

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии

На правах рукописи

ЛОБАНОВ Константин Валентинович

**СТРУКТУРНО-ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ
РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ ПЕГМАТИТОВЫХ И
МАГМАТИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА**

Специальность

25.00.11 - геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых; минерагения

ДИССЕРТАЦИЯ

в виде научного доклада
на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва – 2008 г.

Работа выполнена в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук, академик РАН
Рундквист Дмитрий Васильевич (Геологический музей
им. В.И.Вернадского РАН, г. Москва)

доктор физико-математических наук, профессор
Геншафт Юрий Семенович (ИФЗ РАН, г. Москва)

доктор геолого-минералогических наук, профессор
Игнатов Петр Алексеевич (МГГРУ, г. Москва)

Ведущая организация: Институт геологии и геохронологии докембрия РАН
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 7 марта 2008 г. в 14 час. 30 мин. в ауд. 415 на заседании диссертационного совета Д 501.001.62 геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, геологический факультет.

С диссертацией в виде научного доклада можно ознакомиться в библиотеке геологического факультета МГУ Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (Главное здание, 6 этаж).

Диссертация в виде научного доклада разослана февраля 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.62
доктор геолого-минералогических наук

Р.Н. Соболев

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Проблема влияния физико-механических свойств пород на локализацию месторождений полезных ископаемых относится к числу актуальных проблем не только геологии рудных месторождений, но и структурной геологии, особенно для древних докембрийских рудоносных кратонов. Опыт структурно-петрофизического изучения раннепротерозойских рудных месторождений Балтийского щита показывает, что целевые исследования позволяют определить роль физико-механических свойств метаморфических пород, как в формировании рудоносных структур, так и их дальнейшем преобразовании в ходе геологической истории. Полигоном для разработки методологии структурно-петрофизического изучения докембрийских метаморфических комплексов в связи с их рудоносностью, стала северо-восточная часть Балтийского щита, в которой находятся разнородные раннепротерозойские (2.5-1.8 млрд. лет) месторождения сформировавшиеся в одну эпоху рудообразования, в ходе которой в метаморфических архейских и протерозойских породах локализовались пегматитовые Чупино-Лоухского и медно-никелевые месторождения Печенгского рудных районов.

Цель и задачи исследований. Основная цель выполненных исследований состояла в изучении структурно-петрофизических характеристик вмещающих пород как индикаторов раннепротерозойских тектонических, магматических и метаморфических процессов, определивших формирование пегматитоносных структур и локализацию медно-никелевых месторождений северо-восточной части Балтийского щита. При этом решались следующие задачи: 1) петрофизическая характеристика пегматитоносных складчатых структур и условий локализации жил мусковитовых пегматитов Чупино-Лоухского района; 2) корреляция петрофизических параметров пород разреза Кольской сверхглубокой скважины и опорного профиля на поверхности в Печенгском рудном районе; 3) сопоставление петрофизических параметров метаморфических архейских пород на глубоких горизонтах СГ-3 и на поверхности; 4) разработка интегральной объемной геодинамической модели Печенгского рудного района; 5) выявление структурно-петрофизических условий локализации медно-никелевых месторождений Печенгского рудного поля и их преобразование тектоно-метаморфическими процессами.

Фактический материал. В основе диссертации и использованных в ней методических подходов лежат материалы, собранные автором и сотрудниками тематической группы ИГЕМ РАН с 1974 по 2006 г. в ходе изучения Кольской сверхглубокой скважины и полевых исследований раннепротерозойских пегматитовых месторождений Чупино-Лоухского района и магматических медно-никелевых месторождений Печенгского рудного района.

В процессе работы изучено около 12000 образцов пород и руд с определением их

петрофизических параметров, а также петрологической характеристикой, построены 6000 объемных петрофизических диаграмм, задокументировано более 36000 м керна скважин, в том числе СГ-3, и 7000 м горных выработок. Все образцы пород и руд были отобраны, изучены в лабораторных условиях на одних и тех же приборах по методике структурно-петрофизического анализа, а результаты проинтерпретированы одними и теми же исследователями. В работе использованы петрофизические данные полученные автором самостоятельно и совместно с другими исследователями тематической группы.

Защищаемые положения. В соответствии с поставленными задачами в диссертации обосновываются следующие защищаемые положения:

1. Разработана методология структурно-петрофизического изучения метаморфических пород и руд с использованием плотности, характеризующей литологический состав пород, и коэффициента объемной анизотропии упругих волн, отражающего интенсивность тектонических деформаций синхронных с метаморфизмом. Метод апробирован при изучении Кольской сверхглубокой скважины и поверхностных структур Чупино-Лоухского и Печенгского рудных районов.

2. Закономерности локализации мусковитовых пегматитов в складчатых структурах и зонах вторичного расланцевания в Чупино-Лоухском слюдоносном районе обусловлены высокой анизотропией упругих свойств и пластическими деформациями глиноземистых гнейсов продуктивных горизонтов чупинской свиты беломорского комплекса на свекофеннском этапе тектоно-магматической активизации.

3. Корреляция и формализация разреза Кольской сверхглубокой скважины и опорного наземного 120-километрового профиля по петрофизическим параметрам пород в Печенгском рудном районе является основой интегральной геодинамической модели глубинного строения этого района до глубины 15 км.

4. Продуктивная толща северпеченгской серии, в которой сосредоточены раннепротерозойские никеленосные габбро-верлитовые интрузии и крупные медно-никелевые месторождения Печенгского рудного поля обладает четко выраженной гетерогенностью по физико-механическим свойствам пород. Богатые сульфидные медно-никелевые руды связаны с синметаморфическими зонами расланцевания, возникшими на коллизионном этапе развития карелид и характеризующимися максимальными значениями анизотропии V_p для пород.

5. Петрофизические данные по опорным образцам керна из архейской части разреза СГ-3 и их аналогам на поверхности свидетельствуют о том, что на глубинах 8-12 км выявлены блоки пород аналогичного минерального состава со сходными параметрами плотностей, скоростей V_p и V_s . Аномально высокие значения пористости и объемной анизотропии V_p в

этих породах обусловлены технологическими факторами.

Научная новизна.

1. Разработанный автором модернизированный вариант структурно-петрофизического метода впервые был применен для изучения докембрийских метаморфических пород Балтийского щита.

2. Получены оригинальные структурно-петрофизические данные об условиях локализации раннепротерозойских месторождений мусковитовых пегматитов Северной Карелии.

3. Проведена корреляция пород по разрезу СГ-3 и опорному профилю на поверхности по формализованным характеристикам с применением компьютерных технологий, на основе которых разработана интегральная модель глубинного строения Печенгского рудного района, которая объясняет условия локализации медно-никелевых руд на месторождениях Печенгского рудного поля.

Практическое значение. Изложенные в диссертации и публикациях автора результаты могут служить основой для определения условий локализации пегматитовых и магматических месторождений северо-восточной части Балтийского щита и прогноза перспективных участков. Петрофизическая корреляция пород на глубоких горизонтах континентальной земной коры и поверхности предложена как новое направление в разработках интегральных геодинамических моделей глубинного строения рудных районов и выяснения геологической природы сейсмических границ.

Апробация результатов исследований. Результаты исследований были представлены на 27 международных совещаниях: 29, 30 и 32-м Международных геологических конгрессах (Киото, Япония, 1992; Пекин, Китай, 1996; Флоренция, Италия, 2004), 2-8 конференциях «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (Москва, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007; Дубна, 2004; Борок, 2006), 9-11 конференциях ассоциации по математической геологии (Портсмут, Англия, 2003; Торонто, Канада, 2005; Льеж, Бельгия, 2006), 4 и 5-ом Европейских конгрессах по региональной геологической картографии и информационным системам (Болонья, Италия, 2003; Барселона, Испания, 2006), Канадского геологического и минералогического обществ (Галифакс, Канада, 2005), а также на 20 Всесоюзных и Всероссийских совещаниях, таких как «Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии» (Новосибирск, 1982), «Петрофизика рудных месторождений» (Ленинград, 1990), «Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма» (Москва, 2006), «Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерогения северо-запада России». (Петрозаводск, 2007) и других. Конкретная информация содержится в прилагаемом списке

опубликованных работ.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались в ходе проведения исследований и совещаний по проекту МПГК № 408 «Сравнение состава, структуры и физических свойств пород и минералов по разрезу Кольской сверхглубокой скважины и их гомологов на земной поверхности» (руководители Ф.П.Митрофанов, Д.М.Губерман, И.Кюмпель) (Апатиты, Заполярный, 1998, 1999, 2002; Прага, Чехия, 2000; Виндишэшенбах, Германия, 2001).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 70 научных работ, включая 8 разделов в 7 коллективных монографиях, 17 статей в сборниках научных работ, 14 статей в рецензируемых отечественных журналах, 13 статей в международных журналах и сборниках.

Благодарности. На протяжении 30 лет автор работал в составе тематической группы ИГЕМ РАН изучению процессов рудообразования по материалам сверхглубокого бурения, затем изучению глубинного строения и геодинамики рудных районов, руководимой В.И.Казанским и ее сотрудникам Б.П.Беликову, А.А.Глаголеву, В.Л.Русинову, А.Д.Генкину, А.А.Филимоновой, А.В.Жарикову, И.А.Чижовой.

Кафедре геологии и геохимии полезных ископаемых Геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, где автором проводились все лабораторные исследования и ее заведующему В.И.Старостину.

Кольская экспедиция сверхглубокого бурения НПО «Недра» – Д.М.Губерману, В.С.Ланеву, Ю.П.Смирнову, Ю.Н.Яковлеву, М.З.Абдрахимову. ВНИИгеосистем – О.Л.Кузнецову, Е.Н.Черемисиной, Н.Н.Пимановой. Исследования по геофизике и петрофизике – Н.В.Шарову, Э.В.Исаниной, Ю.И.Кузнецову, В.В.Кочегуре, В.А.Тюремнову, Ф.Ф.Горбачевичу.

Изучение месторождений: мусковитовых пегматитов Северной Карелии – К.А.Шуркину, М.Е.Салье, В.Л.Дуку, Т.Ф.Зингер, Е.П.Чуйкиной; медно-никелевых руд Печенгского рудного района – Г.И.Горбунову, С.В.Соколову, В.В.Дистлеру, Т.Л.Гроховской.

Общие проблемы изучения рудных месторождений Балтийского щита – Н.П.Лаверову, Ф.П.Митрофанову, Д.В.Рундквисту, Ю.Г.Сафонову.

Автор выражает признательность своим коллегам за совместные полевые работы и лабораторные исследования: А.В.Кузнецову, В.В.Астафьеву, Л.П.Гордиенко, Ю.П.Богачеву, А.В.Липаевой, И.К.Мызникову, С.С.Наумову, Ю.И.Самоварову, М.В.Чичерову, без помощи которых выполнение этой работы было бы невозможно.

Положение Чупино-Лоухского и Печенгского рудных районов в докембрийских структурах северо-восточной части Балтийского щита

Согласно современным концепциям, в истории развития Балтийского щита выделяются четыре крупных тектономагматических цикла, которые соответствуют архею, раннему и позднему протерозою [Gaal, 1990; Рундквист, Митрофанов, 1988, и др.]. Особенностью щита является своеобразное «омоложение» коры с северо-востока на юго-запад и его блоковое строение. В нем выделяются три крупные провинции: юго-западная Дальсландская, центральная Свекофеннская и северо-восточная Кольско-Лапландско-Карельская, а также западная Каледонская (рис. 1.а), которые различаются общим характером геологического развития, составом и глубинным строением, металлогеническими особенностями и являются структурами первого порядка, разделенными глубинными разломами [Земная кора..., 1978; Эволюция..., 1987 и др.].

Кольско-Лапландско-Карельская провинция, занимающая северо-восточную часть Балтийского щита, в которой находятся Чупино-Лоухский и Печенгский рудные районы, представляет собой наиболее древнюю часть земной коры и разделяется на три мегаблока: Карельский, Беломорский и Кольский. Центральное положение занимает Беломорский мегаблок, который рассматривался как часть саамского складчатого пояса, претерпевшего неоднократные складчатые и разрывные деформации, полиметаморфизм и мигматизацию [Кратц и др., 1978; Строение литосферы..., 1993]. В его пределах широко развиты тоналитовые гнейсы, амфиболиты и высокоглиноземистые гнейсы беломорского комплекса, прорванные расслоенными интрузиями базит-ультрабазитов (2,45 млрд. лет), слюдоносными пегматитами (1,76 млрд. лет). Породы этого мегаблока претерпели несколько этапов тектонических деформаций, метаморфизма и магматической активизации, два из которых относятся к архею, а два к раннепротерозойской (карельской и свекофеннской) складчатости [Геология Карелии, 1987].

В пределах Кольского мегаблока выделяются крупные блоки - Мурманский, Центрально-Кольский, Кейвский, Инарский, Беломорский, Терский и мобильные пояса сформированные в лопийский и карельский этапы (Колмозеро-Вороньинский, Лапландско-Колвицкий и Печенга-Имандра-Варзугский), которые подразделяются, на более мелкие блоки, зоны и отдельные структуры [Mitrofanov et al., 1995] (рис. 1.б).

Геологическая история Балтийского щита характеризуется дроблением литосферы на блоки различных порядков, в ходе которой выделяются пять тектономагматических и соответствующих им металлогенических циклов [Рундквист, Митрофанов, 1998]: саамский цикл (> 3.15 млрд. лет), лопийский (3.15-2.5), карельский (2.5-2.0), свекофеннский (2.0-1.65),

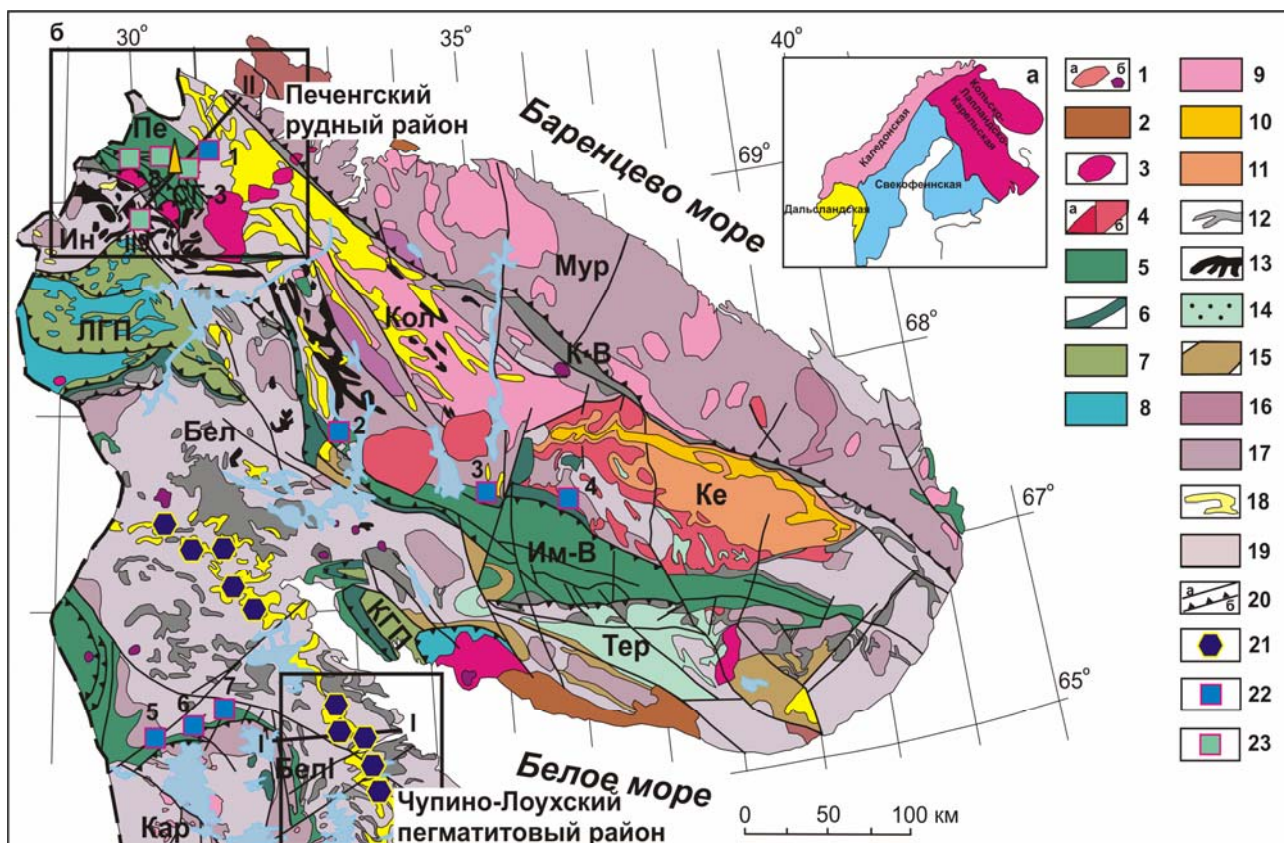


Рис. 1. Схема геотектонического районирования Балтийского (Фенноскандинавского) щита (а) и структурно-геологическая карта северо-восточной части Балтийского щита (б). Составлена на основе геологической карты масштаба 1:500000 [Mitrofanov et al., 1995]:

Палеозой: 1 - Хибинский и Ловоозерский комплексы нефелиновых сиенитов. Поздний протерозой: 2 - конгломераты и песчаники. Ранний протерозой: 3 - граниты, гранодиориты и диориты, 4 - чарнокиты (а) и щелочные граниты (б), 5 - вулканогенно-осадочные комплексы, 6 - расслоенные интрузии перидотит-пироксенит-габбро-норитов и габбро-анортозитов. Ранний протерозой - поздний архей: 7 - основные гранулиты, эндербиты, 8 - кислые гранулиты. Поздний архей: 9 - гранодиориты, диориты и эндербиты, 10 - высокоглиноземистые гнейсы и сланцы, 11 - кислые гнейсы, 12 - метакоматииты, амфиболиты и гнейсы зеленокаменных поясов, 13 - железистые кварциты, амфиболиты и гнейсы, 14 - гнейсы, сланцы, 15 - гнейсы, амфиболиты, 16 - гранодиориты, диориты, 17 - плагиограниты, тоналитовые гнейсы, 18 - кианит-гранат-биотитовые гнейсы, 19 - гнейсы, гранитогнейсы, мигматиты и амфиболиты; 20 - субвертикальные разломы (а) и надвиги (б), разделяющие протерозойские блоки, 21 - раннепротерозойские месторождения мусковитовых пегматитов (I - Чупино-Лоухский, II - Енский районы), 22 - раннепротерозойские магматические интрузивы с медно-никелевой, платинометальной и хромитовой минерализацией (2.5-2.4 млрд. лет): 1 - Гора Генеральская, 2 - Мончегорский, 3 - Имандровский, 4 - Федорово-Панский, 5 - Лукулайсваара, 6 - Ципринга, 7 - Кивакка; 23 - раннепротерозойские габбро-верлитовые интрузии с медно-никелевыми месторождениями и рудопроявлениями (1.95-1.94 млрд. лет): 8 - Печенгское, 9 - Аллареченское рудные поля. I - I и II - II - опорные профили через Чупино-Лоухский и Печенгский районы.

Бел - Беломорский мегаблок; Мур - Мурманский, Кол - Центрально-Кольский, Тер - Терский, Ке - Кейвский и, Ин - Инарский блоки; Ион - Йонский и К-В - Колмозеро-Вороньинский зеленокаменные пояса; ЛГП - Лапландский и КГП - Кандалакша-Колвицкий фрагменты Лапландского гранулитового пояса; Пе - Печенгская и Им-В - Имандра-Варзугская зоны карелид.

рифейский (1.65-1.1 млрд. лет). Каждый из них характеризуется определенным комплексом пород, спецификой тектоно-метаморфической истории и металлогении, определяемым геодинамическим режимом развития основных геологических структур. Для формирования раннепротерозойских пегматитовых Чупино-Лоухского и магматических месторождений Печенгского рудных районов северо-восточной части Балтийского щита важнейшее значение имеют карельский и свекофеннский тектономагматические циклы.

Тектономагматическая активизация карельского цикла (2.5-2.0 млрд. лет), в пределах Беломорского и Кольского геоблоков была связана с заложением глубоких расколов в ранее кратонизированной области, когда по границам блоков, в условиях режима растяжения, возникла система сопряженных линейных рифтогенных структур северо-западного и северо-восточного простирания [Земная кора..., 1978; Магматизм и металлогения..., 1993], в которых преобладал основной-ультраосновой магматизм. В их развитии выделяются два главных этапа с характерными для них магматическими, осадочно-вулканогенными формациями и металлогенией. В начальный сумийско-сариолийский этап образовался главный Беломорский рифт и вместе с ним сформировалась Печенга-Имандра-Варзугская рифтогенная зона, контролирующая размещение интрузий. Вулканиды этих структур имеют различный состав и относятся к андезитобазальтовой, толеит-базальтовой, пикрит-базальтовой формациям. В этот период происходит формирование раннепротерозойской северопеченгской вулканогенно-осадочной серии и формирование Печенгской структуры. В пределах Карельского и Кольского геоблоков интрузии максимально расслоены, имеют крупные размеры и лополитообразную форму (Лукулайсвара, Ципринга, Кивакка, Мончегорский, Федорово-Панский, Горы Генеральской и др.). Они содержат сульфидную медно-никелевую, хромитовую и платинометальную минерализацию (см. рис. 1.б). Главную роль в их локализации играют продольные разломы архейского основания, имеющие северо-западное простирание, а также северо-восточные разломы [Чашин, 1999]. Возраст этих интрузий определен в 2,5-2,4 млрд. лет. [Баянова, Митрофанов, 2002]. Для Беломорского блока в начале в это время характерен интенсивный интрузивный магматизм с внедрением дайкового комплекса лерцолит-габброноритов и габбродолеритов, а затем жильных гранит-лейкогранитов. В позднем карелии породы всех метаморфических и интрузивных комплексов претерпели интенсивные, но локально проявленные деформации и метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации высоких давлений. В это время формируются складчатые структуры Чупино-Лоухского пегматитового района.

Свекофеннский тектономагматический цикл (2.00-1.65 млрд. лет) характеризуется заложением системы глубинных разломов северо-западного и субширотного простирания, явившихся основой свекофеннских подвижных поясов. Беломорская структура в этот период представляла собой область интенсивных движений и метаморфизма [Магматизм и металлогения..., 1993; Эволюция..., 1987 и др.]. На рубеже 1.95-1.80 млрд. лет породы беломорского комплекса претерпели интенсивный диафторез эпидот-амфиболитовой фации высоких давлений с формированием зон вторичного рассланцевания. В этот период формируются главные месторождения мусковитовых пегматитов Чупино-Лоухского и Енского районов [Гродницкий, 1982], а в Печенгском рудном

районе происходит локализация никеленосных габбро-верлитовых интрузивов, а затем, на завершающем этапе свекофеннского цикла формируются межпластовые тектонические зоны синметаморфического рассланцевания, которые приводят к образованию чешуйчато-блоковой структуры Печенгского рудного поля.

Печенгский рудный район как составная часть Печенга-Имандра-Варзугской зоны карелид фигурирует во всех тектонических, геофизических и металлогенических обобщениях по Балтийскому щиту, но под разными названиями. Г.И.Горбунов и др.[1978, 1999] выделяют на Кольском полуострове Печенга-Варзугскую структурно-формационную и одноименную металлогеническую зону и различают на ее северо-западном фланге два крупных рудных поля медно-никелевых месторождений - Печенгское и Аллареченское. Т.В.Билибина и др. [1980] рассматривают их как две металлогенические зоны, входящие в одну структурно-формационную зону, а М.В.Минц и др. [1990] - как два рудных района в пределах Печенгско-Аллареченской металлогенической области. Г.Гаал [Gaal, 1990] называет Печенгское рудное поле Печенгским металлогеническим районом и трактует его как составную часть свекофеннского пояса Печенга-Пасвик-Палмас. В середине 1980-х годов интерпретации металлогении района на основе геосинклинальной теории сменились различными вариантами плейттектонических построений [Минц и др., 1996; Berthelsen, Marker, 1986; Melehiik, Sturt, 1994].

Таким образом, для структурно-петрофизических исследований автора были выбраны Чупино-Лоухский слюдоносный и Печенгский рудные районы. Их объединяет формирование на раннепротерозойском (карельском) этапе развития Балтийского щита пегматитовмещающих складчатых структур поперечно-перекрестного типа в первом, а для второго - образование северопеченгской серии, слагающей Печенгскую структуру, в которой локализуются габбро-верлитовые интрузивы с медно-никелевыми месторождениями. В свекофеннский этап тектоно-метаморфической активизации в Чупино-Лоухском районе происходит образование зон вторичного рассланцевания, которые накладываются на складчатые структуры и контролируют размещение жил мусковитовых пегматитов, а в Печенгском районе происходит формирование чешуйчато-блоковой структуры Печенгского рудного поля с образованием тектонических синметаморфических зон рассланцевания и локализация в них богатых сульфидных медно-никелевых руд [Шуркин и др., 1988, Горбунов и др., 1999 и др.].

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. Разработана методология структурно-петрофизического изучения метаморфических пород и руд с использованием плотности, характеризующей литологический состав пород, и коэффициента объемной анизотропии упругих волн, отражающего интенсивность тектонических деформаций синхронных с метаморфизмом. Метод апробирован при изучении Кольской сверхглубокой скважины и поверхностных структур Чупино-Лоухского и Печенгского рудных районов.

В 1972 году была создана тематическая группа ИГЕМ АН СССР для изучения Кольской сверхглубокой скважины СГ-3, в которую вошли сотрудники отделов эндогенных рудных месторождений, петрографии, метасоматизма и метаморфизма, лабораторий рентгеноспектральной и изотопных исследований. Исследования были направлены на изучение эндогенных процессов в глубинных зонах земной коры, прежде всего рудообразования, и включали специализированную документацию керн, изучение типоморфизма минералов, минеральных парагенезисов горных пород и руд, наблюдения за внутренним строением разрывных нарушений, соотношениями между деформациями горных пород, их метаморфизмом и петрофизическими свойствами [Глаголев и др., 1987].

Для характеристики тектонических деформаций в разрезе скважины СГ-3 сначала были использованы наблюдения за текстурами пород и микроструктурный метод, основанный на определении ориентировки зерен кварца, карбонатов, слюд, и т.д. Эти исследования позволили сделать выводы о тектонической природе анизотропии пород в зоне Лучломпольского разлома и о едином плане деформаций раннепротерозойской северопеченгской и архейской кольской серий в эпоху протерозойского метаморфизма [Казанский и др., 1985, 1997]. Вместе с тем выявились ограниченные возможности этого метода для изучения слабо деформированных пород, особенно основных вулканитов, которые слагают значительные интервалы разреза скважины. Это вызвало необходимость применения другого метода, отражающего внутреннее строение пород любого состава.

Решение этой задачи было осуществлено путем модернизации структурно-петрофизического метода, разработанного В.И.Старостиным [1979] и предназначенного для выявления палеотектонических полей напряжения на последовательных этапах развития рудоносных структур, определения роли физико-механических свойств пород в локализации руд и условий образования и преобразования месторождений полезных ископаемых. Он 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.

Структурно-петрофизическое изучение метаморфических пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины было начато диссертантом в 1974 г. Согласно методике исследования проводились на плоскопараллельных взаимно перпендикулярных пластинах выпиленных из образцов керна и ориентированных образцах с поверхности, на которых указаны координаты их пространственной ориентировки (рис. 2.а). На этих пластинах пород проводилось определение плотности, параметров насыщения, эффективной пористости методом свободного насыщения водой.

С применением ультразвуковых установок УЗИС-ЛЭТИ и Р5-5 со специальной теодолитной приставкой на этих пластинах определялись скорости V_p , V_s и строились диаграммы скоростей V_p (рис. 2.б). В отличие от первоначальной методики структурно-петрофизического анализа, которая предусматривала построение диаграмм V_p для образцов

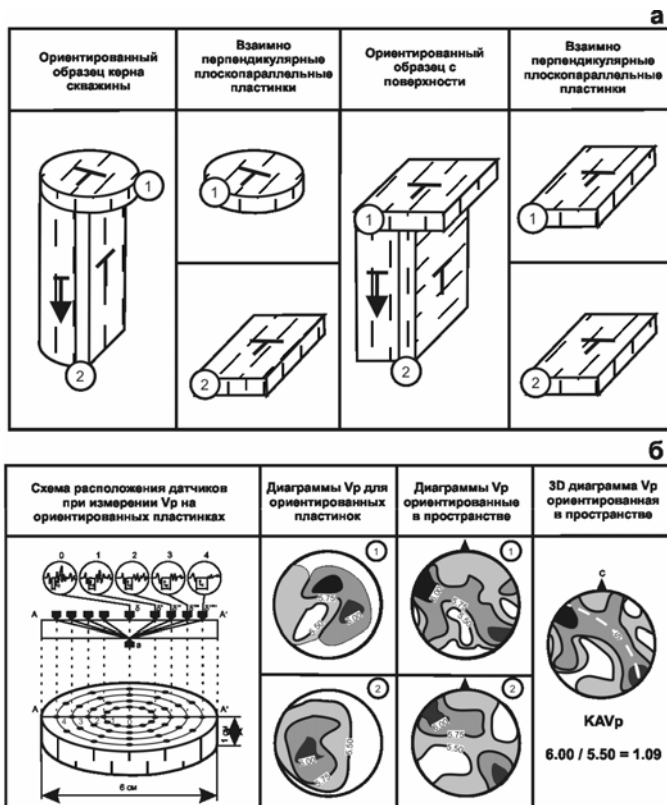


Рис. 2. Схема ориентировки взаимно перпендикулярных плоскопараллельных пластин в образце керна и ориентированном образце с поверхности (а) и построения петрофизических диаграмм V_p на компьютере (б) [Лобанов и др., 1982; Старостин, 1984].

пород в сухом и максимально насыщенном водой состоянии, а также их разностной диаграммы, позволяющей получить ориентировку микротрещин и пор, для метаморфических пород исследования были проведены иначе. Так как для этих пород характерны низкие значения пористости 0.1-0.5 %, то построение диаграмм V_p для пластин в сухом состоянии и, соответственно,

разностных, теряет смысл [Дортман, 1976]. Поэтому все исследования проводились только на образцах в максимально насыщенном водой состоянии с целью уменьшения влияния микротрещин и пор на результаты измерений. Объемная петрофизическая диаграмма строилась по 74 замерам скоростей V_p , которые отражают ориентировку всех породообразующих минералов метаморфических пород. С применением компьютерных программ производился расчет упругих параметров и коэффициента объемной анизотропии V_p (KAV_p), величина которого определяется отношением областей

максимальных скоростей V_p к минимальным на петрофизических диаграммах [Лобанов и др., 1982; Казанский и др., 1985]. Все лабораторные исследования образцов пород и руд были проведены в рудно-петрофизической лаборатории кафедры полезных ископаемых Геологического факультета МГУ.

Петрофизические диаграммы V_p отражают ориентировку всех породообразующих минералов в образце, поэтому являются более информативными по сравнению с микроструктурными диаграммами, так как структурно-петрофизический метод использует взаимосвязь, существующую между упругими свойствами и структурой пород. Определяемая по данным дирекционных измерений скоростей V_p индикатриса позволяет оценить упругую анизотропию породы, а ее форма и абсолютные значения упругих параметров, коэффициента KAV_p являются функцией минерального состава, условий образования, а также характера и интенсивности метаморфических преобразований. Физико-механические свойства пород и руд чутко реагируют на все приложенные к ним разноплановые деформации в ходе геологической истории. Эти свойства хранят информацию о структурно-генетических преобразованиях пород и руд.

Значения KAV_p отражают степень тектонической переработки метаморфических пород, синхронной с метаморфизмом, независимо от их исходного состава. Они возрастают от массивных почти изотропных пород со значениями - 1.01 и достигают максимальных значений для бластомилонитов и интенсивно рассланцеванных пород - 1.50 [Казанский и др., 1985; Лобанов и др., 1982, 1987]. На форму индикатрис на диаграммах V_p и значения KAV_p оказывают влияние наложенные процессы такие как, серицитизации, хлоритизации, альбитизации, эпидотизации, карбонатизации, при которых происходит замена первичных минералов вторичными и усложнение формы индикатрис и уменьшение KAV_p .

Структурно-петрофизический анализ применим при изучении любого типа месторождений полезных ископаемых, залегающих в различных комплексах пород. К началу проведения исследований автором на Балтийском щите, он применялся только для изучения рудных месторождений Урала и Рудного Алтая [Старостин, 1979], поэтому потребовалась модернизация методики исследований для метаморфических породы, слагающих докембрийские рудоносные структуры.

Изучение физико-механических свойств метаморфических пород и их роли в локализации месторождений полезных ископаемых в рудоносных докембрийских структурах северо-восточной части Балтийского щита осуществлялось различными методами многими исследователями [Роль физико-механических свойств..., 1973; Петрофизическая характеристика советской части..., 1976; Петрофизические исследования..., 1979; Петрофизика древних образований, 1986; и др.].

На Балтийском щите рудоносные структуры формировались путем пластического течения, перекристаллизации и частичного плавления горных пород в обстановке, отвечающей нижнему уровню дислокационного метаморфизма [Казанский, 1973, Лобанов и др., 1982 и др.]. В этих условиях происходит совпадение петроструктурной и деформационной компонент упругой анизотропии пород, образуя особый метаморфогенный петроструктурно-деформационный тип анизотропии. Поэтому изменения в методике исследований для этих пород потребовали изучения в первую очередь взаимосвязи метаморфизма, тектонических деформаций и петрофизических свойств пород, а для интерпретации индикатрис на петрофизических диаграммах главное значение имеют, не наблюдения за трещиноватостью как это было ранее, а за сланцеватостью и мелкими структурными формами метаморфических пород. Соответственно, потребовалось изменить порядок проведения как полевых наблюдений, так и лабораторных исследований.

Петроструктурно-деформационная анизотропия упругих свойств присуща породам и рудам испытавшим пластические деформации и гидротермально-метасоматические преобразования в условиях зонального метаморфизма от эпидот-амфиболитовой до гранулитовой фации. Этот тип анизотропии связан с ориентировкой минералов, которая равновесна с локальным полем палеонапряжений. В метаморфических породах минеральные зерна располагаются таким образом, чтобы вектор, характеризующийся максимальным значением скоростей V_p , был ориентирован вдоль направления минимального сжатия, существовавшим в период пластической деформации породы, а с осью максимального сжатия будут совпадать те направления в зернах минералов, в которых величины скоростей будут минимальны (см. рис. 2.б). Эта закономерность справедлива для любых минеральных агрегатов и объясняет их поведение в поле напряжений. Возникшие при этом структуры обладают отчетливой связью между ориентировками зерен породы и ее физическими свойствами [Старостин, 1979, 1984].

Сопоставление диаграмм V_p с полосчатостью, сланцеватостью, микроскладчатостью, а также с минеральным составом и текстурно-структурными особенностями метаморфических пород, степенью их мигматизации и параметрами физико-механических свойств, позволило определить геологические факторы, обусловившие возникновение индикатрис той или иной формы [Звездов, Лобанов, 1976; Лобанов и др., 1982]. Форма индикатрис определяется ориентировкой плоскостных элементов (кристаллизационной сланцеватостью) и в ряде случаев на нее оказывает воздействие наложенная микроскладчатость [Сорский, 1952; Елисеев, 1967 и др.]. Наличие поясов повышенных скоростей V_p и, особенно, расположение в их краевых частях максимумов V_p , может быть объяснено пластической деформацией, которую претерпели породы в условиях больших глубин, поскольку именно с ней многие исследователи связывали явления сланцеватости и линейности в породах [Казаков, 1976 и др.].

др.]. Для интерпретации диаграмм V_p учитывалось влияние упругих свойств главных породообразующих минералов, слагающих гнейсы и амфиболиты – кварца, плагиоклаза, слюды, полевых шпатов и амфибола и их поведение при метаморфизме [Беликов и др., 1970].

В связи с необходимостью изучения пород архейской части разреза СГ-3 и характерных для них тектонических структур на поверхности, автором были проведены исследования глубоко метаморфизованных пород, слагающих складчатые структуры в Чупино-Лоухском слюдоносном районе [Лобанов, 1980, Лобанов и др., 1982]. Этот район является наиболее изученным на Балтийском щите и пегматитоносные складчатые структуры сложенные архейскими породами беломорского комплекса, которые были сформированы в период карельской тектоно-магматической активизации, в условиях зонального метаморфизма, также как аналогичные тектонические структуры в Печенгском районе [Шуркин и др., 1988 и др.].

Изучение физико-механических свойств метаморфических пород беломорского комплекса проводилось на образцах из керна скважин и ориентированных образцах, отобранных по опорному профилю на поверхности длиной около 70 км от побережья Белого моря на востоке до зоны Беломорско-Карельского глубинного разлома на западе (см. рис. 1.б). Опорные разрезы и профили для изучения пегматитовых участков расположены поперек простирания беломорид и достаточно полно характеризуют разрезы свит всего комплекса и продуктивных горизонтов чупинской свиты, содержат горные выработки, скважины или естественные обнажения, позволяющие проводить структурные наблюдения и отбирать образцы.

Изучение пегматитоносных структур проводилось с помощью пунктов структурно-петрофизических наблюдений в масштабах от 1:50000 до 1:2000, которые включали в себя: 1) сведения о породах и их составе; 2) структурную информацию: слоистость, строение контактов, микроскладчатость; сведения о жильных образованиях, их составе и последовательности формирования; 3) проведение статистических замеров мелких структурных элементов и трещиноватости [Лобанов и др., 1982; 2003]. Опорные разрезы и детальные участки складчатых структур явились основной частью структурно-петрофизических схем месторождений. Вторая часть исследований включала нанесение на карты и разрезы результатов лабораторных определений физико-механических свойств, анизотропии V_p , петрографического изучения пород и анализа всех этих данных.

Для петрофизической характеристики складчатых структур, в пределах чупинской свиты, отбирались ориентированные образцы по их простиранию. В пределах этих поперечно-перекрестных антиклинальных складчатых структур было проведено изучение наложенных складок, контролирующих размещение жил пегматитов. Детальные исследования проведены на месторождении Тэдино, где изучались особенности локализации пегматитовых жил в зонах вторичного рассланцевания [Лобанов, 1980].

Наиболее важную информацию о локализации жил мусковитовых пегматитов в разрезе беломорского комплекса дают средние значения параметров упругих свойств, а пегматитоносность тектонических структур закономерно связана с характером анизотропии упругих свойств пород. Всего были изучены разрезы 16 скважин общей длиной более 9000 м, горные выработки на месторождениях мусковитовых и керамических пегматитов – 4000 м. С 1976 по 1988 г. автором было отобрано и изучено более 2000 образцов пород. Детальные исследования условий локализации жил пегматитов в складчатых структурах были проведены на 12 месторождениях Чупино-Лоухского района. Построено около 600 диаграмм V_p , которые позволили дать характеристику этих складчатых структур пегматитовых участков. Все параметры полученные для отдельных образцов были суммированы по типам пород и рассчитаны методом среднего взвешенного, что позволило определить их средние значения для формализованных тектонических элементов свит беломорского комплекса и продуктивных горизонтов чупинской свиты [Лобанов и др., 1982].

Петрофизические исследования образцов керна по разрезу СГ-3 были проведены Б.П.Беликовым, Ю.И.Кузнецовым и другими исследователями из различных организаций [Кольская сверхглубокая..., 1984; 1998 и др.]. Изучались физико-механические свойства пород, и особенно анизотропия упругих свойств в техногенном аспекте для прогноза искривления скважины в процессе бурения. Определялись плотность, пористость, проницаемость, а также упругие, деформационно-прочностные, магнитные, радиоактивные свойства пород, скоростей упругих волн и их анизотропии в образцах керна скважины. Анизотропия определялась путем сопоставления замеров скоростей вдоль и поперек образцов керна (при изменяющихся углах падения, слоистости и сланцеватости, линейности).

Структурно-петрофизическое изучение разреза СГ-3 было начато автором с 1980 г. и явилось продолжением исследований Б.П.Беликова [Казанский и др., 1985; Кольская сверхглубокая..., 1984]. К северо-востоку от Печенгской структуры, сотрудниками тематической группы ИГЕМ был начат сбор образцов архейских пород кольской серии по опорному профилю через Печенгский рудный район для структурно-петрофизического изучения и сопоставления с разрезом СГ-3 (рис. 1.б). Эти исследования проводились с учетом результатов работ автора в Чупино-Лоухском районе Северной Карелии [Лобанов и др., 1982]. Ориентированные образцы пород отбирались по опорному профилю длиной 120 км от побережья Баренцева моря на северо-востоке до Аллареченского рудного поля на юго-западе и расположенного поперек простирающихся тектонических структур района. Работы проводились в течение 10 лет. Наряду с этим отбирались образцы из керна 60 скважин, горных выработок и естественных обнажений, что позволило охарактеризовать все тектонические блоки

Печенгского рудного района [Казанский и др., 1985, 1996, 2004]. Ориентированные образцы метаморфических пород отбирались из вулканогенных толщ как по простиранию Печенгской структуры, так и по опорным профилям поперек ее простирания в западной и центральной частях. Детальные структурно-петрофизические исследования были проведены в Воронежско-Колмозерской, Лицко-Арагубской, Порьиташского и Лучломпольского зонах глубинных разломов и зоны контакта раннепротерозойской северопеченгской серии Печенгской структуры с архейской кольской серией как по разрезу СГ-3, так и на поверхности. Всего в Печенгском рудном районе было изучено около 10000 образцов пород и руд.

Изучение разреза Кольской сверхглубокой скважины в интервале 0-12 км и опорного профиля на поверхности позволило получить два блока данных, соответственно по 1600 и 2400 образцам, которые были собраны, изучены и проанализированы одними и теми же методами и на одних тех же лабораторных приборах, сотрудниками тематической группы [Казанский и др., 1985; Глаголев и др., 1987; Лобанов и др., 1996, 2007]. Получены данные о плотности, пористости, модулях упругости, скорости V_p и V_s , петрофизические диаграммы V_p и значения KA_{Vp} для метаморфических пород.

Эти исследования позволили найти путь формализации геологической задачи по изучению глубинного строения Печенгского рудного района, который коррелируется с геофизическими методами исследований в области гравиметрии и сейсмоки, и провести формализацию разреза СГ-3 и опорного профиля по двум параметрам плотности и KA_{Vp} для компьютерной обработки геологических и петрофизических данных с применением новейших технологий [Казанский и др., 1993, 1994, 1997 и др.]. Все петрофизические параметры рассчитывались для отдельных образцов, а затем они были суммированы по типам пород и методом среднего взвешенного вычислены для формализованных элементов разреза СГ-3 и опорного профиля. Это позволило осуществить перевод геологической информации в форму, доступную для компьютерной обработки, корреляции формализованного разреза скважины, опорного профиля и привлечения материалов наземных гравиметрических съемок. Была проведена петрофизическая характеристика формализованных элементов тектонических блоков по разрезу СГ-3, пород северного и южного крыльев Печенгской структуры на поверхности, а также архейских блоков пород как к северо-востоку от этой структуры, так и к юго-западу.

В результате изучения метаморфических пород, слагающих архейские и раннепротерозойские тектонические структуры северо-восточной части Балтийского щита в Чупино-Лоухском слюдоносном и Печенгском рудном районах, установлено, плотность пород и коэффициент объемной анизотропии KA_{Vp} являются основными параметрами для формализации разреза СГ-3, опорных профилей на поверхности, характеристики рудоносных докембрийских структур. Первый параметр характеризует литологический состав пород,

второй - интенсивность тектонических деформаций, синхронных с метаморфизмом. Это позволило применять компьютерную обработку геологических и петрофизических данных.

Тематической группой ИГЕМ совместно с лабораторией геоинформатики ВНИИгеосистем была разработана интегральная модель глубинного строения Печенгского рудного района [Казанский и др., 1993, 1994; Lobanov et al., 2003, 2004]. Структурно-петрофизические данные явились ключом к разработке 2-х важных составных элементов этой модели: 1) определении глубины залегания Печенгской структуры и продуктивной толщи; 2) характеристики преобразования пород северопеченгской серии и приуроченных к ней никеленосных габбро-верлитовых интрузивов Печенгского района [Казанский и др., 1997, 1998, 2006].

Детальные структурно-петрофизические исследования были проведены с 1985 по 2004 г. на месторождениях сульфидных медно-никелевых руд Печенгского рудного поля совместно с геологами ГМК «Печенганикель» [Лобанов, 1990; Лобанов и др., 1989, 2005]. Были изучены разрезы Продуктивной толщи свиты пильгуярви, в которой локализованы все никеленосные интрузивы, от СГ-3 через месторождения Спутник и Верхнее по 5 скважинам общей длиной 7000 м, а также через центральную часть месторождения Пильгуярвинское по 3 скважинам – 4500 м. Детальные исследования были проведены на месторождениях Восточного рудного узла, в ходе которых было проведено изучение особенностей внутреннего строения рудных тел и межпластовых зон синметаморфического расланцевания, по профилям в карьерах и подземных горных выработках общей длиной 6000 м на месторождениях Заполярное, Пильгуярвинское (Юго-Западное, Западное, Центральное, Юго-Восточное, Южное и Восточное рудные тела). Всего было изучено 6000 образцов пород и руд из керна скважин и ориентированных образцов из горных выработок с детальным картированием рудных тел, зон тектонических нарушений. Были получены данные о внутреннем строении продуктивной толщи и доказана гетерогенность ее разреза по физико-механическим свойствам пород, об особенностях внутреннего строения никеленосных габбро-верлитовых интрузивов, а также установлена роль межпластовых зон синметаморфического расланцевания в локализации богатых сульфидных медно-никелевых руд.

Важным этапом исследований автора и сотрудников тематической группы ИГЕМ проведенных с 1989 по 2007 г. совместно с геологами Кольской экспедиции сверхглубокого бурения НПО «Недра» явились специальные структурно-петрофизическое и петрологическое изучение образцов керна из архейской части разреза СГ-3 в интервале 7-12 км и их аналогов с поверхности [Лобанов и др., 1999, 2002; Иванкина и др., 2004]. Для этой части разреза скважины характерна инверсия скоростей упругих волн, по поводу которой существует масса интерпретаций. Исследования проведены на образцах керна из интервалов разреза СГ-3 пройденных алмазным буровым инструментом и наименее затронутых

техногенными преобразованиями в ходе бурения, что позволило найти и сопоставить полностью аналогичные образцы-аналоги с поверхности. Их сопоставление по петрологическим и петрофизическим параметрам позволило дать характеристику пород в зонах пониженных скоростей и повышенной пористости на больших глубинах в интервалах 8-12 км, которые выделяются как геофизические границы.

Выводы

1. Структурно-петрофизический анализ, разработанный ранее для изучения близповерхностных деформаций на рудных месторождениях Урала и Рудного Алтая, впервые был применен и модернизирован автором для изучения глубоко метаморфизованных докембрийских пород Балтийского щита. Для этих пород присуща упругая анизотропия петроструктурно-деформационного типа, так как рудоносные структуры формировались путем пластического течения, перекристаллизации и плавления пород.

2. Применение модернизированного структурно-петрофизического метода для изучения петрофизических свойств и анизотропии метаморфических пород было проведено в тесной взаимосвязи с данными по метаморфизму и тектоническим деформациям на образцах из разреза СГ-3, опорных профилей на поверхности, которые были собраны, изучены и проанализированы одними и теми же исследователями, одними и теми же методами, и на тех же лабораторных приборах. Определены параметры физико-механических свойств метаморфических пород Чупино-Лоухского и Печенгского районов с раннепротерозойскими месторождениями мусковитовых пегматитов и сульфидных медно-никелевых руд.

3. Определены основные петрофизические параметры для формализованного описания разреза Кольской сверхглубокой скважины, опорных профилей на поверхности, рудоносных докембрийских структур Чупино-Лоухского и Печенгского рудных районов. Это плотность как показатель литологического состава пород и коэффициент объемной анизотропии V_p (KAV_p), как индикатор интенсивности синметаморфических тектонических деформаций, позволяющие применять компьютерную обработку геологических и петрофизических данных.

Второе защищаемое положение. Закономерности локализации мусковитовых пегматитов в складчатых структурах и зонах вторичного рассланцевания в Чупино-Лоухском слюдоносном районе обусловлены высокой анизотропией упругих свойств и пластическими деформациями глиноземистых гнейсов продуктивных горизонтов чупинской свиты беломорского комплекса на свекофеннском этапе тектоно-магматической активизации.

Беломорская пегматитовая провинция, охватывающая Карельское побережье Белого моря и юго-западную часть Кольского полуострова и подразделяется на два пегматитовых района Чупино-Лоухский и Енский (см. рис. 1.б). В беломорском комплексе мусковитовые пегматиты тяготеют к свитам глиноземистых гнейсов, занимающим определенное положение в разрезе и претерпевшим многоэтапную перекрестную складчатость и метаморфизм [Горлов, 1973; Салье, Глебовицкий, 1976, и др.] (рис. 3.а).

Генезис мусковитовых пегматитов служит предметом дискуссий [Мусковитовые ..., 1975]. Первоначально они рассматривались как продукты кристаллизации гранитной магмы, затем возникла идея о метасоматическом генезисе пегматитов и их генетической связи с определенными фациями регионального метаморфизма. Дальнейшее развитие этой идеи привело к разработке модели метаморфогенного образования пегматитов. Для беломорского комплекса выделяются несколько этапов метаморфизма: раннеребольский гранулитовой фации возрастом 2820 ± 15 млн. лет [Глебовицкий и др., 1996; Другова, 1999], высокобарический амфиболитовой фации ($T = 650-730^\circ \text{C}$ и $P = 6-8$ кбар [Глебовицкий и др., 1996]; с возрастным интервалом $2710 \pm 15-2615 \pm 15$ млн. лет [Бибикова и др., 2004], высокобарический эпидот-амфиболитовой фации ($580-600^\circ \text{C}$ и $5-7$ кбар) [Другова, 1999] – 1875 ± 5 млн. лет [Бибикова и др., 2001].

Среди исследователей нет единого мнения о структурных условиях локализации слюдоносных пегматитов. Согласно одной точке зрения главная масса жил была образована синхронно с процессами складчатости [Горлов, 1975; Родионов, 1959; Шуркин и др., 1962 и др.], а согласно другой, формирование пегматитов происходило после создания складчатых структур в условиях преобладающих дизъюнктивных дислокаций [Рыцк, 1972; Стенарь, 1976; Салье, 1982 и др.]. По наблюдениям В.В.Зарубина [1975] размещение жил мусковитовых пегматитов контролируют: северо-восточные складки с субвертикальным положением осевых поверхностей, наложенных на более ранние субширотные и северо-восточные складки, сформировавшиеся на карельском этапе тектоно-магматической активизации и крутопадающие субмеридиональные зоны вторичного рассланцевания, образование которых происходило при вертикальной ориентировке внешних активных сил на свекофеннском этапе активизации Балтийского щита. Деформации позднего периода в пределах

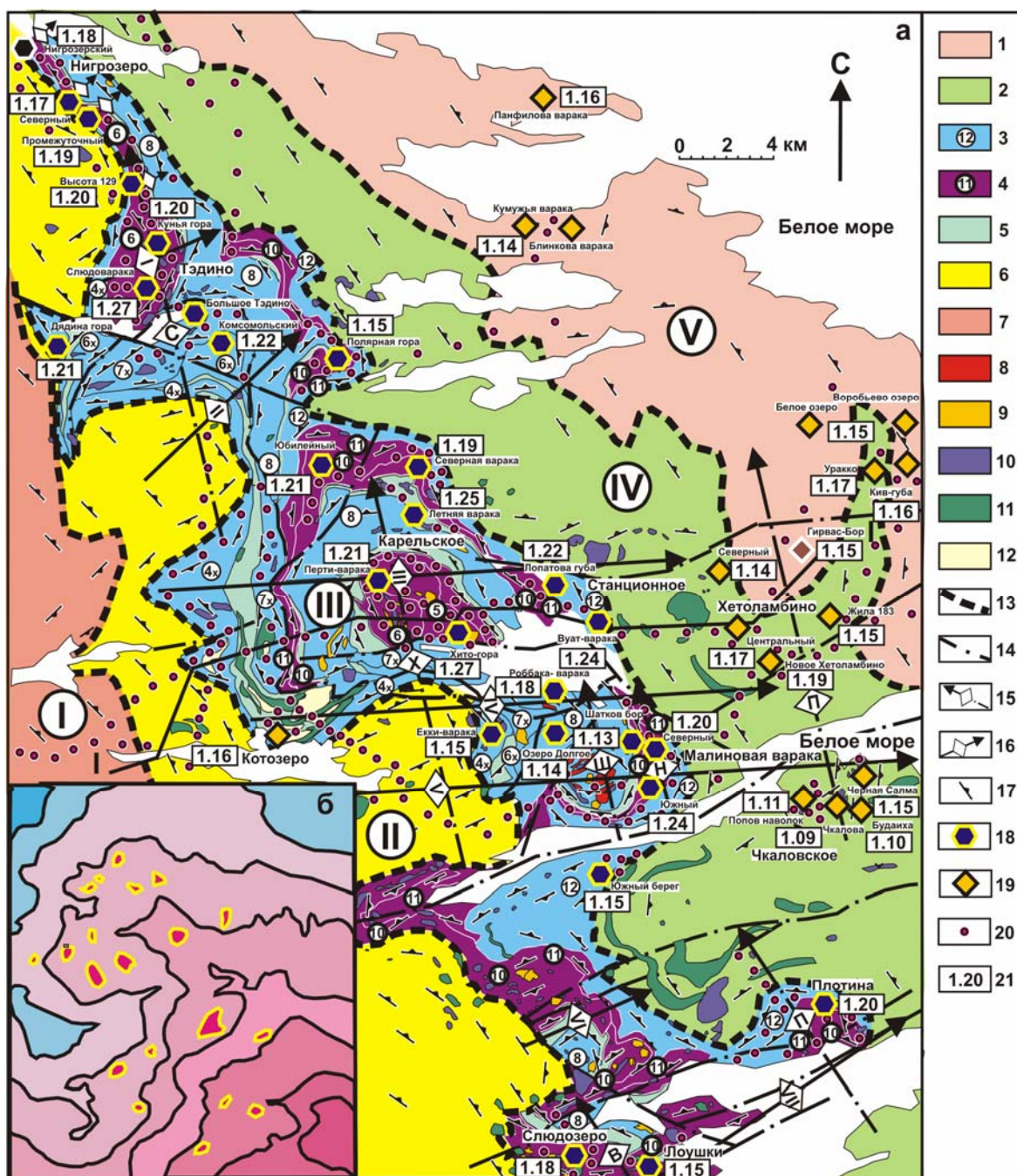


Рис. 3. Схема геологического строения (а), гравитационного поля (б) Чупино-Лоухского слюдоносного района [Лобанов и др., 1982]. Составлена с использованием данных Е.П.Чуйкиной, Н.В.Горлова, К.А.Шуркина и др.

Беломорский комплекс (архей): 1 - керетская свита – биотитовые гнейсы, 2 - хетоламбинская свита - амфибол-биотитовые гнейсы и амфиболиты; 3-5 - чупинская свита (гнейсы и номера горизонтов в кружках): 3 - гранат-биотитовые и биотитовые (12, 8, 7х, 6х, 4х - перспективные), 4 – кианит-гранатовые-биотитовые и гранат-биотитовые (11, 10, 6, 5 - продуктивные), 5 – биотитовые и амфибол-биотитовые (9, 7, 5х, 3х); 6 – биотитовые и амфибол-биотитовые гнейсы котозерской свиты; 7 – гранитогнейсы западной свиты; 8 -граниты; 9 - аплиты; 10 – основные-ультрасосновые интрузии; 11- амфиболиты; 12 - анортозиты; 13 – границы свит; 14 – разломы; 15-16 - оси антиклиналей: 25 -северо-западных; 26 - северо-восточных; 17 - залегание сланцеватости; 18-19 - месторождения и кусты жил пегматитов: 18 - мусковитовых; 19 - керамических; 20 – места отбора ориентированные образцы, 21 – средние значения $KAVp$ для гнейсов продуктивных горизонтов на пегматитовых участках. Северо-восточные и субширотные антиклинали: I – Тэдинская, II – Полярная, III – Пертиваракская, IV – Важенская, V – Малинововаракская, VI – Кябинская, VII – Лоухская. Северо-западные антиклинали: А – Сторонинская, Б – Хитогорская, В – Шатковоборская, Г – Нижнепулонгская, Д – Поповнаволокская, Е – Вицеваракская, Ж - Плотинская. I-I – опорный профиль на поверхности. Римские цифры в кружках – формализованные элементы свит беломорского комплекса: I - Западный, II –Котозерский, III – Чупинский, IV – Хетоламбинский, V – Керетский.

беломорской комплекса осуществлялись в условиях ставролитовых и дистен-гранат-биотит-мусковитовых субфаций фации альмандиновых амфиболитов с увеличением степени наложенного зонального метаморфизма в направлении к центральной части Беломорского блока, а возраст мусковитовых пегматитов - 1800 млн. лет.

На основе геологических и петрографических данных беломорский комплекс расчленен на несколько свит. В Чупино-Лоухском районе Н.В.Горловым [1973] выделены три свиты (снизу вверх): котозерская, чупинская, хетоламбинская, а Е.П.Чуйкиной [1975] - шесть свит: западная, котозерская, чупинская, хетоламбинская и керетская. Общая мощность комплекса оценена в 10-12 км. Представления об общей структуре беломорид также различны. Согласно одним исследователям [Горлов, 1967; Чуйкина, 1973], породы беломорского комплекса моноклинально падают на северо-восток и слагают юго-западное крыло Кандалакшского синклинория. Согласно другим [Дук, 1967; Мишарев и др., 1960; Стенарь, 1973; Шуркин, 1968], основной структурой беломорид является опрокинутый на юго-запад Енско-Лоухский синклинорий, ядро которого сложено породами чупинской свиты. Согласно современным взглядам [Глебовицкий и др., 1996; Миллер, 2002] он имеет сложную линейную покровно-складчатую структуру.

Структурная закономерность локализации кустов пегматитовых жил Чупино-Лоухского района отражается также на гравиметрической схеме. При общем возрастании значений поля силы тяжести с северо-запада на юго-восток (рис. 3.б), отмечено, что все известные месторождения как мусковитовых, так и керамических пегматитов выделяются в виде изометричных локальных положительных аномалий с повышенными значениями. Детальные гравиметрические исследования выявили приуроченность кустов жил пегматитов к участкам между полями локальных положительных и отрицательных аномалий, первые из которых присущи интенсивно мигматизированным гнейсам, плагиогранитам или анатектит-гранитам, а вторые интрузивам основных-ультраосновных пород, амфиболитам или слабо мигматизированным гнейсам [Корсаков, 1971]. Эти данные подтверждают локальное проявление раннепротерозойской тектоно-метаморфической активизации в Чупино-Лоухском районе, в ходе которой происходили формирование пегматитовмещающих складчатых структур и локализация жил пегматитов [Шуркин и др., 1988].

При постановке исследований в Чупино-Лоухском районе автор ориентировался на решение трех задач: 1) получение дополнительных характеристик о строении разреза беломорского комплекса и причинах литологического контроля мусковитовых пегматитов; 2) установление характеристик локальных пегматитоносных структур с особым вниманием к зонам вторичного рассланцевания; 3) усовершенствование структурно-петрофизического анализа применительно к глубоко метаморфизованным породам с изучением нового

петроструктурно-деформационного типа анизотропии, наиболее информативных петрофизических параметров и интерпретацией петрофизических диаграмм V_p .

За основу литологического расчленения беломорского комплекса была принята схема Е.П.Чуйкиной [1975], согласно которой разрез состоит западной, котозерской, чупинской, хетоламбинской и керетской свит, а также геологическая карта района, составленная в результате многолетнего детального геологического картирования. Структурно-петрофизическое изучение пород этих свит было проведено по опорному профилю на поверхности длиной 70 км от побережья Белого моря на востоке до зоны Беломорско-Карельского глубинного разлома на западе. В совокупности эти образцы позволили охарактеризовать пять свит беломорского комплекса.

Для изучения условий локализации пегматитовых месторождений Чупино-Лоухского района в качестве основных параметров для формализованного описания свит разреза беломорского комплекса и пегматитоносных складчатых структур были выбраны плотность пород и KA_{Vp} . Значения всех параметров рассчитаны методом средневзвешенного с учетом всех разновидностей пород, слагающих каждую свиту (рис. 4).

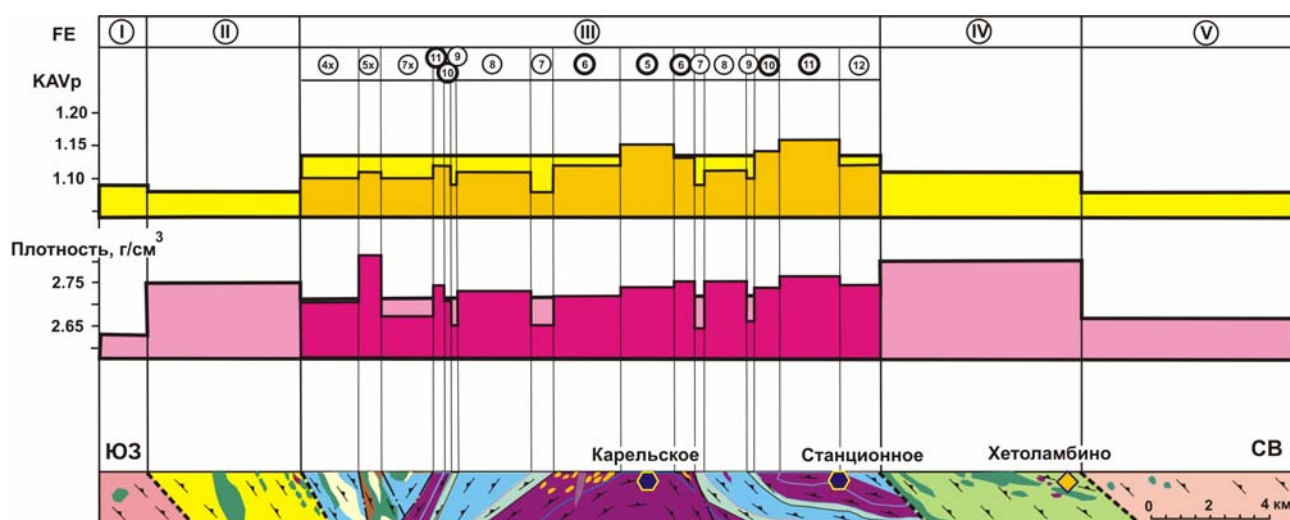


Рис. 4. Формализованный опорный профиль через Чупино-Лоухский пегматитовый район [Лобанов, 1980]. Построен с использованием материалов Е.П.Чуйкиной, К.А.Шуркина и др. KA_{Vp} – коэффициент объемной анизотропии V_p . FE - (I-V) - формализованные тектонические блоки свит беломорского комплекса. Условные обозначения см. рис. 3.

Установлено, что породы чупинской свиты по сравнению с породами других свит беломорского комплекса обладают меньшими величинами плотности и большими – KA_{Vp} : керетская (V) - 2,66 г/см³, KA_{Vp} (1.08), хетоламбинская (IV) - 2,80, (1.11), чупинская (III) - 2,71, (1.14), котозерская (II) - 2,75, (1.08), западная (I) - 2,63, KA_{Vp} (1.09). Эти различия объясняются составом пород свит. Наибольшая величина KA_{Vp} для пород чупинской свиты свидетельствует о высокой анизотропии по физико-механическим свойствам (Лобанов, 1980).

Это свидетельствует о гетерогенности разреза беломорского комплекса по этим параметрам.

Изучение физико-механических свойств метаморфических пород в разрезе продуктивной чупинской свиты было проведено с учетом всех разновидностей, для 15 формализованных стратиграфических горизонтов верхней (5-12) и нижней (1^x-7^x) подсвит [Чуйкина, 1975] (см. рис. 3.а и 4). Свита сложена преимущественно биотитовыми, гранат-биотитовыми и кианит-гранат-биотитовыми гнейсами, претерпевшими региональный метаморфизм кианит-альмандиновой субфации амфиболитовой фации, в которых широко проявлены процессы гранитизации и мигматизации. Продуктивные горизонты свиты отличаются тонким переслаиванием глиноземистых гнейсов, среди которых расположены тела основных и ультраосновных пород. Комплексные слюдяные керамические пегматиты залегают в биотитовых и амфибол-биотитовых гнейсах хетоламбинской свиты, а керамические - тяготеют к полям повышенной мигматизации гнейсов хетоламбинской и керетской свит.

Глиноземистые гнейсы продуктивных горизонтов обладают большими значениями плотности и $KAVp$ по сравнению с другими горизонтами [Лобанов, 1980; Лобанов и др., 1982]. Такое существенное отличие пород продуктивных горизонтов 11, 10, (месторождения Плотина, Малиновая Варака, Слюдозеро, Полярная гора) и 6, 5 (Тэдино и Карельское) верхней подсвиты ($2.72-2.77$ г/см³, $KAVp$ – 1.13-1.16), и перспективных на мусковитовые пегматиты горизонтов 12 и 8 той же подсвиты ($2.72-2.74$ г/см³, $KAVp$ – 1.11-1.13), а также горизонтов 7^x , 6^x , 4^x нижней подсвиты ($2.70-2.75$ г/см³, $KAVp$ – 1.10-1.12) объясняется особенностью их литологического состава, метаморфизма и степенью мигматизации. Для них характерно преобладание глиноземистых гнейсов, которые характеризуются наибольшей пластичностью. Высокие значения $KAVp$ показывают, что для этих горизонтов характерна максимальная анизотропии упругих свойств. Детальное изучение физико-механических свойств пород продуктивных горизонтов на месторождениях позволило выявить гетерогенность их пород по физико-механическим свойствам (Таблица 1).

Значения параметров для кианит-гранат-биотитовых, гранат-биотитовых и биотитовых гнейсов, слагающих пегматитовые участки на месторождениях показывают, что в пределах одних тех же горизонтов они обладают различными значениями параметров этих свойств. Это объясняется минеральным составом, текстурно-структурными особенностями пород, степенью их рассланцевания и мигматизации лейкократовым материалом [Алексеев и др., 1975; Голод и др., 1974; Зарубин, 1975].

Метаморфический контроль, определяющий генетическую природу беломорских пегматитов, рассматривается в настоящее время как главный фактор, контролирующий их пространственное размещение [Салье, Глебовицкий, 1976; Соколов, 1970]. К метаморфическим факторам контроля пегматитов относится также степень мигматизации

Таблица 1

Петрофизические параметры глиноземистых гнейсов продуктивных горизонтов на месторождениях мусковитовых пегматитов Чупино-Лоухского района

Месторождения и горизонты	Гнейсы	Кол-во образцов	Плотность г/см ³	V _p	V _s	KAV _p
				км/с	км/с	
Тэдино 6	Кианит-гранат-биотитовые	45	2.78	5.19	2.62	1.17
	Гранат-биотитовые	140	2.71	5.24	2.73	1.15
	Биотитовые	44	2.69	5.26	2.68	1.12
Полярная гора 10	Кианит-гранат-биотитовые	34	2.76	4.98	2.78	1.13
	Гранат-биотитовые	62	2.74	5.33	2.94	1.11
	Биотитовые	22	2.67	5.42	3.00	1.10
Карельский 5	Кианит-гранат-биотитовые	64	2.79	5.21	2.54	1.15
	Гранат-биотитовые	120	2.71	5.21	2.55	1.13
	Биотитовые	55	2.66	5.29	2.61	1.11
Малиновая варака 10, 11	Кианит-гранат-биотитовые	89	2.78	5.13	2.77	1.16
	Гранат-биотитовые	115	2.74	5.15	2.77	1.14
	Биотитовые	36	2.67	5.32	2.82	1.10
Плотина 10	Кианит-гранат-биотитовые	55	2.76	5.09	2.49	1.20
	Гранат-биотитовые	129	2.70	5.26	2.60	1.15
	Биотитовые	35	2.63	5.32	2.66	1.14
Слюдозеро 10, 11	Кианит-гранат-биотитовые	23	2.84	5.03	2.65	1.14
	Гранат-биотитовые	79	2.78	5.15	2.89	1.12
	Биотитовые	23	2.66	5.34	3.01	1.11

вмещающих пегматитовые жилы пород, так как гнейсов пегматитовых участков характерна средняя степень мигматизации [Судовиков, 1939; Шуркин, 1959].

Изучение образцов глиноземистых гнейсов продуктивных горизонтов на участках месторождений Тэдино, Карельское, Плотина, Малиновая варака, Полярная гора показало, что их свойства меняются в зависимости от степени мигматизации [Лобанов и др., 1982; Лобанов, Зингер, 2003]. Для кианит-гранат-биотитовых, гранат-биотитовых и биотитовых гнейсов с увеличением степени мигматизации происходит уменьшение плотности с 2.84-2.82-2.72 г/см³ (слабая степень) до 2.76-2.75-2.67 (средняя) и 2.69-2.67-2.62 г/см³ (сильная). Значения KAV_p для этих пород изменяются соответственно, 1.12-1.09-1.11 (слабая), 1.22-1.19-1.18 (средняя) и 1.15-1.14-1.13 (сильная). Таким образом, установленная ранее приуроченность жил мусковитовых пегматитов к участкам складчатых структур, сложенных глиноземистыми гнейсами со средней степенью мигматизации, обусловлена высокой анизотропией этих пород в диапазоне KAV_p от 1.15 до 1.30. Формирование пегматитовмещающих полостей и локализация в них пегматитовых жил происходили в тех частях складчатых структур при тектонических воздействиях, для которых присуща

наибольшая анизотропия упругих свойств.

Особенность тектонического контроля месторождений мусковитовых пегматитов состоит в совмещенности их с участками наиболее четко проявленной поперечно-перекрестной складчатости, которая образуется в результате сложного сочетания складчатых структур северо-западного и северо-восточного простирания [Горлов, 1973, 1975]. Эти структуры сформировались на карельском этапе тектономагматической активизации Балтийского щита (Шуркин и др., 1988). Кусты пегматитовых жил размещены в этой складчатости избирательно. Они локализируются в переклиналильных формах, отвечающих местам пересечения взаимно-перпендикулярных складок. В размещении отдельных полей пегматитов важное значение имеют тектонические зоны, обрамляющие поднятия второго порядка, в строении которых главная роль принадлежит кианит-гранат-биотитовым гнейсам. Развитые здесь основные и ультраосновные породы, анатектит-граниты, мигматиты и аплиты являются локальным магматическим фактором контроля мусковитовых пегматитов. С заключительной стадией формирования этих зон, на свекофеннском этапе активизации Балтийского щита, связано образование в жесткой среде наложенных зон вторичного расщепления, контролирующих размещение пегматитовых жил [Зарубин, 1975; Чуйкина, 1975, Лобанов и др., 1982].

Структурно-петрофизическое изучение условий локализации жил мусковитовых пегматитов в складчатых структурах, сложенных глиноземистыми гнейсами продуктивных горизонтов чупинской свиты, было проведено в северной (месторождения Тэдино, Нигрозеро, Полярная гора), центральной (Карельское, Малиновая варака, Плотина, Лоушки, Слюдозеро) частях Чупино-Лоухского района, а комплексных и керамических пегматитов, залегающих в породах хетоламбинской и керетской свит в его восточной части (Хетоламбино, Чкаловское, Кив-губа) (см. рис. 3.б).

Месторождение Тэдино, приурочено к антиклинали северо-восточного простирания и включает пегматитовые участки Слюдоварака, Комсомольский, Большое Тэдино, Дядиногорский и Кунья гора, залегающих в гнейсах 6 горизонта со значениями $KAVp - 1.20-1.27$. Согласно классификации структурных полей пегматитов [Родионов, 1972] для этого месторождения характерен комбинированный, в котором сочетается 2 типа жил - поперечно-секущие и продольно-секущие. Первые приурочены трещинам отрыва в мелких перегибах осей наложенных поперечных антиклиналильных складок северо-восточного простирания, а второй приурочен к тектоническим зонам вторичного расщепления, выполняя сколовые трещины. Для гнейсов 10, 11 горизонтов месторождения Полярная гора, приуроченному к центральной части Полярной антиклинали северо-восточного простирания, характерна высокая степень мигматизации, что отражается на более низких значениях $KAVp - 1.15$, а жилы здесь относятся к поперечно-секущему типу. Пегматитовые участки Нигрозерский,

Северный, Промежуточный, Высота 129 месторождения Нигрозеро, сложены гнейсами 6-го горизонта со значения $KAVp$ 1.17-1.20 и приурочены к антиклинальным частям складок с пегматитовыми жилами поперечно-секущего типа.

В центральной части Чупино-Лоухского района находятся месторождения Карельское, Малиновая варака, Плотина, Лоушки, Слюдозеро. Карельское месторождение приурочено к перекрестным антиклинальным складкам – Пертиваракской, субширотного простирания и Хитогорской - северо-западного, и включает в себя, собственно Карельское и месторождение Станционное (Вуат-варака). Здесь комбинированный тип жил установлен на участках Хитогора, Лопатова Губа, Юбилейный, где локализация жил определяется вмещающими гнейсами 5 и 6 горизонтов, а поперечно-секущие жилы располагаются в хрупких гранат-биотитовых и биотитовых гнейсах, а продольно-секущие – в зонах вторичного расланцевания со значениями $KAVp$ 1.21– 1.27. Для пород участка Перти-варака присущ поперечно-секущий тип жил и $KAVp$ - 1.21. Участок Вуат-варака приурочен к ступенеобразному перегибу северо-восточного крыла антиклинальной складки северо-западного простирания, а значения $KAVp$ для гнейсов – 1.24, тогда как для участка Летняя варака присущи продольно-секущие жилы в зонах вторичного расланцевания с $KAVp$ - 1.25.

Месторождение Малиновая варака включает Северный, Южный, Шатковоборский, Южного берега, Робака-варака, озера Долгого, Екки-варака участки мусковитовых пегматитов, которые различаются между собой по структурному положению и строению. Они приурочены к попечечно-перекрестным складчатым структурам, образованным антиклиналями Важенской, Малинововаракской - северо-восточного и Шатковоборской, Нижнепулогской - северо-западного простирания. Северный и Южный участки приурочены к восточной тектонической зоне и сложены гнейсами 10 и 11 горизонтов. В структурном отношении на Северном участке жилы, залегающие в линзе мелкозернистых гнейсов с $KAVp$ – 1.20, тогда как в гнейсах, обрамляющих эту линзу, а также на Южном участке продольно-секущие жилы приурочены зонам вторичного расланцевания с $KAVp$ – 1.24.

Месторождение Плотина приурочено к поперечно-пекрестной складчатой структуре образованной антиклиналями Кябинской - северо-восточного и Плотинской северо-западного простирания и залегает в глиноземистых гнейсах 10, 11 горизонтов, для которых присущи поперечно-секущие жилы и $KAVp$ – 1.20. Месторождения Лоушки и Слюдозеро находятся в складчатой структуре образованной пересечением антиклиналей Кябинской северо-восточного и Вицеваракской северо-западного простирания и сложены гнейсами тех же горизонтов, для них присущи значения $KAVp$ – 1.15 и 1.18.

Для восточной части Чупино-Лоухского района, расположенного вдоль побережья Белого моря, выделяются Хетоламбинское и Чкаловское месторождения комплексных и

керамических пегматитов в породах хетолабинской свиты (см. рис. 3.б). Первое приурочено к поперечно-перекрестной складчатой структуре образованной антиклиналями - Важенской субширотного и Поповнаволоковской северо-западного простирания. Для гнейсов участков Северный, Центральный, Новое Хетолабино - КАУр 1.14-1.19, а пегматиты относятся к типу поперечно-секущих жил. Участки Жилы-183, Уракко и Гирвас-бор располагаются на периферии и относятся к продольно-секущему типу жил в зонах вторичного рассланцевания с КАУр – 1.15-1.17. Месторождение им. Чкалова приурочено к поперечно-перекрестной складчатой структуре образованной антиклиналями Малинововаракской, субширотного и Поповнаволоковской северо-западного простирания и объединяет несколько участков: Попов наволок, им. Чкалова, Будаиха, Черная Салма, для пород которых КАУр 1.09-1.14. Здесь прослеживаются тектонические зоны сложенные будинами амфиболитов, габбро-пироксенитами, габбро-перидотитами, в которых жилы располагаются как в самих массивах, так и межбудинных пространствах.

Детальные структурно-петрофизические исследования условий локализации жил мусковитовых пегматитов были проведены на месторождении Тэдино. Здесь на участке Слюдоварака развиты две разновидности глиноземистых гнейсов, различных по минеральному составу, текстуре, структуре и степени рассланцованности [Зарубин, 1969, 1975; Лобанов и др., 1982 и др.]. Гранат-биотитовые гнейсы характеризуются мелко- и среднезернистой структурой, неясно выраженной сланцеватостью и неяснополосчатой текстурой, а кианит-гранат-биотитовые гнейсы, более крупнозернисты, имеют хорошо выраженную сланцеватость и четкую полосчатость (рис. 5). На участке преобладают гранат-

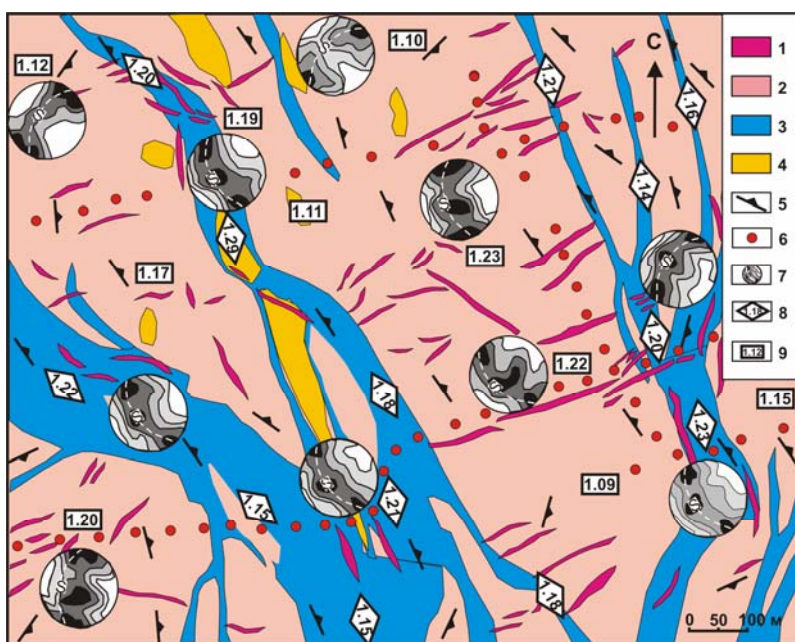


Рис. 5. Структурно-петрофизическая схема центральной части пегматитового участка Слюдоварака месторождения Тэдино [Лобанов и др., 1982]. Составлена с использованием данных В.В. Зарубина, М.Е.Салье, В.Л.Дука и др.

1 - жилы мусковитовых пегматитов, 2 - мелко- и среднезернистые гранат-биотитовые гнейсы со слабой сланцеватостью, 3 - средне- и крупнозернистые интенсивно рассланцеванные кианит-гранат-биотитовые гнейсы зон вторичного рассланцевания, 4 - плагиограниты, 5 - элементы залегания сланцеватости, 6 - места отбора ориентированных образцов, 7 - петрофизические диаграммы Ур. S – сланцеватость. 8-9 – значения КАУр: 8 - в зонах вторичного рассланцевания, 9 - в гранат-биотитовых гнейсах.

биотитовые гнейсы, среди которых располагаются кианит-гранат-биотитовые гнейсы развитые

в западной и восточной частях участка, где слагают две мощные зоны.

Кианит-гранат-биотитовые гнейсы образуют либо сравнительно узкие, изгибающиеся и разветвляющиеся зоны мощностью 10-250 м и длиной до 2 км. Эти зоны имеют северо-западное и субмеридиональное простирание и падают на северо-восток и восток под углами 30-50°. [Лобанов и др., 1982]. Интенсивно рассланцованные кианит-гранат-биотитовые гнейсы являются зонами динамотермального метаморфизма или вторичного рассланцевания, сформировавшиеся в условиях свекофеннской тектоно-метаморфической активизации [Зарубин, 1975, Салье и др., 1980 и др.]. Изменение текстурно-структурных особенностей пород в процессе формирования этих зон отражает тектоническую переработку мелкозернистых гнейсов со слабо выраженной сланцеватостью. Сланцеватость кианит-гранат-биотитовых гнейсов, образовавшихся в результате этой переработки, имеет тектоническое происхождение и в зависимости от ориентировки зон может или совпадать со сланцеватостью гранат-биотитовых гнейсов, или рассекать ее. Петрофизические диаграммы V_p , построенные для этих пород, отражают закономерности залегания гнейсов. Кианит-гранат-биотитовые гнейсы по сравнению с гранат-биотитовыми обладают одинаковой плотностью 2.74 г/см^3 и большими значениями $KA_{Vp} - 1.29$.

Наличие зон вторичного рассланцевания обусловило резкую гетерогенность по упругим свойствам вмещающей пегматиты среды, что проявилось в повышенной пластичности рассланцованных кианит-гранат-биотитовых гнейсов по сравнению с хрупкими гранат-биотитовыми гнейсами. Это во многом определило закономерности размещения интрузивных пород основного и ультраосновного состава, которые внедрялись преимущественно в пластичные гнейсы, причем в тот период, когда в них происходили движения по сланцеватости. Гранат-биотитовым гнейсам, содержащим поперечно-секущие пегматитовые жилы северо-восточного простирания, присущи значения $KA_{Vp} - 1.18-1.23$, а вне же зон развития жил – $1.09-1.15$. Подходя к зонам вторичного рассланцевания эти жилы всегда выклиниваются и нередко увеличиваются в мощности, но всегда ориентируются перпендикулярно к зонам. В зонах вторичного рассланцевания выделены только продольно-секущие пегматитовые жилы северо-западного простирания с $KA_{Vp} - 1.20-1.29$, а на участках без жил - $1.14-1.16$.

Зависимость размещения и залегания пегматитовых жил от положения зон вторичного рассланцевания может быть объяснена тем, что в период локализации пегматитов, слагающие зоны кианит-гранат-биотитовые гнейсы были более пластичными, чем гранат-биотитовые гнейсы. Разница в физико-механических свойствах этих пород была достаточной, чтобы гнейсы этих зон не пересекались вмещающими пегматиты поперечно-секущими трещинами, развитыми в хрупких гранат-биотитовых гнейсах. Совокупность структурно-петрофизических и петрологических данных позволяет сделать вывод о том, что зоны вторичного

рассланцевания являлись не только рудоконтролирующими, но и рудоподводящими структурами [Зарубин, 1975, Лобано и др., 1982].

Выводы

1. В результате исследований в Чупино-Лоухском районе модернизирована методика структурно-петрофизического анализа применительно к глубоко метаморфизованным породам с изучением петроструктурно-деформационного типа анизотропии. Дана петрофизическая характеристика разреза беломорского комплекса и литологического контроля мусковитовых пегматитов, а также локальных пегматитоносных складчатых структур.

2. Определены петрофизические параметры для формализованного описания пород всех свит беломорского комплекса по опорному профилю через Чупино-Лоухский район. Породы продуктивной чупинской свиты отличаются от пород других свит беломорского комплекса высокой гетерогенностью по параметрам физико-механических свойств, а в разрезе самой свиты глиноземистым гнейсам продуктивных горизонтов присущи большие значения плотности и $KAVp$.

3. Для глиноземистых гнейсов продуктивных горизонтов, слагающих складчатые структуры Чупино-Лоухского района на участках с мусковитовыми пегматитами характерны особые условия деформации и высокие значения коэффициента анизотропии. Формирование этих складчатых структур происходило на раннепротерозойском (карельском) этапе тектоно-метаморфической, а локализация пегматитовых жил в период свекофеннской активизации Балтийского щита. Пегматитовмещающие трещины сформировались в гнейсах на участках складчатых структур с высокими значениями анизотропии упругих свойств.

4. Главную роль в размещении жил мусковитовых пегматитов на всех месторождениях района играют зоны вторичного рассланцевания сложенные кианит-гранат-биотитовыми гнейсами, сформировавшимися в период свекофеннской активизации, для которых присуща высокая анизотропия упругих параметров. В этих зонах локализуются только продольно-секущие пегматитовые жилы, а в более жестких гранат-биотитовых гнейсах поперечно-секущие. Это свидетельствует о том, что зоны вторичного рассланцевания являлись не только рудоконтролирующими, но и рудоподводящими структурами.

Третье защищаемое положение. Корреляция и формализация разреза Кольской сверхглубокой скважины и опорного наземного 120-километрового профиля по петрофизическим параметрам пород в Печенгском рудном районе является основой интегральной геодинамической модели глубинного строения этого района до глубины 15 км.

Печенгский рудный район, где находится Кольская сверхглубокая скважина, является опорным в отношении стратиграфии, тектоники и металлогении докембрия северо-восточной части Балтийского щита и изучался многими исследователями. Огромное значение для изучения глубинного строения Печенгского района имеет СГ-3, проходка которой позволила охарактеризовать вертикальную зональность метаморфизма и сопряженных с ним деформаций в едином непрерывном разрезе раннедокембрийской континентальной земной коры, определить физико-химические параметры этого метаморфизма, выяснить тенденции изменения с глубиной физических свойств пород [Кольская сверхглубокая..., 1984].

Корреляция геологических, геофизических и металлогенических данных по сопредельным территориям России, Норвегии и Финляндии установила, что Печенгский район представляет собой обособленный сегмент Печенга-Имандра-Варзугской зоны карелид [Казанский, Лобанов, 1996] (рис. 6.а). На северо-востоке он ограничен Титовско-Амбарной (Воронье-Колмозерской), на юго-востоке - Лицко-Арагубской, на северо-западе - Инари-Киркенесской зонами разломов и на юго-западе - еще слабо изученной системой разломов северо-западного простирания (рис. 6.б). В такой интерпретации архейский фундамент Печенгского рудного района включает фрагменты Норвежско-Кольского блока и блока Инари, а его протерозойские структурные элементы представлены Печенгской структурой и ее продолжением поясом Пасвик-Полмас, Лицко-Арагубской цепочкой гранитоидных массивов и массивом Вайноспаа, а также многочисленными разломами, разделяющими архейский фундамент на тектонические блоки более высокого порядка [Казанский и др., 1997, 2004]. Некоторые из этих разломов, вероятно, унаследовали положение архейских структур.

Главные тектонические элементы Печенгского рудного района находят четкое отражение в региональном гравитационном поле (рис. 6.в). Печенгской структуре соответствует почти изометричная положительная аномалия, которая охватывает оба крыла этой структуры и краевую часть блока Инари. В Печенгской структуре различают Северное и Южное крыло, которые в последнее время стали называть Северной и Южной зонами. Симметрично по отношению к положительной аномалии располагаются две отрицательные аномалии, которые пространственно ассоциируются с гранитоидными массивами Лицким и Вайноспаа.

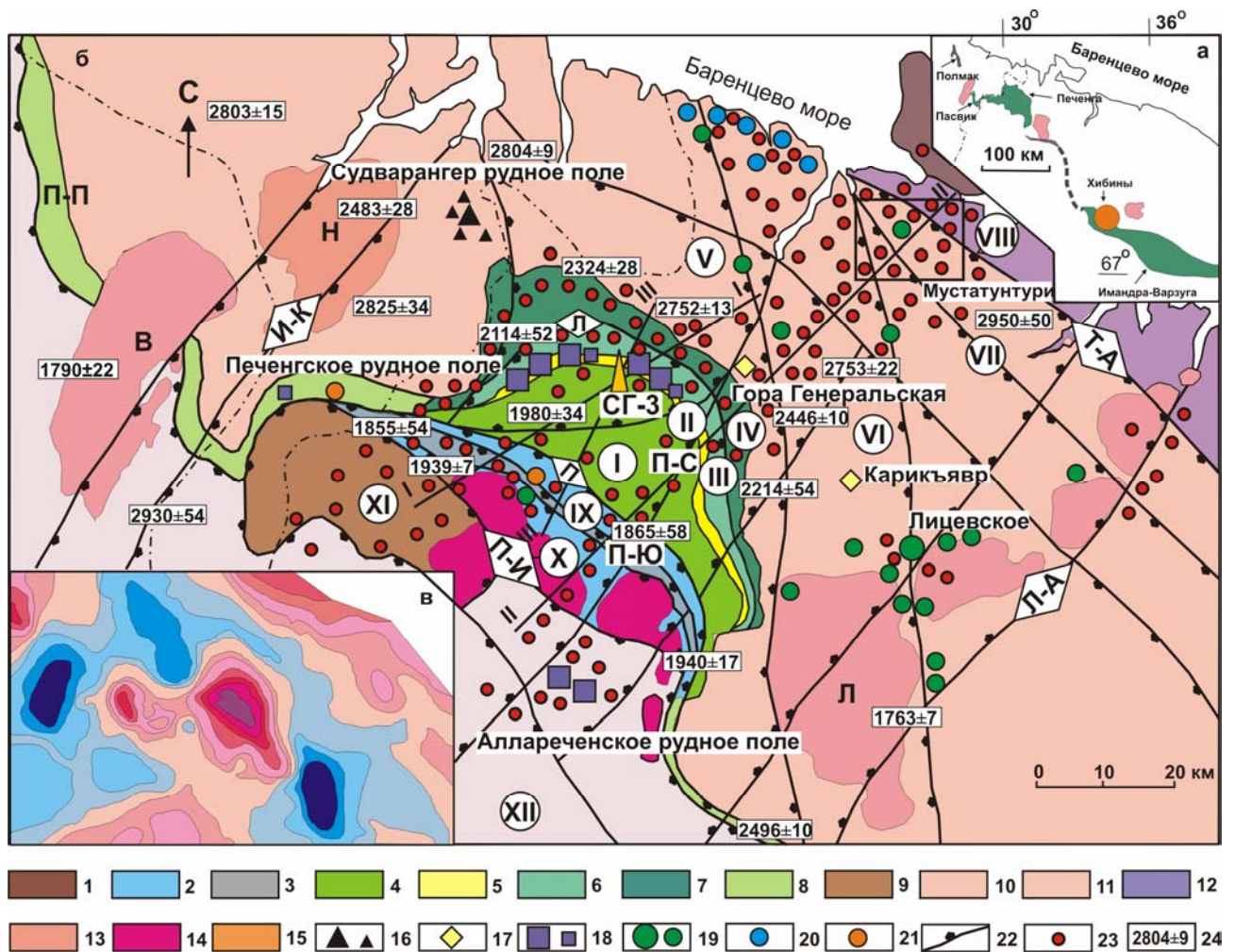


Рис. 6. Схема регионального размещения (а) геологического строения (б), гравитационного поля (в) в Печенгском рудном районе [Казанский, Лобанов, 1996]. Составлена с использованием данных Ю.А.Балашова, В.Р.Ветрина, Г.И.Горбунова, В.С.Ланева, А.В.Савицкого, Г.Юве и др.

1 - позднепротерозойские осадочные отложения; 2-7 - ранний протерозой: 2,3 - южнопеченгская серия (Пороярвинский блок - IX): 2 - метавулканогенные и метаосадочные породы, 3 - метаандезиты; 4-7 - северопеченгская серия: 4 - metabазальты и метапикриты свиты пильгуйярви (Пильгуйярвинский - I), 5 - метаосадочная Продуктивная толща с никеленосными интрузиями (Продуктивный - II), 6 - metabазальты и метаосадочные породы свиты колосйюки (Колосйюкский - III), 7 - метаандезиты и метаосадочные породы свит куэтьярви, ахмалахти (Луостаринский - IV); 8 - северопеченгская и южнопеченгская серии нерасчлененные; 9 - кристаллические сланцы тундровой серии (Тундровый - XI); 10-12 - архей: 10 - гнейсы, мигматиты, граниты и амфиболиты Кольско-Норвежского блока (Западно-Няссюкский - V, Няссюкско-Титовский - VI, Лиинахамарский - VII), 11 - гнейсы и кристаллические сланцы блока Инари (Аллареченский - XII), 12 - гранитизированные гнейсы Мурманского блока (VIII); 13-15 - раннепротерозойские гранитоиды: 13 - поздние интрузивные (лицко-арагубский комплекс), В - Вайноспаа, Л - Лицкий; 14 - реоморфические (Толпвдыдский - X); 15 - ранние интрузивные, Н - Нейден; 16-21 - рудные месторождения (крупные значки) и рудопроявления (мелкие значки): 16 - Fe, 17 - ЭПГ, 18 - Cu-Ni, 19 - U, 20 - Pb-Zn, 21 - Au; 22 - зоны разломов (буквы в ромбах): Т-А - Титовско-Амбарная (Воронья-Колмозерская), Л-А - Лицко-Арагубская, И-К - Инари-Киркенесская, П-И - Печенга-Имандра, Л - Лучломпольский, П - Порьыташский); 23 - места отбора ориентированных образцов, 24 - результаты изохронного датирования (млн. лет). П-С - Северное крыло, П-Ю - Южное крыло Печенгской структуры, П-П - пояс Пасвик-Полмак. Цифры в кружках - формализованные тектонические блоки. I-I - расчетный профиль, проходящий через Кольскую сверхглубокую скважину, II-II - опорный профиль на поверхности через Печенгский район, III-III - сейсмический профиль КОЛА ОГТ-92.

В гравитационном поле четко фиксируются и реоморфические гранитоидные купола.

Докембрийские породы района подразделяются на три главных серии: кольскую, тундровую и северопеченгскую. Архейская кольская серия представлена разнообразными гнейсами и гранито-гнейсами с прослоями амфиболитов и кварцитов, которые смяты в

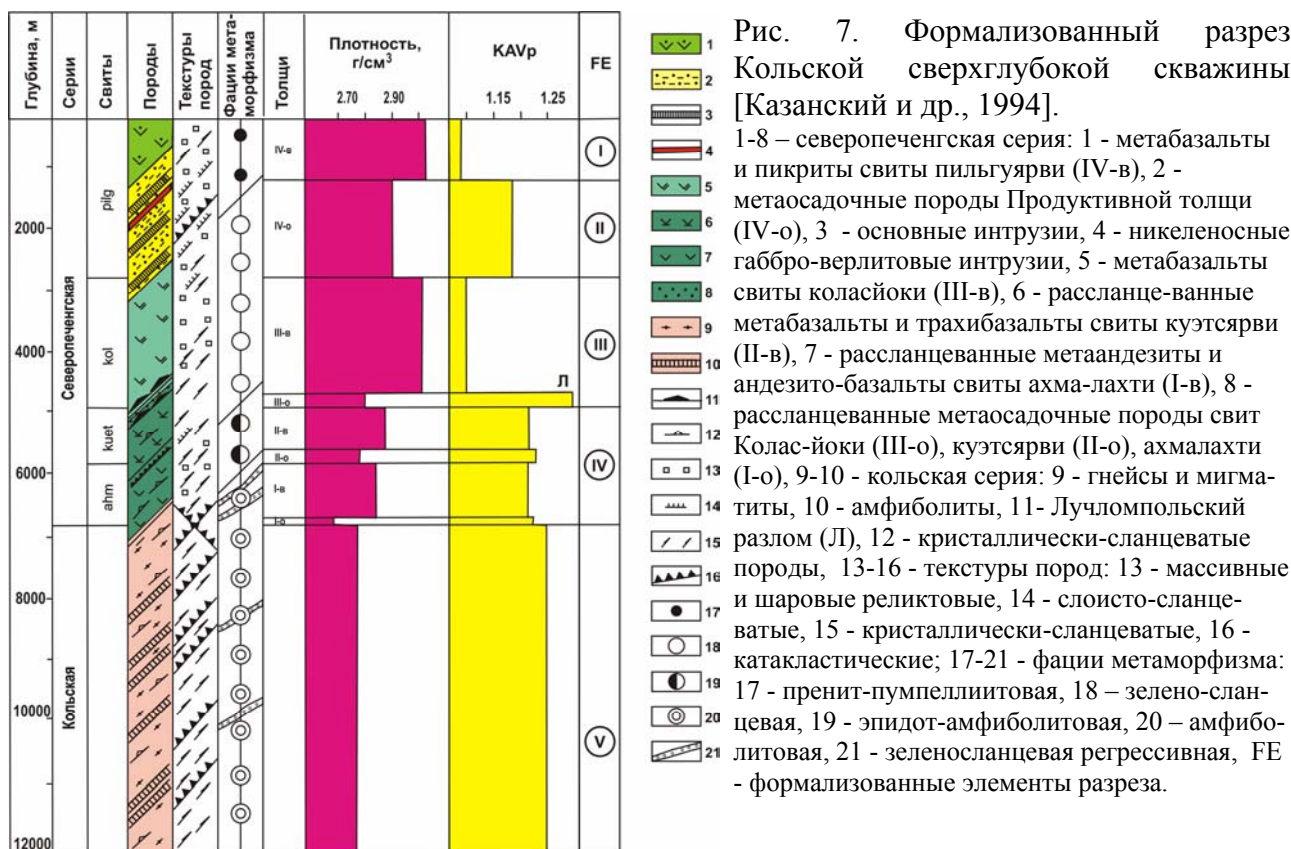
линейные и куполовидные складки и рассечены крупными разломами. Раннепротерозойская северопеченгская серия залегает на кольской серии с размывом и угловым несогласием. Она имеет мощность около 8 км и состоит из четырех свит (снизу вверх): ахмалахти, куэтсарви, колосйоки и пильгуярви. Каждая свита начинается с толщи осадочных пород и заканчивается вулканогенной толщей. Наиболее мощная Продуктивная осадочная толща насыщена габбро-верлитовыми интрузиями, с которыми ассоциируются сульфидные медно-никелевые месторождения. Северопеченгская серия слагает одноименную структуру, состоящую из двух крыльев. Ее Северное крыло напоминает в плане створку раковины. Слагающие его вулканогенные и осадочные породы в современном эрозионном срезе располагаются в виде нескольких дуг с общим центроклинальным падением. Южное крыло вытянуто в северо-западном направлении и отделено от Северного крыла крупным Порыташским разломом. С другой стороны Южное крыло соприкасается с зоной реоморфических гранитных куполов и выходами пород тундровой серии, возраст которой оценивается как позднеархейский-раннепротерозойский [Казанский и др., 1985].

В последние годы появились надежные радиологические датировки возраста пород скважины СГ-3 и Печенгской структуры в целом [Архейский комплекс..., 1991; Балашов и др., 1992; Ветрин и др., 1987; Дук и др., 1989; Скуфьин, 1993; Шарков, Смолькин, 1990; Hanski, 1992; Баянова, 2004]. С помощью Rb-Sr изохронного метода, а также U-Pb датировок по цирконам и отдельных Sm-Nd определений установлено, что основные вулканогенные породы Северного крыла формировались в интервале от 2.4 до 2.0 млрд. лет. Для вулканитов свиты ахмалахти (I-в) получены значения 2338 ± 30 млн. лет, свиты куэтсарви (II-в) 2250 ± 80 , свиты колосйоки (III-в) - 2130 ± 52 и свиты пильгуярви (IV-в) - 1980 ± 32 млн. лет. Никеленосные габбро-верлитовые интрузии имеют возраст 1990 млн. лет. Метавулканические и метаосадочные породы Южного крыла (южнопеченгская серия) имеют возраст - от 1990 до 1780 млн. лет, а примыкающие к ним реоморфические гранитоиды - 1940 млн. лет (см. рис. 6.б). В архейской части разреза скважины СГ-3 наиболее древние датировки (2865 ± 50 млн. лет) зафиксированы на глубине 9.7-11 км. Близкие значения возраста получены в образцах пород кольской серии с поверхности. Завершение прогрессивного метаморфизма пород северопеченгской серии датировано по изохронному Rb-Sr методу в 1685 ± 75 млн. лет (Геохронологические рубежи..., 1972). Эти процессы оказали интенсивное воздействие и на породы архейской кольской серии.

Чтобы устранить резкую диспропорцию между детальными комплексными исследованиями СГ-3 и фрагментарными наблюдениями на поверхности, начиная с 1980 года автором и сотрудниками тематической ИГЕМ РАН проводился систематический сбор образцов пород по опорному 120 км профилю от хребта Мустатунтури на северо-востоке до

Аллареченского рудного поля на юго-западе. Они позволили осуществить формализацию и корреляцию разреза скважины и опорного профиля с использованием компьютерных технологий [Казанский и др., 1993].

Для формализованного описания разреза СГ-3 и опорного профиля на поверхности были выбраны плотность пород и коэффициент $KAVp$, которые были определены в 1600 образцах керна и 2400 образцах с поверхности, а затем вычислены их средние значения для формализованных элементов скважины и профиля [Казанский и др., 1998, 2006; Лобанов и др., 1996, 2004] (Рис. 7).



Северопеченгская серия в разрезе скважины разделена на четыре формализованных элемента: первый отвечает метавулканитам (IV-в) свиты пильгуйрви, второй - Продуктивной толще (IV-о), третий - метавулканитам и метаосадочным породам свиты коласйоки с зоной Лучломпольского разлома в нижней части (III-в, III-о), и четвертый - метавулканитам (II-в, I-в) и метаосадочным (II-о, I-о) породам свит куэтьсарви и ахмалахти. Разрез кольской серии рассматривается в качестве пятого формализованного элемента.

Для вулканогенной свиты пильгуйрви (IV-в) сложенной metabазальтами и пикритами характерны наибольшие значения плотности пород (3.02 г/см^3) и значения $KAVp$ - 1.08. Резкую гетерогенность Продуктивной толщи (IV-о) по литологическому составу пород с плотностью 2.90 г/см^3 , еще более усиливают многочисленные согласные зоны синметаморфического рассланцевания. Эта свита выделяется большой мощностью и

повышенными значениями $KAVp$ - 1.18. Нижележащие свиты характеризуются преобладанием вулканогенных пород над осадочными. Состав вулканогенных пород изменяется вниз по разрезу от базальтов с прослоями пикритов (свита колосйоки, III-в) через щелочные базальты и трахибазальты (куэтсарви, II-в) до андезитов-базальтов и андезитов (ахмалахти, I-в). Соответственно средняя плотность вулканогенных пород уменьшается сверху вниз от 3.01 до 2.85 г/см³, а $KAVp$ возрастает от 1.10 до 1.23

По мере приближения к Лучломпольскому разлому интенсивность метаморфизма увеличивается от пренит-пумпеллиитовой до низов зеленосланцевой фации и на нижней границе разлома сменяется эпидот-амфиболитовой фацией. Глубина 4340 м служит тем рубежом, ниже которого все вулканогенные и осадочные породы интенсивно рассланцованы и перекристаллизованы [Глаголев и др., 1987]. Состав и парагенезисы минералов этих тектонитов соответствуют положению разлома в вертикальной метаморфической зональности [Казанский и др., 1985]. Значение $KAVp$ в зоне Лучломпольского разлома резко увеличивается и достигает 1.40. Ниже него сланцеватые метабазальты и метаандезиты свит куэтсарви и ахмалахти также характеризуются высокими значениями $KAVp$ от 1.22 до 1.23.

Главный отличительный признак пород в зоне Лучломпольского разлома - резкая анизотропия, обусловленная рассланцеванием, перекристаллизацией деформированных пород, возникновением в них закономерной пространственной ориентировки. Появление в этих породах высокой анизотропии, а не пестрота разреза свиты и резкое возрастание степени метаморфизма объясняют с геологических: позиций природу первой сейсмической границы [Литвиненко, 1975; Кольская сверхглубокая..., 1984].

Породы архейской кольской серии также обладают сланцеватыми текстурами как и породы нижних свит северопеченгской серии, но в отличие от нее все они в той или иной степени гранитизированы. Гранитизация более интенсивно проявлена в гнейсах и слабее в амфиболитах. Породы кольской серии в интервале 6.8-12.2 км характеризуются средней величиной плотности пород 2.76 г/см³ и $KAVp$ - 1.25.

Результаты исследования образцов по опорному профилю на поверхности хорошо согласуются с материалами по скважине СГ-3 (рис. 8). Как и в скважине метавулканиды свиты пильгуярви (IV-в) обладают максимальной плотностью 2,98 г/см³ и значениями $KAVp$ - 1,16, а в Продуктивной толще (IV-о) плотность пород меньше (2.84 г/см³), а $KAVp$ выше (1,19). Плотность метавулканидов последовательно снижается от 2.97 (III-в) до 2.82 г/см³ (II-в, I-в). Породам зоны Лучломпольского разлома на поверхности присущи значения $KAVp$ - 1,21, а ниже его в метавулканидах свит куэтсарви и ахмалахти фиксируется $KAVp$ (1.15-1.16). Однако значения $KAVp$ на поверхности меньше, чем в разрезе скважины СГ-3. Значения плотности (2.73 г/см³) и $KAVp$ (1.16) в породах архейской кольской серии меньше,

чем в породах низов северопеченгской серии.

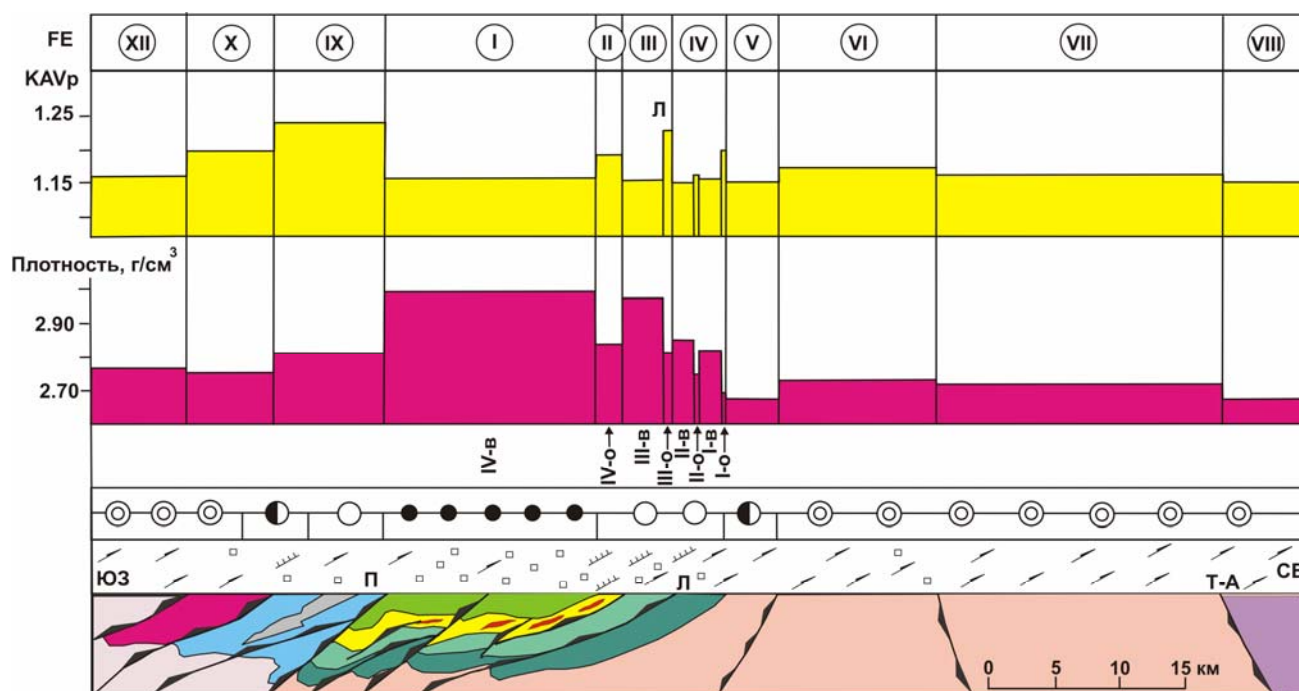


Рис. 8. Формализованный опорный профиль через Печенгский рудный район [Казанский и др., 1994]. Условные обозначения см. рис. 6,7.

В дополнение к разрезу скважины СГ-3 по материалам опорного профиля на поверхности охарактеризовано Южное крыло Печенгской структуры (см. рис. 6, 8). Пороярвинский блок (IX), который вытянут вдоль Порыташского разлома и сложен сланцеватыми метаандезитами, метабазами и метаосадочными породами, имеет плотность $2,81 \text{ г/см}^3$ и повышенные значения KAVp (1.24-1,26), что выделяет этот блок как наиболее мощную (2-4 км) зону интенсивных деформаций Печенгской структуры [Казанский и др., 1993]. Тольпывдский блок (X), сложенный реоморфическими гранитами, имеет плотность $2,76 \text{ г/см}^3$ и KAVp - 1.20, а Аллареченский блок (XII) (блок Инари) характеризуется близкими параметрами ($2,77 \text{ г/см}^3$ и KAVp - 1.16). Тундровый блок (XI), находящийся к северо-западу от опорного профиля, имеет высокую плотность пород ($2,92 \text{ г/см}^3$) и KAVp - 1.16. Это обусловлено широким распространением основных кристаллических сланцев и биотит-амфиболовых гнейсов.

На поверхности собраны более полные данные об архейских породах тектонических блоков к северо-востоку от Печенгской структуры [Лобанов и др., 2002, 2003; Казанский и др., 2005]. Мурманский блок (VIII) характеризуется значениями плотности пород $2,67 \text{ г/см}^3$ и KAVp 1.15 в связи с преобладанием гранитогнейсов. В Лиинахамарском блоке (VII) плотность выше $2,70 \text{ г/см}^3$, KAVp – 1.16, а в Няссюкско-Титовском блоке (VI) она еще выше $2,73 \text{ г/см}^3$ из-за даек основного-ультраосновного состава, а KAVp – 1.16. Породы Западно-Няссюкского блока (V) имеет меньшую плотность $2,68 \text{ г/см}^3$ и KAVp – 1.15, что объясняется

широким развитием гранитоидов. На этом общем фоне крупные межблоковые разломы четко фиксируются по пониженной плотности пород и максимальным значениям $KAVp$ (1.22-1.26).

Метаморфическая зональность в разрезе скважины СГ-3 и на поверхности в Северном крыле Печенгской структуры и его архейском обрамлении в целом согласуется между собой (см. рис. 7 и 8). В разрезе скважины интенсивность метаморфизма сверху вниз возрастает от прениг-пумпеллиитовой через зеленосланцевую до эпидот-амфиболитовой и, наконец, амфиболитовой фации. На поверхности в направлении на северо-восток наблюдается аналогичная смена фаций метаморфизма. На Южном крыле Печенгской структуры интенсивность метаморфизма увеличивается в направлении на юго-запад от зеленосланцевой через эпидот-амфиболитовую до амфиболитовой фации. Однако зоны наиболее интенсивных пластических деформаций занимают одинаковое положение в метаморфической зональности: и там, и здесь они тяготеют к области перехода от зеленосланцевой к эпидот-амфиболитовой фации [Казанский и др., 1997].

Бурение и исследование Кольской сверхглубокой скважины стимулировали разработку альтернативных моделей глубинного строения Печенгского рудного района. Эти модели трактуют Печенгскую структуру, в которой локализуются крупные сульфидные медно-никелевые месторождения, как грабен-синклиналь, асимметричный синклинорий, взрывной вулканический аппарат центрального типа и другие [Казанский и др., 1993]. Ключевое значение для понимания тектоники, глубинного строения и металлогении Печенгского района имеет одноименная структура. Уникальный материал о глубинном строении Печенгской структуры, точнее ее Северного крыла, изложен в коллективной монографии «Кольская сверхглубокая...» [1984], но он был интерпретирован по-разному, и фактически на основании разреза скважины СГ-3 и одной и той же карты Печенгской структуры были предложены принципиально разные геодинамические модели района.

Работы по оценке альтернативных моделей и разработке интегральной глубинной геодинамической модели Печенгского района были проведены совместно тематической группой ИГЕМ РАН и лабораторией геоинформатики ВНИИгеосистем [Казанский и др., 1993, 1994]. Учитывалось современное геологическое строение Печенгского рудного района, т.е. взаимное расположение геологических тел, которые отличаются по составу, деформациям и возрасту горных пород и по характеру контактов со смежными блоками. Критерием состава пород служит средняя величина плотности пород формализованных тектонических блоков, а показателем интенсивности деформаций, синхронных прогрессивному метаморфизму северопеченгской серии - средняя величина $KAVp$. Эти параметры были рассчитаны для формализованных тектонических блоков Печенгского

рудного района с учетом всех разновидностей пород и особенностей внутреннего строения до глубины 15 км с применением компьютерных технологий (Таблица 2).

Таблица 2
Петрофизические параметры пород тектонических блоков Печенгского рудного района (средние значения до глубины 15 км)

Тектонические блоки, разломы	Кол-во образцов	Объем блока, км ³	Плотность г/см ³	V _p км/с	V _s км/с	KAV _p	FE
Мурманский	105	1800	2.71	5.71	3.17	1.14	VIII
Титовско-Амбарный разлом	48		2.70	6.01	3.34	1.22	
Лиинахамарский	306	12690	2.73	5.68	3.18	1.15	VII
Нясюкско-Титовский	103	10800	2.75	5.87	3.26	1.17	VI
Западно-Нясюкский	400	21750	2.72	5.65	3.01	1.16	V
Печенгский:	2534	8660	2.93	6.29	3.50	1.17	(I-IV)
Пильгуярвинский (IV-в)	432	2200	3.01	6.39	3.53	1.15	I
Продуктивный (IV-о)	1540	760	2.87	6.14	3.25	1.18	II
Колосйокский (III-в, III-о)	478	1750	2.91	6.21	3.49	1.16	III
Лучломпольский разлом	170		2.81	6.08	3.23	1.25	
Луостаринский (II-I-в, II-I-о)	632	3950	2.84	6.02	3.38	1.17	IV
Порьиташский разлом	152		2.76	6.03	3.26	1.26	
Пороярвинский	245	1430	2.90	6.11	3.30	1.22	IX
Толпвыдский	164	1070	2.72	5.75	3.28	1.17	X
Тундровый	74	760	2.92	6.05	3.29	1.16	XI
Аллареченский (Инари)	279	15900	2.74	5.82	3.16	1.15	XII

Обработка данных по плотности пород выполнена в ВНИИгеосистем. Предварительно средние величины плотности пород по блокам были нанесены на разрез, параллельный опорному профилю и проходящий через СГ-3 (см. рис. 6.а). В процессе обработки решалась обратная задача имитационного моделирования и подбора поля от объекта с заданными параметрами. Расчетные гравиметрические кривые сопоставлялись с наблюдаемым гравиметрическим профилем по этому разрезу. Они осуществлялись с помощью компьютерных технологий и были ориентированы на решение следующих задач: 1) определение глубины распространения Печенгской структуры; 2) расшифровка ее внутреннего строения; 3) геодинамическая интерпретация глубинного строения Печенгского района. Было проанализированы известные к настоящему времени модели глубинного строения района, разработанные как до бурения СГ-3, так и с учетом его данных. Всего было рассчитано 14 различных альтернативных моделей. Это такие модели как грабен-синклинали [Ланев, Русанов, 1984], коллизионной шовной зоны [Beerthelsen, Marker, 1986], взрывного вулканического структуры центрального типа [Петров, 1988] и другие (рис.9).

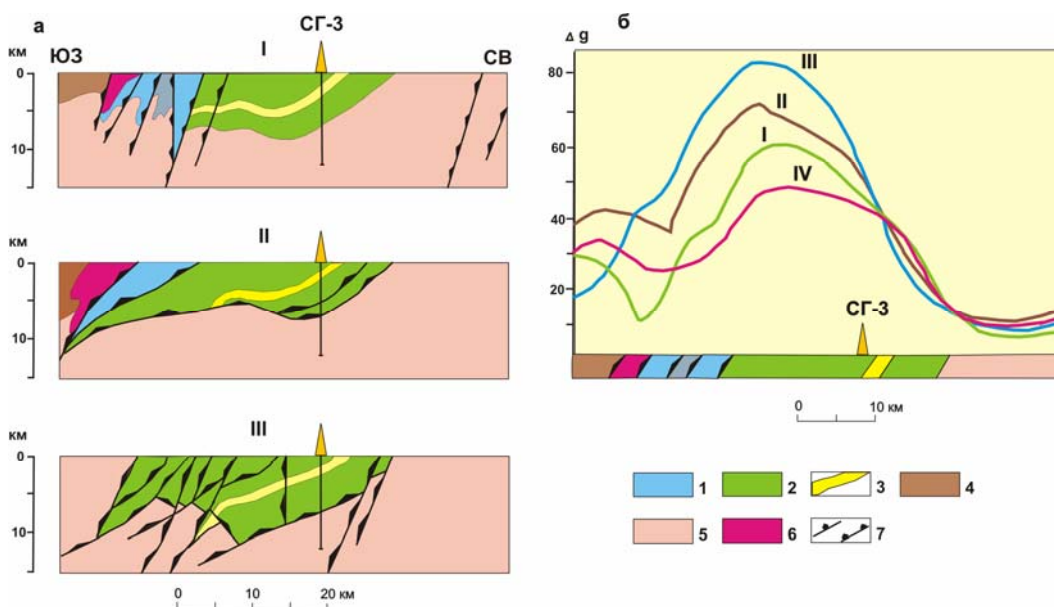


Рис. 9. Альтернативные модели глубинного строения Печенгской структуры в проекции на разрез через Кольскую сверхглубокую скважину (а) и сопоставление наблюдаемого и расчетного гравиметрических профилей (б) [Казанский и др., 1994].

I - модель грабен-синклинали [Ланев и Русанов, 1984], II - модель коллизионной шовной зоны [Berthelsen, Marker, 1986], III - модель эксплозивного аппарата центрального типа [Петров, 1988]. 1- южнопеченгская серия: метавулканиды и метаандезиты; 2-3 – северопеченгская серия: 2 - метавулканогенные и метаосадочные породы, 3 - Продуктивная толща; 4 - метавулканогенные и метаосадочные породы тундровой серии; 5 - гнейсы, мигматиты и амфиболиты кольской серии, 6 - реоморфические граниты, 7 – разломы. I-III - расчетные гравиметрические профили: I - для грабен-синклинали, II - для коллизионной шовной зоны, III - для эксплозивного вулканического аппарата, IV - наблюдаемый гравиметрический профиль.

Приведенные данные о вариациях плотности пород в разрезе СГ-3 и по опорному профилю были использованы для оценки альтернативных моделей и для разработки интегральной геологической модели путем сравнения фактического гравитационного профиля с расчетными [Казанский и др., 1993, 1994]. Как видно на рис. 9.б, ближе всего располагаются фактические и расчетные кривые в модели грабен-синклинали (I), а для остальных альтернативных моделей характерны резкие расхождения этих кривых.

Сведения об $KAVp$ пород, как показателе интенсивности тектонических дислокаций, оценивались путем сравнения фрагментов геологической карты и разрезов, т.е. визуально. Они лучше всего отвечают коллизионной модели. Две другие модели занимают промежуточное положение: в них отражено интенсивное расщепление пород в Южном крыле Печенгской структуры, но не учитывается наличие крупных согласных зон расщепления в низах северопеченгской серии на Северном крыле. Последние данные о возрасте докембрийских пород Печенгского района накладывают дополнительные ограничения на эти модели. Так, признание разного возраста пород Северного и Южного крыла не согласуется с моделями грабен-синклинали и эксплозивного вулканического аппарата. Коллизионная модель в этом отношении лучше всего отвечает имеющимся возрастным датировкам протерозойских пород. Каждая из моделей содержит положительные

элементы. Модель грабен-синклинали точнее всего отражает пространственное расположение блоков архейских и протерозойских пород. В эксплозионной модели Печенгская структура отнесена к структурам центрального типа, а коллизионная модель рассматривает эту структуру в динамике как результат совмещения двух разнородных серий пород, слагающих Северное и Южное крыло.

Ограничения интегральной геодинамической модели базируются, с одной стороны, на результатах изучения СГ-3, а с другой - на дополнительных материалах наземных исследований [Казанский и др., 1994, 1997]. Разрез разработанной с учетом этих ограничений модели представлен на рис. 10. Интегральная объемная геологическая модель

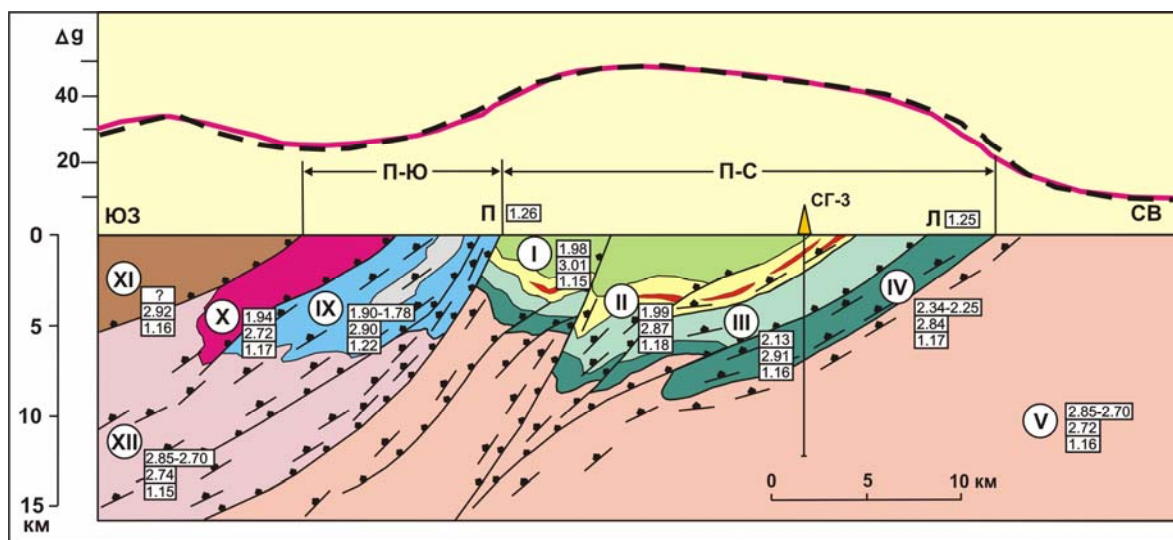


Рис. 10. Схематический разрез объемной интегральной геодинамической модели Печенгского рудного района через скважину СГ-3 и сопоставление наблюдаемого и расчетного гравиметрических профилей [Казанский и др., 1994]

Условные обозначения см. рис. 6, 8. Цифры в квадратах средние значения для пород формализованных тектонических блоков (I-XII): верхняя — возраст пород млрд лет, средняя — плотность ($г/см^3$), нижняя — значения KA_{Vp} .

Печенгского района была построена на основе геологической информации с использованием петрофизических данных. Затем она была скорректирована путем согласования наблюдаемого и расчетного гравиметрических профилей в разрезе через скважину СГ-3.

Одним из важных результатов анализа альтернативных и разработки интегральной модели является вывод о распространении пород Северного крыла или северопеченгской серии на сравнительно небольшую глубину, не превышающую 10-12 км от современной дневной поверхности. То же самое относится к породам Южного крыла. Компьютерные расчеты плотностных моделей свидетельствуют также об отсутствии в осевой части Печенгской структуры подводящих каналов, заполненных дайками основных и ультраосновных пород значительной мощности. Вариации KA_{Vp} пород в поперечном разрезе Печенгской структуры доказывают, что Южное крыло деформировано сильнее Северного. Наиболее напряженные тектонические воздействия испытал Пороярвинский блок (IX). На Северном

крыле синметаморфическое рассланцевание пород наиболее четко проявлено в низах северопеченгской серии и в Продуктивной толще. Судя по распределению плотностей пород, максимальная глубина залегания нижнего контакта Продуктивной толщи не превышает 5-6 км. Ее южная граница распространения ограничена Порьыташским разломом [Казанский и др., 1997].

Интегральная геодинамическая модель трактует Печенгский рудный район как горизонтальное сечение мантийной рудообразующей системы центрального типа и отражает его строение до глубины 15 км [Казанский и др., 1994]. Модель характеризует Северное крыло Печенгской структуры как фрагмент вулканической кальдеры, осложненной согласными зонами рассланцевания, а ее Южное крыло - как комбинацию чешуйчатой моноклинали с реоморфическими гранитными куполами. Формирование рудообразующей системы началось с рифтогенеза древней континентальной земной коры и внедрения платиноносных расслоенных интрузий. Модель учитывает генетическую связь между раннепротерозойским базальтоидным вулканизмом и никеленосными габбро-верлитовыми интрузивами. Основные и более молодые средние вулканы заполнили две вулканотектонические депрессии, сопряженные с мощной зоной разломов северо-западного простирания. Позднее эти депрессии подверглись интенсивному сжатию и региональному метаморфизму, которые изменили также породы фундамента. И наконец, еще позднее в обстановке растяжения возникли крутопадающие зоны катаклаза и регрессивных изменений.

Выводы

1. Сопоставление петрофизических данных по СГ-3 и профилю позволило найти путь формализации геологической задачи по изучению глубинного строения Печенгского рудного района, который коррелируется с геофизическими методами исследований в области гравиметрии и сейсмологии. Выделение формализованных элементов по плотности пород и KAV_p позволило осуществить перевод геологической информации в форму, доступную для компьютерной обработки.

2. Установлено, что изменения значений параметров плотности и KAV_p для пород формализованных элементов по разрезу СГ-3 и опорному профилю в северо-восточном направлении происходят аналогично, что позволило рассчитать средние значения параметров упругих свойств для пород протерозойских и архейских тектонических блоков до глубины 15 км и с помощью компьютерных технологий провести анализ альтернативных моделей глубинного строения Печенгского района и разработать интегральную геодинамическую модель.

3. Интегральная геодинамическая модель трактует Печенгский рудный район как горизонтальное сечение мантийной рудообразующей системы центрального типа и отражает его строение до глубины 15 км. Модель характеризует Северное крыло Печенгской структуры как фрагмент вулканической кальдеры, осложненной согласными зонами расланцевания, а ее Южное крыло - как комбинацию чешуйчатой моноклинали с реоморфическими гранитными куполами. Модель учитывает генетическую связь между раннепротерозойским базальтоидным вулканизмом и никеленосными габбро-верлитовыми интрузивами.

Четвертое защищаемое положение. Продуктивная толща северопеченгской серии, в которой сосредоточены раннепротерозойские никеленосные габбро-верлитовые интрузии и крупные медно-никелевые месторождения Печенгского рудного поля обладает четко выраженной гетерогенностью по физико-механическим свойствам пород. Богатые сульфидные медно-никелевые руды связаны с синметаморфическими зонами расланцевания, возникшими на коллизионном этапе развития карелид и характеризующимися максимальными значениями анизотропии V_p для пород.

Металлогению Печенгского района определяют прежде всего крупные сульфидные медно-никелевые месторождения [Медно-никелевые месторождения..., 1985, Горбунов, 1999 и др.]. Однако они отодвигают на второй план другие типы проявленного здесь оруденения. Анализ геологических и металлогенических данных по этому району и сопредельным территориям России, Норвегии и Финляндии позволяет говорить о Печенгском рудном районе как об изолированном сегменте древней континентальной земной коры со своей историей геологического развития и закономерным сочетанием разновозрастного и разнотипного оруденения [Казанский, Лобанов, 1996, 2004].

Помимо сульфидных медно-никелевых месторождений Печенгского и Аллареченского рудных полей в его пределах располагаются архейские месторождения железистых кварцитов Судварангера в Норвегии, раннепротерозойские проявления платинометалльной минерализации в мафических-ультрамафических интрузиях (Гора Генеральская, Карикъявр), разнотипные и разновозрастные (протерозойские и фанерозойские) месторождения и рудопроявления радиоактивных руд (Лицевское месторождение и др.), проявления гидротермальной свинцово-цинковой минерализации предположительно палеозойского возраста и, проявления золото-серебряного оруденения на глубоких горизонтах СГ-3 (см.

рис. 6.б).

Сульфидные медно-никелевые месторождения Печенгского рудного поля являются вторым после Норильского района источником никеля в России и входят в первую пятерку этих месторождений в мире [Горбунов и др., 1999 и др.]. Все исследователи признают, что сульфидные медно-никелевые месторождения Печенги связаны с мантийным источником и процессами, пространственно и генетически ассоциируются с габбро-верлитовыми интрузиями, внедрившимися на заключительном этапе формирования раннепротерозойского осадочно-вулканогенного комплекса, имеют первично магматическое происхождение и испытали воздействие метаморфических и гидротермальных процессов на свекофеннском этапе тектономагматической активизации Балтийского щита [Горбунов, 1968; Смолькин, 1992 и др.]. Согласно интегральной геодинамической модели Печенского района металлогению главного карельского цикла определяют месторождения и рудопроявления Ni, Cu, ЭПГ и U, чередование обстановок сжатия и растяжения и параллельное развитие базальтоидного и гранитоидного магматизма. История развития Печенгского района в течение карельского цикла подразделена на четыре этапа: предрифтогенный, рифтогенный, коллизионный и постколлизионный [Казанский, 1997; Казанский, Лобанов, 2005].

Печенгское рудное поле занимает вполне определенное положение в разрезе северопеченгской серии и подчиняется общему тектоническому плану Печенгской структуры. Оно имеет форму вытянутой дуги, обращенной выпуклой стороной на северо-восток, и ограничено выходами Продуктивной толщи, которая наклонена в южных румбах (см. рис. 6.б). В Продуктивной толще залегает около трехсот габбро-верлитовых массивов, с которыми и ассоциируется сульфидное медно-никелевое оруденение. Месторождения Печенгского рудного поля объединяются в два рудных узла - Западный (Каула, Промежуточное, Котсельваара, Камикиви и Семилетка) и Восточный. (Спутник, Верхнее, Тундровое, Пильгуярвинское, Заполярное и Онки). Месторождения Восточного узла располагаются двумя субпараллельными ярусами, вытянутыми в восток-юго-восточном направлении на расстояние около 9 км в пределах Продуктивной толщи. Здесь сосредоточены самые крупные месторождения, связанные с Пильгуярвинским габбро-верлитовым массивом (рис. 11). В Печенгском рудном поле выделяются три группы интрузивных пород, последовательно внедрявшихся в осадочно-вулканогенную Продуктивную толщу: безрудные габбро-диабазы, основные-ультраосновные породы и рудоносные дифференцированные габбро-верлитовые интрузивы, залегающие согласно с туфогенно-осадочными отложениями и подающие на юго-запад.

Восточный узел представляет собой крупную рудную залежь, нарушенную крутопадающим согласным сдвиго-надвигом, по которому рудоносный массив был разбит на

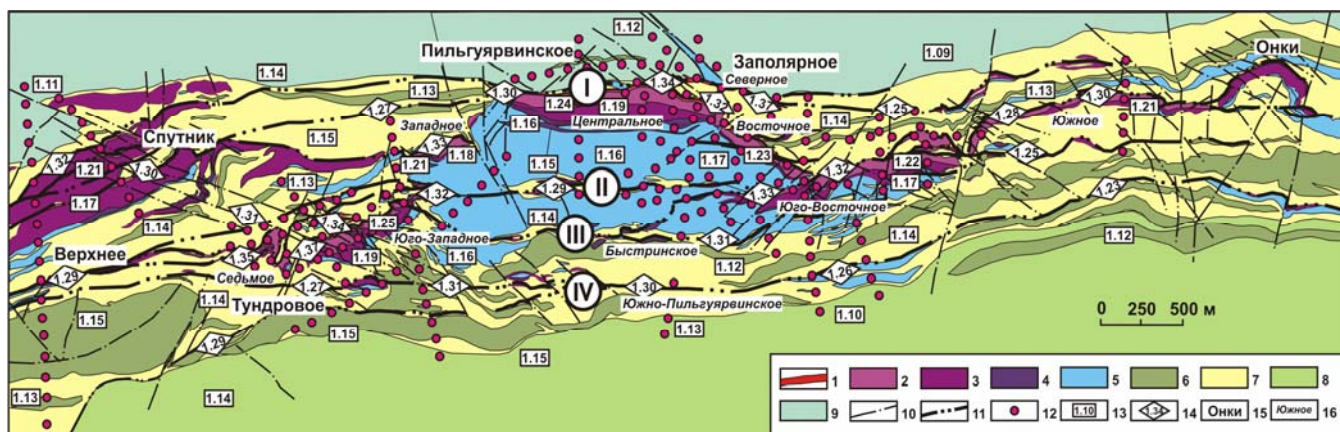


Рис. 11. Петрофизическая схема Восточного рудного узла Печенгского рудного поля [Казанский, Лобанов, 2005]. Составлена по материалам Г.И. Горбунова [1999] и ГКМ "Печенганикель". 1 – эпигенетические брекчиевидные, сплошные и богатые вкрапленные сульфидные медно-никелевые руды; 2 – вкрапленные руды в серпентинизированных перидотитах, 3 - перидотиты; 4 – пироксениты, 5 - габбро; 6 - габбро-диабазы; 7 - породы Продуктивной туфоогенно-осадочной толщи; 8 - вулканогенные породы пильгуярвинской свиты, 9 - вулканогенные породы колосйюкской свиты; 10-11 - разрывные тектонические нарушения: 10 - диагональные разломы, 11 - межпластовые тектонические зоны (I-IV); 12 - места отбора ориентированных образцов и участки детальных структурно-петрофизических исследований; 13-14 - средние значения $KAVp$ для пород: 13 - тектонических блоков, 14 - межпластовых тектонических зон, 15 - месторождения медно-никелевых руд; 16 - рудные тела сульфидных медно-никелевых руд.

два блока: северо-восточный, представляющий собой наиболее опущенную центральную часть Пильгуярвинского массива, и юго-западный, надвинутый по Верхней тектонической зоне (II) на первый блок [Горбунов и др., 1999]. Исследование глубоких горизонтов этого массива выявило неоднократное сдвигание разреза интрузива, тектоническое выклинивание метаосадочных пород между его частями, наличие мощных межпластовых тектонических зон синметаморфического расланцевания между отдельными его блоками (I-IV).

Изучения разреза Кольской сверхглубокой скважины и месторождений медно-никелевых руд Восточного рудного узла установлено, что сульфидное медно-никелевое оруденение

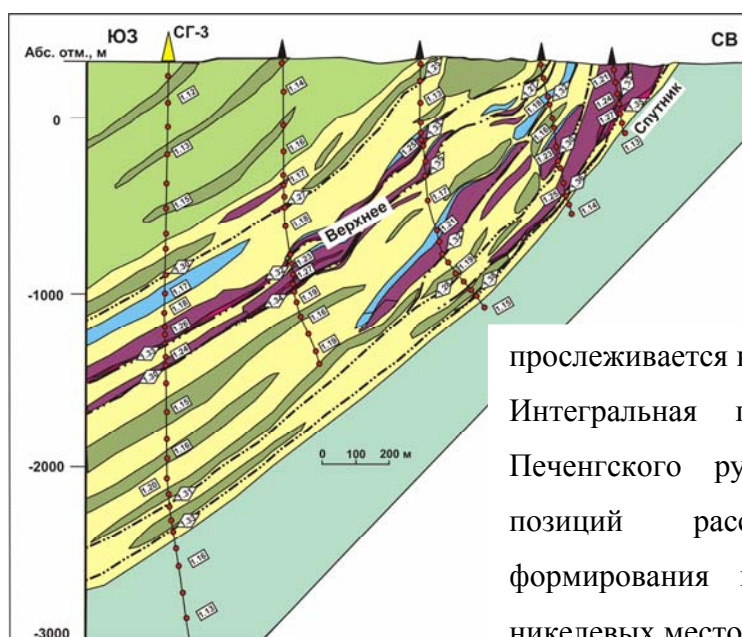


Рис. 12. Петрофизический разрез СГ-3 - месторождения Верхнее и Спутник Восточного рудного узла Печенгского рудного поля. [Казанский, Лобанов, 2005] (Условные обозначения см. рис. 11).

прослеживается на глубину более 2.5 км (рис. 12). Интегральная глубинная геодинамическая модель Печенгского рудного района позволяет с новых позиций рассмотреть структурные условия формирования и локализации сульфидных медно-никелевых месторождений Печенгского рудного поля.

Продуктивная толща, к которой приурочены все рудоносные интрузивы, выделяется в разрезе северопеченгской серии не только пестротой литологического состава, но и резкой гетерогенностью разреза по физико-механическим свойствам пород (Лобанов и др., 1989) (таблица 3).

Таблица 3

Петрофизические параметры пород Продуктивной толщи, рудоносных габбро-верлитовых интрузивов и сульфидных медно-никелевых руд Восточного рудного узла

Породы	К-во обр.	Плотность г/см	Пористость %	V _p км/с	V _s км/с	KAV _p
Метабазальты IV-в свиты пильгуярв	245	3.01	0.38	6.60	3.76	1.14
Песчаники масс и н/с	498	2.83	0.62	6.10	3.25	1.15
Песчаники, филлиты сланц.	670	2.78	0.84	5.97	3.13	1.17
Габбро-диабазы	242	2.95	0.46	6.24	3.30	1.12
Габбро	469	2.97	0.80	6.25	3.27	1.15
Пироксениты	224	3.05	0.63	6.29	3.26	1.17
Перидотиты	805	3.01	0.80	6.11	3.18	1.18
Бедные вкрапленные руды в серп. перидотитах	1366	3.06	0.89	6.05	3.06	1.20
Прожилково-вкрапленные руды в перидотитах	356	3.21	0.91	5.89	3.04	1.22
Брекчиевидные руды	126	3.38	1.32	5.28	2.76	1.32
Сплошные руды	84	4.34	1.11	4.83	2.39	1.15
Прожилково-вкрапленные руды в филлитах	275	3.06	0.79	5.70	3.03	1.22
Породы межпластовых тектонических зон	235	3.01	1.15	5.87	3.09	1.33
Метавулканыты III-в свиты колосйоки	286	3.01	0.74	6.39	3.53	1.15

Именно эти свойства пород обусловили как локализацию никеленосных габбро-верлитовых интрузивов, так и возникновение межпластовых зон синметаморфического расщепления с локализацией в них богатых брекчиевидных медно-никелевых руд (рис. 13).

Для туфогенно-осадочных пород Продуктивной толщи характерны средние значения - плотность от 2.78-2.83 г/см³ и KAV_p - 1.15-1.17. По разрезу дифференцированных габбро-верлитовых интрузивов от габбро к пироксенитам, перидотитам и оруденелым перидотитам происходит изменение значений плотности 2.97 – 3.05 – 3.01 – 3.06 г/см³ и KAV_p 1.15 – 1.17 - 1.18 – 1.20 – 1.22. Для пород межпластовых зон синметаморфического расщепления характерны высокие значения KAV_p до 1.33. Средние значения для пород толщи по

плотности - 2.84 г/см^3 и $KAVp - 1.19$, тогда как вулканогенные породы свит пильгуярви и колосйоки перекрывающих и подстилающих ее характеризуются большей плотностью и

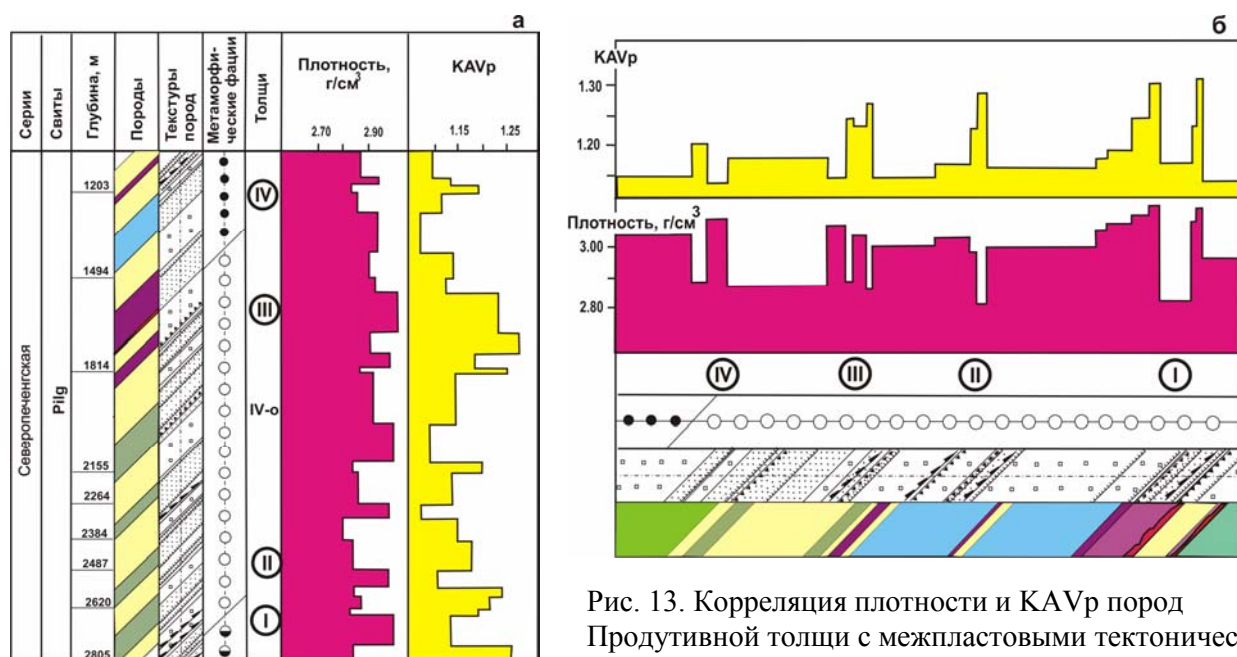


Рис. 13. Корреляция плотности и $KAVp$ пород Продуктивной толщи с межпластовыми тектоничес-

кими зонами синметаморфического расщепления Восточного рудного узла по разрезу СГ-3 (а) и профилю на поверхности на участке Центрального рудного тела Пильгуярвинского месторождения (б) [Лобанов и др., 1989]. (Условные обозначения см. рис. 7 и 11).

меньшей анизотропией $KAVp - 1.14-1.15$ (см. таблицу 2)..

Внутреннее строение никеленосных габбро-верлитовых интрузивов получает более обоснованное объяснение, если исходить из внедрения никеленосных магматических расплавов в горизонтально залегающие туфогенно-осадочные породы Продуктивной толщи согласно интегральной геодинамической модели [Казанский и др., 1998]. Это объясняет параллельность границ магматических дифференциатов никеленосных интрузивов, бедных и богатых вкрапленных руд наклонным контактам интрузивов с вмещающими породами, тектонический характер этих контактов и т.д.

По текстурным особенностям и составу сульфидные медно-никелевые руды разделяются на пять главных типов, для которых характерны следующие значения плотности и $KAVp$: 1) бедные вкрапленные в серпентинизированных перидотитах – 3.06 г/см^3 , $KAVp - 1.20$; 2) богатые прожилково-вкрапленные в серпентинитах («серые» руды) 3.21 и 1.22 ; 3) брекчиевидные - 3.38 и 1.32 ; 4) сплошные сульфидные - 4.34 и 1.15 ; 5) прожилково-вкрапленные в филлитах - 3.06 и 1.22 [Лобанов и др., 1989, 2003]. Минеральный состав всех типов руд в отношении главных рудных минералов (пирротин, пентландит, халькопирит, магнетит, пирит) одинаков, изменяются лишь количественные соотношения минералов [Горбунов и др., 1999].

В процессе протерозойских чешуйчато-блоковых деформаций резкая гетерогенность пород Продуктивной толщи по упругим свойствам способствовала широкому развитию в

ней межпластовых тектонических зон синметаморфического рассланцевания и будинированию габбро-верлитовых массивов. В перекрывающих вулканитах свиты пильгуярви, а также в мощных вулканических покровах подстилающей свиты колосйоки плотность, пористость, упругие характеристики пород колеблются в гораздо меньших пределах, а залегающие еще ниже по разрезу осадочные свиты обладают небольшой мощностью и более однородным литологическим составом, что отражается и на их физико-механических свойствах.

На первично-магматические особенности строения никеленосных интрузивов наложили существенный отпечаток тектонические нарушения, возникшие на коллизионном этапе развития района. Среди них важную роль в структуре месторождения занимают крутопадающие межпластовые тектонические зоны вторичного рассланцевания (см. рис. 11-13). Главную роль в формировании чешуйчато-блоковых структур Восточного рудного узла сыграли межпластовые тектонические зоны, которые привели к многоярусности в расположении рудных тел. О степени деформированности пород в каждом блоке и в зонах разломов свидетельствуют вариации $KAVr$. Установлены дополнительные критерии выделения этих зон, в которых независимо от состава исходных пород отмечается закономерное возрастание $KAVr$ до 1.35. Максимальные значения $KAVr$ установлены также для брекчиевидных руд в межпластовых тектонических зонах.

В Восточном рудном узле выделены четыре межпластовых тектонических зоны синметаморфического рассланцевания. Главная (I) зона проходит вдоль нижнего контакта Пильгуярвинского интрузива и контролирует размещение богатых брекчиевидных и сплошных сульфидных руд в Центральном, Западном и Восточном рудных телах, со значениями $KAVr$ 1.27-1.37 (см. рис. 11,12). На западном фланге месторождения она продолжается вплоть до месторождения Спутник. В восточном направлении от нее отходит прямолинейная зона, контролирующая размещение сплошных сульфидных руд месторождения Заполярное ($KAVr$ - 1.34). Морфологически Главная зона выражена брекчированием и рассланцеванием оруденелых серпентинизированных перидотитов, местами оруденелой тектонической брекчией и сплошными сульфидными рудами. Верхняя (II) межпластовая тектоническая зона простирается параллельно Главной в 200-500 м выше по разрезу, падает на юго-запад под углом $70-80^\circ$ и разбивает массив на два крупных блока: Главный, в низах которого расположены Западное, Центральное и Восточное рудные тела, и Верхний, где с ней непосредственно связаны богатые руды ($KAVr$ – 1.28-1.32). В пределах Юго-Восточного и Южного рудных тел зона выражена оруденелой тектонической брекчией, реже богатыми брекчиевидными и сплошными сульфидными рудами. Третья (III) тектоническая зона проходит параллельно двум первым в 300-400 м выше по разрезу над

Юго-Восточным и Южным рудными телами и контролирует локализацию Быстринского месторождения ($KAVp = 1.25-1.31$). Четвертая (IV) межпластовая тектоническая зона пересечена в самых верхах Продуктивной толщи, в 300-400 м от перекрывающих вулканитов ($KAVp = 1.25-1.31$), но в ней отмечаются только маломощные линзовидные и пластовые тела ультраосновных пород.

Значения петрофизических параметров пород в межпластовые тектонические зонах синметаморфического расланцевания характеризуются наиболее высокой плотностью, пористостью и $KAVp$. Высокая плотность объясняется наличием сплошных и брекчиевидных руд, а пористость - тем, что породы интенсивно расланцованы и раздроблены. При метаморфизме и последующих гидротермально-метасоматических изменениях в этих зонах происходило формирование низкотемпературной ассоциации минералов (карбонат, хлорит, альбит, актинолит, сульфиды), которые снижали упругие параметры пород. Высокие значения $KAVp$ (1.29-1.32) подтверждают, что породы в этих зонах формировались при интенсивных тектонических движениях в эпоху свекофеннской тектоно-метаморфической активизации.

Сульфидные медно-никелевые руды в разрезе СГ-3 приурочены к контакту метаперидотитов с филлитами, осложненному согласно межпластовой тектонической зоной расланцевания (рис. 14.а). По ассоциации минералов эти породы отвечают эпидот-

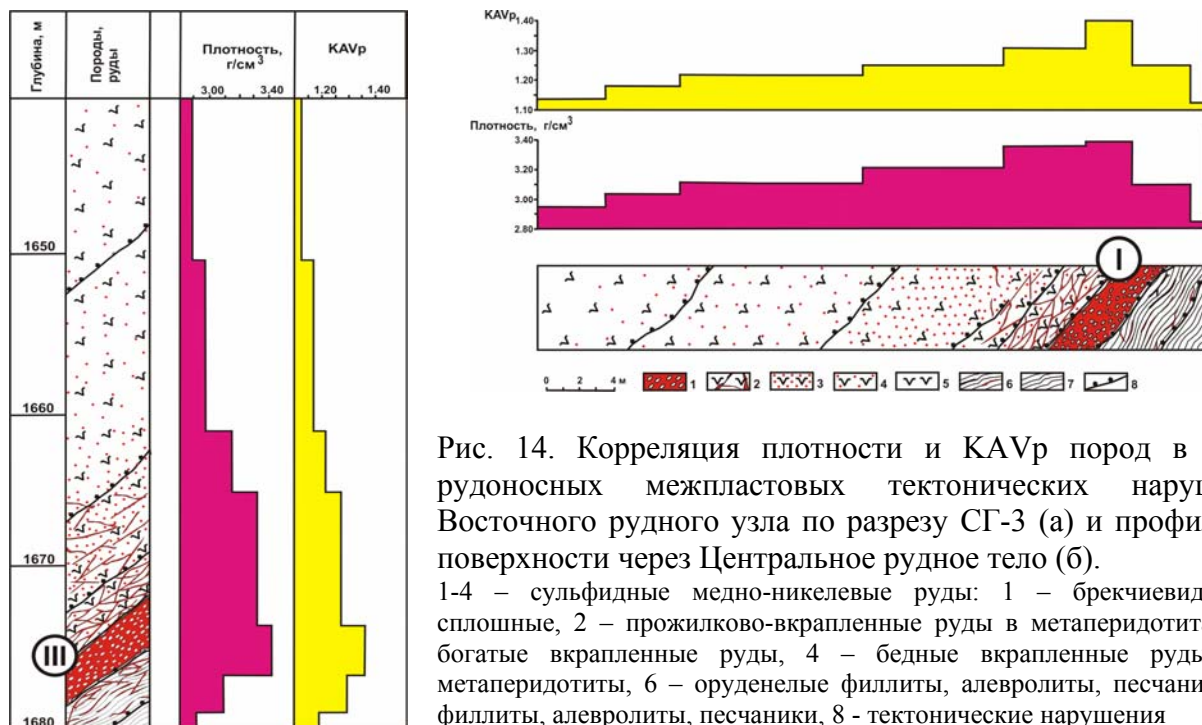


Рис. 14. Корреляция плотности и $KAVp$ пород в зонах рудоносных межпластовых тектонических нарушений Восточного рудного узла по разрезу СГ-3 (а) и профилю на поверхности через Центральное рудное тело (б).

1-4 – сульфидные медно-никелевые руды: 1 – брекчиевидные и сплошные, 2 – прожилково-вкрапленные руды в метаперидотитах, 3 – богатые вкрапленные руды, 4 – бедные вкрапленные руды, 5 – метаперидотиты, 6 – оруденелые филлиты, алевролиты, песчаники, 7 – филлиты, алевролиты, песчаники, 8 – тектонические нарушения

хлоритовой субфации зеленосланцевой фации, что соответствует их положению в общей вертикальной зональности прогрессивного метаморфизма пород северопеченгской серии. Сверху вниз первично-магматические рассеянные и густовкрапленные руды сменяются

эпигенетическими брекчиевидными рудами в рассланцованных породах и прожилково-вкрапленным оруденением в филлитах с возрастанием плотности пород и руд от 2,90 для вкрапленных руд до 3.40 г/см³. Максимальная величина KAVp 1.30 присуща для брекчиевидных руд в межпластовой тектонической зоне.

На участке Центрального рудного тела Главная тектоническая зона рассланцевания и брекчирования имеет мощность около 10 м, проходит как по перидотитам, так и по подстилающим их туфогенно-осадочным породам (рис. 14.б). Для серпентинизированных перидотитов с вкрапленным оруденением характерны плотность 3.00-3.10 г/см³ и KAVp – 1.14-1.18. В серпентинизированных, рассланцованных, раздробленном перидотитах с прожилково-вкрапленным оруденением возрастают плотность – 3.15-3.30 г/см³ и KAVp до 1.22-1.30, а для рассланцеванных, оталькованных перидотитов, бластокатаклазитов, бластомилонитов, брекчиевидных сульфидных медно-никелевых руд плотность 3.40 г/см³, KAVp – 1.36. При удалении от межпластовой тектонической зоны, в подстилающие слабо рассланцеванные филлиты KAVp резко падает до 1.17-1.20 [Лобанов и др., 2003, 2006].

Богатые брекчиевидные руды, судя по их высокой анизотропии, являются составной частью межпластовых тектонических зон синметаморфического рассланцевания – KAVp 1.25-1.35. Однако происхождение их продолжает оставаться предметом дискуссий. Наиболее важным аргументом в пользу эпигенетического (постмагматического) происхождения брекчиевидных руд является их связь с зонами дислокационного метаморфизма - синметаморфического рассланцевания, занимающими определенное положение в общей вертикальной метаморфической зональности протерозоя. Об этом свидетельствуют тесные сростания сульфидных минералов с силикатами в рассланцованных метаультрабазах и метаосадочных породах, в то время как сульфидные минералы первично-магматических вкрапленных руд интенсивно замещаются гидросиликатами, и наконец, контрастное обогащение сульфидов тяжелым изотопом серы по мере перехода от вкрапленных руд в перидотитах к брекчиевидным рудам на контакте рассланцованных перидотитов и филлитов [Казанский и др., 1983; Глаголев и др., 1987]. Соотношения сульфидов с силикатными минералами и часто встречающимся в брекчиевидных рудах кварцем свидетельствуют о значительной роли явлений замещения при образовании сульфидов, количество которых варьирует от 10-15 до 70-80% [Горбунов и др., 1968].

Геологические и структурно-петрофизические данные свидетельствуют о первоначально субгоризонтальном залегании рудоносных габбро-верлитовых интрузий, возраст которых около 1990 млн. лет [Смолюкин, 1992; Hanski, 1992]. На это указывают: тектонический характер контактов большинства никеленосных интрузивов как со стороны лежащего и висячего бока, так и по простиранию, наклонное залегание первичной расслоенности

интрузивов, границ вкрапленных сульфидных медно-никелевых руд и слоистости окружающих осадочных пород; отсутствие прямой корреляции между мощностью интрузивов и мощностью сульфидных медно-никелевых руд, более интенсивное развитие в продуктивной толще согласных зон расланцевания по сравнению с нижележащими и вышележащими вулканогенными толщами.

При современной геологической изученности Восточного рудного узла нельзя дать точных ответов на вопросы о том, насколько чешуйчато-надвиговые дислокации северопеченгской серии изменили первоначальные размеры и форму никеленосных габбро-верлитовых интрузивов и на каком расстоянии от поверхности последние подверглись прогрессивному метаморфизму зеленосланцевой фации. Возраст метаморфизма определен изохронному Rb-Sr методу в 1685±75 млн. лет [Смолюкин и др., 1996]. Необходимо отметить, что перемещения блоков в пределах Восточного рудного узла происходили с юго-запада на северо-восток. Структурно-петрофизические данные показали, что на первично-магматические особенности локализации сульфидного оруденения существенный отпечаток наложили послерудные тектонические движения по межпластовым тектоническим зонам синметаморфического расланцевания, которые, возникли в условиях свекофеннской тектономагматической активизации Балтийского щита. Они обусловили чешуйчато-блоковое строение Восточного рудного узла и многоярусность в расположении дислоцированных рудных тел.

Выводы

1. Образованию в Печенгском рудном районе крупных раннепротерозойских месторождений сульфидных медно-никелевых руд благоприятствовало формирование карельского осадочно-вулканогенного комплекса на древней континентальной земной коре, его длительная тектоническая и металлогеническая эволюция и приуроченность этого района к изолированному сегменту Печенга-Имандра-Варзугской зоны карелид.

2. Согласно интегральной глубинной геодинамической модели Печенгского рудного района, никеленосные габбро-верлитовые интрузии Печенгского рудного поля первоначально представляли собой силы и залегали субгоризонтально. Их локализация происходила в сравнительно узком вертикальном диапазоне вулканогенно-осадочных пород Продуктивной толщи и обусловлена гетерогенностью ее литологического разреза и высокой анизотропией по физико-механическим свойствам.

3. Изучение Кольской сверхглубокой скважины и месторождений Восточного рудного узла показало выдержанность сульфидного медно-никелевого оруденения по падению на

2.5 км. Об этом свидетельствуют тектонический характер контактов никеленосных интрузивов как со стороны лежащего и висячего бока, так и по простиранию; наклонное залегание первичной расслоенности интрузивов, границ вкрапленных сульфидных медно-никелевых руд и вмещающих осадочных пород; отсутствие прямой корреляции между мощностью интрузивов и мощностью сульфидных медно-никелевых руд; более интенсивное развитие в Продуктивной толще согласных тектонических зон синметаморфического расщепления по сравнению с нижележащими и вышележащими вулканогенными толщами, а также возрастание в этих зонах $KAVp$ до 1.30-1.40.

4. Важную роль в структуре Печенгского рудного поля занимают межпластовые тектонические зоны синметаморфического расщепления, которые обусловили формирование чешуйчато-блоковых структур Восточного рудного узла и привели к многоярусности в расположении рудных тел. Особые условия тектонических деформаций и метаморфизма на этапе свекофеннской тектоно-метаморфической активизации не уничтожили первичные магматические руды, а, наоборот, способствовали их преобразованию и формированию богатых эпигенетических руд в межпластовых зонах синметаморфического расщепления с высокой анизотропией Vp .

Пятое защищаемое положение. Петрофизические данные по опорным образцам керна из архейской части разреза СГ-3 и их аналогам на поверхности свидетельствуют о том, что на глубинах 8-12 км выявлены блоки пород аналогичного минерального состава со сходными параметрами плотностей, скоростей Vp и Vs . Аномально высокие значения пористости и объемной анизотропии Vp в этих породах обусловлены технологическими факторами.

Бурение Кольской сверхглубокой скважины было ориентировано на получение максимально полной информации о вещественном составе и физическом состоянии пород на больших глубинах и выяснение геологической природы сейсмических границ в древней континентальной земной коре [Кольская сверхглубокая..., 1984, 1998]. В интервале 6.8-12.2 км скважина пересекла архейские породы кольской серии. В разрезе скважины СГ-3 она сложена главным образом гнейсами и мигматитами и содержит тела амфиболитов и метаультрабазитов. Среди гнейсов преобладают биотит-плагиоклазовые и биотит-амфибол-плагиоклазовые разновидности. Отдельные пачки содержат высокоглиноземистые минералы: андалузит, гранат, ставролит. Минеральные ассоциации и составы сосуществующих минералов пород кольской серии соответствуют температурным границам

амфиболитовой фации.

Широкий резонанс вызвали сообщения об аномально высокой пористости и низких скоростях акустических волн в архейских породах на глубинах ниже 7 км. Они были зафиксированы с помощью акустического каротажа скважины и замеров в образцах керна. Природа аномалий до настоящего времени остается предметом дискуссий [Кольская сверхглубокая..., 1998]. Необходимо отметить, что глубже 7.2 км бурение осуществлялось с применением шарошечных долот и отбором керна способом магазинирования, который обеспечивал более высокий выход керна, но одновременно нарушал естественную последовательность образцов керна. Кроме того, по мере увеличения глубины скважины все более заметным становилось дискование керна, вызванное техногенным воздействием бурового снаряда. Диски керна имели толщину от 3 до 1 см, и были мало пригодны для лабораторных определений физических свойств.

Однако даже на больших глубинах отдельные небольшие интервалы были пройдены с помощью алмазного бурения. Из этих интервалов были извлечены уникальные образцы керна архейских пород монолитными цилиндрами диаметром 6 см и длиной 30-40 см с четкой ориентировкой верх-низ. В 1989 году часть этих образцов была передана главным геологом Кольской экспедиции сверхглубокого бурения НПО «Недра» В.С.Ланевым в тематическую группу ИГЕМ. В их числе 4 образца биотитовых плагиоклазовых гнейсов, 4 образца амфиболитов и 3 образца мигматитов [Лобанов и др., 1999].

В архейском комплексе вплоть до забоя скважины зафиксированы зоны катаклаза и регрессивного метаморфизма зеленосланцевой фации. Поэтому первым критерием отбора опорных образцов для петрофизических исследований является отсутствие или минимальное проявление в них регрессивных изменений [Лобанов и др., 1999, 2002]. Вторым критерий связан с необходимостью исключить влияние интенсивного дискования керна на больших глубинах при использовании стандартных шарошечных бурильных коронок. Третьим критерием явилась размерность минеральных зерен пород. Биотит-амфиболовые гнейсы, гнейсы с высокоглиноземистыми минералами и метаультрабазиты обладают крупнозернистыми сланцеватыми и очковыми текстурами. Поэтому предпочтение было отдано более однородным мелкозернистым биотит-плагиоклазовым и двуслюдяным гнейсам, мигматитам и амфиболитам, пользующимся наибольшим распространением в разрезе скважины СГ-3.

Из разреза Кольской сверхглубокой скважины для последующих исследований были отобраны 3 образца биотит-мусковит-плагиоклазовых гнейсов К-8658; К-8802; К-9002, 3 образца амфиболитов К-8933; К-11262; К-11345 (рис. 15). Число после буквы «К» соответствуют глубинам отбора образцов керна.

При сопоставлении разреза СГ-3 и опорного профиля установлено, что метаморфическая зональность пород в разрезе согласуется с таковой на поверхности в Печенгской структуре и в ее северно-восточном архейском обрамлении. При выборе возможных участков для отбора образцов-аналогов была использована совокупность геолого-структурных и петрографических критериев [Лобанов и др., 2002, Иванкина и др., 2004].

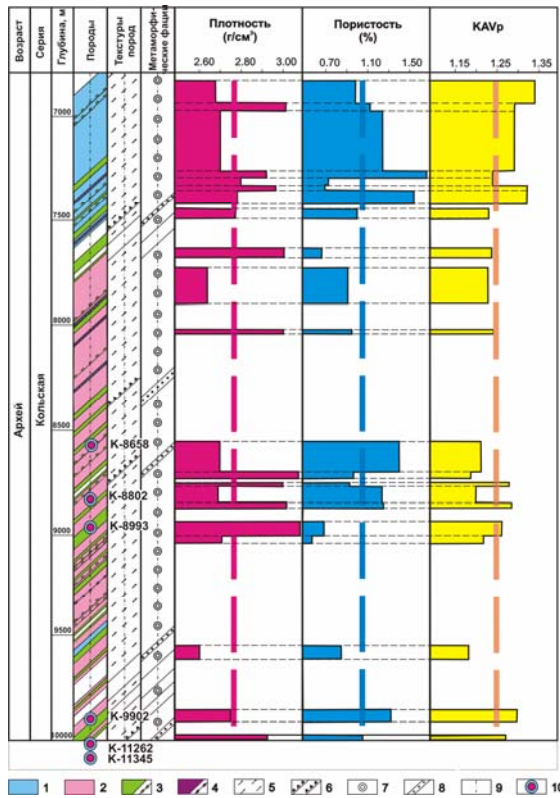


Рис. 15. Вариации плотности, пористости и KAVr архейских пород кольской серии в интервале 6835-10000 м разреза СГ-3 [Лобанов и др., 1999].

1 - биотит-плагиокзовые гнейсы с высокоглиноземистыми минералами, 2 – биотитовые и амфибол-биотитовые гнейсы, 3 - амфиболиты, 4 – метаультрабазиты, 5-6 - текстуры пород: 5 - кристаллически-сланцеватые, 6 - катакластические; 7-8 - фации метаморфизма: 7-амфиболитовая, 8 - зеленосланцевая регрессивная, 9 – ось скважины, 10 – места отбора опорных образцов керна и их номера (К-8658, К-8802, К-9002 – гнейсы, К-8933, К-11262, К-11345 – амфиболиты). Цветным пунктиром давы средние плотности, пористости и KAVr для пород кольской серии в интервале 6.8-12.2 км

Соответственно на поверхности был выбран участок Мустатунтури, находящийся в 45 км к северо-востоку от скважины СГ-3. Он сложен породами кольской серии, образующие куполовидные складки, метаморфизованными на уровне амфиболитовой фации и в минимальной

степени затронутыми катаклазом и регрессивными изменениями (рис. 15, см. рис. 6.б). Кольская серия здесь сложена биотит-плагиоклазовыми гнейсами и развитыми по ним мигматитами, среди которых выделяются горизонты биотит-амфибол-плагиоклазовых гнейсов и амфиболитов. Во внутренних частях этих купольных структур развиты поля мигматитов и плагиогранитов.

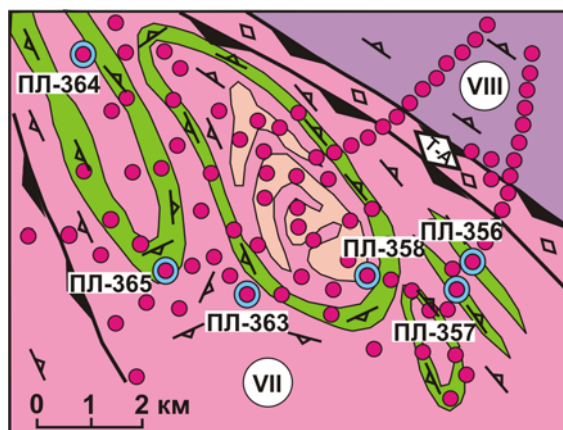


Рис. 16. Схематическая геологическая карта участка Мустатунтури [Лобанов и др., 2002].

1-2 - кольская серия: 1 – биотит-плагиоклазовые гнейсы, 2 – амфиболиты, амфибол-биотит-плагиоклазовые гнейсы; 3 – плагиограниты; 4 – гранитогнейсы, граниты, эндербиты; 5 - бластомилониты и бластокатаклазиты; 6 – разломы; 7 – элементы залегания пород; 8 – места отбора ориентированных образцов; 9 - места отбора и номера ориентированных образцов-аналогов (ПЛ-358, ПЛ-363, ПЛ-364 – гнейсы, ПЛ-356, ПЛ-357, ПЛ-365 – амфиболиты). VII – Лиинахамарский (Норвежско-Кольский) блок, VIII – Мурманский блок, Т-А – Титовско-Амбарный разлом.

Первоначально на участке Мустатунтури было отобрано 120 образцов архейских гнейсов,

амфиболитов и мигматитов для петрографического и петрофизического изучения, а затем из них выбраны только 11 образцов, наиболее близких по текстурным признакам и минеральному составу к упомянутым образцам керна из скважины СГ-3. В их числе образцы биотит-плагиоклазовых гнейсов (ПЛ-358, ПЛ-363, ПЛ-364), амфиболитов (ПЛ-356, ПЛ-357, ПЛ-365) и мигматитов (Лобанов и др., 1999, 2002, 2004).

Изученные группы пород являются наиболее представительными для архейской части разреза СГ-3, а минеральные ассоциации и составы сосуществующих минералов соответствуют температурным границам амфиболитовой фации. Петрографическое и минералогическое изучение опорных образцов гнейсов и амфиболитов из разреза скважины и их аналогов с поверхности показало, что они хорошо согласуются с данными о минеральных ассоциациях и составах метаморфических минералов в интервалах разреза скважины между глубинами отбора упомянутых образцов керна (см. рис. 15). Все изученные образцы обладают тонкосланцеватыми текстурами, лепидогранобластовыми структурами и обнаруживают признаки равновесных отношений слагающих их метаморфических минералов. Для амфиболитов характерна ассоциация высокоглиноземистой роговой обманки с плагиоклазом типа олигоклаз-андезина и андезина, для гнейсов – ассоциация биотита с более кислым плагиоклазом.

Микроструктурный анализ гнейсов и амфиболитов из скважины СГ-3 показал, что в вертикальном разрезе, параллельном оси керна и перпендикулярном сланцеватости, оптические оси кварца образуют пояс на периферии большого круга проекции (рис. 18).

		Биотитовые гнейсы			Амфиболиты				
Место отбора образцов	Номера образцов	Микроструктурные данные		Петрофизическая диаграмма V_p/KAV_p	Номера образцов	Микроструктурные данные			Петрофизическая диаграмма V_p/KAV_p
		Оптические оси кварца	Спайность биотита			Оптические оси кварца	Спайность биотита	Оси "с" роговой обманки	
Скважина СГ-3	К-9858				К-8933				
	К-9802				К-11262				
	К-9002				К-11345				
Поверхность	ПЛ-358				ПЛ-356				
	ПЛ-363				ПЛ-357				
	ПЛ-364				ПЛ-365				

Рис. 17. Микроструктурные диаграммы ориентировки минералов и петрофизические диаграммы V_p для образцов гнейсов и амфиболитов из разреза скважины СГ-3 и аналогов с поверхности [Лобанов и др., 2002]. Все диаграммы даны в проекции на вертикальную плоскость перпендикулярно сланцеватости. S – сланцеватость, KAV_p – коэффициент объемной анизотропии V_p .

Листочки биотита лежат преимущественно в плоскости сланцеватости, а призматические зерна роговой обманки вытянуты в горизонтальном направле-

нии, то есть параллельно оси R – тектонита по кварцу. В образцах архейских пород с поверхности зафиксированы те же текстуры и аналогичная ориентировка зерен кварца, биотита и роговой обманки.

На основании минеральных ассоциаций, составов сосуществующих равновесных минералов и с учетом экспериментальных данных метаморфизм пород и сопряженные деформации пород кольской серии в разрезе скважины СГ-3 происходили в интервале температур от 550 до 650⁰С при умеренных давлениях, не превышавших 0,3 – 0,4 ГПа [Глаголев и др., 1987]. В этих же границах находятся температуры метаморфизма амфиболитов из скважины и их образцов-аналогов с поверхности, вычисленные по плагиоклаз-роговообманковому геотермометру [Лобанов и др., 1999, 2002].

В ходе лабораторных исследований кроме упругих свойств определены плотность и открытая пористость пород. Вариации плотности, пористости и KAV_p в разрезе и их средние значения для всей архейской части, соответственно 2.76 г/см³, 1.08 % и 1.25 (см. рис. 15). Петрофизическое изучение опорных образцов архейских гнейсов и амфиболитов из разреза СГ-3 и их аналогов с поверхности участка Мустатунтури показало различие физических свойств этих пород (Таблица 4).

Таблица 4

Петрофизические свойства архейских гнейсов и амфиболитов из разреза СГ-3 и их аналогов с поверхности на участке Мустатунтури

Группы пород	Места отбора образцов	№№ образцов	Плотность, г/см ³	Пористость, %	A, %	V _p , км/с	V _s , км/с	KAV _p
Гнейсы	Скважина СГ-3	К-8658	2.72	1.07	0.91	5.48	2.61	1.25
		К-8802	2.68	1.23	0.85	5.52	2.68	1.25
		К-9002	2.74	1.07	0.91	5.72	2.88	1.22
		Среднее	2.71	1.12	0.89	5.57	2.72	1.24
	Поверхность	ПЛ-358	2.75	0.74	0.53	5.88	3.23	1.18
		ПЛ-363	2.75	0.63	0.27	5.83	3.13	1.15
		ПЛ-364	2.71	0.46	0.31	5.79	3.18	1.15
		Среднее	2.74	0.61	0.37	5.83	3.18	1.16
Амфиболиты	Скважина СГ-3	К-8933	3.09	0.96	0.74	6.32	3.32	1.26
		К-11262	3.06	0.94	0.61	6.22	3.34	1.24
		К-11345	3.03	1.00	0.8	6.34	3.26	1.18
		Среднее	3.06	0.97	0.72	6.29	3.31	1.23
	Поверхность	ПЛ-356	3.07	0.60	0.43	6.55	3.45	1.17
		ПЛ-357	3.02	0.69	0.51	6.37	3.42	1.14
		ПЛ-365	3.05	0.50	0.21	6.59	3.48	1.12
		Среднее	3.05	0.60	0.44	6.50	3.45	1.14

Средняя плотность гнейсов и амфиболитов из разреза СГ-3 всего на 1-2 % меньше, чем для образцов этих пород с поверхности, в то же время скорость V_p в тех же образцах значительно ниже (соответственно 5,57 против 5,83 км/с и 6,29 против 6,50 км/с). Средние величины открытой пористости образцов гнейсов из керна равны 1,12 %, а поверхностных аналогов - 0,61 %, для амфиболитов 0,97 и 0,60 %. Петрофизические диаграммы V_p ,

полученные для образцов из керна и с поверхности имеют одинаковый вид: максимальные значения V_p группируются в плоскости сланцеватости или вблизи нее, то есть подчинены текстурному узору исследованных пород (см. рис. 17). Значения $KA V_p$ явно выше в образцах керна, чем в образцах-аналогах с поверхности как гнейсов, так и амфиболитов (1,23 – 1,25 и 1,14 – 1,16 соответственно).

При проведении петрофизических исследований по архейской части разреза СГ-3 было отмечено, что аномально большие значения открытой пористости архейских пород (1,9 – 4,9%) на глубинах ниже 7 км обусловлены взаимодействием бурового снаряда с забоем скважины и разуплотнением керна при его подъеме на дневную поверхность (Кольская сверхглубокая..., 1984). Эти выводы были подтверждены результатами сравнения величин пористости пород на периферии и в центральных частях образцов керна [Кременецкий, Овчинников, 1986] и данными акустополярископических исследований [Горбацевич, Басалаев, 1993].

Данные о динамике водонасыщения опорных образцов гнейсов и амфиболитов и их аналогов с поверхности и результаты экспериментальных исследований при высоких температурах и давлениях позволяют оценить указанные явления на количественном уровне (см. таблица 4). Параметры пористости и условно-мгновенного водонасыщения (А) архейских пород получены методом свободного водонасыщения образцов пород при комнатной температуре и атмосферном давлении. Средние значения пористости для гнейсов из керна и на поверхности соответственно равны 1.13 % и 0.61 %. В амфиболитах зафиксированы такие же различия: 0.97 % и 0.60 %. При этом условно-мгновенное насыщение (А) в течение первого часа лабораторных определений для образцов керна имеет гораздо большие значения, чем для гнейсов и амфиболитов с поверхности - соответственно 0,89-0,72 % и 0,37-0,44 %. Следовательно, в образцах керна больше сквозных пор, поровых каналов правильных очертаний и более крупного диаметра, чем в образцах с поверхности. Можно полагать, что установленные различия в величинах открытой пористости и параметрах водонасыщения обусловлены как техногенным воздействием бурового инструмента, так и разуплотнением образцов керна при их извлечении с больших глубин на поверхность.

Детальное изучение пористости на образце керна К-8933 (амфиболит) проведенное А.В.Жариковым [2005] показало, что для центральной части она составляет 0.20%, средней – 0.30-0.40%, а для краевой – 1.25-2.00%, причем среднее значение пористости составляет 0.96% (Рис. 18). Эти данные показывают, что для образцов керна полученных даже при алмазном бурении, то есть с минимальным техногенным воздействием на породу, происходит такое резкое возрастание пористости и техногенной микротрещиноватости, и,

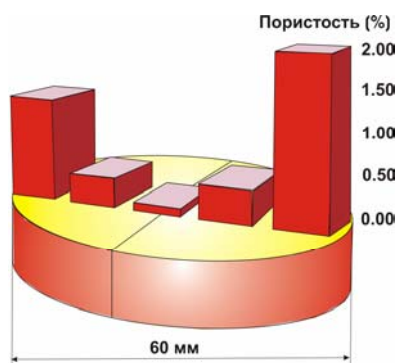


Рис. 18. Изменение пористости от центра к краевой части в образце амфиболита керна К-8933 из архейской части разреза СГ-3.

соответственно, уменьшение, упругих параметров.

Высокие значения KAV_r обусловлены также техногенным воздействием и декомпрессией керна при подъеме образца на поверхность и влиянием микротрещиноватости. Поэтому

необходимо учитывать при исследованиях, что даже для таких уникальных образцов что наиболее реальные значения петрофизических параметров, отражающие свойства пород на больших глубинах, могут быть получены только из центральной части керна.

Исследования геологического пространства и скоростей упругих волн в разрезе скважины СГ-3 привели ряд исследователей к выводу о наличии волноводов и флюидонасыщенных зон в архейском комплексе пород [Шаров, 1993; Беляков, Шлезингер, 1996; Николаев, 1999]. Изучение субгоризонтальных флюидонасыщенных рефлекторов было одной из главных целей международного проекта КОЛА-ОГТ 92 [Smythe et al., 1994]. Однако, данные о строении самого волновода были и остаются отрывочными и противоречивыми. В этом плане особенно показательны результаты сопоставления глубинного разреза МОВЗ с сейсмотомографическим разрезом (рис. 19).

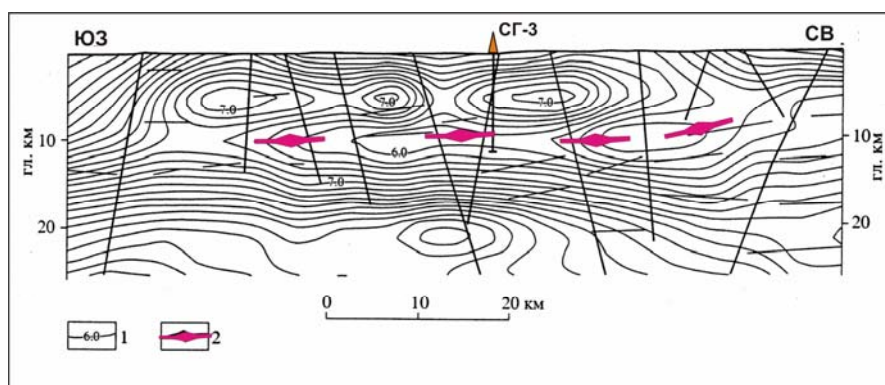


Рис. 19. Сейсмогеологический (скорость V_p) и сейсмический (МОВЗ-МРС) разрез через Печенгскую структуру [Казанский и др., 2002]. 1 – изолинии скоростей V_p в км/с (до глубины 25 км в изолиниях); 2 – ось волновода

Они свидетельствуют о существовании под Печенгской структурой почти горизонтальной зоны пониженных скоростей V_p , осевая поверхность которой пересечена скважиной СГ-3 на глубине около 10 км. Общая мощность зоны волновода составляет порядка 5 км. Верхняя граница волновода прослеживается прерывистой границей обменов, которая одновременно является и подошвой высокоскоростных линзовидных аномалий в верхней части коры. Нижняя граница волновода выражена более устойчивой границей обменов, которая на протяжении всего профиля контролирует положение кровли высокоскоростного слоя.

Петрофизические данные полученные для опорных образцов керна архейских пород и их

аналогов с поверхности доказывают, что на глубинах 8.5-11.5 км присутствуют гнейсы со средней скоростью V_p - 5.57 км/с и амфиболиты со средней скоростью V_p 6.29 км/с (см. таблицу 4). Именно они создают тот каркас волновода, в котором развиваются более поздние процессы [Лобанов и др., 2002, 2007]. В качестве возможных причин возникновения волновода можно исключить насыщенность разреза СГ-3 метабазами и степень мигматизации метаморфических пород, поскольку они не обнаруживает закономерных вариаций по глубине.

Самостоятельным структурным элементом зоны волновода в разрезе скважины СГ-3 являются зоны катаклаза и регрессивного метаморфизма. Существует предположение, что именно они могут являться флюидонасыщенными рефлекторами. Однако петрофизические данные показывают, что регрессивные изменения в гнейсах, амфиболитах и мигматитах приводят к уменьшению плотности, пористости, KAV_p и увеличению скоростей V_p и V_s (Таблица 5). Следовательно, их также нельзя рассматривать в качестве флюидонасыщенных

Таблица 5

Петрофизические параметры архейских метаморфических пород и диафторитов из разреза Кольской сверхглубокой скважины

Породы	Кол-во образцов	Плотность г/см ³	Пористость, %	V_p , км/с	V_s , км/с	KAV_p
Гнейсы	59	2.72	1.25	5.29	2.72	1.24
Диафториты по гнейсам	15	2.68	0.93	5.39	2.75	1.17
Амфиболиты	25	3.03	0.94	5.70	2.78	1.24
Диафториты по амфиболитам	11	2.81	0.96	5.80	3.03	1.17
Мигматиты по гнейсам	16	2.69	1.26	5.10	2.52	1.24
Диафториты по мигматитам	6	2.65	0.93	5.77	2.73	1.17

сейсмических границ (Казанский и др., 2002).

Остается еще одна альтернатива – еще более молодые зоны открытой трещиноватости, заполненные флюидами. В пользу этого предположения свидетельствует продолжение предполагаемого волновода в акваторию шельфа Баренцева моря и однотипная инверсия скоростей S- и P-волн на глубине 8-10 км там и здесь. Однако распознать такие флюидонасыщенные зоны открытой трещиноватости в скважине СГ-3 практически оказалось невозможным вследствие отбора керн в этом интервале в 2000 м способом магазинирования, интенсивного дискования керн архейских пород, который составляет из проходки за 258 рейсов бурения 53%, тогда как с прямой трубой пройдено 23.5%, и столько же составляют интервалы без отбора керн.

Для этой части разреза было получено 9604 образца керн, половина из которого претерпела дискование и не пригодна для исследования физических свойств. Отсутствие

представительного кернового материала и приборов, которые бы позволили отбирать на больших глубинах пробы флюидов и газов, поступающих из окружающих пород и трещинных зон приводят к предположению, что для зоны волновода характерно наличие открытой трещиноватости.

Выводы

1. Результаты структурно-петрологических и петрофизических исследований опорных образцов керна из архейской части разреза Кольской сверхглубокой скважины и их аналогов с поверхности имеют кардинальное значение для характеристики того каркаса, в котором в глубинных зонах континентальной земной коры развивались более поздние процессы, а также проливают свет на постоянно дискутируемый вопрос об аномально высокой пористости и аномально низких скоростях упругих волн на глубоких горизонтах скважины, имеющий прямое отношение к проблеме сейсмических границ и волноводов.

2. Параметры физическо-механических свойств опорных образцов керна и их аналогов с поверхности показывают, что на глубинах 8 – 12 км присутствуют гнейсы и амфиболиты с нормальными для таких пород плотностью (2.71-2.74 и 3.05-3.06 г/см³), скоростями V_p (5.57-5.83 и 6.29-6.50 км/с) и V_s (2.72-3.18 и 3.31-3.45 км/с) волн. Декомпрессия при подъеме образцов керна на поверхность приводит к их разуплотнению, в результате чего пористость может возрасти в два раза. Результаты этих исследований дают основание предполагать, что *in situ* архейские гнейсы и амфиболиты обладают пористостью порядка 0.5 %.

3. Установлено, что даже опорные образцы керна СГ-3 испытывавшие минимальное техногенное воздействие при бурении алмазным инструментом и релаксации при подъеме на поверхность, а также насыщенные водой, при измерениях, имеют гораздо большую величину KAV_p (1.25), чем их аналоги с поверхности (1.15), что не позволяет дать реальную характеристику анизотропии V_p в архейских породах на больших глубинах.

4. Установлено, что в интервале от 8 до 12 км в архейском комплексе формировались более поздние зоны регрессивного метаморфизма и трещиноватости. Эти зоны, насыщенные флюидами, 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор для структурно-петрофизического изучения раннепротерозойских месторождений мусковитовых пегматитов Чупино-Лоухского района и сульфидных медно-никелевых месторождений Печенгского рудного района в плане решения задач по Кольской сверхглубокой скважине обусловлен тем, что в первом районе пегматитоносные складчатые структуры, сложенные метаморфическими породами сформировались в течение карельской тектономагматической активизации Балтийского щита. В это же время в Печенгском районе сформировалась Печенгская структура, сложенная вулканогенно-осадочными породами, в которых залегают никеленосные интрузивы с медно-никелевыми месторождениями. На этапе последующей свекофеннской активизации происходили локализация жил мусковитовых пегматитов в складчатых структурах и преобразование первично-магматических медно-никелевых месторождений. Для обоих районов характерно формирование зон вторичного синметаморфического рассланцевания, которые сыграли главную роль в локализации пегматитовых жил и преобразовании сульфидных медно-никелевых руд.

Структурно-петрофизический анализ, разработанный ранее для изучения близповерхностных деформаций на колчеданных месторождениях Урала и Рудного Алтая, впервые был модернизирован и применен для изучения докембрийских метаморфических пород Балтийского щита, для которых характерна упругая анизотропия петроструктурно-деформационного типа. Определены основные петрофизические параметры для формализованного описания разреза Кольской сверхглубокой скважины, опорных профилей на поверхности, рудоносных структур на месторождениях. Это плотность как показатель литологического состава пород и коэффициент объемной анизотропии $KAVp$, как индикатор интенсивности синметаморфических тектонических деформаций.

Породы чупинской свиты отличаются от пород других свит беломорского комплекса в Чупино-Лоухском районе высокой гетерогенностью разреза по физико-механическим свойствам, а в разрезе самой свиты глиноземистым гнейсам продуктивных горизонтов присущи высокие значения плотности и $KAVp$. Формирование складчатых структур Чупино-Лоухского района происходило на раннепротерозойском (карельском) этапе тектоно-метаморфической активизации, а локализация пегматитовых жил на свекофенском этапе активизации Балтийского щита. Главную роль в размещении жил мусковитовых пегматитов играют зоны вторичного рассланцевания сложенные кианит-гранат-биотитовыми гнейсами, для которых присуща высокая анизотропия упругих параметров и локализуются только продольно-секущие пегматитовые жилы, а в более жестких гранат-биотитовых гнейсах поперечно-секущие. Это свидетельствует о том, что зоны вторичного рассланцевания являлись не только

рудоконтролирующими, но и рудоподводящими структурами.

Сопоставление петрофизических данных по разрезу СГ-3 и опорному профилю позволила найти путь формализации геологической задачи по изучению глубинного строения Печенгского рудного района, который коррелируется с геофизическими методами исследований в области гравиметрии и сейсмоки. Выделение формализованных элементов по плотности пород и $KAVp$ позволило осуществить перевод геологической информации в форму, доступную для компьютерной обработки, что позволило разработать интегральную геодинамическую модель глубинного строения Печенгского рудного района до глубины 15 км, которая характеризует Северное крыло Печенгской структуры как фрагмент вулканической кальдеры, осложненной согласными зонами расланцевания, а ее Южное крыло - как комбинацию чешуйчатой моноклинали с реоморфическими гранитными куполами.

Согласно интегральной геодинамической модели Печенгского рудного района, раннепротерозойские никеленосные габбро-верлитовые интрузии Печенгского рудного поля первоначально представляли собой силы и залежали субгоризонтально, а их локализация происходила в узком вертикальном диапазоне Продуктивной толщи и обусловлена гетерогенностью ее литологического разреза и высокой анизотропией по физико-механическим свойствам вулканогенно-осадочных пород. Важную роль в структуре рудного поля играют межпластовые тектонические зоны синметаморфического расланцевания, которые обусловили формирование чешуйчато-блоковых структур и привели к многоярусности в расположении рудных тел. Тектонические деформации и метаморфизм на свекофенском этапе активизации Балтийского щита не уничтожили первичные магматические руды, а, способствовали преобразованию первично-магматических и локализации богатых эпигенетических руд в межпластовых зонах синметаморфического расланцевания с высокой анизотропией Vp .

Структурно-петрологические и петрофизические исследования опорных образцов керна из архейской части разреза СГ-3 и их аналогов с поверхности имеют кардинальное значение для характеристики того каркаса, в котором в глубинных зонах континентальной земной коры развивались более поздние процессы, а также для зон аномально высокой пористости и низких скоростей упругих волн, имеющих прямое отношение к проблеме сейсмических границ и волноводов. На глубинах 8 – 12 км присутствуют гнейсы и амфиболиты с нормальными для таких пород плотностью (2,71-2,74 и 3,05-3,06 г/см³), скоростями Vp (5,57-5,83 и 6,29-6,50 км/с) и Vs (2,72-3,18 и 3,31-3,45 км/с). В интервале 8-12 км СГ-3 в архейском комплексе формировались зоны регрессивного метаморфизма и трещиноватости, но по петрофизическим параметрам они 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.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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. М.: Наука, 1987. С. 129-144.

Иванкина Т.И., Никитин А.Н., Замятина Н.В., Казанский В.И., **Лобанов К.В.**, Жариков А.В. Анизотропия архейских амфиболитов и гнейсов из разреза Кольской сверхглубокой скважины по данным нейтронографического текстурного анализа // Физика Земли. 2004, № 4. С. 74-87.

Исанина Э.В., Казанский В.И., Крупнова Н.А., **Лобанов К.В.**, Шаров Н.В. Глубинное строение Печенгского рудного района // Глубинное строение и геодинамика Фенноскандии, окраинных и внутриплатформенных транзитных зон. Материалы 8 Международной конференции, Петрозаводск, Кар НЦ РАН, 2002, С. 112-113.

Жариков А.В., **Лобанов К.В.**, Керн Х. Транспортные упругие свойства и анизотропия пород разреза Кольской скважины и с поверхности // Материалы 8-ой Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, ОИФЗ РАН, 2007, С. 45-47.

Звездов В.С., **Лобанов К.В.** Об индикатрисе скоростей продольных ультразвуковых волн в кристаллах искусственного кварца // Региональная геология некоторых районов СССР. Изд-во. МГУ, 1976, С. 34-37.

Казанский В.И., Боронихин В.А., Ванюшин В.А., Глаголев А.А., Кузнецов А.В., Кузнецов Ю.И., Ланев В.С., **Лобанов К.В.**, Прохоров К.В., Смирнов Ю.П., Старостин В.И. Соотношения между деформациями, метаморфизмом и петрофизическими свойствами пород в Печенгском рудном районе // Внутреннее строение рудоносных докембрийских разломов. М.: Наука. 1985. С. 6-46.

Казанский В.И., Исанина Э.В., **Лобанов К.В.**, Предовский А.А., Шаров Н.В. Геолого-геофизическая позиция, сейсмогеологические границы и металлогения Печенгского рудного района // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44. № 4. С. 276-286.

Казанский В.И., Кузнецов А.В., **Лобанов К.В.** Корреляция низкотемпературной гидротермальной минерализации в разрезе Кольской сверхглубокой скважины и Печенгском

побережье // Результаты изучения глубинного вещества и физических процессов в разрезе Кольской сверхглубокой скважины до глубины 12261 м. Апатиты. МУП «Полиграф». 2000, С. 48-51.

Казанский В.И., Кузнецов А.В., **Лобанов К.В.** Объемная геологическая модель Печенгского рудного района // Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы: Лапландско-Печенгский район. Апатиты. Изд-во КНЦ РАН, 1997, С. 157-180.

Казанский В.И., Кузнецов А.В., **Лобанов К.В.**, Минц М.В., Глазнев В.Н., Раевский А.Б., Кузнецов О.Л., Пиманова Н.Н., Черемисина Е.Н. Объемные модели и геодинамика Печенгского рудного района и сопредельных территорий // Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. Москва, Изд-во Технонефтегаз, 1998, С. 130-155.

Казанский В.И., Кузнецов О.Л., Кузнецов А.В., **Лобанов К.В.**, Пиманова Н.Н., Черемисина Е.Н. Разработка интегральной модели глубинного строения Печенгского рудного района // Геоинформатика. 1993. № 2. С. 3–14.

Казанский В.И., Кузнецов О.Л., Кузнецов А.В., **Лобанов К.В.**, Черемисина Е.Н. Глубинное строение и геодинамика Печенгского рудного района: опыт изучения Кольской сверхглубокой скважины // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36. № 6. С. 500-519.

Казанский В.И., **Лобанов К.В.** О границах и металлогении Печенгского рудного района // Геология рудных месторождений. 1996. № 1. С. 103-109.

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.

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, ИГЕМ РАН, 2004, Москва, С. 24-43.

Казанский В.И., **Лобанов К.В.**, Баянова Т.Б., Ветрин В.Р., Исанина Э.В. Объемная модель, геодинамика и металлогения Печенгского рудного района // Строение литосферы российской части Баренц-региона (ред. Н.В.Шаров, Ф.П.Митрофанов, М.Л.Верба, К.Гиллен). Петрозаводск, Изд-во КарНЦ РАН, 2005, С. 158-181.

Казанский В.И., **Лобанов К.В.**, Кузнецов А.В., Савицкий А.В., Морозов Ю.А., Шолпо В.Н., Шаров Н.В. Гидротермальная полиметаллическая минерализация переходной зоны «Суша–Море», Печенгский рудный район (Россия) // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41. № 3. С.195-213.

Казанский В.И., **Лобанов К.В.**, Исанина Э.В., Шаров Н.В. От разреза Кольской

сверхглубокой скважины к глубинной модели района бурения: корреляция структурно-петрологических, петрофизических и сейсмических данных // Российский геофизический журнал, 2006, № 41/42, С. 7-17.

Казанский В.И., **Лобанов К.В.**, Исанина Э.В., Шаров Н.В. Геологическая позиция Печенгского рудного района в переходной зоне Балтийский щит – шельф Баренцева моря // Материалы Всероссийской научной конференции «Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерагения северо-запада России. Петрозаводск, Кар НЦ РАН, 2007, С. 155-159.

Казанский В.И., **Лобанов К.В.**, Шаров Н.В. Кольская сверхглубокая скважина: перспективы новых открытий // Наука в России. Москва, Наука РАН 1998, № 5, С. 14-19.

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.

Казанский В.И., Черемисина Е.Н., **Лобанов К.В.**, Галуев В.И. Компьютерный анализ материалов Кольской сверхглубокой скважины и поверхности для моделирования строения глубинных зон континентальной земной коры // Тезисы докладов семинара «Использование результатов геофизических исследований на региональных профилях при геологическом изучении недр». Москва, Изд-во ВНИИгеосистем, Дубна, 1999, С. 86-89.

Керн Х., Попп Т., Горбачевич Ф.Ф., Жариков А.В., **Лобанов К.В.**, Смирнов Ю.П. Сейсмические свойства пород из Кольской сверхглубокой скважины и их гомологов на поверхности в условиях адекватных глубинным / Глубинное вещество: структура, свойства и состояние в геопространстве Кольской сверхглубокой скважины. Результаты исследований по проекту МПГК-408 ЮНЕСКО (Часть II). Вестник МГТУ, Мурманск. 2007. Т. 10, № 2, С. 263-266.

Лобанов К.В. Влияние упругих свойств пород на локализацию мусковитовых пегматитов в разрезе беломорского комплекса // Эндогенные рудные месторождения. М.: Наука, 1980, С. 156-171.

Лобанов К.В. Петрофизическая характеристика складчатых структур Чупино-Лоухского пегматитового района // Геология рудных месторождений, 1980, № 2, С. 94-98.

Лобанов К.В. Петрофизическая характеристика пегматитоносных складчатых структур Северной Карелии // Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума «Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии». Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1982, С. 141-142.

Лобанов К.В. Петрофизическая характеристика рудоносных структур Печенгского района // Тезисы докладов Всесоюзного семинара «Петрофизика рудных месторождений», Ленинград, НПО Рудгеофизика, 1990, С.100-102.

Лобанов К.В. Соотношения между тектоническими деформациями, метаморфизмом, петрофизическими свойствами горных пород и рудной минерализацией // Породы и минералы на больших глубинах и на земной поверхности: субпроекты. Апатиты. МУП «Полиграф». 1999, С. 47-50.

Лобанов К.В. Структурно-петрофизическая корреляция разреза Кольской сверхглубокой скважины и опорного профиля на поверхности // Тезисы докладов 2-ой Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». Москва, 1999, ИФЗ РАН, С. 34-35.

Лобанов К.В. Методика структурно-петрофизического исследования рудоносных докембрийских структур северо-восточной части Балтийского щита // Материалы 8-ой Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». Москва, 2007, ИФЗ РАН, С. 75-77.

Лобанов К.В., Глаголев А.А., Жариков А.В., Кузнецов А.В., Смирнов Ю.П. Сопоставление архейских пород в разрезе Кольской сверхглубокой скважины и на поверхности // Геоинформатика, 1999. № 4. С. 38-50.

Лобанов К.В., Зингер Т.Ф. Петрофизическая характеристика зон мигматизации в глиноземистых гнейсах и их связи с локализацией жил мусковитовых пегматитов Северной Карелии // Тезисы докладов 4-ой Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, ОИФЗ РАН, 2003, С. 25-26.

Лобанов К.В., Казанский В.И. Корреляция петрологических и петрофизических данных по зональности метаморфизма пород в разрезе СГ-3 // Тезисы докладов 6-ой Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, ОИФЗ РАН, 2005, С. 37-38.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Дистлер В.В., Кузнецов А.В., Чичеров М.В., Кочегура В.В. Сопоставление изотопно-геохронологических и палеомагнитных данных для пород тектонических блоков и медно-никелевых месторождений Печенгского рудного района // Материалы III Российской конференции по изотопной геохронологии «Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма», Москва, ИГЕМ РАН, ГЕОС, 2006, Т. 1, С. 442-447.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В., Жариков А.В. Сопоставление плотности, пористости и анизотропии упругих свойств метаморфических пород по разрезу Кольской сверхглубокой скважины и опорному профилю на поверхности // Тезисы докладов 3-ей Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». Москва, 2001, ИФЗ РАН, С. 24-26.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В., Жариков А.В. Сопоставление плотности,

пористости и анизотропии упругих свойств образцов архейских пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины и аналогов с поверхности // Тезисы докладов 4-ой Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, ОИФЗ РАН, 2003, С. 30-31.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В., Жариков А.В., Никитин А.Н., Иванкина Т.И., Замятина Н.В. Сопоставление архейских пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины и их аналогов с поверхности по результатам структурно-петрологических, петрофизических и нейтронографических исследований // Петрология. 2002, Т. 10. № 1. С. 30-45.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В., Старостин В.И. Структурно-петрофизическая характеристика протерозойских и архейских пород по разрезу Кольской сверхглубокой скважины и опорному профилю на поверхности // Тезисы докладов 4-ой Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, ОИФЗ РАН, 2003, С. 27-28.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В., Чичеров М.В. Структурно-петрофизические факторы преобразования медно-никелевых и свинцово-цинковых руд Печенгского рудного района // Петрология, геохимия, минералогия, геология месторождений полезных ископаемых, геоэкология. Материалы Всероссийской Научной конференции «Геология, Геохимия, Геофизика на рубеже XX и XXI веков», Москва, ИГЕМ РАН, ООО «Связь-Принт», 2002, Т. 2, С. 284-285.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В., Чичеров М.В. Структурно-петрофизическая характеристика согласных рудоносных зон синметаморфического расщепления Восточного рудного узла Печенгского рудного поля // Материалы 7-ой Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Борок, ОИФЗ РАН, 2006, С. 44-45.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В., Чичеров М.В., Губерман Д.М., Смирнов Ю.П., Хмелинский В.Н., Яковлев Ю.Н. Золотоносность пород южного крыла Печенгской структуры // Геология, генезис и вопросы освоения комплексных месторождений благородных металлов. Материалы Всероссийского Симпозиума. Москва ИГЕМ РАН, ООО «Связь-Принт», 2002, С. 183-185.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В. Принципы отбора образцов для сопоставления архейских пород в разрезе Кольской сверхглубокой скважины и на поверхности // Результаты изучения глубинного вещества и физических процессов в разрезе Кольской сверхглубокой скважины до глубины 12261 м. Апатиты. МУП "Полиграф". 2000, С. 107-109.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В. Сопоставление разреза Кольской сверхглубокой скважины и опорного профиля на поверхности по плотности и анизотропии упругих волн метаморфических пород // Труды Международной конференции «Глубинное строение литосферы и нетрадиционное использование недр Земли», Киев, Украина, 1996, С. 30-32.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В., Старостин В.И. Методика изучения объемной анизотропии упругих свойств по керну сверхглубоких скважин // Тезисы докладов Всесоюзного совещания по обмену опытом по обработке керна и геолого-геофизическим исследованиям в скважинах и околоскважинном пространстве сверхглубоких скважин. Ярославль, ПГО Недра, 1987, С. 86-88.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Кузнецов А.В., Соколов С.В. Структурно-петрофизическая характеристика Восточного рудного узла Печенги // Геология рудных месторождений, 1989, № 5, С. 18-33.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Старостин В.И. Структурно-петрофизический контроль мусковитовых пегматитов Чупино-Лоухского района (Северная Карелия) // Рудоносные структуры докембрия. М.: Наука. 1982. С. 137-165.

Лобанов К.В., Казанский В.И., Шаров Н.В. Петрофизическая характеристика пород зоны глубинного волновода в разрезе Кольской сверхглубокой скважины // Материалы 8-ой Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, ОИФЗ РАН, 2007, С. 78-79.

Лобанов К.В., Кузнецов А.В. Структурно-петрофизический анализ зоны сочленения Мурманского блока и кольской серии (район хребта Мустатунтури) // Тезисы докладов Всесоюзной школы «Структурный анализ кристаллических комплексов». Тбилиси, ГИН АН СССР, 1988, С. 81-83.

Лобанов К.В., Кузнецов А.В., Чичеров М.В. Структурно-петрофизические факторы преобразования медно-никелевых месторождений Печенгского рудного района // Тезисы докладов 3-ей Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». Москва, 2001, Изд-во ИФЗ РАН, С. 26-27.

Никитин А.Н., Иванкина Т.И., Замятина Н.В., Казанский В.И., **Лобанов К.В.**, Жариков А.В. Текстура как индикатор метаморфизма горных пород и деформационных процессов в континентальной земной коре // Труды V Международной конференции «Кристаллы: рост, свойства, реальная структура и применение». Александров, ВНИИСИМС, 2001, т. 2, С. 316-322.

Чижова И.А., **Лобанов К.В.** Сопоставление петрофизических диаграмм образцов пород Кольской сверхглубокой скважины и аналогов с поверхности на основе анализа изображений

// Петрология, геохимия, минералогия, геология месторождений полезных ископаемых, геоэкология. Материалы Всероссийской Научной конференции «Геология, Геохимия, Геофизика на рубеже XX и XXI веков», Москва, ИГЕМ РАН, ООО «Связь-Принт», 2002, Т. 2, С. 348-349.

Шуркин К.А., Зингер Т.Ф., Котов А.Б., Митрофанов Ф.П., Корсаков В.Н., **Лобанов К.В.** Петрогенетическая связь мигматитов и пегматитов Беломорья // Геология и генезис пегматитов. Л. Наука, 1983, С. 145-155.

Шуркин К.А., Корсаков В.Н., Зингер Т.Ф., Арутюнов Г.А., Котов А.Б., Кутявин Э.П., **Лобанов К.В.**, Малов Н.Д., Саморукова Л.М., Ярмач А.А. Комплексные поисковые критерии слюдоносных пегматитов Беломорья (петролого-геофизическая модель локализации месторождений мусковита). Л.: Наука, 1988, 152 с.

Chijova I., Lobanov K. Determination of features of the Constitution of Petrophysical Diagrams V_p for Rock Samples from Kola Superdeep Borehole on the Basis of logical-information Analysis // Proceedings of 10th Annual Conference of the IAMG'05 GIS and Spatial Analysis, 21-26 August 2005, Toronto, Canada, 2005, V. 2, pp. 1234-1241.

Kazansky V.I., Kochegura V.V., **Lobanov K.V.** Paleomagnetic characterization of tectonic block rocks in the Pechenga district // Abstract Intern. Symposium IGCP, 275, 257. Petrozavodsk, 1992. pp. 33-35.

Kazansky V.I., Kuznetsov O.L., **Lobanov K.V.**, Cheremisina E.N. Geodynamic models of the Pechenga ore district: experience of the Kola superdeep borehole // Abstracts International Symposium on Scientific Continental Drilling. Orlean, France, 1992.

Kazansky V.I., Kuznetsov O.L., **Lobanov K.V.**, Galdin N.E., Cheremisina E.N. Geodynamic model of the Pechenga ore region: experience of the Kola superdeep borehole // Abstract 29 International Geological Congress. Kuoto, Japan, V. 1, 1992.

Kazansky V.I., **Lobanov K.V.** Anorogenic granitoids and their setting in the Pechenga ore district // Abstracts Inter. Symposium IGCP, 315, Helsinki, Finland, 1996, pp. 46-47.

Kazansky V.I., **Lobanov K.V.** The Early Proterozoic crustal evolution and deep structure of the Pechenga ore district (northern Baltic Shield): evidence from the Kola Superdeep Borehole, petrological, petrophysical and seismic data. // Abstracts of the International Meeting CAC, Halifax, Canada, 2005 pp. 100-101.

Kazansky V., **Lobanov K.**, Kuznetsov O., Cheremisina E. New insight into the Pechenga ore district as related to the studies of the Kola super deep borehole // Abstracts 30 International Geological Congress, V. 1, Beijing, China, 1996. p. 100.

Kazansky V., **Lobanov K.**, Tarasov N., Tripol'sky A., Popov N., Sharov N. Geological setting of the Pechenga and Kirovograd polymetal ore districts as related to the heterogeneity of Earth crust

and M-discontinuity relief // Abstracts Understanding the genesis of ore deposits to meet the demands of the 21st century, 12th Quadrennial IAGOD symposium, 21-24 August 2006, Moscow, ООО «Информполиграф» p. 84.

Kern H., Popp T., Gorbatshevich F., Zharikov A., **Lobanov K.V.**, Smirnov Yu.P. Pressure and temperature dependence of Vp and Vs in rocks from the superdeep well and from surface analogues at Kola and the nature of velocity anisotropy // *Tectonophysics*, 2001, V. 338, pp. 113-134.

Lobanov K.V., Cheremisina E.N., Chicherov M.V., Chizhova I.A., Kazansky V.I., Kuznetsov A.V., Sharov N.V. Relationship among mineral deposits and 3D geodynamic model of deep structure of the Pechenga ore district (Baltic shield, Russia) // *Proceedings of 5 European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems*, Barcelona, Spain, 2006, V. I, pp. 232-234.

Lobanov K., Kazansky V. Correlation between Archean rocks from the Kola Superdeep Borehole and their surface analogues: on the data of structural-petrological and petrophysical studies // *The lithosphere: Continental lithosphere: nature, structure and deformation Abstracts of the 27th General Assembly of the European Geophysical Society*, Nice, France, 2002, p. 68.

Lobanov K., Kazansky V. The three-dimensional geodynamic model of the Pechenga ore district (Baltic shield, Russia) // *The lithosphere: Rock physics from laboratory to field scales. Abstracts of the 27th General Assembly of the European Geophysical Society*, Nice, France, 2002, p. 70

Lobanov K., Kazansky V., Chizhova I. 3D integration model of the Pechenga ore district on geological data of Kola superdeep borehole and surface (Baltic shield, Russia). // *Proceedings of 11 International Congress for Mathematical Geology Quantitative Geology from Multiple Sources*, 3-8 September, Liege, Belgium, 2006.

Lobanov K., Kazansky V., Kuznetsov A., Zharikov A. Integrated geodynamic model of the Pechenga ore district on the correlation geological, petrological and petrophysical data on Kola superdeep borehole section and reference profile on surface. // *Abstract 32 International Geological Congress*. Florence, Italy, V. 1, 2004, p. 763.

Lobanov K., Tchijova I. Computer analysis of structural-petrophysical data for geodynamic simulation on example of the Kola superdeep borehole (Baltic shield, Russia) // *Proceedings of 4 European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems*, Bologna, Italy, 2003, V. I, pp. 36-38.

Tchijova I., **Lobanov K.** Logic-Informative Analysis of Petrophysical Diagrams for Simulation of Precambrian Tectonic Structures of Baltic Shield (Pechenga Ore District) // *Proceedings of 9th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology*, 7-15 September 2003, Portsmouth, UK, 2003. pp. 487-492.

Tchijova I., **Lobanov K.** Taxonomy method in analysis of petrophysical diagrams of rock

samples from Precambrian tectonic structures // Abstract 32 International Geological Congress. Florence, Italy, V. 1, 2004, p. 101.

Trckova J., Zivor R., **Lobanov K.V.**, Kazansky V.I., Zharikov A.V., Smirnov Y.P. Comparison of elastic properties of the Kola Superdeep borehole core samples and their surface analogues obtained by static and dynamic measurements // Acta Montana. A Geotectonika, IRSM AS CR, Praha, 2002, 21 (125), p.p. 27-54.