

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



**Иванюк Григорий Юрьевич**

**МИНЕРАЛОГИЯ И ПЕТРОЛОГИЯ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛОСЧАТОЙ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ  
ФОРМАЦИИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА**

Специальности    25.00.05 - минералогия, кристаллография  
                          25.00.04 - петрология, вулканология

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург  
2004

Работа выполнена в Геологическом институте Кольского научного центра РАН

Научный консультант: доктор геолого-минералогических наук,  
профессор **Горяинов Павел Михайлович**

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,  
профессор **Булях Андрей Глебович**

доктор геолого-минералогических наук  
**Жданов Валерий Васильевич**

доктор геолого-минералогических наук,  
**Кременецкий Александр Александрович**

Ведущая организация: **Институт геологии и геохронологии  
докембрия РАН**

Защита состоится 22 апреля 2004 г. в 15 часов в ауд. 52 на заседании диссертационного совета Д 212.232.25 по защите диссертаций на соискание учёной степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете (199034, С.-Петербург, Университетская наб., 7/9, геологический факультет).

Электронная почта: [ivanyuk@geoksc.apatity.ru](mailto:ivanyuk@geoksc.apatity.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. А. М. Горького при Санкт-Петербургском государственном университете

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2004 г.

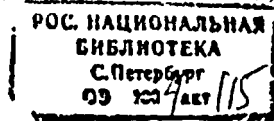
Учёный секретарь диссертационного совета  
доктор геолого-минералогических наук

А.Б.Кольцов

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность и цели исследования.** Вот уже на протяжении целого столетия породы полосчатой железорудной формации (ПЖФ) являются объектом пристального внимания учёных, поскольку они не только концентрируют в себе все основные проблемы докембрийской геологии, но и являются основным источником железа для мировой промышленности. Этому также способствовало широчайшее распространение ПЖФ на всех кристаллических щитах и очень высокий уровень их геолого-промышленного освоения, обеспечивающий исследователей высококачественным фактическим материалом, не сопоставимым с таковым для прочих метаморфических комплексов. Особенно активно дискуссия о происхождении железистых кварцитов велась в 50—60 годы, что было инициировано, прежде всего, работами Н.М.Страхова (1947) и Г.Джеймса (James, 1954) об экзогенно-осадочном генезисе кремнисто-железорудных толщ. Определенной альтернативой указанным воззрениям явились разработки Н.С.Шатского (1954), А.Гудвина (Goodwin, 1962), М.С.Точилина (1963; Тоцилин, Горяинов, 1964), Н.П.Хераскова (1964), В.Н.Гусельникова (1969); Л.Н.Формозовой (1973), П.М.Горяинова (1976; 1990 и др.), Р.К.Морриса (Morris, 1986 и др.) и др., в которых отстаивалась идея существенного вклада эндогенных (прежде всего, вулканогенного) факторов в процессы мобилизации и накопления железорудного вещества. Принципиально иная трактовка генезиса полосчатых железорудных формаций заложена в работах А.А.Полканова (1935) и его последователей (Жданов, Малкова, 1974; Барабанов, 1974; Трусова, 1976; Барабанов, 1977; Михайлов, 1979; 1983, 1989; Панков, Нечеухин, 1981; Панков, 1984; Жданов, 1993 и др.), которые считают эти породы продуктом глубокой метасоматической переработки различного рода основных и ультраосновных пород. Вместе с тем, большинство сторонников осадочного генезиса ПЖФ признают значительную роль метасоматических явлений в формировании современного облика месторождений железистых кварцитов, а учёные, отстаивающие метасоматический генезис этих формаций, вынуждены говорить о литологическом и стратиграфическом контроле метасоматитов, наследовании метасоматическими текстурами метаморфических текстур и т. п.

В конце 1970-х годов интерес к ПЖФ стал быстро затухать по всему миру, число публикаций резко сократилось, новые данные о составе и строении большинства железорудных месторождений-гигантов ничего нового для решения проблемы их генезиса не давали, и в конце концов геологическое сообщество в большинстве своём признало вулканогенно-осадочный генезис пород железорудной формации, примитивность и постоянство их химического и минерального состава. Дискуссия о



происхождении высокометаморфизованных железистых кварцитов Кольского полуострова к этому времени также окончательно зашла в тупик, но и по несколько иной причине. Её суть П. М. Горяинов выразил следующим образом: "... чем большее число подсистем рассматриваемой системы ("железородная формация") попадало в наше поле зрения, тем дальше от согласования представала причинно-генетическая схема. Всё отчётливее вырисовывалась альтернатива: либо пренебречь некоторыми, хотя и согласованными между собой свойствами ради того, чтобы все остальные объединить в рамках общепринятых подходов, либо оставить всё как есть, но отказаться от попыток "втиснуть" их, все самые разнообразные свойства как части сложноорганизованного, упорядоченного сообщества, в детерминистские генетические конструкции (например, метаморфическую осадочно-вулканогенную). То есть отдать предпочтение структурно-организационным аспектам исследования, а не традиционным историческим" (Горяинов и др., 1990, стр. 150).

В рамках этого подхода были изучены геологическое строение отдельных месторождений и всего ареала железородной формации (Горяинов и др., 1987; Горяинов, Балабонин, 1988; Горяинов, 1989; Goryainov, 1990; Горяинов и др., 1987; 1990; Никитин, Иванюк, 1991; Иванюкидр., 1996; Goryainov et al., 1997 и др.), особенности минералогии железистых кварцитов (Иванюк, 1991; Иванюк и др., 1994; 1999; 2001; Балабонин, Иванюк, 1995, Базай, Иванюк, 1997; Голиков и др., 1999), текстурные особенности железистых кварцитов (Иванюк, Никитин, 1991; Базай, Иванюк, 1995, 1996; Базай и др., 1999; Егоров, Иванюк, 1996; Иванюк, 1997; Горяинов и др., 1997; Goryainov et al., 1997 и др.) и сделаны некоторые общие выводы об эволюции железородных систем докембрия Кольского полуострова (Горяинов, 1989; 1995; 1998; Горяинов и др., 1992; 1997 Иванюк и др., 1996; Базай, Иванюк, 1996; Goryainov, Ivanjuk, 1998; Горяинов, Иванюк 2001; 2002; 2003). Этими работами удалось показать, что за кажущейся примитивностью геохимического и минерального спектра железных руд — а это вошло во многие сводки и справочные источники — кроется огромная геолого-генетическая и технологическая информация. Выявленная связь состава и свойств минералов со строением железородных месторождений сделала актуальным обобщение всей минералогической и петрографической информации о железных рудах. Такое обобщение приобретает особое значение при переориентировании на новые технологии (например, для производства магнетитового концентрата для порошковой металлургии) и нетрадиционные виды сопутствующих полезных ископаемых, в частности - золота.

Соответственно, в рамках решения традиционной **проблемы** генезиса месторождений полосчатой железородной формации, включающей в качестве составляющих проблему строения замкнутых железородных

поясов и отдельных месторождений, проблему аутигенной зональности рудных тел и всей формации, проблему полосчатости во всех её аспектах, были определены следующие задачи: 1) изучение минералогии ПЖФ с упором на промышленно ценные и потенциально ценные минералы: магнетит, гематит, золото; 2) изучение минеральной и геохимической зональности рудных тел и всей толщи ПЖФ; 3) обобщение всех имеющихся данных по геологии, петрологии, минералогии и геохимии Кольской ПЖФ на основе современных представлений о строении и свойствах сложных систем с использованием фрактальной геометрии, теорий диссипативных структур и самоорганизованной критичности; 4) классификация месторождений и рудопроявлений ПЖФ на количественной основе и разработка простых критериев прогноза их запасов. Решение этих задач определило структуру работы.

Объём и структура работы. В первой главе представлены новые или заново переосмысленные данные о геологическом строении района развития ПЖФ, основных железорудных месторождений Кольского полуострова, даны сведения об их возрасте и *P-T*-условиях образования. Это потребовало, помимо прочего, составления новых карт, геологических разрезов и схем большинства месторождений и рудопроявлений ПЖФ, выполнения термодинамических расчётов, дополнительных геохронологических исследований. В ходе этих работ был установлен единый стиль строения всех месторождений, основным элементом которого являются фрактальные ансамбли линзовидных тел железистых кварцитов, характеризующихся воспроизводимой аутигенной и текстурной зональностью.

Во второй главе приведена петрографическая характеристика основных типов пород и руд ПЖФ, включая метасоматиты и гидротермалиты, для чего нами были проведены масштабные работы по диагностике породообразующих и аксессуарных минералов посредством микрозондового и рентгенофазового анализа, проведена качественная и количественная оценка минерального состава пород и руд всех месторождений и рудопроявлений, охарактеризованных в первой главе.

В третьей, основной по объёму и фактической нагрузке главе приведены сведения о распространённости, составе и свойствах 113 минеральных видов, достоверно установленных на месторождениях ПЖФ Кольского полуострова, сопровождаемые 700 оригинальными микрозондовыми анализами. Особенно детально рассмотрены промышленно ценные минералы: магнетит, гематит и самородное золото, а также породообразующие силикаты всех пород ПЖФ.

Четвертая глава, отражающая результаты изучения геохимии ПЖФ, состоит из двух разделов, посвященных, соответственно, петрогенным элементам и микропримесям. В начале каждого из разделов приведены сведения о распределении отдельных элементов по разрезу ПЖФ, их

парагенстических взаимоотношениях с другими элементами, характере вариационных кривых и т.д., в конце - обобщение полученных данных на основании многомерного статистического анализа средних содержаний элементов в породах ПЖФ.

В пятой главе рассматриваются вопросы образования полосчатости железистых кварцитов, текстурной и минерально-геохимической зональности рудных тел и всей толщи пород ПЖФ. Полосчатость железистых кварцитов изучена комплексом методов, включая методы фрактальной геометрии, анализ Фурье, методы символической динамики, метод фазовых портретов, процедуру Грассбергера-Прокаччия и другие методы анализа временных (пространственных) рядов. Показано, что в большей части образцов её статистические характеристики соответствуют фликкер-шуму, характерному для детерминированно-хаотических систем с перемежаемостью ламинарных и турбулентных режимов и систем с сам-организованной критичностью (СОК). На примере Печегубского месторождения рассмотрены закономерности формирования много-порядковой складчатости в осевых зонах рудных тел, проведена аналогия между морфологией складчатых зон и строением турбулентных потоков жидкости, установлена зависимость самых разнообразных структурных и вещественных характеристик железистых кварцитов от интенсивности складчатости. Сходство морфологии ПЖФ самых разных возрастов и положения с перколяционными кластерами, вполне понятное в свете современных теоретических и экспериментальных работ по проблемам фрагментации и трещинообразования, предопределило детальный анализ геологических перколяционных зон, сделанный с привлечением большого объёма новых данных по геологии, геохимии и минералогии апатитовых месторождений Хибинского щелочного комплекса (Горяинов и др., 1998; Иванюкидр., 1996; 2002; Яковенчукидр., 1996; 1997; 1999 и др.).

Работа объёмом 50 авторских листов включает 64 таблицы, 270 рисунков и список цитированной литературы из 425 наименований. В качестве основных генетических выводов проведённых исследований выдвинуты следующие защищаемые положения:

1. Комплекс месторождений железистых кварцитов Кольского полуострова полностью сформировался за период 2.8-2.5 млрд. лет, в течение которого температура процессов минералообразования понизилась с 600-900 до 100 С. Степенная зависимость числа месторождений от их запасов (с коэффициентом корреляции 0.9996) свидетельствует о едином рудогенерирующем процессе для всех месторождений и, как следствие, о бесперспективности поиска на Кольском полуострове новых крупных месторождений железистых кварцитов.
2. Месторождения железистых кварцитов Кольского полуострова характеризуются необычно широким для архейских метаморфических

комплексов разнообразием минеральных видов (114), связанным в первую очередь с различными метасоматическими породами и гидротермальными жилами (в том числе, с золотосеребряным урудсением), сформировавшимися в контактовой зоне железистых кварцитов и биотитовых гнейсов за счёт привноса Mg, Ca, K, Na и Si.

3. Буферные свойства железистых кварцитов обуславливают симметричную всеществую зональность рудных тел, выраженную рядом последовательных популяций, каждая из которых включает одну из пород главной серии (гематито-магнетитовые, магнетитовые, сульфидно-магнетитовые железистые кварциты, биотитовые гнейсы и др.), связанные с ней метасоматиты (магнетито-диопсидовые породы, магнетито-карбонатные породы, эпидозиты, нодулярные гнейсы и др.) и гидротермальные жилы.
4. Переход от прямополосчатых железистых кварцитов внешних зон рудных тел к плейчатых железистым кварцитам осевой зоны осуществляется через зону перемежаемости прямополосчатых и плейчатых пород. При этом закономерно и взаимосогласованно изменяются топологические свойства полосчатости железистых кварцитов, их микроструктура, минеральный и химический состав, физические свойства и состав породообразующих минералов.

Научная новизна. Приведены новые сведения о геологическом строении, петрографии, минералогии и геохимии большинства месторождений и некоторых рудопроявлений железистых кварцитов Кольского полуострова. Детально изучено 113 минеральных видов, установленных автором на месторождениях железорудной формации, в том числе более 70 впервые для этих комплексов. Впервые дана характеристика золотосеребряной минерализации, связанной с жильным комплексом околорудных кислых гнейсов. Впервые комплексом методов (анализ Фурье, методы фрактальной геометрии, символической динамики, теории самоорганизации и др.) изучены статистические свойства полосчатости пород железорудной формации. На основании анализа минерально-геохимической и текстурной зональности толщ пород формации предложена новая модель генезиса месторождений железистых кварцитов, включающая процессы формирования продуктивной зоны фумарольными источниками; её метаморфизм и образование характерной зональности рудных тел; складкообразование и формирование полосчатости; образование брекчий, внедрение жил гранитных пегматитов и даек долеритов, образование различных метасоматитов и гидротермальных жил.

Фактический материал и методы исследований. Диссертация в основном опирается на полученные лично автором теоретические и практические результаты. В её основу положены материалы геологических, петрографических, геохимических, минералогических и технологических

исследований автора за более чем пятнадцатилетний период работы на Кольском полуострове. Геологические исследования включали широкий комплекс методов, в том числе картирование, структурные, геофизические и геохронологические исследования и др. В ходе работ на месторождениях и рудопроявлениях Кольского полуострова автором собраны значительные по объему коллекционные материалы (более 1000 образцов), результаты лабораторного петрографического, минералогического и геохимического изучения которых легли в основу работы. Автор непосредственно участвовал во всех этих работах, включая разработки нового метода изучения магнитных свойств минералов при помощи жидких кристаллов, статистический анализ полученных данных, в том числе, при помощи оригинальных компьютерных программ. Для сравнения привлекаются материалы автора по геологии и минералогии Хибинского и Ковдорского массивов.

Практическая значимость работы определяется возможностью прямого использования её результатов для оптимизации добычи и обогащения железистых кварцитов с целью получения магнетитового, гематитового и золотосеребряного (супер-)концентратов. Данные об аутигенной зональности рудных тел и всей толщи пород ПЖФ могут быть использованы для прогноза оруденения на сопредельных территориях Балтийского щита и в других регионах мира. Большое значение имеют ограничения на возможный размер месторождений и качество руд, вытекающие из установленной автором принадлежности ПЖФ к системам с самоорганизованной критичностью. Разработанный в ходе исследований метод изучения поверхности магнитных минералов при помощи жидких кристаллов нашёл применение в минералогии, материаловедении и электронике.

Апробация работы и публикации. Результаты настоящих исследований обсуждались на II Всесоюзном семинаре "Оптика жидких кристаллов" (Красноярск, 1990); VIII Всесоюзном совещании по физическим свойствам горных пород при высоких температурах и давлениях (Уфа, 1990); IV Всесоюзном съезде по геомагнетизму (Владимир, 1991); II Всесоюзном совещании "Теория минералогии" (Сыктывкар, 1991); международном семинаре по оптике жидких кристаллов "Белые ночи" (Ленинград-Валаам, 1991); на Летней европейской конференции по жидким кристаллам (Вильнюс, 1991); I-IV международных совещаниях по геологической синергетике (Алма-Ата, 1991, 1995; Иркутск, 1992; Апатиты, 1997); V Всероссийской школе "Структурные исследования кристаллических образований" (С.-Петербург, 1994); XVI Съезде ММА (Пиза, 1994); IX совещании МАЕГ (С.-Петербург, 1995); XXX международном геологическом конгрессе (Пекин, 1996); международном совещании "Закономерности эволюции земной коры" (С.-Петербург, 1996); IV международном симпозиуме "Фракталы и динамические системы в науках о Земле" (Стара-Лесна, 1997); IV совещании SGA (Турку, 1997); международной



конференции "Геология и XXI век" (Москва, 1997); Всероссийском совещании "Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма" (Москва, 1999); III-м Всероссийском совещании "Общие вопросы расчленения докембрия" (Апатиты, 2000); международной конференции "Геология и полезные ископаемые Балтийского щита" (Апатиты, 2002) и др. По вопросам, прямо или косвенно затрагиваемым в диссертации, опубликовано 4 монографии, 38 статей, 55 тезисов докладов; 6 научных и научно-производственных отчётов.

Благодарности. Исследования проводились в соответствии с научными программами лабораторий "Метаморфогенного рудообразования" и "Самоорганизации минеральных систем" Геологического института Кольского НЦ РАН в сотрудничестве с А.В.Базай, Н.Л.Балабониным, П.М.Горяиновым, Н.Г.Коноплёвой; И.В.Никитиным, А.П.Николаевым, Я.А.Пахомовским, А.М.Перликовым, П.В.Припачкиным и В.Н.Яковенчуком. На протяжении многих лет мы постоянно сотрудничали с группой геологов ОАО "ОЛКОН", возглавляемой П. Н. Голиковым. Исследования электрических свойств железистых кварцитов проводились совместно С.С.Крыловым и В.А.Любичем (Физический факультет С.-Петербургского университета), определение *P-T* параметров условий образования пород ПЖФ - с П.Я.Азимовым и Д.В.Доливо-Добровольским (ИГГД РАН), анализ геометрии сейсмогеологических профилей ОГТ — с Н.В.Шаровым (ГИ Карельского НЦ РАН), изучение микроморфологии породообразующих минералов железистых кварцитов - с Н.В.Сорохтиной, микроструктурной организации железистых кварцитов - с Д.Г.Егоровым, термических свойств магнетита — с В.И.Скибой, оптических — с Ю.Н.Нерадовским, магнитных — с В.А.Тюреновым и В.П.Мирошниковым (все из Геологического института КНЦ РАН). Метод исследования минералов при помощи нематических жидких кристаллов разрабатывался совместно с М.Г.Томилиным (ГОИ им. С. И. Вавилова). Микронзондовые анализы минералов выполнены Я.А.Пахомовским, Е.Э.Савченко и С.А.Рсженовой; рентгеновские исследования проводились А.Н.Богдановой и Ю.П.Меньшиковым; U-Pb возраст циркона и титанита из амфиболитов Урагубского месторождения определён Т.Б.Баяновой (Геологический институт КНЦ РАН), изучение изотопного состава Sr и Nd и концентрации Rb, Sr, Sm и Nd в магнетито-карбонатных породах ПЖФ - Ю.Д.Пушкарёвым и В.М.Саватенковым (ИГГД РАН). Ряд программ для компьютерной обработки данных разработан В.Э.Асмингом (Кольский региональный сейсмоцентр) и А.М.Перликовым (ИППЭС КНЦ РАН). Фотографии шлифов сделаны при содействии А.Н.Кулакова (Горный институт КНЦ РАН). По вопросам статистического анализа данных я неоднократно получал исчерпывающие консультации со стороны Ю.В.Федоренко и А.М.Перликова (ИППЭС КНЦ РАН). Большую пользу

для интерпретации результатов изучения магнетита принесли беседы с Л.Г.Булахом (С.-Петербургский государственный университет) и Н.Г.Стениной (ИГ СО РАН). Отдельные промежуточные этапы работ поддерживались грантами РФФИ, завершающий - грантами Комитета природных ресурсов по Мурманской области и Межрегионального центра по геологической картографии. На протяжении многих лет наши исследования процессов самоорганизации геологических систем встречали всемерную поддержку со стороны И.Р.Пригожина (Бельгия) и Г.Хакена (Германия). На заключительном этапе работы с рукописью большую пользу принесли исправления, комментарии и советы Ю.Л.Войтеховского, А.В.Волошина, В.Н.Глазнева, Я.А.Пахомовского, В.П.Петрова (Геологический институт КНЦ РАН) и Д.В.Доливо-Добровольского (ИГГД РАН). Всем названным лицам и организациям я выражаю самую искреннюю признательность. Особую благодарность я приношу моему учителю П.М.Горяинову, во многом благодаря которому и смогла появиться настоящая работа.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

(по защищаемым положениям)

I. Комплекс месторождений железистых кварцитов Кольского полуострова полностью сформировался за период 2.8-2.5 млрд. лет, в течение которого температура процессов минералообразования понизилась с 600-900 до **100** \*С. Степенная зависимость числа месторождений от их запасов (с коэффициентом корреляции 0.9996) свидетельствует о едином рудогенерирующем процессе для всех месторождений и, как следствие, о бесперспективности поиска на Кольском полуострове новых крупных месторождений железистых кварцитов.

Со времени открытия Кольских железистых кварцитов в начале 30-х годов прошлого века эти породы являются объектом пристального внимания геологов самых разных организаций и специализации. Их стараниями здесь открыто более 400 рудопроявлений и месторождений ПЖФ. Практически все они сосредоточены в пределах Кольско-Норвежского мегаблока, а все более или менее крупные - в пределах Приимандровской структуры (рис. 1). Повсюду породы полосчатой железорудной формации образуют связную сеть между линзами тоналитов самого разного размера, а рудные тела всегда маркируют осевые зоны таких железорудных поясов (Goryainov, Ivanjuk, 1998; Горяинов, Иванюк, 2001). По соотношению железистых кварцитов, гнейсов и амфиболитов выделяется два типа железорудной формации: лептитовый и амфиболитовый. Все более или менее крупные месторождения относятся к лептитовому типу. Для них характерен непосредственный контакт рудных тел с глинозёмистыми гнейсами, а амфиболиты оттеснены к контакту толщи пород ПЖФ с

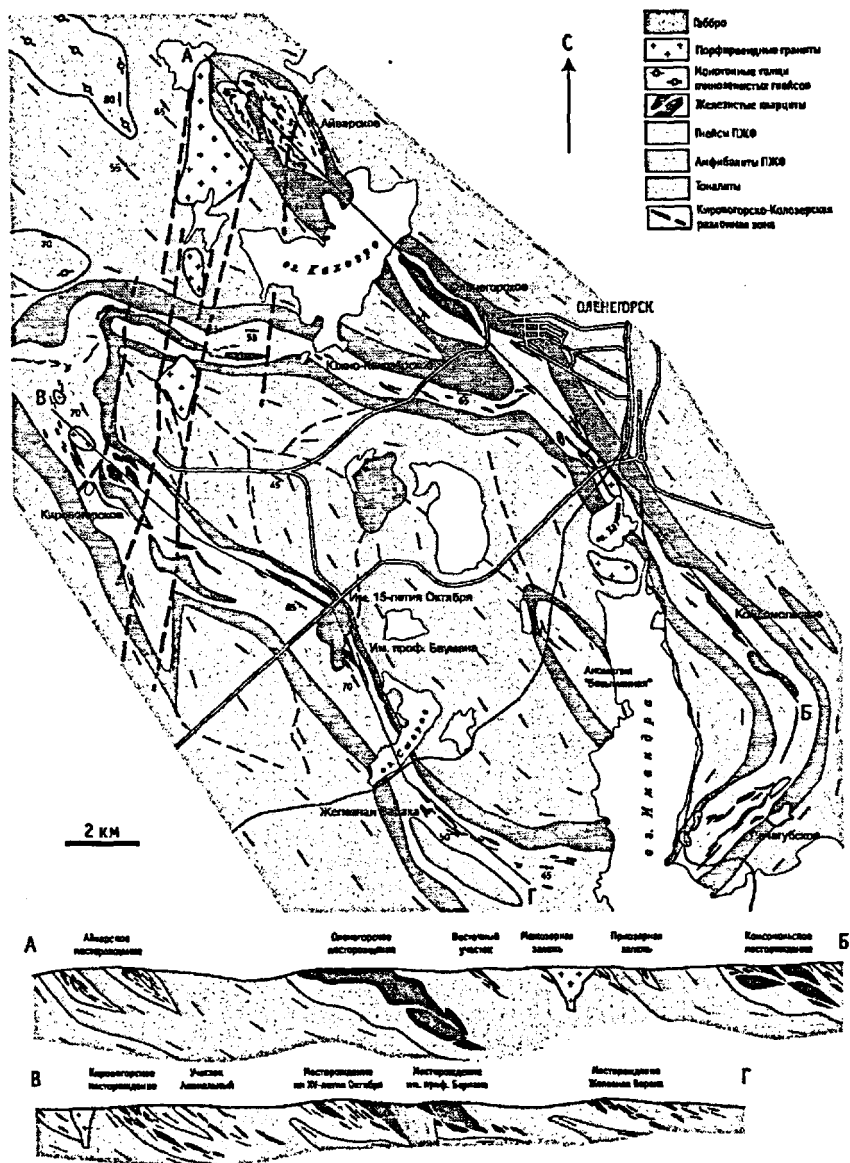


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Главной Примандровской структуры

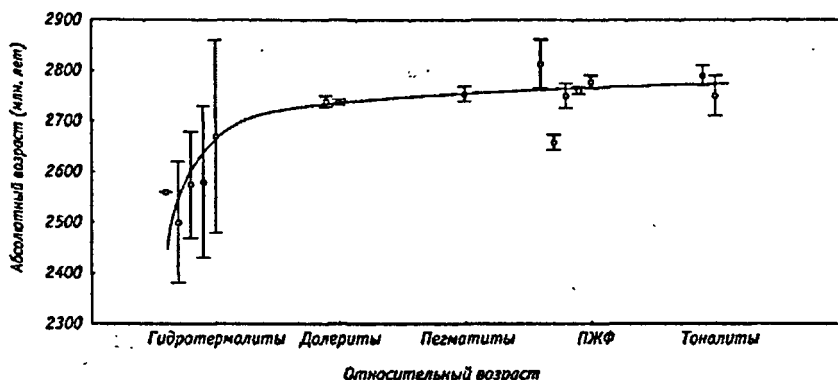


Рис. 2. Совмещённый график радиологических определений возраста тоналитов, пород ПЖФ, интрузивных тел и гидротермальных жил (Жиров и др., 1972; Пушкарёв и др., 1979; Лобач-Жученко и др., 1986; Пушкарёв, 1990; Баянова, Егоров, 1999; неопубликованные данные Ю.А.Балашова и Т.Б.Баяновой).

тоналитами. Большинство мелких месторождений относится к амфиболитовому типу. В этом случае железистые кварциты слагают амфиболито-железородные линзы в толще глинозёмистых гнейсов. Но в обоих случаях контакты между всеми породами ПЖФ согласные и резкие (Goryainov et al., 1997; Иванюк др., 1996; 1999).

То же самое, как это ни удивительно, можно сказать о контакте пород железородной формации с тоналитами. Несмотря на присутствие в зоне контакта участков брекчирования, рассланцевания, биотитизации и хлоритизации пород, контакты между обоими комплексами всегда конформные, и у нас нет никаких геологических оснований для заключения об их разновозрастности (Горяинов, Иванюк, 2001). Абсолютный возраст тоналитов и пород железородной формации также совпадает. В пределах толщи пород железородной формации фиксируется множество явно разновозрастных событий: железистые кварциты и гнейсы пронизаны штокверками гранитных пегматитов и гидротермальных жил, и те, и другие пересекаются многочисленными дайками долеритов. Однако на шкале абсолютного времени возраст большинства из этих событий укладывается в сравнительно узкий интервал 2.7—2.8 млрд. лет, и только гидротермальные жилы оказались моложе на 200 млн. лет (Горяинов, Иванюк, 2001): рис. 2.

Гидротермальные жилы преимущественно концентрируются в двуслюдяных и нодулярных гнейсах, маркирующих контакт с железистыми кварцитами, причём здесь их места больше чем, скажем, в Хибинском или Ковдорском массивах. Как правило, это сильно уплощённые линзовидные сегрегации, "обтекаемые" полосчатостью вмещающих пород. Центральные пустоты инкрустированы кристаллами пумпеллиита-Са, шабазита-Са,

гейландита-Са, стильбита-Са, таумасита и других минералов, температура образования которых не могла быть выше 150-200 °С (Иванюк и др., 2001). Иными словами, за время с 2.8 до 2.5 млрд. лет формирования месторождений ПЖФ было полностью завершено, температура процессов минералообразования упала с 600-900 °С до 200-100 °С, после чего всё было законсервировано и благополучно сохранилось до наших дней.

Месторождения железистых кварцитов могут быть представлены единой крупной линзой этих пород, но чаще — множеством линз самого разного размера, объединённых в одну или несколько гломер или полос (рис. 3).

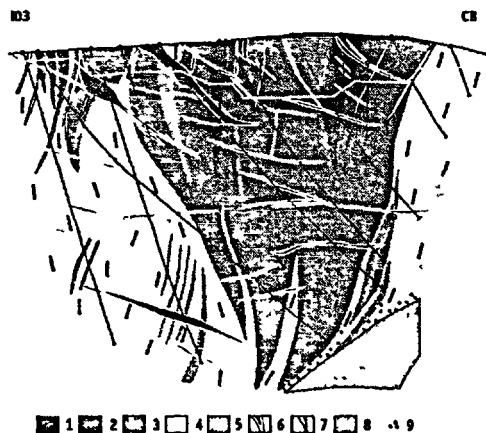
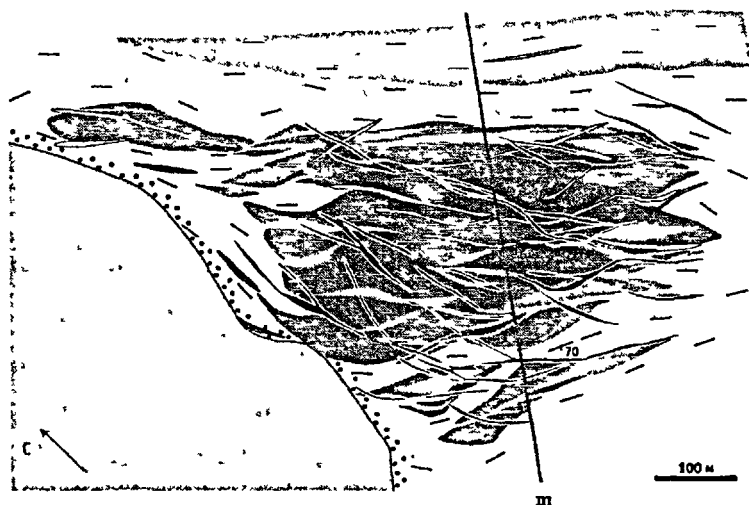


Рис 3 Схема геологического строения месторождения им проф Баумана и разрез по профилю III 1 – гематито магнетитовые кварциты, 2 – магнетитовые кварциты, 3 – сульфидно-магнетитовые кварциты, 4 – биотитовые и глиноземистые гнейсы, 5 – роговообманковые и ждритовые амфиболиты, 6 – гранитные пегматиты, 7 – долериты, 8 – массив габбро, 9 – зона ороговикования

Мелкие линзы железистых кварцитов сложены только прямополосчатыми породами, а начиная с уровня мощности порядка 10 м в приповерхностных участках их осевых зон появляется плейчатость. В приповерхностной части большинства месторождений фиксируются характерные надвиги, придающие рудным телам форму штормовой волны. К приповерхностным же частям месторождений приурочены скопления жил гранитных пегматитов и долеритов, количество которых в глубину и к периферии уменьшается по экспоненте. Здесь же развиты штокверковые зоны брекчий, обычно сопровождаемые жилами так называемых псевдотрахилитов – расплавных пород тектонического происхождения, в стекловатой основной ткани которых присутствуют округлые фрагменты кварца и, реже, других минералов вмещающих пород. Нередко зоны интенсивной плейчатости при приближении к поверхности непосредственно переходят в зоны брекчирования. Встречаемость фрагментов брекчий уменьшается с увеличением их объёма по степенному закону с показателем 0.8-0.9, так что эти брекчии в широком интервале масштабов представляют собой фракталы размерности 2.5-2.8. Их формирование возможно только при резком снятии напряжений. Таким образом, имеются веские основания считать, что современный облик месторождений ПЖФ сформировался в результате дилатансии при их быстром тектоническом подъёме к поверхности, подобно тому, как это происходило и происходит в Хибинском щелочном массиве (Горяинов, 1983; Горяинов и др., 1998; Горяинов, Иванюк, 2001).

На всех месторождениях, а особенно ярко на крупных, проявлена так называемая аутогенная зональность рудных тел (см. рис. 3), когда гематито-магнетитовые железистые кварциты концентрируются в осевой зоне вблизи поверхности, затем идут магнетитовые железистые кварциты, а на периферии и, особенно, на глубине – сульфидно-магнетитовые кварциты. В результате, идеальная зональность рудного тела выглядит следующим образом (Иванюк и др., 1999; 2001):

- гематито-магнетитовые железистые кварциты с тальком, тремолитом и флогопитом;
- магнетитовые железистые кварциты с актинолитом, роговой обманкой и грюнеритом;
- сульфидно-магнетитовые железистые кварциты с геденбергитом и грюнеритом;
- магнетито-диопсидовые породы и различные скарноиды;
- магнетито-кальцито-доломитовые породы;
- лептиты, двуслюдяные и нодулярные гнейсы.

Количественное соотношение различных типов железистых кварцитов зависит от мощности рудного тела. Мощность магнетитовых кварцитов с увеличением мощности тела возрастает по степенному закону. Доля

сульфидно-магнетитовых кварцитов достигает максимума в рудных пересечениях порядка 150 м и снова падает до нуля к 300-метровой отметке. Гематито-магнетитовые железистые кварциты появляются в составе рудных тел только при превышении ими предела мощности порядка 200 м, достигая максимума в 300-метровых телах (Базай, Иванюк, 1996).

И моно- и многолинзовые месторождения железистых кварцитов, в свою очередь, состоят из более мелких линз, те - из ещё более мелких и так вплоть до линзочек сечением 10-20 см (см. рис. 3). В результате такая структура оказывается фрактальной на масштабах, по крайней мере, от 5 до 500 м. Фрактальная размерность месторождений Приимандровского района в плане изменяется от 1.5 до 1.7, причём практически не зависит от глубины. В этом случае мы можем применить эмпирическое правило Мандельброта (Mandelbrot, 1983) и приблизительно оценить полную фрактальную размерность месторождений, прибавив к этим значениям единицу, т. е. как 2.5-2.7. С железистыми кварцитами, естественно, связаны наиболее сильные магнитные аномалии. В свою очередь, эти аномалии образуют каркас структуры, составленной из более слабых аномалий, связанных с мелкими линзами железистых кварцитов и участками магнетитосодержащих гнейсов и амфиболитов (рис. 4). Двумерная сеть отрицательных магнитных аномалий Приимандровского района имеет фрактальную размерность 1.7. Замечательно, что примерно такое же строение и размерность имеют и другие районы развития пород железорудной формации, вне зависимости от их возраста и географического положения (КМА, Йиллгарн, Сьопериор и др.).

Такую морфологию рудных тел в геологии обычно обозначают понятием штокверк, а её более общее название — перколяционный кластер (Иванюк и др., 1996; Иванюк, 1997; Горяинов и др., 1998; Горяинов, Иванюк, 2001; 2003). Название перколяционный кластер происходит от структур протекания жидкости в пористой среде. Но оказалось, что подобное строение имеют также электрические разряды, структуры растворения под давлением, трещины всевозможных типов и многое другое. Наиболее близким аналогом собственно структур протекания в железистых кварцитах являются кластеры роговой обманки, замещающей грюнерит по краям его зёрен в соответствии с морфологией просачивающегося щелочного раствора, или кластер гематита, резорбирующего магнетит при мартитизации. Другим примером являются штокверки диопсидовых прожилков, развивающиеся в железистых кварцитах при формировании магнетито-диопсидовых метасоматитов. Такое же строение имеют разломные зоны самого разного размера, вплоть до системы рифтов Земли, а также связанные с ними кластеры эпицентров землетрясений, разного рода рудные штокверки, поля пегматитов, гидротермальных жил, зеленокаменные пояса и многие другие геологические структуры

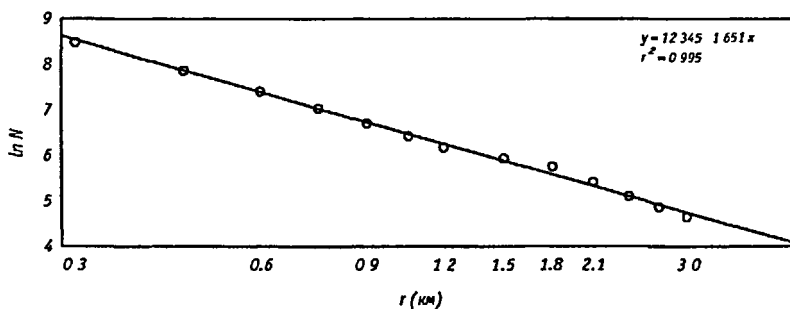
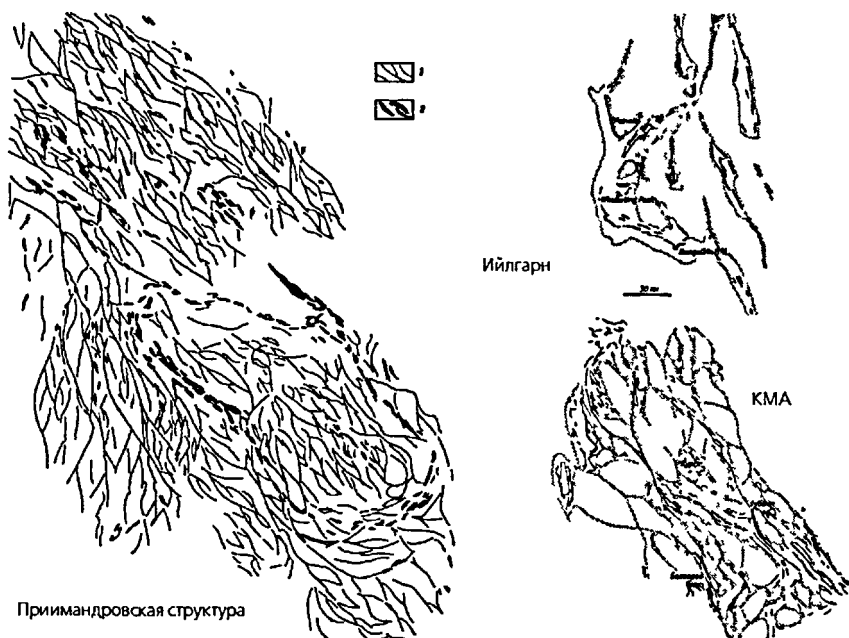


Рис 4 Комплекс месторождений ПЖФ Примандровской структуры (1 – оси слабых магнитных аномалий, 2 – линзы железистых кварцитов), КМА (Горяинов, Балабонин, 1988) и блока Йиллгарн (Gole, 1981) и число  $N$  квадратных ячеек размера  $r \times r$ , потребовавшихся для полного покрытия "магнитной структуры" Примандровского района, как функция  $r$

(Садовский, Писаренко, 1991; Turcotte, 1992; Korvin, 1995; Горяинов, Иванюк, 2001). Поскольку накопление современных железистых осадков, близких по составу к железистым кварцитам, происходит почти исключительно в рифтовых зонах, то морфология железорудных поясов за историю Земли существенно не изменилась — изменился лишь размер кластеров и масштаб рудообразования.



Анализ геофизических данных показывает, что в пределах Балтийского щита железорудные месторождения отчётливо тяготеют кучасткам земной коры повышенной сейсмической мощности. Этот факт хорошо соотносится с подсчётами темпов приращения континентов. Наиболее высокая скорость формирования континентальной коры приходится на период древнее 2 млрд. лет, и в этот же период происходило формирование 95 % месторождений ПЖФ (Goryainov, Ivanyuk, 1998). Иными словами, тоналиты и железорудно-гнейсо-амфиболитовая толща железорудной формации являются производными одного и того же процесса формирования континентальной коры. Поэтому результаты Rb-Sr (Баянова, Егоров, 1999; наши данные) и Sm-Nd (наши данные) изотопных исследований магнетито-карбонатных пород и биотито-мусковитовых гнейсов Кировогорского месторождения демонстрируют полное отсутствие коровой компоненты в этих породах в момент их формирования (так называемая короткоживущая кора?).

На рис. 5 показана билогарифмическая зависимость числа месторождений железистых кварцитов Кольского полуострова с запасами, превышающими некоторую величину  $S$ , от величины  $S$  (по данным официального кадастра), которая аппроксимируется прямой линией с коэффициентом корреляции, близким к 1. С позиций теории самоорганизованной критичности (Вак, 1997; Вак, Tang, 1989) это означает, что все месторождения ПЖФ Кольско-Норвежского мегаблока относятся к единой железорудной системе, в которой реализуются процессы рудообразования всех возможных масштабов. Степенной вид функции распределения говорит о том, что хотя крупные месторождения встречаются редко, для их объяснения не надо искать специальный механизм — он тот же самый, что и для рядовых

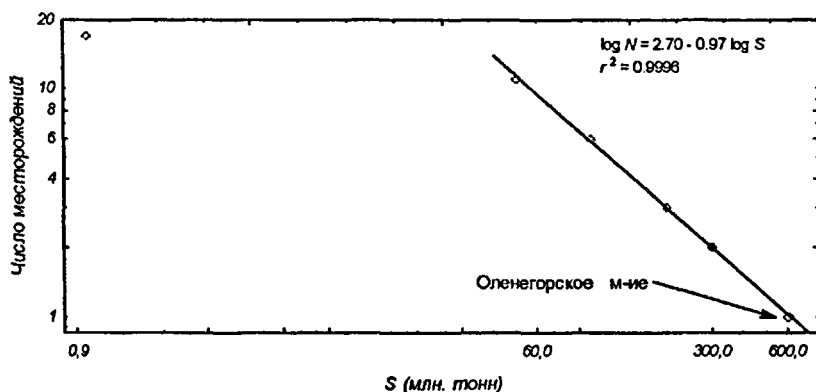


Рис. 5. Зависимость числа месторождений ПЖФ Кольского полуострова с запасами, большими  $S$ , от величины  $S$ . Данные о запасах почерпнуты из официального реестра Министерства природных ресурсов.

рудопроявлениям (Горяинов, Ивашок, 2001). Кроме того, становится ясным, что ничего, подобного Олснегорскому или Кировогорскому месторождениям здесь больше нет, поскольку присутствие таковых автоматически означало бы наличие ещё, но крайней мере, одного суперкрупного, что, с учётом масштаба геологических работ на Кольском полуострове, практически исключено.

**II. Месторождения железистых кварцитов Кольского полуострова характеризуются необычно широким для архейских метаморфических комплексов разнообразием минеральных видов (114), связанным в первую очередь с различными метасоматическими породами и гидротермальными жилами (в том числе, с золотосеребряным оруденением), сформировавшимися в контактовой зоне железистых кварцитов и биотитовых гнейсов за счёт привноса Mg, Ca, K, Na и Si.**

Несмотря на то, что в каждом отдельно взятом образце железистого кварцита присутствует небольшое число породообразующих минералов (4-6), в целом минеральный состав этих пород достаточно разнообразен. На сегодняшний день здесь нами достоверно установлено 114 минеральных видов: медь, серебро, золото, графит, сера; пирротин, галенит, сфалерит, миллерит, ковеллин, халькозин, пирит, марказит, халькопирит, молибденит, пентландит, борнит, паркерит, виттихснит, рикардит, алтаит; гематит, магнетит, герцинит, ганит, рутил, ильменит, кварц, опал, ферроколумбит, пиррохлор, пиролюзит, сапфирин, гётит; микроклин, альбит-анортит, мейонит, гейландит-Ca, стильбит-Ca, шабазит-Ca, ломонтит, сколецит, галлуазит, пренит, лизардит, гриналит, сепиолит, тальк, мусковит, Маргарит, флогопит-аннит, клинохлор-шамозит, фторапофиллит, энстатит-ферросилит, диопсид-геденбергит, авгит, эгирин-авгит, эгирин, волластонит, пектолит, антофиллит, жедрит, грюнерит, тремолит-ферроактинолит, магнезиальная роговая обманка-железистая роговая обманка, чермакит-феррочермакит, паргасит, магнезиосаданагаит, кордиерит, берилл, шерлдравит, цоизит, клиноцоизит-эпидот, алланит-(Ce), пумпеллиит-Mg, форстерит, циркон, датолит, альмандин, андрадит, гроссуляр, спессартин, титанит, силлиманит, кайнозит-(Y), таумасит, хризоколла, корнерупин; фторапатит—гидроксилapatит; шеелит; ангидрит, гипс, пиккерингит, копиапит, роценит, фиброферрит, феррогексагидрит, ярозит; кальцит, сидерит, доломит и малахит.

Среди пород формации наименьшим разнообразием минералов характеризуются гематито-магнетитовые железистые кварциты и машетито-карбонатные породы, наибольшим — различные гидротермалиты (рис. 6). Большая часть породообразующих силикатов представлена непрерывным рядом составов от одного крайнего члена до другого, что позволяет использовать состав минералов в качестве очень чувствительного

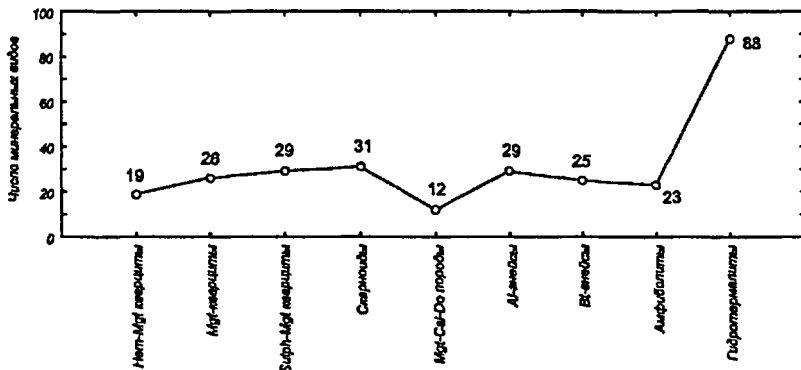


Рис 6 Разнообразие минерального состава пород ГЖФ Кольского полуострова

типоморфного признака. Например, присутствие тремолита в ассоциации с гематитом однозначно указывает на то, что рассматриваемая порода – это гематито-магнетитовый кварцит, а в ассоциации с пиритом, — что это гидротермальная жила в гнейсах.

Главным рудным, причём сквозным минералом формации является магнетит, содержание которого изменяется от единичных зёрен в биотитовых гнейсах и роговообманковых амфиболитах до 100 % объёма некоторых гидротермальных жил и зон вторичного обогащения. Как и на других месторождениях самого разного возраста, здесь фиксируется две разновидности магнетита, легко различающиеся при микроскопических исследованиях (Балабонин, Иванюк, 1995): рис. 7. Более высокожелезистый магнетит, который имеет в отражённом свете слегка голубоватый оттенок, всегда присутствует в виде реликтов в относительно железodefицитном

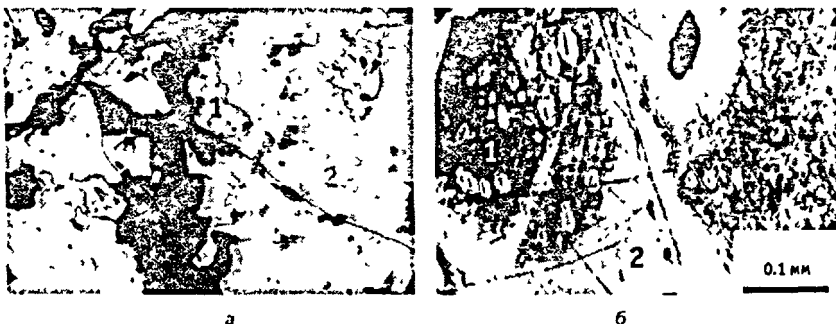


Рис. 7 Соотношения "голубоватого" (1) и "коричневатого" (2) магнетита а – без видимых следов замещения (Печегубское м. ие, отр свет), б – нодули "коричневатого" магнетита вокруг экссолюционных ламелей герцинита в "голубоватом" магнетите (рудопроявление Кичаны, отр свет, николи скрещены, нанесен нематический жидкий кристалл МББА)

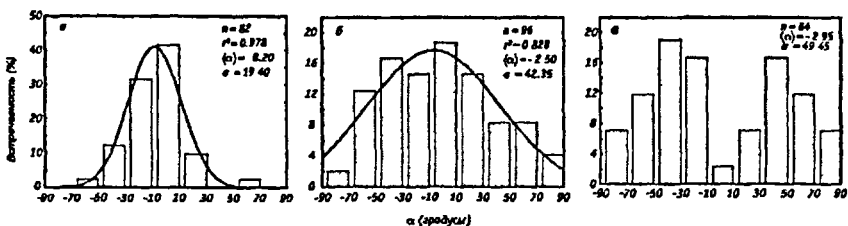


Рис. 8 Основные типы магнитной анизотропии железистых кварцитов (0° – направление полосчатости)

коричневатом магнетите. "Голубоватый" магнетит отсутствует в сульфидно-магнетитовых и гематито-магнетитовых кварцитах, а максимальное его содержание характерно для богатых магнетитовых руд. Переход от прямополосчатых железистых кварцитов периферических зон рудных тел к их складчатым ядрам также сопровождается исчезновением "голубоватого" магнетита. При этом в его составе происходят очень необычные изменения: если первичный "голубоватый" магнетит содержал какую-либо микропримесь в количестве, превышающем некоторую предельную величину, то происходит уменьшение её количества. Если же содержание этой микропримеси было ниже этого предела, то при образовании коричневатого магнетита происходит увеличение содержания данной микропримеси. Предельные концентрации составляют 0.08 мас. % для Mn, 0.04 мас. % для Mg, 0.07 мас. % для Li и Si.

Складкообразование, кроме того, сопровождается бифуркацией векторов намагниченности магнетита (рис. 8), в ходе которой последние разворачиваются от плоскости слоистости под углами  $\alpha$  порядка  $45^\circ$  к ней (Иванюк, 1991; Иваиюкидр., 1994). Первый тип магнитной анизотропии обусловлен влиянием сильной анизотропии формы — обширных мономинеральных магнетитовых слоев, мощностью которых можно пренебречь по сравнению с их площадью. Магнитная анизотропия второго типа (векторы остаточной намагниченности образуют с направлением полосчатости углы, близкие к  $45^\circ$ ) не может быть объяснена ни эффектом магнитного отжига (по крайней мере, в его чистом виде), поскольку не удастся выделить единого направления намагниченности, ни анизотропией формы магнетика. Однако тот факт, что этот тип анизотропии характерен для плейчатых железистых кварцитов, равно как результаты микроструктурного изучения кварца (Базай, Иванюк, 1997), позволяют связать переход ко второму типу магнитной анизотропии с увеличением касательных напряжений при складкообразовании. Кроме того, наведение магнитной анизотропии в ферритах самым непосредственным образом связано с процессом окисления вещества (Тикадзуми, 1987), когда создаются вакансии и появляется возможность для диффузии ионов. Только в железодефицитном

магнетите, таким образом, ионы двухвалентного железа получают возможность диффундировать в энергетически выгодные позиции, создавая необратимую одноосную магнитную анизотропию второго типа. Косвенным подтверждением возможности такого процесса является тот факт, что в плейчатых железистых кварцитах весь магнетит представлен своей относительно железодефицитной "коричневатой" разновидностью (Иванюкидр., 1994; Балабонин, Иванюк, 1995).

Следующим после магнетита промышленно ценным минералом железорудной формации является самородное золото. Постоянно фиксируемая связь концентраций золота и серебра с серой позволяет рассматривать в качестве носителей золотосеребряного оруденения сульфидно-магнетитовые железистые кварциты, сульфидоудержающие гнейсы и гидротермальные жилы в этих породах (Голиков и др., 1999; Иванюк и др., 1999). Однако анализ минералов, вросших в зёрна золота (клиноцоизит, гроссуляр, эпидот, тремолит и флогопит), однозначно говорит о том, что золото связано с гидротермальными жилами, залегающими в глинозёмистых гнейсах вблизи от их контакта с железистыми кварцитами (Иванюк и др., 2001). Размер зёрен неправильной формы и хорошо образованных кристаллов золота (рис. 9) варьирует от первых сотых миллиметра до 6 мм, составляя в среднем 0.3 мм. Пробность золота Олснегорского месторождения высокая (в среднем  $883 \pm 119$ ), а из

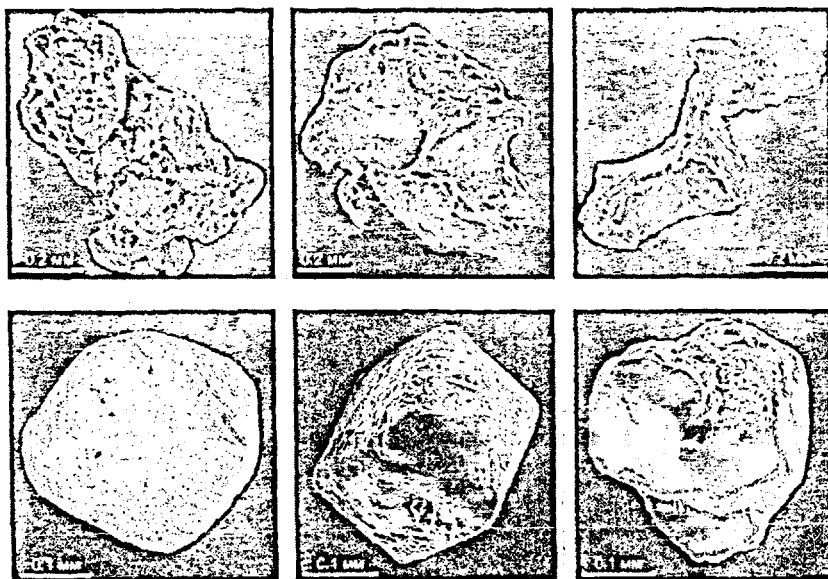
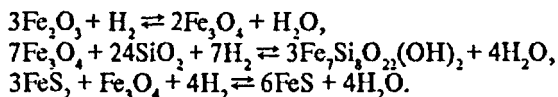


Рис. 9. Морфология самородного золота Оленегорского месторождения. РЭМ-фото.

примесей присутствуют серебро (до 50 ат. %) и медь (до 24 ат. %). Тот факт, что на месторождениях Кольской ПЖФ получил распространение золото-теллуридный тип оруденения, вполне согласуется с выводом о приповерхностном генезисе жильного комплекса железорудных месторождений (Горяинов, Николаев, 1991, Иванюкидр., 1996; Горяинов, Иванюк, 2001) и даёт основания надеяться на обнаружение на глубоких горизонтах более богатых месторождений золото-пирит-арсенопиритового и золото-полисульфидного типов (Кременецкий, Минцер, 1995; Кременецкий, идр., 1996).

III. Буферные свойства железистых кварцитов обуславливают симметричную вещественную зональность рудных тел, выраженную рядом последовательных популяций, каждая из которых включает одну из пород главной серии (гематито-магнетитовые, магнетитовые, сульфидно-магнетитовые железистые кварциты, биотитовые гнейсы и др.), связанные с ней метасоматиты (магнетито-диопсидовые породы, магнетито-карбонатные породы, эпидозиты, нодулярные гнейсы и др.) и гидротермальные жилы.

Главной чертой химического состава всех железомagneзиальных силикатов является строгая зависимость от набора рудных минералов, обусловленная различными буферными реакциями между минералами железа (рис. 10). В результате, силикаты сульфидно-магнетитовых железистых кварцитов представлены исключительно своими железистыми разновидностями, гематито-магнетитовых кварцитов — магнезиальными с повышенным содержанием ионов трёхвалентного железа, а в магнетитовых железистых кварцитах они имеют промежуточный состав. Действительно, как это экспериментально показано Г. Югстером (Eugster, 1959), при данных температуре и давлении железорудная система имеет фиксированное парциальное давление кислорода, определяемое составом твердых фаз, не зависящее от привноса (потери) водорода извне и поддерживаемое реакциями типа:



Первой из них отвечают гематито-магнетитовые кварциты, со второй и третьей можно сопоставить соответственно магнетитовые и сульфидно-магнетитовые кварциты. Окислительно-восстановительный потенциал буфера не зависит от относительных количеств твердых минеральных фаз — он сохраняется неизменным до тех пор, пока не исчерпаются ресурсы минерала, содержащего железо в более окисленной (восстановленной) форме. При переходе от гематито-магнетитового к магнетито-магнетитовому буферу отношение  $\text{H}_2:\text{H}_2\text{O}$  возрастает практически от нуля до двух. Это

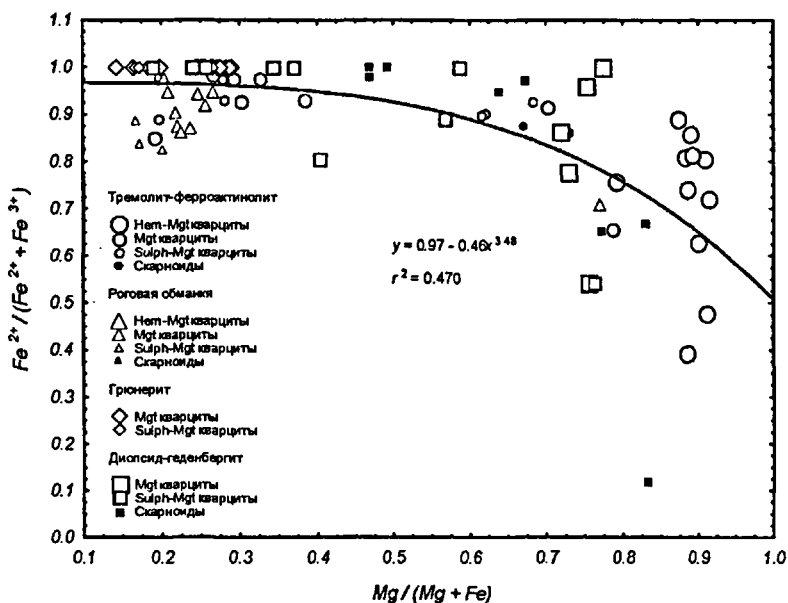


Рис. 10. Соотношение концентраций Mg, Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> (в формульных коэффициентах) в составе породообразующих силикатов железистых кварцитов Кольского полуострова.

означает, что в межзерновом флюиде гематито-магнетитовых кварцитов будет превалировать трёхвалентное железо. При относительном недостатке ионов Fe<sup>2+</sup> силикаты оказываются существенно магниальными, но одновременно в их структуру входит относительно повышенное количество ионов Fe<sup>3+</sup> (см. рис. 10).

Складкообразование, как и в случае магнетита, также сопровождается возрастанием соотношения Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> в составе силикатов, причём обычно это происходит на фоне возрастания содержания магния, сопровождающего выделение новообразованного магнетита (гематита) из силикатов. В результате даже в однотипных железистых кварцитах наблюдается та же самая закономерность, что и при переходе от одного типа буферной системы к другому: чем более магниальны породообразующие силикаты, тем выше концентрация трёхвалентного железа в их составе.

Наличие строгой петрографической зональности предполагает и ясно выраженную геохимическую зональность (рис. П). Действительно, при переходе от осевых частей железорудной формации к периферии последовательно уменьшается содержание железа за счёт алюминия, щелочных металлов и кремния, а магний, кальций, углерод и сера

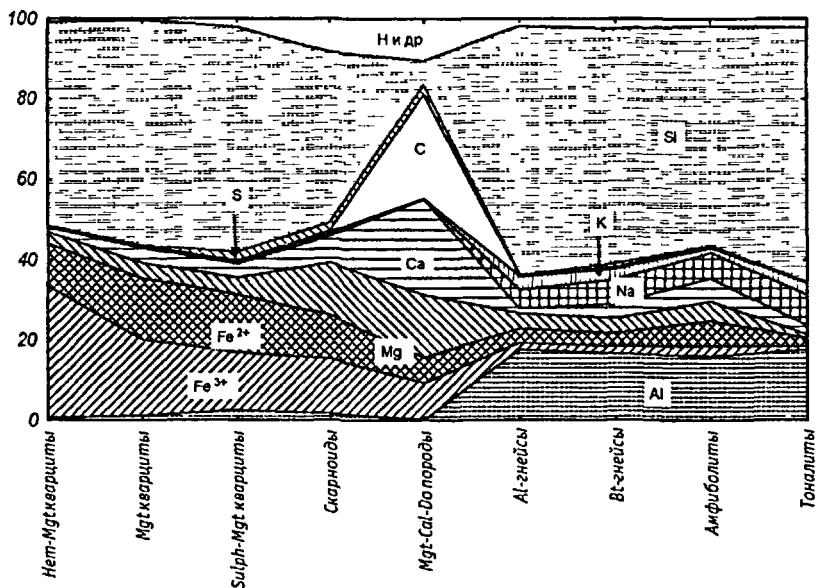


Рис 11 Средний состав пород ПЖФ Кольского полуострова (ат % от бескислородной части)

концентрируются в промежуточной зоне. В тоналитах, как и следовало ожидать, доминируют нормальные распределения элементов. Распределение железа в железистых кварцитах, кремния и алюминия в глинозёмистых гнейсах, магния в скарноидах отвечает  $q$ -нормальной модели, что, скорее всего, свидетельствует о привносе этих элементов из соседних зон. Например, повышенные концентрации алюминия в глинозёмистых гнейсах, магния в скарноидах, кальция и углерода в магнетито-карбонатных породах могут быть связаны с вытеснением этих элементов из железистых кварцитов, характеризующихся логнормальными и экспоненциальными распределениями указанных элементов. Главной особенностью геохимии микроэлементов является последовательное (по степенному закону) сокращение содержания большинства из них от контакта с топалитами к осевой зоне (рис. 12).

Общее содержание железа в железистых кварцитах отдельных месторождений и всего Кольского полуострова характеризуется  $q$ -нормальным распределением с модальными значениями в интервале 30-40 мас. %. Породы с концентрацией железа, превышающей 45 мас. %, не только на Кольском полуострове, но и повсюду в мире крайне редки и всегда относятся не к самым железистым кварцитам, а к переотложенным



рудам. Таким образом, содержание 40 % железа является естественным пределом концентрации этого элемента в железистых кварцитах, но на Кольском полуострове в таком критическом состоянии находится основная их часть, на месторождениях КМА таких пород уже меньше, а на слабо-метаморфизованных месторождениях Канадского щита они практически отсутствуют. Гематит в составе Кольских железистых кварцитов появляется лишь при превышении общей концентрацией железа предела порядка 35 мас. % (рис. 13), так что появление этого минерала является чётким признаком высокого содержания железа в руде. В породах же зелено-сланцевой и более низких ступеней метаморфизма такой закономерности не существует, и гематит слагает руды самого разного в отношении общего железа состава.

При компонентном анализе данных о среднем составе пород железорудной формации Кольского полуострова выделяется 3 группы элементов. Эти группы с большей или меньшей достоверностью фиксируются на всех месторождениях мира и обычно трактуются как "окисная" ( $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ), "глинистая" (Al, Na, K, Ti) и "карбонатная" (C, Ca, Mg, Mn) составляющие первичных осадков (James, 1954; Плаксенко, 1966; Garrels at al., 1973).

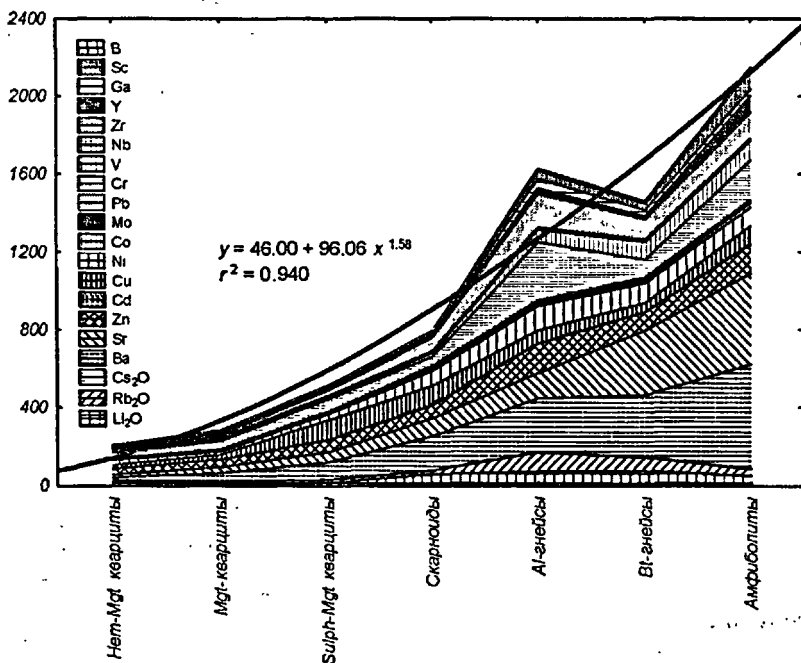


Рис. 12. Соотношение концентраций микропримесей в породах ПЖФ.

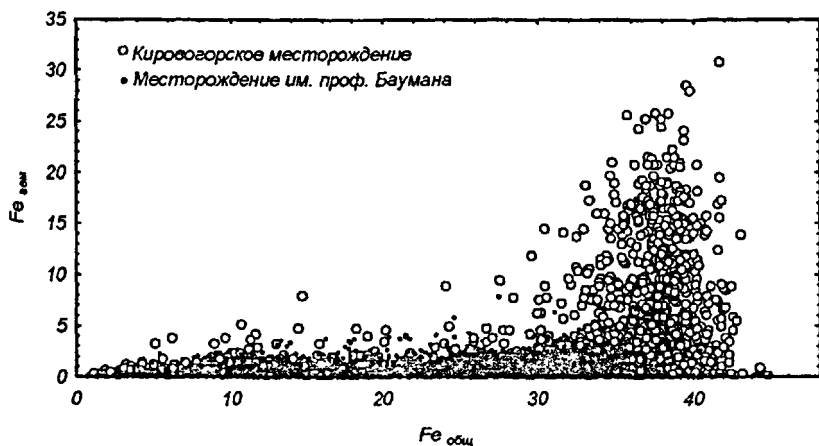


Рис. 13 Соотношение концентраций гематитового и общего железа в железистых кварцитах.

Интересно, что если исключить из выборки данные о составе гнейсов и амфиболитов, то компонентный анализ покажет те же самые группы элементов. Более того, картина качественно совершенно не меняется ни в случае анализа, скажем, данных о составе одних только магнетитовых железистых кварцитов, ни одних только биотитовых гнейсов или даже магнетито-карбонатных пород. Это означает, что все породы формации являются производными какого-то единого процесса, обусловившего указанную зональность.

Как отмечалось, набор рудных минералов однозначно определяет не только минеральные парагенезисы, но и химический состав сосуществующих силикатов. Большинство исследователей связывают этот факт с действием кислородных буферных смесей при метаморфизме изначально различных по составу слоев железистых кварцитов. Нам же представляется, что симметричная зональность рудных тел сама по себе может возникнуть за счёт "разгонки" элементов под влиянием буферных реакций. По аналогии с современным вулканогенно-осадочным процессом можно предположить, что формирование такой вещественной зональности обусловлено воздействием восходящего восстановленного флюида на существенно гематитовый протолит, образовавшийся в процессе гидротермальной переработки базальтов океанической коры (скажем, по схеме "чёрных курильщиков") и погружающийся в зоны протекания всё более высокотемпературных метаморфических реакций по мере зарастания перколяционного шва (Горяинов, Иванюк, 2001; 2002; 2003). В результате формируется зональное рудное тело с гематито-магнетитовыми (прото-) железистыми кварцитами в апикальной части, сульфидно-магнетитовыми

(прото-)железистыми кварцитами в корневой части и магнетитовыми (прото-)железистыми кварцитами между ними.

Новообразованный сульфидно-магнетитовый буфер приводит к высвобождению магния, место которого в силикатах теперь занимает двухвалентное железо, создавая предпосылки для образования диоксидов и магнетито-доломитовых пород на периферии рудных тел. Ввиду отсутствия свободных ОН-групп во флюиде из-за их непрерывного поглощения буферными реакциями, большинство гидроксилсодержащих минералов здесь также неустойчиво. Это приводит к накоплению в межзерновом флюиде щелочных металлов и алюминия, мигрирующих из области действия сульфидно-магнетитового буфера в следующую зону скарноидов и глинозёмистых гнейсов или кристаллизующихся в виде вторичной роговой обманки на регрессивной стадии формирования сульфидно-магнетитовых кварцитов.

Преобразование неизменённых базальтов краевых зон шовной зоны в роговообманковые амфиболиты, а "обелённых" за счёт выноса Fe, Na, K, Ca и др. элементов базальтов в биотитовые гнейсы завершает формирование зональной толщи пород железорудной формации. Иными словами, "возникающая" в такой гипотетической модели зональность полностью совпадает с реально наблюдаемой в природе (см. рис. 1). Результаты подсчёта баланса элементов между железистыми кварцитами и гнейсовой толщей на основе соотношения площадей, занимаемых этими породами на картах и разрезах реальных месторождений такому сценарию не противоречат.

С зональностью толщи пород железорудной формации напрямую связаны близкие по возрасту комплексы гидротермалитов, представленные гематито-кварцевыми, кальцитовыми и эпидото-андрадито-апофиллитовыми жилами в гематито-магнетитовых кварцитах; кальцитовыми, кальцито-андрадито-эпидото-диоксидовыми, альмандино-биотито-кварцевыми и альмандино-роговообманковыми жилами в магнетитовых кварцитах; сульфидно-альмандино-биотито-кварцевыми и сульфидно-альмандино-роговообманковыми жилами в сульфидно-магнетитовых кварцитах, цеолито-кварцевыми, эпидото-кальцитовыми, гроссуляро-кварцевыми, датолито-кальцитовыми, пренитовыми, ангидрито-гипсовыми и др. жилами в глинозёмистых гнейсах (Иванюк и др., 2001).

**IV. Переход от прямополосчатых железистых кварцитов внешних зон рудных тел к пльчатым железистым кварцитам осевой зоны осуществляется через зону перемежаемости прямополосчатых и пльчатых пород. При этом закономерно и взаимосогласованно изменяются топологические свойства полосчатости железистых кварцитов, их микроструктура, минеральный и химический состав, физические свойства и состав породообразующих минералов.**

Помимо аутигенной зональности, ключевой проблемой генезиса железорудных формаций является проблема полосчатости. Большинство исследователей автоматически считают полосчатость железистых кварцитов безусловным признаком их осадочного генезиса, вследствие чего это важное свойство оказалось совершенно не изученным. Зато предложено множество моделей формирования строго периодической слоистости гипотетического железисто-кремнистого осадка. Чтобы прервать этот замкнутый круг мы решили предпринять, наконец, систематическое изучение полосчатости всех пород формации.

Прежде всего мы обратили внимание на тот факт, что вмещающие породы, будь то нодулярные гнейсы, лептиты или амфиболиты, вблизи контакта с железистыми кварцитами становятся столь же контрастно-полосчатыми, как и сами железистые кварциты. Это, к слову, сразу же поставило под сомнение любые гипотезы о формировании полосчатости за счёт перехода двухвалентного железа в трёхвалентное с его последующим немедленным осаждением в виде гётита (Walter et al., 1977; Cairns-Smith, 1978; Evers, 1983; Morris, 1986; Мельник, 1986; Кулик, 1986; Braterman, Cairns-Smith, 1987; Brown et al., 1995 и др.). Для оценки степени неоднородности разреза Л.П.Николаев предложил очень удобный показатель—модуль дискретности, или число любых межпородных разделов на единицу разреза (Николаев, Горяинов, 1990). Оказалось, что эта величина всегда последовательно возрастает от периферии железорудной формации к осевой зоне, выраженной железистыми кварцитами. При отсутствии рудных тел использование модуля дискретности позволяет с высокой точностью предсказать рудную зону, так что полосчатость железистых кварцитов можно считать лишь максимальным проявлением неоднородности всей гнейсово-амфиболитовой толщи.

Оценить степень заполнения каким-либо минералом поверхности шлифа, т. е. его фрактальную размерность, можно, если плотно покрывать карту распределения этого минерала квадратными ячейками разного размера. Если зависимость числа таких ячеек от их размера отвечает степенному закону, то показатель этой зависимости и есть фрактальная размерность (Базай, Иванюк, 1995; 1996; Иванюк, 1997; Горяинов, Иванюк, 2001). Для шлифа мономинеральной породы, естественно, этот показатель равен двум, для единственного прослоя - единице. Железистые кварциты можно представить в виде вставленных друг в друга мономинеральных фракталов размерности 1.2-1.7 (рис. 14). Интервал масштабов, на которых полосчатость фрактальна, простирается от 0.01 мм, т. е. практически от размера зёрен, до 1 см. Можно полагать, что на самом деле этот интервал шире, но эксперимент ограничен размерами шлифа.

Поэтому на следующем этапе мы применили более универсальный подход к анализу фрактальной размерности пространственных рядов по

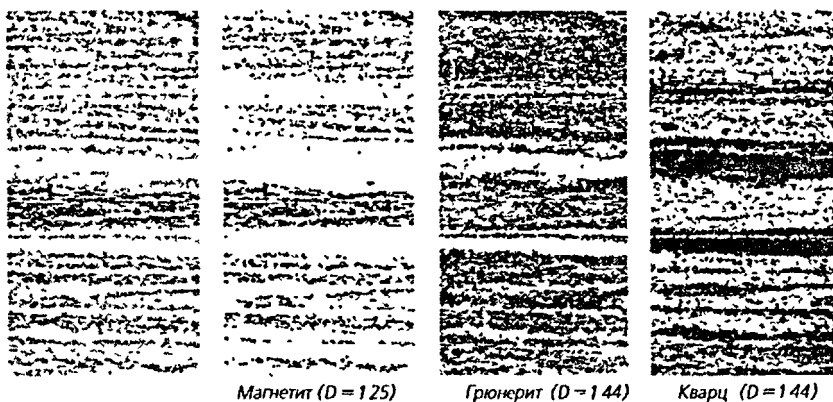


Рис 14 Фрактальное распределение минералов в железистом кварците Печегубского месторождения

их спектрам мощности. Для анализа мы использовали кривые интенсивности чёрного цвета в окраске образцов, неявно отражающие концентрацию железа в составе породы, и кривые кажущейся магнитной восприимчивости, полученные при магнитном каротаже рудных тел Кировогорского месторождения. Метод основан на том факте, что если спектральная плотность уменьшается с увеличением пространственной частоты по степенному закону, то показатель  $\beta$  этой зависимости связан простым соотношением  $D_F = (5 - \beta) / 2$  с фрактальной размерностью!) анализируемого ряда (Voss, 1985; 1988). По этому критерию, фрактальная размерность последовательностей окраски и магнитной восприимчивости железистых кварцитов лежит в пределах от 1.2 до 2, причем графики окраски чаще являются обычными самоафинными кривыми ( $K D_F < 2$ ), а графики КМВ в своём большинстве отвечают фликкер-шуму ( $D_F = 2$ ). И это не удивительно, поскольку, как отмечалось, строение рудной зоны в целом соответствует перколяционному кластеру, а графики любых физических полей, носителем которых является перколяционный кластер, представляют собой фликкер-шум (Горяинов, Иванюк, 2001).

Помимо подсчёта фрактальной размерности мономинеральных агрегатов в шлифах, мы попытались выявить закономерности чередования зёрен вкрест полосчатости различных пород формации (Базай и др., 1999; Горяинов, Иванюк, 2001). Сначала мы перевели последовательности зёрен в набор содержания железа, кремния и так далее, исходя из среднего состава минералов в данном образце. По таким концентрационным кривым были получены спектры Фурье, которые показали практически полное отсутствие строго периодических последовательностей зёрен. Обычно это непрерывный спектр, свойственный шумовому сигналу, на фоне которого

выделяется несколько более или менее интенсивных максимумов. Число таких максимумов последовательно возрастает от гематито-магнетитовых железистых кварцитов к магнетито-карбонатным породам. Поскольку переход от периферических зон к ядрам рудных тел сопровождается уменьшением количества гармоник большой амплитуды в спектрах Фурье, мы можем говорить о текстурной самоорганизации железорудных толщ.

Широкие возможности для оценки упорядоченности последовательностей данных предоставляют методы символической динамики, в частности, метод гиперсимволов (Базай и др., 1999; Горяинов, Иванюк, 2001). Например, если мы имеем строго периодическую последовательность зёрен кварц-магнетит-грюнерит-кварц-магнетит-грюнерит- и так далее, то заменив триплет кварц-магнетит-грюнерит символом а, мы получим в три раза меньшую цепочку этих символов. Если же мы проанализируем белый шум, то длина цепочки гиперсимволов будет составлять 65 % от длины анализируемой последовательности. Поэтому, сжав файл каким-либо архиватором и подсчитав степень сжатия, мы получим информацию о степени хаотичности анализируемой цепочки символов. Таким образом было установлено последовательное возрастание текстурной упорядоченности пород от сульфидно-магнетитовых железистых кварцитов Кировогорского месторождения к гематито-магнетитовым. А на Печегубском месторождении текстурная упорядоченность магнетито-грюнеритовых кварцитов возрастает при складкообразовании.

На рис. 15 показано изменение концентраций оксидов железа и кремния в составе железистых кварцитов Печегубского месторождения от их контакта с двуслюдяными гнейсами к осевой части рудного тела (Иванюк, Никитин, 1991). Если построить фазовую плоскость, координатами которой будут эти компоненты, то эволюция состава железистых кварцитов от периферии к осевой зоне может быть выражена спиралью, оборачивающейся вокруг точки с координатами (50 мас. %  $\text{SiO}_2$ ) : (50 мас. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  общ.). Покрывая такую фазовую траекторию ячейками разного размера и подсчитывая зависимость их числа от размера, мы, естественно, получим степенную зависимость с показателем 1, как и для любой линии (см. рис. 15). Для более сложного разреза сделать это обычно крайне сложно, поскольку мы не можем провести опробование с достаточной детальностью. Но и из такой ситуации имеется выход. Как это теоретически обосновано Такенсом (Takens, 1981), для восстановления топологии фазовой траектории можно использовать последовательность значений одной-единственной переменной, выбирая в качестве осей фазового пространства либо первую, вторую и так далее производные анализируемого сигнала, либо значения этого сигнала с некоторой задержкой. На рис. 16 приведена фазовая траектория, восстановленная методом задержек по одной из последовательности данных магнитного каротажа Кировогорского месторождения.

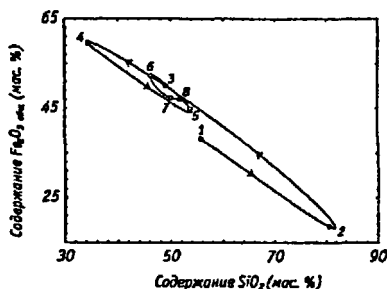
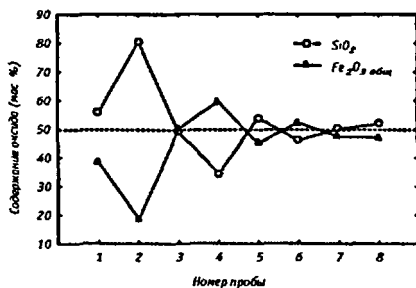
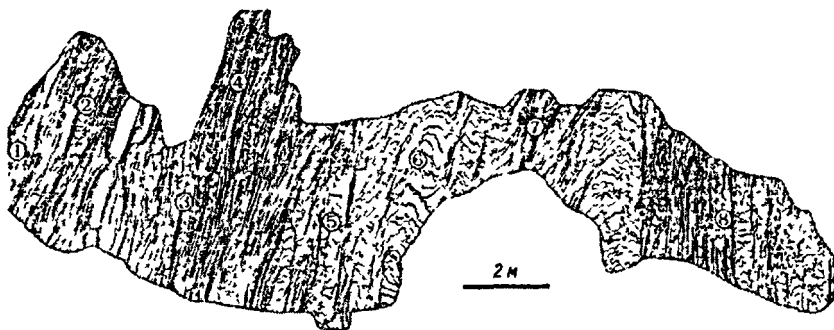


Рис 15 Изменение состава железистых кварцитов Печегубского месторождения от контакта с гнейсами (1) к осевой зоне рудного тела (8)

Для оценки фрактальной размерности фазовой траектории можно просто заполнять фазовое пространство кубиками разного размера и подсчитывать число потребовавшихся кубиков, но, как это показано Грассбергером и Прокаччия (Grassberger, Procaccia, 1983), лучший результат даёт использование корреляционного интеграла. Применение процедуры Грассбергера-Прокаччия позволило установить, что в данном случае динамика железорудной системы обусловлена наличием фрактального аттрактора размерности 3.1, а фазовое пространство образовано пятью независимыми переменными.

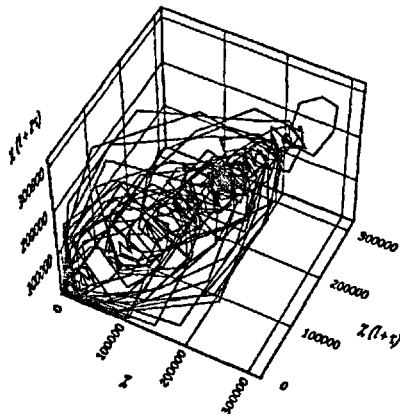


Рис 16 Фазовый портрет, восстановленный методом Такенса по последовательности значений  $\chi$  кажущейся магнитной восприимчивости, измеренной в скважине 99 ПР 13 Кировогорского месторождения

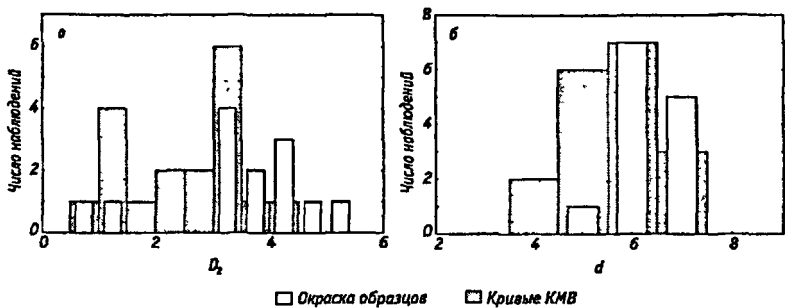


Рис 17 Встречаемость аттракторов разной размерности  $D_2$ , реконструированных методом Такенса по кривым изменения кажущейся магнитной восприимчивости (КМВ) и окраски образцов железистых кварцитов (а), а также размерность их вложения  $d$  (б)

Эта процедура была применена как к кривым кажущейся магнитной восприимчивости, так и к графикам окраски полированных штупфов железистых кварцитов (Горяинов и др., 1992; 1997; Иванюк и др., 1996; Горяинов, Иванюк, 2001). В обоих случаях на гистограммах имеется по два максимума, соответствующих размерности аттракторов 1 и 3.2 (рис. 17). Размерность 1 имеют разного рода предельные циклы, приводящие к периодическим изменениям окраски или магнитной восприимчивости пород. Дробная фрактальная размерность говорит о наличии фрактального аттрактора, приводящего к хаотическим колебаниям рассматриваемых величин. Размерность фазового пространства (т. е. число независимых переменных, участвующих в процессе) изменяется в обоих случаях в пределах от 4 до 7. Можно полагать, что в качестве переменных выступают породообразующие минералы железистых кварцитов (Горяинов, Иванюк, 2001). Главным свойством фрактальных аттракторов является существенная зависимость от начальных условий, так что эволюционные кривые быстро расходятся, и мы практически не в состоянии прогнозировать поведение системы. Если динамика рудообразующей системы действительно определялась фрактальными аттракторами, то образование двух близких по строению и качеству руд месторождений становится маловероятным. Возможно, поэтому руды оленегорского типа, которые можно использовать для получения суперконцентрата, встречаются только на самом Оленегорском месторождении.

Ещё одной характерной чертой железистых кварцитов является их плейчатость, которая появляется в осевых частях рудных тел при превышении ими предела мощности порядка 10 метров и полностью отсутствует во вмещающих породах и маломощных рудных телах. Удобной мерой интенсивности плейчатости является фрактальная размерность одиночного слояка, которая по мере возрастания интенсивности



складкообразования изменяется от 1 до 1.3. Складки последнего типа уже являются переходными к дендритам и образуются за счёт диффузионных процессов (Иванюк, Яковенчук, 1995; Иванюк, 1997; Иванюкидр., 1999).

Но самое удивительное состоит в том, что складкообразование не приводит к нарушению полосчатости. Наоборот, - и это подчёркивают почти все исследователи, - при переходе от прямополосчатых участков рудного тела к плейчатым железистые кварциты становятся всё более тонкополосчатыми и контрастными (Базай, Иванюк, 1996). Фрактальная размерность полосчатости линейно уменьшается с увеличением фрактальной размерности складок, в результате чего железистые кварциты и выглядят всё более тонко-контрастнополосчатыми (рис. 18). Фрактальная размерность сети межзерновых границ при этом сначала резко возрастает, а затем выходит на плато, что, вероятно, связано с влиянием отжига. Оценка степени упорядоченности микроструктур по методу Ю.Л.Войтеховского (1994; 1996) показала линейное увеличение информации Шеннона при возрастании фрактальной размерности складок, а использование критериев S-теоремы Климонтовича позволило установить возрастание степени упорядоченности микроструктур при складкообразовании (Егоров, Иванюк, 1996).

Если идти от контакта любой достаточно крупной линзы железистых кварцитов с вмещающими породами к её осевой зоне, то сначала текстура пород будет исключительно прямополосчатой (см. рис. 15). Затем среди прямополосчатых пород появятся линзовидные участки плейчатой текстуры. Постепенно их будет становиться всё больше и больше, и начнётся зона крупных многопорядковых складок, сменяемая в осевой части тела мелкой изоклиальной плейчатостью. Эта зональность достаточно универсальна и наблюдается на многих месторождениях. В результате, графики изменения угла раскрытия крыльев складок или фрактальной

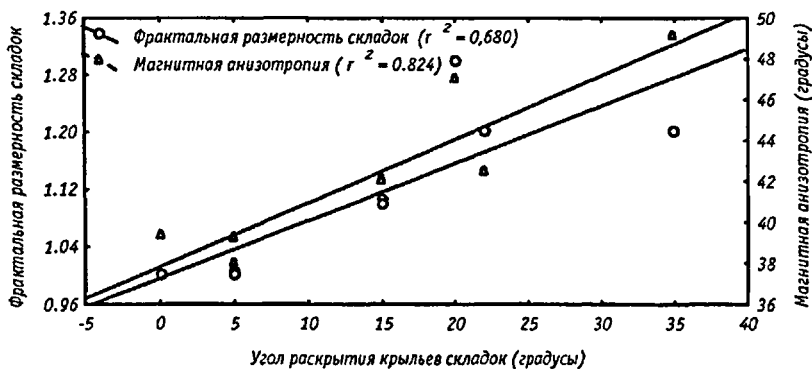
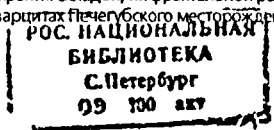


Рис 18 Соотношение между углом раскрытия складок, их фрактальной размерностью и магнитной анизотропией в железистых кварцитах Печенгского месторождения (см рис 15)



размерности последних в железистых кварцитах от контакта с гнейсами к осевой зоне рудного тела оказываются близки к кривой изменения масштаба турбулентности потока вязкой жидкости в плоском канале, где также вблизи стенок поток всегда ламинарный, затем идёт зона перемежаемости, сменяемая зонами сначала крупно-, а затем и мелкомасштабной турбулентности (Конт-Белло, 1968). Наличие участка перемежаемости лучше всего видно на графиках изменения углов отклонения полосчатости от оси линзы (рис. 19): на фоне прямополосчатых пород регулярно - примерно через 3 м - проскакивают турбулентные всплески, их интенсивность постепенно растёт, и в центре рудного тела имеет место хаотический интервал, представленный зоной мелкой плойчатости. Распределение мощности прямополосчатых участков отвечает логнормальному закону, что характерно для перемежаемости так называемого третьего типа (Шустер, 1988). Для этого вида перемежаемости, помимо прочего, чрезвычайно характерна масштабная инвариантность турбулентных всплесков, соответствующая фликкер-шуму.

В процессе складкообразования происходит закономерное изменение химического состава железистых кварцитов, выражающееся в выносе из них всех второстепенных компонентов. В результате в осевой части рудного тела железистые кварциты представляют собой контрастнополосчатые породы, состоящие только из оксидов кремния и железа. Компонентный анализ данных о составе и свойствах железистых кварцитов Печегубского месторождения (рис. 20) показал, что уже первый собственный вектор включает в себя 23 переменные с факторными нагрузками более 50% из 25 анализировавшихся и учитывает 50% изменчивости данных:

$$\frac{D_{\text{пол}} 79, H_{\text{Mg}} 85, x_{\text{Mg}} 56, x_{\text{Gr}} 62, Fe_{56}, Ti_{24}, Al_{75}, Mg_{87}, Mn_{33}, Ca_{72}, Na_{26}, K_{60}, Li_{87}, S_{60}, Zn_{62}, Ga_{77}}{\varphi_{94}, \alpha_{26}, D_{\text{сн}} 17, D_{\text{ср}} 77, I_{\text{сн}} 69, C_{\text{сн}}, C_{61}}$$

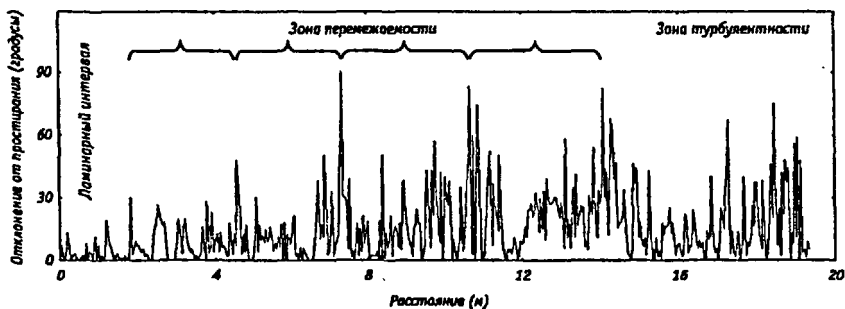


Рис. 19. Изменение ориентировки полосчатости железистых кварцитов Печегубского месторождения (см. рис. 15) от их контакта с гнейсами к центру рудного тела.

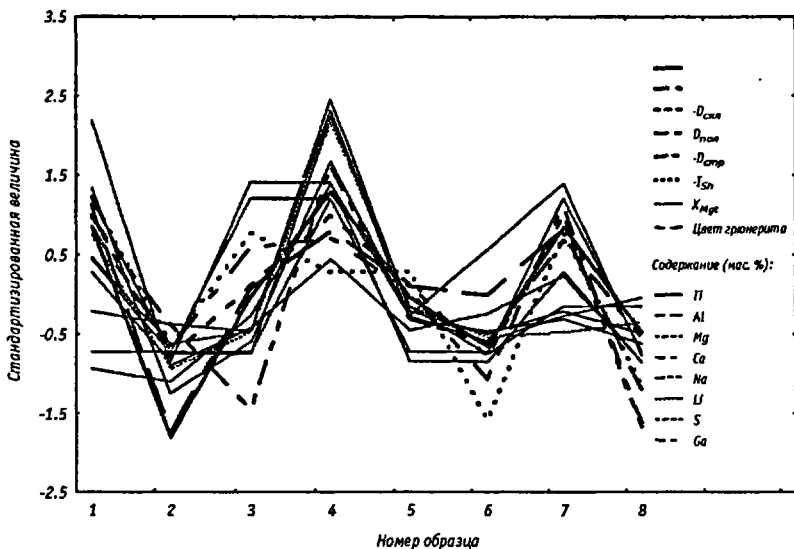


Рис 20 Изменение геометрических и вещественных характеристик железистых кварцитов от приконтактной части рудного тела Печегубского месторождения к его центру (см. рис. 15).

где  $D_{нас}$ ,  $D_{скал}$ ,  $D_{стп}$  — фрактальная размерность полосчатости, складок и межзерновых границ, соответственно;  $\varphi$  — угол раскрытия крыльев складок;  $\alpha$  — магнитная анизотропия;  $I_{Sh}$  — информация Шеннона для микроструктур;  $x_{Mgt}$  — доля "голубоватого" магнетита;  $H_{Mgt}$  — микротвёрдость магнетита;  $C_{Gru}$  — окраска гронерита;  $\chi_{Gru}$  — магнитная восприимчивость гронерита; Fe-Ga — концентрации соответствующих элементов.

Очевидно, что когерентность большинства геометрических и вещественных переменных свидетельствует против представлений о пассивно-деформационном характере складчатости. При этом, текстурно-вещественная самоорганизация железорудной системы предопределена закономерностями ползучести твердых тел. Поскольку ползучесть является термически активируемым процессом, а любая пластическая деформация сопровождается выделением тепла, мы имеем самоускоряющийся процесс, аналогичный в этом плане автокатализу или экзотермической химической реакции. В такой системе любые положительные флуктуации усиливаются, что создаёт предпосылки для различных явлений самоорганизации. Из металловедения известно (Иванова и др., 1994), что смена характера пластического течения происходит при максимально высоких напряжениях сдвига, когда система уже не может эффективно диссипировать привносимую энергию традиционными способами и "включает" новый,

ротационный механизм ее рассеяния. О многократном усилении сдвиговых напряжений при складкообразовании говорят и наши данные изучения микроструктурных ориентировок кварца и магнетита (Иванюк, 1991; Иванюк и др., 1994; Базай, Иванюк, 1997; Горяинов, Иванюк, 2001). Численные эксперименты также указывают на возможность возникновения хаотических пространственных аттракторов при складкообразовании и на существенное влияние складчатости на ход метаморфической дифференциации пород (Ord, 1991; Hobbsetal., 2001).

Таким образом, вещественная зональность ПЖФ неотрывна от её текстурной зональности, выраженной, прежде всего, характером метаморфической полосчатости и плейчатости. Метаморфическая полосчатость, практически отсутствующая в роговообманковых амфиболитах и биотитовых гнейсах, появляется в двуслюдяных и нодулярных гнейсах, где она обусловлена послойной концентрацией флогопита, кварца и плагиоклаза. Контрастность полосчатости резко возрастает вблизи контакта с железистыми кварцитами, в которых далее увеличивается до своего максимума в гематито-магнетитовой осевой зоне. В этом же направлении происходит упорядочение полосчатости, выраженное в уменьшении её фрактальной размерности, переходе непрерывных спектров мощности в дискретные со всё меньшим числом интенсивных максимумов и т. д. В самих железистых кварцитах фрактальные и информационные свойства полосчатости, плейчатости и микроструктур, состав пород и пороодообразующих минералов, физические свойства и тех, и других связаны друг с другом простыми функциональными соотношениями.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

(исключая тезисы докладов)

1. Базай Л.В., Иванюк Г.Ю. Механо-химическая дифференциация железистых кварцитов с позиций теории самоорганизации // ЗВМО. 1996. № 5. С. 67-82.
2. Базай А.В., Иванюк Г.Ю. Сравнительный анализ микроструктурной ориентировки кварца и магнетита из железистых кварцитов Кольского региона // Записки ВМО. 1997. № 6. С. 116-124.
3. Базай А.В., Иванюк Г.Ю. Фрактальные свойства железорудных толщ // Геология Балтийского шита и других докембрийских областей России. Апатиты: Изд. Кольского НЦ РАН, 1995. С. 44-50.
4. Базай А.В., Иванюк Г.Ю., Перликов А.М. Опыти изучения полосчатости железистых кварцитов методом гиперсимволов // Геология и полезные ископаемые Северо-запада и Центра России. Апатиты: Изд. МУП "Полиграф", 1999. С. 187-192.
5. Балабонин Н.Л., Иванюк Г.Ю. О природе "голубоватого магнетита" из железистых кварцитов Кольского полуострова // Записки ВМО. 1995. № 4. С. 61-77.

6. Голиков Н.Н., Горяилов П.М., Иванков П.Ю., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.А. Золотоносность железистых кварцитов Оленегорского месторождения (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41. № 2. С. 162-170.
7. Горяилов П.М., Егоров Д.Г., Иванков Г.Ю. Железорудные месторождения Кольского полуострова как самоорганизующиеся системы // Записки Санкт-Петербургского горного института. 1997. Т. 143. С. 70-74.
8. Горяилов П.М., Егоров Д.Г., Иванков Г.Ю. К построению синергетической модели железистых кварцитов докембрия (на материалах по железорудным формациям Кольского полуострова) // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 9. С. 1490-1496.
9. Горяилов П.М., Егоров Д.Г., Иванков Г.Ю. Оструктурно-вещественной самоорганизации в архейских железорудных ансамблях (Кольский полуостров) // Доклады АН, 1992. Том 322, № 6. С. 1123-1127.
10. Горяилов П.М., Иванков Г.Ю. Перколяция эндогенной энергии — причина и способ самоорганизации тектоносферы // Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова. Т.3: Новые идеи и подходы к изучению геологических образований // Апатиты: Изд. МУЛ "Полиграф", 2002. С. 76-95.
11. Горяилов П.М., Иванков Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. М.: ГЕОС, 2001. 312 с.
12. Горяилов П.М., Иванков Г.Ю. Самоорганизованная литосфера: об основах новой парадигмы геологии // Геологические этюды. Магадан: Изд. СВНЦ ДВО РАН, 2003. С. 92-100.
13. Горяилов П.М., Иванков Г.Ю. Энергетическая перколяция - ресурс новых идей в геотектонике // Вестник Воронежского университета. Геология. 2001. Вып. 5 (11). С. 7-22.
14. Горяилов П.М., Иванков Г.Ю., Шаров Н.В. Фрактально-геометрические мотивы в организации сейсмогеологических разрезов земной коры (на примере Балтийского щита) // Физика Земли. 1997. № 7. С. 69-80.
15. Горяилов П.М., Иванков П.О., Яковенчук В.Н. Тектонические перколяционные зоны в Хибинском массиве // Физика Земли. 1998. № 10. С. 822-827.
16. Егоров Д.Г., Иванков Г.Ю. О применимости информационной энтропии как меры упорядоченности петрографических структур // ЗВМО. 1996. № 4. С. 95-103.
17. Егоров Д.Г., Иванков Г.Ю. Складкообразование в железорудных системах как детерминированно-хаотический процесс // Физика Земли. 1996. № 1. С. 16-29.
18. Иванков Г.Ю. Магнетит как индикатор симметрии поля напряжений при формировании железистых кварцитов // Минералогический журнал, 1991. Т. 13. № 2. С. 78-83.

19. Иваинок Г.Ю. Фрактальные геологические среды: размерность, основные типы, генетические следствия // Физика Земли. 1997. № 3. С. 21–31.
20. Иваинок Г.Ю., Базай А.В., Голиков Н.Н., Горяинов П.М., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.Л. Минеральные парагенезисы золотоносных пород полосчатой железорудной формации Кольского полуострова // Геология и полезные ископаемые Северо-запада и Центра России. Апатиты: Изд. МУП "Полиграф", 1999. С. 109-115.
21. Иваинок Г.Ю., Базай А.В., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.П., Горяинов П.М. Низкотемпературные гидротермальные жилы в породах архейской железорудной формации Кольского полуострова // Записки ВМО. 2001. № 3. С. 16-28.
22. Ивашок Г.Ю., Базай Л.В., Реженова С.А. Состав и физические свойства амфиболов ряда куммингтонит-грюнерит из железистых кварцитов Кольского полуострова // Записки ВМО. 1999. № 1. С. 72-78.
23. Иваинок П.О., Волошин А.В., Яковенчук В.П., Пахомовский Я.А. Лвтоконцентрационные волны в цирконах из амазонитовых ранд-пегматитов Западных Кейв (Кольский полуостров) // Записки ВМО. 1997. № 3. С. 20-31.
24. Иваинок Г.Ю., Горяинов П.М., Егоров Д.Г. Введение в нелинейную геологию. Апатиты: Изд. КНЦ РАН. 1996. 187 с.
25. Иваинок Г.Ю., Никитин И.В. Оструктурно-вещественной организации железистых кварцитов Печегубского месторождения // Рудогенез в метаморфических комплексах докембрия. Апатиты: Изд. Кольского НЦАН СССР, 1991. С. 54-61.
26. Иваинок Г.Ю., Томилин М.Г. Метод нематических жидких кристаллов для исследования магнитных свойств минералов // ЗВМО. 1990. № 3. С. 95-98.
27. Иваинок Г.Ю., Тюремнов В.А., Балабонин Н.Л. О природе магнитной гетерогенности магнетитов из железистых кварцитов // Физика Земли, 1994. № 3. С. 81-87.
28. Иваинок Г.Ю., Яковенчук В.Н. Регулярные и случайные дендриты: фрактальный подход // ЗВМО. 1996. № 3. С. 16-25.
29. Иваинок Г.Ю., Яковенчук В.Н., Горяинов П.М. Основные черты карбонатообразования в гидротермальных жилах Кукисвумчоррского месторождения // ЗВМО. 1996. № 3. С. 9-23.
30. Иваинок Г.Ю., Яковенчук В.Н., Горяинов П.М., Коноплева Н.Г., Пахомовский Я.А., Кривовичев С.В. Природный минералогический автоклав // Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова. Т. 2. Полезные ископаемые, минералогия, петрология, геофизика. Апатиты: Изд. МУП "Полиграф", 2002. С. 91-103.
31. Иваинок П.Ю., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.А. Морфология и генезис дендритов доннейита-(Y) в маккельвиите-(Y) и эвальдите // ЗВМО. 1999. № 4. С. 70-76.

32. Иванюк Е.Ю., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.А. Ковдор. Апатиты: Изд. "Минералы Лаплавдии", 2002.326 с.
33. Никитин И.В., Иванюк Г.Ю. Структурная упорядоченность в железистых кварцитах (Печегубское месторождение) // Рудогенез в метаморфических комплексах докембрия. Апатиты: Изд. Кольского НЦАН СССР, 1991. С. 45-54.
34. Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А. Фрактальный доннейит-маккельвиитовый агрегат как природный аналог «Салфетки Серпинского» // ДАН. 1996. Т. 346. № 3. С. 375-379.
35. Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я. А., Меньшиков Ю. П. Минералы Хибинского массива. Москва: Земля, 1999. 326 с.
36. Яковенчук В.Н., Меньшиков Ю.П., Пахомовский Я.А., Иванюк Г.Ю. Анкилит-(La) —  $\text{SrLa}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})\text{H}_2\text{O}$  — новый карбонат из гидротермальной жилы г. Кукисвумчорр (Хибинский массив) и его соотношение с анкилитом-(Ce) // Записки ВМО, 1997. № 1. С. 96-108.
37. Goryainov P. M., Ivanyuk G.Yu. On genesis of banded iron-formation of the Kola peninsula. Synergetic aspects // Theophrastus' contributions to advanced studies in geology. Vol. II. Theophrastus Publications A. E., Athens, 1998. P. 249-267.
38. Goryainov P.M., Ivanyuk G.Yu. Self-organized lithosphere: on the fundamentals of a new geological paradigm // Academie Royale des sciences, des lettres & des beaux-arts de Belgique. 2003. Vol. 101. P. 11-23.
39. Goryainov P.M., Ivanyuk G.Yu., Golikov N.N. Banded iron formations // Ore deposits of the Kola Peninsula, North-western Russia. Research and exploration — where do they meet? 4<sup>th</sup> Biennial SGA Meeting, August 11-13, 1997, Turku, Finland, excursion guidebook B4. Geologiantukimuskeskus, Opas - Geological Survey of Finland, Guide 45. P. 21-26.
40. Goryainov P. M., Ivanyuk G.Yu., Sharov N.V. Fractal analysis of seismic and geological data // Tectonophysics. 1997. \Б\ 269. P. 247-257.
41. Pakhomovsky YaA., Men'shikov Yu.P., Yikovenchuk V.N., Ivanyuk G.Yu., Krivovichev S.V, Burns P.C Cerite-(La), (La,Ce,Ca),(Fe,Ca,Mg)  $(\text{SiO}_4)_3[\text{SiO}_3(\text{OH})]_4(\text{OH})_3$ , a new mineral species from the Khibina alkaline massif: occurrence and crystal structure // The Canadian Mineralogist. 2002. Vol. 40. P. 1177-1184.
42. Tomilin M.G., Ivanyuk G.Yu. The application of thin nematic liquid crystal layers to mineral analysis // Liquid Crystals. 1993. Vol 14. No. 5. P. 1599-1606.
43. "Yakovenchuk V.N., Pakhomovsky YaA, Men'shikov Yii.P., Ivanyuk G. Yu., Krivovichev S.V, Burns P.C. Chlorbartonite,  $\text{K}_6\text{Fe}_{24}\text{S}_{26}(\text{Cl}, \text{S})$ , a new mineral species from a hydrothermal vein in the Khibina massif, Kola Peninsula, Russia: description and crystal structure // The Canadian Mineralogist. 2003. Vol. 41. P. 503-511.

№ - 2864

Автореферат

Иванюк Григорий Юрьевич

**МИНЕРАЛОГИЯ И ПЕТРОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
ПОЛОСЧАТОЙ ЖЕЛЕЗНОРУДНОЙ ФОРМАЦИИ  
КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА**

Технический редактор В.А.Ганичев

**Лицензия серия ПД №00801 от 06 октября 2000 г.**

Подписано к печати 22.01.2004

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура Times/Cyrillic

Уч.-изд.л. 2.1. Заказ № 7. Тираж 150 экз.

---

*Владимир Александрович*

Ордена Ленина Кольский научный центр им.С.М.Кирова  
184209, Апатиты, Мурманская область, Ферсмана, 14