Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1987, т. 112

УДК 552.3

ЭВОЛЮЦИЯ ИНТРУЗИВНОГО МАГМАТИЗМА В ИСТОРИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ И ЕЕ ПРИЧИНЫ

В.Н.ЛАРИН, Ю.Б.МАРИН

В геологической истории Земли в настоящее время принято выделять пять стадий тектономагматической эволюции [4]: I) «лунную» (более 3 млрд.лет) с примитивным базитовым магматизмом; 2) нуклеарную (3,5–2,5 млрд.лет) с андезит-базальтовым характером магматизма и максимальным развитием коматиитовых формаций; 3) кратонную (2,5–I,5 млрд.лет), в ходе которой продолжается формирование магматических формаций нуклеарной стадии при резком снижении роли коматиитов и отчетливом увеличении удельного веса таких формаций, как гранитогнейсовая, мигматитовая, чарнокитовая, гранитов-рапакиви, повышается роль калиевых магматитов, появляются первые щелочные граниты; 4) континентальную (I,5–0,25 млрд.лет), наиболее типичной особенностью которой является многообразие связанных с ней магматических формаций и смена проявления магматизма с площадного на линейно-поясовый; 5) континентально-океаническую (250 млн.лет – ныне), в ходе которой магматизм становится отчетливо континентальным и океаническим, причем континентальный магматизм характеризуется разнообразным набором формаций с широким развитием гранитоидных и щелочных.

Анализ особенностей магматизма различных этапов развития Земли позволяет в качестве ведущей тенденции его эволюции в истории нашей планеты назвать смену примитивного коматиит-базитового магматизма глубоко дифференцированным магматизмом, с закономерным последовательным расширением спектра составов изверженных пород и возрастанием роли известково-щелочных и щелочных формаций [4]. Подчеркивая закономерно направленный необратимый характер общей эволюции магматизма Земли в целом, О.А.Богатиков и его соавторы [4] связывают это со снижением энергетического потенциала Земли во времени, прогрессирующим обеднением верхней мантии некогерентными, летучими и радиоактивными элементами, вовлечением в процессы магмообразования континентальной коры, возрастанием ее мощности и гетерогенности, усложнением геодинамических условий магмообразования. Сказанное, в свою очередь, находит достаточно достоверное и непротиворечивое объяснение с позиций гипотезы «изначально гидридной Земли» [3, 8].

Анализ геодинамической обстановки в ходе развития Земли, свидетельствующий о ее коренных изменениях, позволяет в наиболее общем виде выделить три типа режима и три соответствующих им этапа: I) архейский – догеосинклинальный, с высокими геотермическими градиентами, безводным гра-

нулитовым метаморфизмом и состоянием мелкоячеистой конвекции; 2) протерозойский, знаменующийся появлением протогеосинклинальных зеленокаменных поясов и являющийся главным этапом формирования гранитного слоя коры; 3) рифей-фанерозойский – этап платформенно-геосинклинального развития планеты, свойственный только континентам.

Специфика архея целиком обусловлена процессом формирования силикатно-окисной оболочки изначально гидридной Земли. Эта оболочка нарастала постепенно сверху вниз; по мере увеличения ее мощности (и давления в зоне реакций) экзотермический эффект окисления уменьшался и конвективные движения постепенно затухали. Рубеж архея – протерозоя обусловлен достаточно высокой степенью окисления петрогенных элементов во внешней геосфере планеты, что отражается в повсеместном появлении окисленного (водно-углекислого) флюида, в наступлении эпохи амфиболитового метаморфизма и синхронизированного с ним „калиевого взрыва", обусловившего грандиозную калиевую гранитизацию и гранитообразование нижнепротерозойского времени [3, 8].

Хотя многие исследователи в настоящее время поддерживают концепцию Д.С.Коржинского [6] о ювенильных потоках трансмагматических щелочных флюидов, вызывающих гранитизацию, вопрос о „зоне питания" глубинного флюида щелочными элементами и причине достаточно внезапного появления его гранитизирующих свойств только с конца архея – начала протерозоя остаются открытыми. По нашему мнению, эти проблемы не связаны с температурным режимом планеты (поскольку именно в архее мантия была наиболее прогрета и находилась в состоянии мелкоячеистой конвекции) и решение их следует искать, скорее всего, в эволюции состава мантии.

Из петрогенных элементов калий является наиболее сильным основанием и естественно предположить, что вынос его связан с изменением режима кислотно-основного взаимодействия в недрах Земли. В пользу этого предположения свидетельствует изменение флюида от безводного резковосстановленного, в составе которого в архее преобладали H_2 и CH_2 до полностью окисленного в протерозое. Этот вывод, ранее основанный на термодинамических и экспериментальных данных, сейчас подтвержден прямыми анализами флюидной фазы метаморфических пород [9, 10]. Таким образом, синхронизированные в истории геологического развития появление воды в составе глубинного флюида (окисление его) и калиевый взрыв, по всей вероятности, взаимообусловлены.

Окисление водорода до воды свидетельствует об увеличении активности кислорода, а повышение активности кислород-аниона должно вызывать увеличение активности (в конечном счете, концентрации) основных (в первую очередь калия) оксидов [7]. Из гипотезы изначально гидридной Земли, предполагающей формирование силикатно-окисной геосферы в результате выноса кислорода из тела планеты в процессе „водородной продувки", вытекает вывод о постепенном (во времени) увеличении индекса основности внешней силикатной оболочки, соответствующем уменьшении степени ее полимеризации и увеличении активности кислорода по мере повышения его концентрации. В свете исследований В.А.Жарикова и Д.С.Коржинского [5-7], при наличии водородного флюида это могло обусловить вынос из мантии щелочей (в виде групп R-OH), который

ыл возможен лишь при достижении определенного уровня концентрации кислорода [8], что и явилось причиной калиевого взрыва (и его «внезапности») и широкого развития амфиболитовой фации метаморфизма, сменившей во времени гранулитовую фацию. С традиционных позиций силикатно-окисного сложения всей мантии и постоянного для нее во все времена индекса основности задержку калиевого взрыва на 2-2,5 млрд.лет от момента рождения Земли объяснить трудно.

Начавшийся в нижнем протерозое процесс расширения планеты, сопровождавшийся уменьшением силы тяжести и соответствующим изменением градиента давления в мантии в разные геологические эпохи [3, 8], определяет всю дальнейшую эволюцию ее геодинамического режима и характер эволюции коры и мантии континентов во времени (рис.I). Здесь важно подчеркнуть постепенное укрупнение линейных структур при одновременном уменьшении их числа, что находит объяснение в закономерной генерализации сети структур растяжения по мере увеличения мощности мантии и уменьшении радиуса ядра, т.е. по мере перемещения фронта разуплотнения в глубь планеты [8]. В процессе расширения вслед за погружением «изобары-100» происходил распад шпинелевого гранатита и трансформация его в пироксен-оливиновую смесь - пиролит, по [8]. Такая гранатит-пиролитовая трансфор-

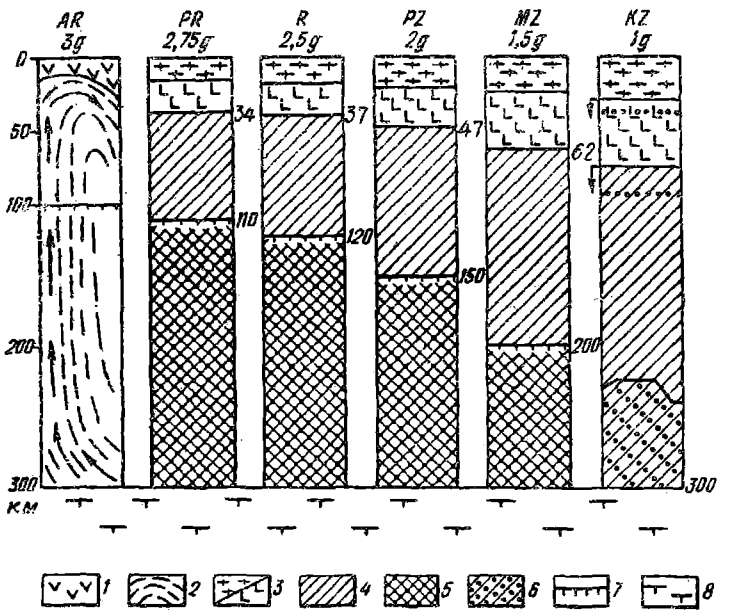


Рис.1. Характер эволюции коры и мантии континентов во времени в зонах *полициклического (сквозного)* геосинклинального развития (принципиальная модель)

1 - примитивная базитовая кора архея; 2 - верхняя мантия архея - силикатно-окисная оболочка планеты, находящаяся в процессе формирования вследствие выноса кислорода из недр планеты (стрелками условно показано состояние конвективного перемешивания); 3 - двухслойная протерозой-фанерозойская кора (примерное соотношение гранитной и базальтовой частей принято 1:1,5); 4 - рестит - слой мантии, из которого извлечены литофильные элементы; 5 - шпинель-гранатитовый гиполит; 6 - пиролит - пироксен-оливиновый гиполит (наличие пиролита в кайнозойской колонке отражает незавершенность процесса образования коры в альпийском поясе); 7 - слой C мантии (интерметаллы); 8 - изобара-100

Характерные для указанных временных моментов значения силы тяжести g приведены по данным работы [8]

мация должна была сопровождаться «решетчатым" сбросом целого ряда элементов (в том числе калия и других литофилов) в связи с уменьшением изоморфной емкости решеток оливина и пироксена по сравнению с гранатом и шпинелью. «Сброшенные" решетками литофилы должны находиться в геохимически неустойчивом состоянии (что способствует их мобилизации) и служат источником элементов для глубинного флюида, вызывающего гранитизацию и гранитообразование в верхних горизонтах земной коры. Остальные особенности эволюции и тектономагматической активности, свойственные протерозойскому и рифей-фанерозойскому этапам, связываются с закономерным изменением характера истечения водорода из недр планеты по мере увеличения мощности мантии. Конфигурация его потока должна существенно меняться при продвижении от ядра в верхние геосферы. В нижних частях мантии «испаряющийся" водород, по-видимому, представлен достаточно однородным облаком протонного газа, обволакивающим ядро. При истечении водорода однородное (и разреженное) облако должно дифференцироваться на ряд отдельных более плотных потоков. Последние по мере проникновения сквозь мантию оливаются в несколько крупных и концентрированных «русел", по которым происходит заложение тектоногенов.

Предложенная схема позволяет понять характерные особенности конфигурации потоков водорода во времени и соответственно наметить причину эволюции тектономагматической активности в истории развития планеты [8]. Так, в архее до расширения Земли и в начале этого процесса в протерозое при маломощной мантии водородное облако не успевало разделиться на отдельные потоки, что и объясняет повсеместность тектономагматической активности в архее и площадное развитие гранитизации в протерозое. В дальнейшем по мере расширения планеты и увеличения мощности мантии водородный поток повсеместно дифференцировался на отдельные струи, что обусловило локализацию тектономагматической активизации в обособленных зонах, разделенных стабильными блоками; процесс стягивания потоков водорода в крупные русла, видимо, сопряжен с явлением генерализации структур растяжения.

Цикличность тектоногенеза в рамках предлагаемых построений объясняется пульсационным отделением водорода от ядра Земли. Каждый цикл начинался разложением гидридов во внешней сфере внутреннего ядра, что обусловливало разогрев и повышение давления протонированного водорода во внешнем ядре. Это приводило к бурной дегазации водорода и последующему разуплотнению внешней зоны ядра, причем первое могло вызвать на поверхности планеты геосинклинальный цикл тектономагматических явлений, тогда как сокращение дегазации и разуплотнение должны были сопровождаться расширением океанических впадин. Поскольку причины геологического развития связываются с циклическим разложением ядра, естественен вывод - крупные геотектонические эпохи на земном шаре должны быть синхронными.

С каждым циклом границы внешнего и внутреннего ядра перемещаются к центру планеты на некоторый интервал, причем ритм цикличности определяется процессом диссоциации водородистых соединений во внутреннем ядре. Если допустить, что устойчивость гидридов против термического разложения линейн

возрастает с ростом давления, то граница внутреннего ядра должна была погружаться с каждым циклом примерно на один и тот же интервал, но объемы вещества, вовлекаемые в разложение, резко уменьшались от ранних циклов к поздним [8]. Соответственно этому должно было сокращаться и время дегазации и разуплотнения, т.е. должна была уменьшаться продолжительность циклов разложения гидридного ядра и определяемых ими тектономагматических циклов (явление акселерации).

Одной из самых общих закономерностей магматизма является направленное, обычно гомодромное, изменение состава, выражающееся в отчетливом уменьшении содержаний Ca, Mg, Fe, Ti, Mn с увеличением содержаний кремнезема и щелочей и прослеживающееся как в ходе развития каждого из тектономагматических циклов фанерозоя, так и при образовании интрузивных серий и отдельных формаций [I, I2, I3, I5]. Наряду с этим от ранних формаций к поздним заметно увеличивается разнообразие элементов-примесей и намечается четкое повышение содержаний редких и редкоземельных элементов при уменьшении сидерохалькофильных [3, II-I4]. Обращает внимание увеличение неоднородности (дисперсии) распределения петрогенных и особенно малых элементов в направлении к поздним формациям. Корреляционные отношения между петрогенными, а в большинстве случаев и между петрогенными и малыми элементами достаточно достоверны и хорошо выражены в ранних формациях, к самым поздним они ослабевают и часто становятся незначимыми [I3].

По петрогеохимическим особенностям интрузивные формации фанерозойских складчатых областей и активизированных платформ делятся на три последовательно возникающие группы:

I. Г и п е р б а з и т о в у ю, в которую объединяются формации, являющиеся производными недифференцированных или слабо дифференцированных мантийных расплавов, возникших за счет „реститового" субстрата верхней мантии, лишенной легкоплавкой фракции (нижний уровень магмогенерации). Главнейшие петрохимические особенности гипербазитовых формаций (повышенные содержания магния и железа, резкий антагонизм магния по отношению ко всем элементам) унаследованы и в известной степени характеризуют химизм переплавленного вещества верхней мантии.

2. Г а б б р о - г р а н и т о и д н у ю, формации которой рассматриваются как продукты в основном корового магматизма на среднем уровне магмообразования, отвечающем базальтовому слою, с образованием габбро-плагиогранитовых серий, и на верхнем (гранитогнейсовый слой) - с образованием собственно гранитоидных формаций. Инверсия геосинклинальной области приводит к смещению уровня магмообразования в верхние горизонты земной коры. Связанная с этим смена габбро-плагиогранитовых серий существенно гранитоидными отражает снижение производительности магматических очагов нижнего и среднего уровней и максимум магмообразования на верхнем уровне и приводит к некоторому нарушению гомодромного характера петрохимической эволюции [I3]. Однако существенной перестройки структур корреляционных связей петрогенных элементов в формациях разных серий при этом

не устанавливается. По-видимому, антагонизм Si (K, Na) по отношению к Al (Ca, Mg, Ti, Fe, Mn) является главнейшей петрохимической особенностью вулканогенных, интрузивных и метаморфических коровых образований вне зависимости от уровня магмообразования [13].

3. Щелочно-гранитоидную - формации этой группы можно считать продуктами кристаллизации гибридных (ювенильно-коровых) магм [12]. Предполагается, что они возникают за счет взаимодействия остаточных низкотемпературных кислых расплавов с глубинными флюидами, обогащенными щелочами. По-видимому, гибридный характер этих формаций приводит к антагонизму фемических элементов по отношению к алюминию, а избыток натрия - к устойчивой положительной связи пары (Na + Al), антагонистической по отношению к кремнезему.

Интрузивные породы, возникающие в течение тектономагматического цикла, обычно образуют закономерно построенные латеральные ряды, обусловленные миграцией эпицентров разновозрастной магматической деятельности. Структурно-магматическая зональность определяется не только смещением ареалов распространения поздних формаций в сторону более стабильных блоков и изменением в этом направлении степени прерывистости (уменьшение) и завершенности (увеличение) серий, но и вариациями составов однотипных пород, особенно увеличением их калиевости.

Согласно нашей концепции, ранние гипербазиты и базиты (а также инициальный вулканизм) могут быть связаны с заложением океанической структуры растяжения на этапе расширения Земли, предшествующем появлению экстремального теплового потока, обусловленного истечением водорода от ядра планеты. В дальнейшем по мере заложения зоны заглатывания и формирования депрессионной воронки диссипация тепла из астеносферы вызывала подъем геоизотерм и постепенное проникновение фронта метаморфизма и магмообразования через базальтовый, диоритовый и гранитовый слои коры с возникновением габбро-диорит-гранодиорит-гранитовых серий, которые, естественно, не могут выходить за пределы своей геосинклинальной зоны, определяемой размером депрессионной воронки, продуцирующей тепло. Появление аляскитов в поздне-посторогенный этап на регрессивной стадии метаморфизма можно связать с процессом всплывания астенолитов, которые транспортировали из зоны заглатывания в подкоровые горизонты необходимые для гранитообразования тепло, водород, воду и прочие ювенильные компоненты, в том числе и металлы. Массивы субщелочно-щелочно-гранитовых и нефелин-сиенитовых формаций, видимо, можно считать возникшими за счет взаимодействия остаточных расплавов аляскитовых магм с глубинными флюидами, продолжающими поступать сначала из астенолитов, а затем из отмирающих очагов нижнего уровня. Этим во многом объясняются ювенильный характер металлогении таких интрузий, их насыщенность летучими и возможность выхода за пределы своих геосинклинальных зон, так как всплывающие астенолиты должны "растаскиваться" в горизонтальном направлении растекающимся астеносферным вздутием, образовавшимся при ликвидации зоны заглатывания. Щелочной уклон магматизма по границам древних платформ и срединных массивов находит естественное

объяснение, поскольку эти структуры имеют специфический разрез мантии с резко увеличенной мощностью «пиролита" [8], что может обеспечить повышенную щелочность генерируемых магм и возросшие концентрации в них редких элементов.

Предпринятый нами анализ позволяет заключить, что при принятии: во-первых, гипотезы изначально гидридной Земли, во-вторых, представления о трех уровнях магмогенерации и скачкообразно-эволюционном перемещении очагов с нижнего на верхний уровень, а отмирания в последовательности - средний, верхний и, наконец, нижний, в-третьих, допущения о наиболее вероятных механизмах магмообразования - частичного или полного плавления верхней мантии под действием теплового (водородного) потока и тепла вязкого трения на нижнем уровне, контактово-анатектического на среднем, анатексиса и палингенеза в сочетании с синтексисом с заменой на поздних этапах многократным палингенезом и гибридизацией палингенных коровых магм ювенильными флюидами на верхнем уровне - направленное изменение составов интрузивных формаций, возникающих в течение тектономагматического цикла, и их последовательное смещение от эвгеосинклинальных к все более внешним зонам складчатых областей с захватом окраинных частей платформ выглядит закономерно и получает достаточно строгое обоснование [3, 12].

Закономерности, устанавливаемые при анализе латеральных и возрастных рядов интрузивных серий определенных циклов, в целом справедливы и при сопоставлении гомологичных формаций древних и молодых циклов, что является следствием эволюции планеты [3, 8] и отражает как изменение петрогеохимических свойств ее оболочек, так и закономерное изменение условий магмогенерации.

Характер эволюции коры и мантии, в свете наших представлений, существенно различался в различных сегментах планеты и зависел от геодинамического режима, свойственного этим сегментам, что могло определенным образом влиять на специфику металлогении. Выше уже отмечалось, что расширение Земли, очевидно, сопровождалось полиморфными трансформациями минеральных ассоциаций в мантии. Экспериментальные данные [2, 16] позволяют предполагать переход гранат-шпинелевой ассоциации в пироксен-оливиновую, который происходит при падении давления ниже 100 кбар. Поскольку изоморфная емкость решеток оливинов и пироксенов примерно на порядок меньше, чем у граната, при гранатит-пиролитовом переходе должны высвобождаться многие редкие и рассеянные элементы. Пироксен-оливиновая мантия, содержащая широкий спектр элементов, не связанных решетками породообразующих минералов (что способствует их мобилизации), по нашему мнению, служила и служит источником элементов при ювенильном минералообразовании. Экстракция металлов из пиролита осуществляется глубинным флюидом, появление и характер которого на данном уровне определяется дегазацией водорода от ядра Земли. Следовательно, потенциальная рудоносность той или иной провинции определяется мощностью пиролита в разрезе подстилающей мантии.

Напомним, что гипотеза изначально гидридной Земли рассматривает тектономагматическую активность как результат дегазации водорода из внутрен-

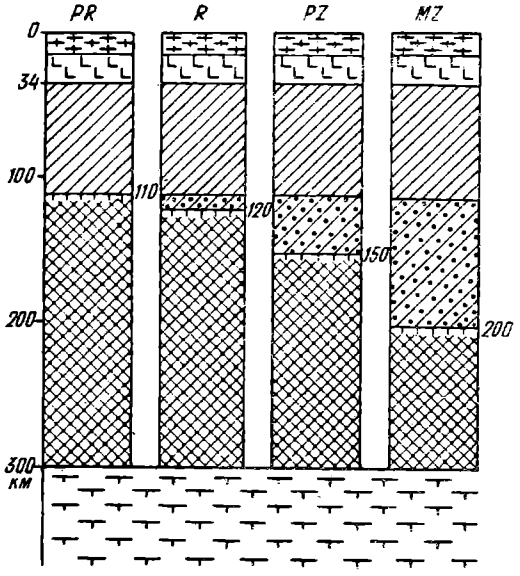


Рис.2. Характер эволюции мантии древних платформ
Условные обозначения см. рис.1

них геосфер: прохождение водородного флюида непременно должно было сопровождаться активизацией тектоники и магматизма, и, наоборот, состояние тектонического покоя свидетельствует об отсутствии потока ювенильного флюида в данной зоне. Полициклическая тектономагматическая активность предполагает периодическое промывание подстилающей мантии ювенильным флюидом, в результате чего пиролит превращается в рестит (в связи с экстракцией щелочей и других литофильных элементов). Совершенно иное положение должно быть в древних блоках земной коры, длительное время находившихся в состоянии тектонического покоя. Поскольку в этих зонах отсутствовал ювенильный поток флюида, мощность пиролита под ними со временем увеличивалась и в мезозое под древними платформами могла составлять 90 км (рис.2), а под молодыми с рифейским фундаментом - 80 км (при принятых нами темпах расширения планеты). Можно считать, что наличие в мантии столь мощного слоя пиролита, содержащего литофильные редкие и рассеянные элементы в состоянии, способствующем их мобилизации, определяет большую потенциальную рудоносность блоков древней коры (или блоков ранней консолидации) по сравнению со структурами „сквозного" геосинклинального развития, в которых ювенильные мантийные концентрации распылялись по многим тектономагматическим циклам, создавая повышенный геохимический фон редких и рассеянных элементов в этих зонах.

Таким образом, регенерация тектономагматической активности в регионах, длительно находившихся в состоянии тектонического покоя, обязательно должна была сопровождаться аномально большими масштабами литофильно-редкометального оруденения, поскольку глубинный флюидный поток мог осуществлять экстракцию редких и рассеянных металлов из слоя пиролита большей мощности. По всей вероятности, этим же обусловлен и резко выраженный щелочной характер магматизма в зонах активизации древних платформ. Однако необходимо учитывать акселерацию расширения Земли во второй половине фанерозоя и соответственно неравномерность прироста пиролита во времени (рис.2). В этой связи потенциальная рудоносность в большей степени определяется временем тектономагматической активизации, чем временем стабилизации провинции, с которого в ее пределах установился режим тектонического покоя.

Итак, закономерности развития магматических формаций, особенности эволюции их состава и строения во времени, а также повышенное металлогеническое значение зон „автономной активизации" находят объяснение с позиций гипотезы изначально гидридной Земли и являются отражением необратимого развития всех оболочек планеты, включая ядро.

ЛИТЕРАТУРА

Абрамович И.И., Клушин И.Г. Петрохимия и глубинное строение Земли. Л., Недра, 1978. 376 с.

2. Акимото С. Система $MgO-FeO-SiO_2$ при высоких давлениях и температурах. В кн.: Верхняя мантия. М., Мир, 1975, .60-80.

3. Бескин С.М., Ларин В.Н., Марин Ю.Б. Редкометальные гранитовые формации. Л.. Недра, 1979. 280 с.

4. Богатиков О.А., Борсук А.М., Дмитриев Ю.И. и др. Эволюция магматизма в истории Земли. В кн.: Петрология. М., Наука, 1980, с. 3-13.

5. Жариков В.А. Режим компонентов в расплавах и магматическое замещение. - В кн.: Проблемы петрологии и генетической минералогии. М., Наука, 1969, с. 62-79.

6. Коржинский Д.С. Трансмагматические потоки растворов подкорового происхождения и их роль в магматизме и метаморфизме. В кн.: Кора и верхняя мантия Земли. М., Наука, 1968, с. 69-74.

Коржинский Д.С. Соотношение между активностью кислорода, кислотностью и восстановительным потенциалом при эндогенном минералообразовании. - Изв. АН СССР, сер. геол., 1973, 3, с. 53-62.

8. Ларин В.Н. Гипотеза изначально гидридной Земли. М., Недра, 1980. 216 с.

9. Летников Ф.А., Шкандрий Б.О. Флюидный режим метаморфизма. В кн.: Термодинамический режим метаморфизма. Л., Наука, 1976, с. 79-86.

10. Летников Ф.А., Карпов И.К., Киселев А.И., Шкандрий Б.О. Флюидный режим земной коры и верхней мантии. М., Наука, 1977. 214 с.

Магматические формации СССР. Л., Недра, 1979. Т. 2. 280 с.

12. Марин Ю.Б. Гранитоидные формации малых и умеренных глубин. Л., Изд-во ЛГУ, 1976. 144 с.

13. Марин Ю.Б., Скублов Г.Т., Ванштейн Б.Г. Петрохимическая эволюция фанерозойских гранитоидных формаций. Л., Недра, 1983. 166 с.

14. Месторождения литофильных редких элементов. М., Недра, 1980. 560 с.

15. Методы теоретической геологии. Л., Недра, 1978. 335 с.

16. Рингвуд А.Е., Грин Д.Х. Изучение фазовых переходов. - В кн.: Земная кора и верхняя мантия. М., Мир, 1972, с. 574-589.