

О МЕТАМОРФИЗМЕ В ИЗЛОЖЕНИИ В.ГОЛЬДШМИДТА И П. ЭСКОЛЫ (К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ГЕНЕЗИСА ЖЕЛЕЗИСТО-КРЕМНИСТОЙ ФОРМАЦИИ)

И. А. Бергман

г. Москва

Поступила в редакцию 27 января 2017 г.

Аннотация: рассмотрены концепции В. Гольдшмидта и П. Эсколы, критический анализ которых показал, что исследование вещества докембрийских пород, и особенно, железистых кварцитов, принципиально не может обходиться без учета временного фактора.

Ключевые слова: метаморфизм, железисто-кремнистая формация.

ABOUT METAMORPHISM IN THE PRESENTATION V. GOLDSCHMIDT AND P. ESKOLA (ON THE STUDY OF GENESIS FERRUGINOUS-SILICEOUS FORMATIONS)

Abstract: the concept of Goldschmidt and Eskola is reviewed. Critical analysis which showed that the study of the substance of Precambrian rocks, and especially, ferruginous quartzites, essentially cannot do without taking into account the time factor.

Keywords: metamorphism, ferruginous-siliceous formation.

К интерпретации метаморфизма исследователи стали привлекать физическую химию по крайней мере с конца XIX века. Но, только начиная с работ В. Гольдшмидта и П. Эсколы начала XX в., физическая химия превратилась в одно из ведущих направлений в учении о метаморфизме.

На ранней стадии исследований интенсивность регионального метаморфизма пород петрологи ставили в связь с различной глубиной их преобразования и, соответственно, не считая верхнего пояса выветривания, выделяли 2-3 зоны глубинности в зависимости от предполагаемого изменения РТ-условий. Выделенные зоны (ката-, мезо- и эпизона) получали соответствующую качественную характеристику температур, гидростатического давления и стресса, преобладающего типа метаморфизма, и минералов, типоморфных для каждой зоны.

По мере детализации исследований и появления всё более новых фактов становилась очевидней необходимость смещения систематизации явлений метаморфизма с глубинно-зонального уровня на уровень формаций и пород. В выборе идеологии систематизации исследователи, руководствуясь, по-видимому, результатами экспериментальных исследований и их теоретического обобщения в форме Правила фаз Дж. Гиббса (см. ниже), отдали предпочтение связи минерального и химического состава пород. Уже в 1911 г. эта занимавшая петрологов идея получила мощную физико-химическую поддержку в знаковой монографии В. Гольдшмидта, посвященной контакто-

вому метаморфизму пород в окрестностях Христиании [1], а также в ряде статей, выходящих за рамки контактового метаморфизма [2 и др.]. Основную задачу своих исследований этот автор видел в создании систематики продуктов контактового метаморфизма осадочных пород, базирующейся, с его точки зрения, именно на связи химического и минерального составов контактовометаморфизующихся пород.

В природе, утверждал В. Гольдшмидт [1, стр. 313], отдельные минеральные виды встречаются обособленно относительно редко. В процессе минералообразования одновременно обычно возникает несколько минералов, содержащих одну или несколько общих составных частей. Со временем, особенно петрографами, которые при микроскопическом исследовании горных пород могли наблюдать множество различных комбинаций, собран огромный материал по совместному нахождению различных минералов.

Особенность теоретической обработки закономерностей образования минеральных ассоциаций в кристаллических сланцах, рудных жилах состоит по этому автору в том, что мы имеем дело с конечным состоянием системы, в которой минералогические и петрографические исследования нам непосредственно демонстрируют, какие минералы образовались совместно. Наконец, очень существенный вклад в познание минеральных ассоциаций давали экспериментальные исследования, которые непосредственно указывали, как несколько минералов образуются друг около друга. Таким образом, в противоположность

петрографам, рассматривавшим метаморфизм как эволюцию минералов с участием флюидов, теперь, руководствуясь материалами петрографических и экспериментальных исследований, метаморфизм следует рассматривать, как смену минеральных ассоциаций *одновременно* образовавшихся минералов.

Более того, в дополнение к одновременности минеральные ассоциации следует наделять ещё одним крайне важным свойством – равновесностью входящих в их состав минералов. Сам В. Гольдшмидт пишет об этом следующее: «...минералогические и петрографические исследования нам непосредственно указывают, какие минералы образовались совместно. Мы можем, во всяком случае, *предположить*, что при кристаллизации существует равновесие между выделившимися минералами и насыщенным ими раствором. При этом не важно, был ли “насыщенный раствор” водным раствором, расплавом или только насыщенным паром». И далее: «Равновесие *однозначно* определяется *общим составом системы, содержание энергии в которой и обычные величины давления и температур указывают на состояние с максимальной энтропией*».

«И в этой области естественных явлений (в сфере метаморфизма, И. Б.), – продолжает В. Гольдшмидт [2, стр. 3], – *мы должны установить общие законы, которые с количественной точностью управляют образованием отдельных типов метаморфических пород во всем их многообразии*. Особенное значение принадлежит тем законам, которые *базируются исключительно на термодинамике*, которая не нуждается ни в каких других предположениях, кроме трёх теорем механической теории теплоты. Наука, которая занимается приложением термодинамики к превращению вещества на макроуровне, физическая химия; *эта наука - ключ к пониманию метаморфизма пород*».

Чтобы законы термодинамики можно было применить к метаморфизму пород, *мы, прежде всего, должны с максимальной точностью установить, что представляли собой породы до своего превращения и как они изменились по его завершению*. Для этого в качестве рабочего метода В. Гольдшмидт предложил использовать исследование пород в тонких шлифах оптическим методом. В то же время, проведенные Дж. Коббом исследования [1, стр. 106], показывают, что, например, и безводные оксиды при тех же температурах – ниже температур плавления всех участвующих соединений и смесей – могут вступать в реакцию. Общий результат, достигнутый в исследованиях по проблеме [2, стр. 4] состоит в том, что обычный метаморфизм, будь то контактовый или региональный, протекает в твердом агрегатном состоянии (без расплавления); только маленькая часть породы находится в другом агрегатном состоянии (растворе). Позже химические исследования показали [3], что в количественном отношении общий состав пород при нормальном метаморфизме изменяется несущественно (могут удалиться только некоторые летучие вещества, вода и углекислота). *Привнос вещества в*

породы, как правило, не наблюдается.

Если сопоставить минеральный состав пород на контакте с их химическим составом, то нетрудно прийти к выводу о том, что без сомнения между ними имеется закономерная связь. При более детальном рассмотрении такого рода сопоставления минеральный состав контактовой породы можно вывести, зная её химический состав, если известны давление и температура в процессе контактового метаморфизма. К тому же совершенно безразлично, каким путем достигается конечный результат метаморфизма – кристаллизацией из гомогенного расплава, или через посредство отдельных расплавленных частиц, или под действием растворителя из внешнего источника, *но только при условии, если процесс длится до тех пор, пока не будет достигнуто конечное стабильное состояние, пока вся порода не метаморфизуется в такой степени, какая только может быть достигнута при данных значениях температуры и давления*.

Фундаментальным законом, связывающим химический состав контактовых пород с их минеральным составом, является *Правило фаз Дж. Гиббса* (1876): в термодинамической системе, *достигшей внутреннего равновесия*, число степеней свободы равно числу независимых компонентов минус число фаз плюс число факторов, влияющих на равновесие. В случае большого количества компонентов в системе практическое применение Правила фаз может вызывать определенные трудности, поэтому я, пишет В. Гольдшмидт, предпочитаю применять Правило фаз в специализированной форме [1, 2]. Последняя гласит: «*В любой стабильной комбинации максимально возможное число сосуществующих минералов эквивалентно числу независимых переменных вещества, определяющих ее общий состав*». И продолжает: «эта форма позволяет представить соотношение химического и минерального состава пород в более наглядной форме и, к тому же, *в форме законов образования двойных солей (соединений)*. Эти законы содержатся в самом правиле фаз, и они особенно подходят для того, чтобы представить реакции, происходящие в контактовых породах. Примером тому реакция андалузит + волластонит = анортит:



Изменение пород в процессе метаморфизма состоит в том, что в них происходит *взаимодействия между отдельными компонентами* [2]; в результате превращения образуются некоторые новые соединения, в то время как другие *одновременно* исчезают. Важно подчеркнуть: за обоснованием этого тезиса В. Гольдшмидт обращается к термодинамике. В частности, из последней следует, что любая смесь данных веществ при заданных значениях температуры и давления может состоять только из единственной комбинации соединений в твердом агрегатном состоянии [2]. Если каким-нибудь образом возникает другая минеральная комбинация, отличающаяся от ранее образованной с установившимся равновесием, то в этой системе

должны начаться такие превращения, которые, в конечном счете, приведут к возникновению единственно возможного стабильного состояния.

Важное преимущество такого термодинамического подхода состоит в том, что нам не нужно привлекать какие-либо специальные гипотезы для объяснения того, как осуществляется взаимодействие – в газообразном, жидком или твердом агрегатном состоянии, с участием или без участия раствора из внешнего источника, поскольку конечный результат однозначно определяется типом и количеством вещества, а также господствующими в системе температурой и давлением.

Возвращаясь к проблеме равновесности, В. Гольдшмидт задается вопросом [2, стр. 5]: как найти условия равновесности данных веществ при данных значениях температуры и давления? И отвечает: в этой первоначальной форме проблема может показаться сложной, поскольку вещества, которые должны быть приняты во внимание (кремнезем, глинозем, щелочи и др.) могут образовать большое разнообразие химических соединений, которые мы затем находим в породах в виде минералов. Решение этой проблемы облегчается, если воспользоваться упрощенной формой Правила фаз – Минералогическим правилом фаз, применимым к процессам в конденсированных системах, к коим относится метаморфизм пород (как контактовый, так и региональный); в такой форме мы определяем верхнюю границу числа сосуществующих минералов в *стабильной* комбинации. Таким образом, критерием равновесности той или иной ассоциации минералов метаморфической породы становится удовлетворение требованиям Минералогического правила фаз.

Практическое применение этого закона В. Гольдшмидт [1] иллюстрирует примером контактового метаморфизма известняков и глинистых сланцев окрестностей Христиании, представленных 10 классами продуктов их метаморфизма (*при условии, что они находились в непосредственной близости к расплавленной глубинной породе, вызвавшей тепловое воздействие*).

Еще один вариант физико-химического подхода к анализу процессов метаморфизма связан с именем П. Эскола, объектом исследований которого явились метаморфизованные породы архея Юго-Западной Финляндии (район Ориярви) [4]. В ходе исследований петрогенеза архея Южной Финляндии автор был немало удивлен, обнаружив тот факт, что состав минеральных парагенезисов метаморфических пород контролировался, по-видимому, простыми законами и был тесно связан с их химическим составом [4, стр. 109]: архейские формации фактически достигли состояния почти *истинного химического равновесия*.

Последнее может быть достигнуто только в том случае, если РТ-условия остаются приблизительно постоянными в течение всего преобразования (метаморфизма). Среди петрологов сложились различные мнения по поводу трактовки достижения метаморфическими породами состояния истинного равновесия.

П. Эскола, в результате проведенных им исследований архейских формаций, убедился в том, что равновесие было достигнуто в очень высокой степени. Следовательно, считает он, у него есть основания интерпретировать эти метаморфические породы с точки зрения химической статистики. *Метастабильные реликты и продукты вторичного изменения во внимание не принимаются*. В этом случае мы можем предложить следующий тезис, основанный на фундаментальных теориях физической химии.

В любой породе метаморфической формации, которая в результате метаморфизма достигла состояния химического равновесия при постоянных температуре и давлении, минеральный состав контролируется исключительно химическим составом. Мы пришли к общей концепции, которую автор предлагает назвать концепцией метаморфических фаций [4, стр. 114–115].

По принадлежности к определенным фациям мы относим породы, которые, имея идентичный химический состав, слагаются одними и теми же минералами. Следует подчеркнуть, что эта концепция *не постулирует никаких предположений, касающихся генетических, дометаморфических соотношений пород*; каждая фация может включать все возможные химические и генетические разновидности. Одна и та же фация может иметь место в совершенно различных частях Планеты, тогда как на смежных площадях могут сосуществовать различные фации.

Используя минералогические критерии, П. Эскола первоначально выделил пять метаморфических фаций: санидиновую, роговиковую, амфиболитовую, зеленых сланцев и эклогитовую; позднее они были дополнены еще тремя – гранулитовой, эпидотовых амфиболитов и глаукофановых сланцев [5, стр. 152].

Для анализа равновесных минеральных ассоциаций (парагенезисов) П. Эскола предложил использовать диаграммы в форме равносторонних треугольников. В частности на диаграммах вида АСF: в вершину А помещается та часть глинозема, которая не связана с Na и K, в вершину С – СаО и в вершину F – (Mg, Fe, Mn)O. Из анализа *выводятся избыточные компоненты* и аксессуарные минералы. Таким образом, в плоскости диаграммы АСF получают представление соответствующие отношения компонентов метаморфических пород; положение точек на диаграмме выражает состав минералов, находящихся в метаморфической породе соответствующей фации.

К 1991 г. автор закончил полную реконструкцию дометаморфической и первичной природы рудного и нерудного вещества и механизма слоистого сложения железисто-кремнистых формаций раннего докембрия [3, 6]. Из реконструкции, в частности, следует, что процесс метаморфизма пород этих формаций происходил не как смена равновесных минеральных ассоциаций, а как последовательная смена отдельных минералов (рис. 1). На этом фоне ассоциация кварца и магнетита, возникающая на ранней стадии метаморфизма, является сквозной вплоть до гранулитовой

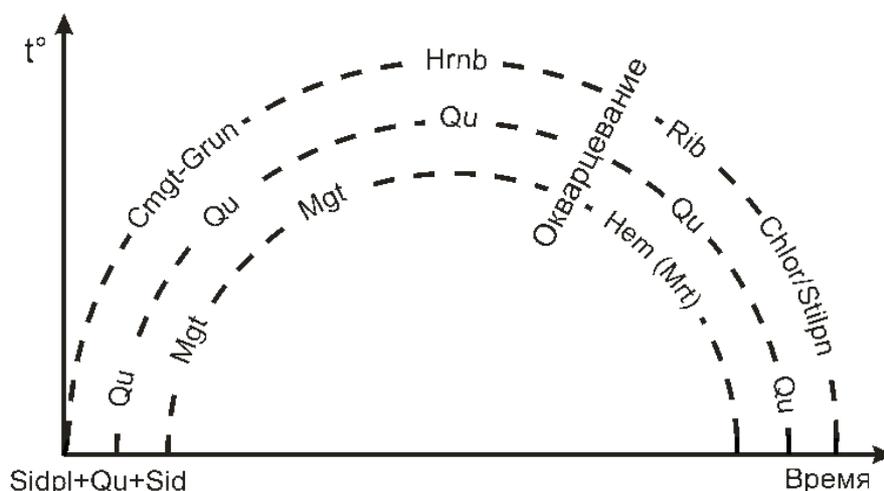


Рис. 1. Реконструированная последовательность метаморфогенного минералообразования в породах железисто-кремнистой формации Криворожской серии: Sidpl/Sid – сидероплезит/сидерит, Qu – кварц, Cmgт-Grun – куммингтонит-грюнерит, Hrnb – роговая обманка, Rib – рибекит (или щелочные амфиболы), Chlor – хлорит, Stilpn – стильпномелан, Mgt – магнетит, Hem/Mrt – гематит/мартит.

фации метаморфизма; меняется только степень кристалличности обоих минералов – от тонкозернистой до крупнозернистой. Столь тесную пространственную связь кварца и магнетита в железистых кварцитах некоторые исследователи (Семененко, 1954, 1966; Глаголев, 1966; и др.) воспринимали и интерпретировали как связь парагенетическую вопреки тому, что кварц и магнетит – физико-химические минералы-антагонисты. Но, если кварц и магнетит физико-химические антагонисты, то как они оказались в совместном залегании? Из упомянутой выше реконструкции автора следует, что совместное нахождение кварца и магнетита в железистых кварцитах следствие 4-х процессов. Первый процесс сближения железа и кремнезема произошел в бассейнах седиментации вследствие отложения железа в форме сидерита, а кремнезема в форме коллоидного силицита на смежных участках фациального профиля в области отложения хемогенных фаций – сидерита относительно ближе к берегу, а силицита – дальше от берега. Второе, ещё более тесное сближение железа и кремнезема произошло вследствие механического процесса – трансгрессивно-регрессивной миграции фаций, что привело к переслаиванию сидеритовых и силицитовых слоев. Третий процесс – метаморфизм, в результате которого на месте сидерита образовался магнетит и слоистость трансформировалась в переслаивание магнетитовых и кварцитовых слоев. Четвертый процесс – кварцевый метасоматоз, проявившийся в форме миграции кварца кварцитовых слоев в магнетитовые и силикатные слои с замещением в них непрореагировавших в магнетит карбонатов, а также силикатов. Последний процесс сродни переотложению примесного кремнезема в карбонатных толщах из областей повышенного давления в области пониженного с образованием в них кремней и более редких агатов.

В поисках дополнительного обоснования высказанным выше соображениям автор обратил внимание

на то, что *Природа образована 92 заведомо неравновесными элементами*. Неоднородность и неравновесность элементов начинаются (для автора) на ядерном уровне (в ядре водорода один протон ... в ядре урана 92 протона), продолжается в строении атомов (в центре ядро, по периферии на различных энергетических уровнях вращаются электроны, среди которых, согласно принципу В. Паули нет даже двух во всем эквивалентных) и далее на минеральном, породном и формационном уровнях. Так, например, железисто-кремнистые формации – толщи переслаивания до 800-1200 м *гетерогенных* кварцитовых, рудных – магнетитовых, в меньшей степени гематит-магнетитовых, гематитовых, сидеритовых и силикатных слоев мощностью от долей мм до 5-7 см и, как исключение, до 20-40 см. А в анизотропной (по минеральному составу слоев, теплопроводности, проницаемости, всех видов устойчивости и т.п.) открытой среде в каждой её точке (даже без учета деструктивной тектоники) не может быть одинакового давления, одинаковой температуры, одинакового давления и состава флюидной фазы и их одинакового изменения. И процессы метаморфизма – неизохимические процессы. Кстати, ещё раз заметим: там, где всё равно, одинаково, там нет предмета науки, там ученому делать нечего: он не нужен.

Результат анализа

Возвращаясь к В. Гольдшмидту: ограниченный фактический материал, гиперболизация возможностей минералогических и петрографических исследований в реконструкции метаморфизма и априорная личная убежденность в том, что физическая химия – ключ к познанию метаморфизма, дезориентировали этого автора в вопросах метаморфизма Природных систем. Ограничимся перечислением некоторых негативных положений в модели метаморфизма В. Гольдшмидта:

1. Экспериментальные системы задает исследователь, Природные – геологическое время. Ни в Прави-

ло фаз Дж. Гиббса, ни в Минералогическое правило фаз В. Гольдшмидта не входит геологическое время, следовательно, они не применимы к Природным системам, в частности, с целью выделения несуществующих равновесных минеральных ассоциаций.

2. И в том случае, если система находится в конечном состоянии, минералогические и петрографические исследования не могут демонстрировать совместное образование минералов; дело в том, что возможности этих исследований ограничены констатацией пространственного сонахождения минералов, которое является внешним (несущественным) признаком систем, тогда как совместное образование минералов относится к категории их внутренних (существенных) признаков; в их субординации определяющими являются внутренние, а не внешние, как мыслит В. Гольдшмидт; примером тому железистые кварциты, в которых в тесной ассоциации оказались кварц и магнетит, являющиеся разновременными образованиями (см. выше). Вопреки этому автору совместное образование минералов в экспериментальных системах, являющихся закрытыми, не может быть распространено на Природные системы, являющиеся открытыми.

3. Ошибочным является и отрицание В. Гольдшмидтом важной роли флюидов в процессах метаморфизма, как и огульное отрицание в этих же процессах привноса-выноса вещества, за которым, по существу, стоит стремление упростить процессы метаморфизма и свести их к некоторому подобию экспериментальных систем. Опровержение тому, в частности, обнаруживаются в железистых кварцитах. Действительно, откуда без участия флюидов поступает кислород на превращение десятков миллиардов тонн сидерита в магнетит, а также на мартитизацию магнетита и образование дисперсного гематита в железистых кварцитах, если в протоосадках железистых кварцитов ничего, кроме сидерита и силицита не было?

4. В. Гольдшмидт, возлагая большие надежды на минералогические и петрографические исследования по самому строгому восстановлению дометаморфической природы (метаморфических) пород, видимо, не был знаком с такими явлениями как выпадение в процессах метаморфизма минеральных фаз и невозможность их восстановления ни минералогическими, ни петрографическими методами, как сложность установления взаимоотношений минералов при отсутствии в них спайности, как избирательный характер замещения минералов, и т.д.

5. Не находит подтверждения и закон образования двойных соединений В. Гольдшмидта, рассматривающего метаморфизм как взаимодействие между отдельными компонентами контактирующих минералов, приводящее к образованию новых соединений и исчезновению ранее образованных. Примером тому рудные слои сидерит-магнетитового кварцита.

Опубликованные вслед за В. Гольдшмидтом работы П. Эсколы [4, 5] дополнили петрологию метаморфических пород следующими двумя моделями: концепцией метаморфических фаций и графическим ана-

лизом минеральных парагенезисов на треугольных диаграммах в координатах типа ACF.

Изложенная выше концепция метаморфических фаций П. Эсколы, даже если опустить отсутствие несуществующей в Природе равновесности (см. выше), неприменима к метаморфическим продажам по следующим причинам: 1) в предложенной этим автором концепции отсутствует геологическое время, являющееся неотъемлемым признаком всех Природных объектов, включая и метаморфические породы; 2) отсутствуют критерии равновесности метаморфических пород, кроме личной убежденности самого П. Эсколы в её существовании; 3) минеральный и химический состав пород, в том числе метаморфических, относятся к категории их внешних, несущественных признаков; поэтому они не могут быть критериями состояния метаморфических пород (которое относится к категории внутренних, существенных признаков), в том числе находятся ли они в состоянии равновесности или нет; 4) согласно П. Эсколе, предложенная им модель систематизации метаморфических фаций не постулирует никаких предположений, касающихся генезиса, дометаморфических соотношений пород и т.п. Если так, то такая механистическая модель геологии не нужна: ведь смысл изучения, реконструкции и систематизации метаморфизма как раз и состоит в выяснении дометаморфической природы метаморфических пород с последующим выходом на их генезис с целью восстановления истории геологического развития территории и последующей оценке формирования ее металлогенического потенциала.

Предложенный П. Эсколой графический метод изображения и анализа равновесных минеральных ассоциаций метаморфических пород на треугольных диаграммах типа ACF, получивший в литературе широкое распространение, неприменим к метаморфическим породам (вообще породам!): нет равновесных минеральных ассоциаций, нет и их анализа. Характеризующим метаморфизм диаграммам типа ACF свойственны ещё следующие недостатки: на диаграммах *опущено геологическое время*, без которого в геологии все теряет смысл: предложенные П. Эсколой приемы по приспособлению минерального состава метаморфических пород к возможностям его графического изображения, в частности выведение из состава избыточных и второстепенных компонентов, объединение компонентов и т.п. – являются исключительно механическими приемами; они не противоречат самой механистической сути парагенетического анализа, но противоречат генетической сущности метаморфизма; в частности, *парагенетическим анализом на диаграммах ACF не могут быть восстановлены исчезнувшие в процессе метаморфизма фазы, например сидериты в железистых кварцитах*. Поясним на примере железистых кварцитов раннего докембрия. В них железо (Fe^{2+} и Fe^{3+}) и кремний – избыточные компоненты. Если мы их выведем из анализа, оставшаяся порода перестанет соответствовать железистым кварцитам.

Выводы

Работы В. Гольдшмидта и П. Эсколы характеризуют состояние физико-химических исследований в области метаморфизма на первую половину XX в. Для геологов они важны тем, что опыт их физико-химических исследований будет содействовать более объективному отражению метаморфизма пород, особенно пород раннего докембрия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Goldschmidt, V.M.* Die Kontaktmetamorphose im Kristianigebiete. Videnskapsselskapets Skrifter. I. Mat.- naturv. Klasse / V.M. Goldschmidt. – 1911. – N 11. – 483 p.
2. *Goldschmidt, V.M.* Die Gesetze der Gesteinsmetamorphose mit Beispielen aus der Geologie des Südlichen Norwegens. Vi-

denskapsselskapets Skrifter. 1. Mat.-naturv. Klasse. / V.M. Goldschmidt. – 1912. – N 22. – 16 p.

3. *Бергман, И.А.* Железисто-кремнистый рудогенез раннего докембрия / И.А. Бергман. – М.: ФГУП ВИМС, 2012. – 344 с.

4. *Eskola, P.* Om sambbandet etc. Англ. резюме. On the relations between the chemical and mineralogical composition in the metamorphic rocks of the Orijarvi region / P. Eskola // Bull. Comm. Geol. Finlande. – 1915. – N 44. – P. 145.

5. *Eskola, P.* The mineral facies of rocks. Norsk. Geol. Tidsskrift. / P. Eskola. – 1920. – Bd VI. – Hefte 1–2. – P. 143–194.

6. *Бергман, И.А.* Принципы и методы реконструкции первичной природы докембрийских железистых формаций в связи с проблемой их генезиса и прогнозом месторождений: автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук / И.А. Бергман. – М.: ВИМС. – 1991. – 40 с.

г. Москва

Бергман Иван Андреевич, доктор геолого-минералогических наук

Тел.: 8 (495) 614-61-30

Moscow

Bergman I. A., Doctor of the Geological and Mineralogical Science

Тел.: +7(495) 614-61-30