

Концентрации золота во флюидах разных типов включений



Наиболее высокие концентрации золота обнаружены во флюидах включений типов 3 и 4.



Спасибо за внимание!