

## ПРОЦЕССЫ РАФИНИРОВАНИЯ ИЗВЕСТНЯКОВ ПРИ ПРОГРЕССИВНОМ МЕТАМОРФИЗМЕ

Е.В. Рахов

В предыдущей статье автора [Рахов, 2002], касающейся некоторых аспектов метаморфизма карбонатных пород, были рассмотрены процессы, приводящие к появлению мономинеральных полигонально-зернистых кальцитовых зон в слабо измененных известняках, унаследовавших сингенетичные структурно-текстурные черты. Причиной дифференциации вещества, приводящей к обособлению мономинеральных кальцитовых сегрегаций, было названо механическое отторжение акцессорных минералов фронтом кристаллизационного замещения. Кристаллизационное замещение – результат динамотермального воздействия на известняки, приводящее к полному уничтожению первичного облика исходной карбонатной породы. В данной работе рассматриваются возможные следствия продолжающегося воздействия метаморфизирующих агентов на известняки.

Напомним, что природным объектом, на примере которого описывались явления «мономинерализации», послужила карбонатная толща, залегающая в юго-восточном секторе метаморфического обрамления Борисовского массива (Кочкарский комплекс, Южный Урал), обнажающаяся в районе Андрее-Юльевского прииска. Массовое появление мономинеральных участков фиксируется в темно-серых, местами черных, известняках на их границе с белыми мраморами. Как было показано в предыдущей статье, именно действием метаморфизирующих агентов объясняется «мономинерализация» отдельных участков карбонатной породы, при которой акцессорные примеси (в основном глинистые минералы и органическое вещество) механически вытесняются разрастающимся полигонально-зернистым агрегатом кальцита. Основной задачей настоящей работы является выяснение причин очистки карбонатной породы от этих примесей при метаморфизме и объяснение механизмов миграции минерального вещества, слагающего примеси.

Одним из важных фактов является практически полное отсутствие в мраморах акцессорных примесей, насыщающих субстрат, по ко-

торому развились эти породы, т.е. известняки. Здесь также отсутствуют продукты деструкции или метаморфизма этих примесей. Особого внимания заслуживает органическое вещество известняков, загадочно исчезающее при развитии мраморов по этим породам. Известно, что действие факторов метаморфизма неизбежно должно приводить к преобразованию ОВ. Повышение давления и температуры при определенных условиях вызывает постепенное упорядочение кристаллической структуры ОВ и, в итоге, образование графита. При высокой активности кислорода в поровых растворах [Банникова, 1990] происходит окисление ОВ, продукты которого сохраняются в породе. Разложение ОВ под действием химических агентов практически невозможно. В этом можно убедиться, обратившись к одному из методов извлечения концентрата ОВ из горной породы, суть которого заключается в полном удалении минеральной части путем кипячения в сильнейших кислотах [Жорчагина, 1976]. Беззольное выгорание высококонденсированных соединений, слагающих седиментогенное ОВ, также невозможно. В кальцитовых мраморах Андрее-Юльевского прииска, напомним, совершенно отсутствуют графит и окисленное ОВ. Эту проблему снимает предположение о том, что весь процесс развития мраморов по известнякам представляет собой кристаллизационное замещение. Освобождение от акцессориев при этом происходит подобно тому, как это случается при возникновении в известняке мономинерального участка [Рахов, 2002].

Строение зоны, переходной между известняками и мраморами, во многом раскрывает суть явлений, происходящих при постепенном усилении действия факторов метаморфизма. На рис. 1 видно, что в направлении от известняка к мрамору степень преобразования породы постепенно нарастает. Исходным материалом, слагающим первую зону, является темно-серый (черный) мелкозернистый органогенный известняк с ярко выраженной кристаллизационной полосчатостью, возникновение которой, как и после-

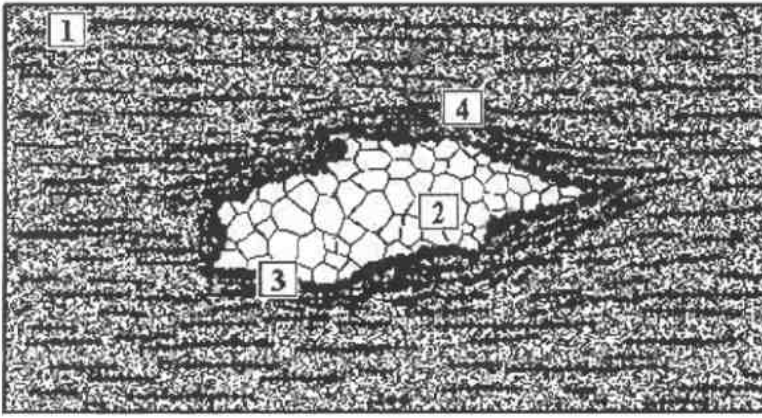


Рис. 1. Схематическое изображение взаимоотношений исходного известняка и новообразованного мономинерального кальцитового агрегата.

1 – известняк (темными линиями показана кристаллизационная слоистость); 2 – мономинеральное «ядро»; 3 – концентрационная кайма нерастворимых примесей; 4 – деформация кристаллизационной полосчатости.

дующая мраморизация, вызвано воздействием Борисовского массива. Следующая зона – мелкозернистый известняк, подобный исходному, но содержащий значительное количество чистых мономинеральных зон с оторочками из концентрата аксессуариев. Третья зона представлена среднезернистым осветленным мрамором, пронизанным сетью темных микро- и мелкозернистых прожилков, сложенных аксессуарным материалом, образовавшихся за счет разрастания мономинеральных зон вплоть до их соприкосновения. Четвертая зона – белый, абсолютно свободный от механических примесей, полигональный крупнозернистый мрамор. Такое строение переходной зоны говорит о том, что каждый участок исходной породы испытывает несколько последовательных стадий преобразования при прогрессивном метаморфизме, что предполагает существование и перемещение фронта мраморизации в направлении от источника давления и температуры. Пространственное совмещение зоны, насыщенной мономинеральными кальцитовыми участками, с этим фронтом, свидетельствует в пользу того, что развитие мраморов происходило посредством все того же кристаллизационного замещения, сопровождающегося оттеснением механических частиц на границу новообразованного «чистого» агрегата с исходной породой. Таким образом, очистка значительных объемов пород, представляющих в настоящий момент мраморы, происходила механическим путем. Причиной стремления карбонатного материала к самоочистке, приводящего к механическому отталкиванию примесей, являются специфические свойства кристаллических агрегатов, сложенных преимущественно кальцитом [Рахов, 2002]. Преобразования минералов-примесей не происходят потому что температуры и давления, при которых происходит кристаллизационное

замещение, недостаточны для этих преобразований. Другими словами, минералы-примеси выносятся из замещающего агрегата несколько раньше достижения в последнем РТ-условий, достаточных для химических реакций.

Попытаемся выяснить, в каких условиях происходит замещение известняка полигонально-зернистым мрамором. Для этого нужно рассмотреть строение мономинерального кальцитового участка («ядра»), зародившегося и развивающегося в слабоизмененном известняке (рис. 1). Следует оговориться, что подобные «ядра» в изобилии содержатся в большинстве облицовочных мраморов. Именно их присутствием и взаимным расположением обусловлены исключительные декоративные свойства этих пород. Обсуждаемые в настоящей работе явления кристаллизационного замещения, сопровождающиеся механической отгонкой аксессуариев, отчетливо видны практически во всех облицовочных мраморах, однако, в литературе подобные факты остались совершенно неосвещенными.

Вернемся к рисунку. Наиболее интересным здесь представляется соотношение текстур исходного метаморфизованного известняка и новообразованного полигонально-зернистого агрегата зарождающегося мрамора. Известняк обладает отчетливой кристаллизационной полосчатостью, являющейся результатом реализации принципа Рикке, согласно которому перекристаллизующиеся зерна приобретают удлинение, перпендикулярное направленному давлению. Полигонально-зернистый мономинеральный агрегат равнозернистый и сложен изометричными зернами. Напомним, что в случае Андрее-Юльевского прииска как ориентированная текстура известняков, так и отсутствие таковой в участках «мономинерализации», обусловлены деятельностью Борисовского массива,

воздействием давления и температуры. Как же в таком случае объяснить отсутствие ориентированных текстур в мономинеральных ядрах, окруженных отчетливо текстурированным известняком? На наш взгляд, это объясняется тем, что в участках возникновения мономинерального агрегата направленного давления не было, оно было всесторонним. Это, в свою очередь, возможно только при состоянии вещества, близком к жидкому. Иначе говоря, исходный известняк и новообразованный участок мраморизации должны были обладать существенно различными реологическими свойствами. Эффект всестороннего давления создавался самим зарождающимся и разрастающимся мономинеральным полигонально-зернистым агрегатом. Отсутствие же реоморфизма в известняке, находящемся в тех же условиях, объясняется, вероятно, наличием равномерно рассеянных твердых частиц аксессуариев. Известно, что введение в раствор цемента жестких частиц повышает его сопротивление ползучести [Рейнер, 1963]. Вероятно, отсутствие инородных твердых частиц в агрегате, заместившем исходный известняк, способствует пластическому течению последнего, обуславливая в то же время его постоянную перекристаллизацию.

Еще одной замечательной чертой строения мономинеральных «ядер» является преобладание в окаймляющей их полосе концентрации примесей органического материала, совершенно аналогичного тому, что содержится в исходном известняке. Можно утверждать, что ОВ, слагающее оторочку, не испытало какой-либо существенной структурной перестройки, показателем которой принято считать возрастание температуры выгорания ОВ, фиксирующееся на кривых ДТА. Термический анализ ОВ известняков и ОВ участков концентрации примесей на фронте мраморизации показал, что температуры выгорания этого вещества в том и другом случае близки и колеблются в интервале от 260 до 300°C. Это обстоятельство также дает повод утверждать, что образование мономинеральных кальцитовых агрегатов путем кристаллизационного замещения, так же как и пластическое состояние новообразованного агрегата, имели место при температурах, не превышающих указанные.

Следует обратить внимание на свойства субстанции, слагающей кайму вокруг мономинерального обособления. В то время как мономинеральный агрегат представляет собой гомо-

генную вязкую пластичную массу, материал, слагающий оторочку, является дисперсной системой, а точнее – коллоидно-дисперсной. О наличии в дисперсной фазе частиц коллоидной размерности свидетельствует мутность растворов, остающихся после растворения образцов известняков и участков концентрации, которая не снижается в течение нескольких недель. Дисперсионной средой здесь служит, вероятно, отжимаемый поровый раствор, поэтому система эта свободнодисперсная, что говорит о высокой подвижности вещества, слагающего оторочку.

Перемещение фронта мраморизации, вызывающее вытеснение примесей, должно сопровождаться накоплением последних на границе новообразованного и исходного агрегатов. На контакте мраморов с известняками описываемого объекта такая концентрация действительно наблюдается: в черных пелитоморфных известняках нерастворимый остаток составляет в среднем 0,013 мас. %, в зоне контакта известняков с мраморами – 0,422%. Разница более чем 30-кратная. Причем преобладающая часть нерастворимого остатка в большинстве проб представлена реликтовым материалом – ОВ. Однако количество некарбонатного материала здесь, судя по всему, значительно меньше количества, соответствующего объему преобразованных известняков. Вероятно, это связано с определенными свойствами участков концентрации, обеспечивающими высокую подвижность дисперсных масс аксессуариев. Эти свойства определяются наличием в системе дисперсной фазы (микроскопических и коллоидных частиц преимущественно ОВ и глинистых минералов) и дисперсионной среды (вероятно, порового раствора, отжатого в ходе мраморизации в зону концентрации). Через коллоидно-дисперсный слой происходит односторонний обмен между исходной породой и новообразованным агрегатом: карбонатный материал (вероятно, в виде диссоциированного раствора), высвобождающийся при растворении известняка, проходя через слой, «питает» разрастающийся участок мраморизации. Нерастворимый же тонкодисперсный материал задерживается коллоидно-дисперсным слоем, увеличивая тем самым массу его дисперсной фазы. При этом разрастание новообразованного агрегата, одновременное с растворением исходной породы, вызывает перемещение слоя. Работа коллоидно-дисперсного слоя в качестве обменной зоны обеспечивается осмотическим набуханием, с

которым связана насыщенность слоя раствором, и суспензионным эффектом. Частицы дисперсной фазы вместе с двойным электрическим слоем создают в системе соответствующую противоионную среду. Если противоионами являются  $H^+$  - и  $OH^-$  - ионы, то среда приобретает кислый или щелочной характер. В случае мраморизации рН дисперсионной среды скорее всего превышает рН раствора на границе с новообразованным агрегатом, что предотвращает кристаллизацию внутри слоя и способствует интенсивному движению компонентов.

Рассмотрим подробнее последовательность событий, следствием которых является появление зоны концентрации нерастворимых примесей, разграничивающей исходную породу и развивающуюся очищенную породу. Как было показано в предыдущей статье [Рахов, 2002], динамотермальное воздействие на осадочную карбонатную породу вызывает появление в ней множества мономинеральных участков, окаймленных концентрированным коллоидно-дисперсным материалом. Очевидно, что продолжающееся и усиливающееся воздействие на породу приводит к разрастанию мономинеральных участков, вплоть до их соприкосновения, вследствие чего порода приобретает ячеистое строение (мономинеральная основная масса породы разбита сетью коллоидно-дисперсных прожилков). Дальнейшее возрастание нагрузки служит причиной следующей стадии «мономинерализации» породы: направленное разрастание (наступление) мономинерального агрегата с еще большим размером зерен оттесняет коллоидно-дисперсные прожилки в сторону границы с известняком, где и образуется зона концентрации нерастворимых примесей. Стадийное преобразование известняков в ходе

продвижения фронта мраморизации находит отражение в строении граничной зоны, представленном на рис. 2. Расположение в различной степени измененных полос (слоев) породы в пределах этой зоны показывает, что каждый участок известняка в ходе возрастающей нагрузки испытывал последовательные изменения, что могло происходить только при условии перемещения фронта мраморизации.

На начальной стадии мраморизации, когда появляются только отдельные очищенные зерна кальцита и редкие обособления таких зерен, сгущение нерастворимых примесей обусловлено перемещением межзерновых границ (собирающей перекристаллизацией), что, в свою очередь, связано с низкой энергией активации твердофазной диффузии у карбонатов. В ходе дальнейшего преобразования агрегата ответственным за концентрацию примесей и перемещение коллоидно-дисперсных слоев процессом становится кристаллизационное давление, действующее со стороны разрастающегося мономинерального «полужидкого» агрегата на высокоподвижную массу нерастворимого материала.

Расположение остановившегося фронта мраморизации относительно источника энергии (Борисовского массива), строение зоны концентрации примесей и характер кристаллизационной слоистости известняков позволяют предполагать, что замещение этих пород мономинеральными кальцитовыми мраморами происходило в направлении градиента температуры и давления. Механическому перемещению коллоидно-дисперсных масс преимущественно органического вещества способствовал отжим порового флюида из мраморизирующейся породы в зону концентрации (осмоти-

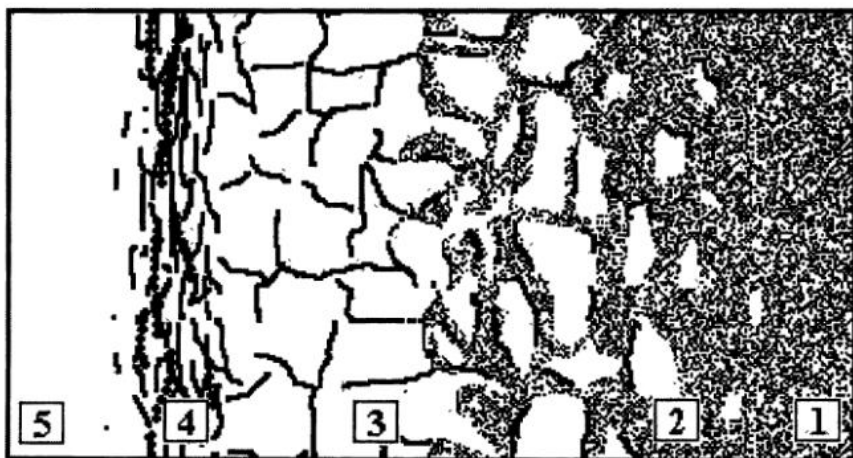


Рис. 2. Схематическое изображение строения фронта мраморизации.

1 – исходный известняк; 2 – зона разобренных новообразованных мономинеральных участков; 3 – зона коллоидно-дисперсных прожилков; 4 – зона уплотнения коллоидно-дисперсных прожилков; 5 – зона сплошных мономинеральных кальцитовых агрегатов.

ческое набухание). Еще одним обстоятельством, благоприятствующим вытеснению концентрированных масс органического вещества, могло послужить близкое к жидкому состояние новообразованного мрамора.

Рассматриваемые явления, судя по всему, следует относить к так называемому диспергитному метасоматозу [Поспелов, 1973], обычно предшествующему обычному метасоматозу. Такое предшествование, вероятно, следует связывать с тем, что карбонатные (особенно кальцитовые) породы представляют собой структурно-чувствительные кристаллические агрегаты. и динамотермального воздействия относительно низкого энергетического уровня оказывается достаточно для запуска процессов кристаллизационного замещения, но недостаточно для начала химических реакций обычного метасоматического характера.

Явление персраспределения различных веществ при структурной перестройке кристаллических агрегатов давно известно и широко используется химиками-аналитиками в различных методах разделения веществ. К таким методам относятся, например, зонная плавка и кристаллизационное концентрирование. Кристаллизационное концентрирование, проводящееся при низких температурах, оказывается незаменимым, если объект исследования лабилен, термически неустойчив, что относится прежде всего к сложным органическим соединениям. В случае с карбонатными породами кристаллизационная очистка в механическом виде становится возможной благодаря нахождению дисперсных масс в насыщенной флюидами граничной зоне, что за счет осмотических явлений делает эти массы высокоподвижными. Суть же явлений возникновения рафинированного агрегата остается той же, что и при кристаллизационном концентрировании.

По тому же принципу кристаллизационного концентрирования, возможно, происходит и тонкая химическая очистка карбонатной породы, сопровождающая механическую отгонку примесей, на что указывает наличие реликтов мелкозернистых доломитизированных мраморов в массе очищенных кальцитовых мраморов. Увеличение размеров зерен при замещении доломитизированного агрегата сопровождается «кальцитизацией». К следствиям такой очистки можно отнести и появление на фронте перекристаллизации не свойственных исходным известнякам минеральных ассоциаций. Так, в

нерастворимых остатках образцов контактовой зоны часто отмечаются зеленый турмалин, хромсодержащий флогопит, фуксит, флюорит.

Главной особенностью отгонки примесей из метаморфизируемой карбонатной толщи является безреактивность этого процесса. Как метасоматоз в классическом понимании, так и кристаллизационное замещение, является способом приспособления физико-химической системы к меняющимся РТ-условиям. Но при метасоматозе это приспособление проявляется в большей степени на уровне минерального состава, в меньшей – в структурно-текстурном отношении. Приспособление путем кристаллизационной очистки заключается только в устранении «поверхностно-энергетических несогласий» с изменившимися условиями. Это говорит о том, что метасоматоз и кристаллизационная очистка карбонатных пород находятся на различных энергетических уровнях, чем и объясняется предшествование диспергитного метасоматоза обычному.

Строение мономинеральных ядер, разрастание очищенного агрегата за счет исходной породы, зональность фронта мраморизации, соотношения структур граничащих агрегатов, «прижимание» коллоидно-дисперсных слоев вязкой рафинированной массой к твердому исходному агрегату указывают на то, что очистка карбонатной толщи могла происходить только при прогрессивном метаморфизме. Единственно возможный способ появления мономинеральных участков на регрессивной стадии – образование жил выполнения. Агрегаты, слагающие такие жилы, должны быть неравнозернистыми с извилистыми межзерновыми границами, чего в очищенных мраморах не наблюдается.

Тем временем действие направленного давления и повышенных температур на прогрессивной стадии, способствующих реоморфизму рафинированных карбонатных масс, не исключает существования тектонических трещин в исходных известняках, прилегающих к участкам мраморизации. Предполагается также возможность пространственных перемещений очищенных вязких масс карбонатного материала через такие трещины, приводящее к формированию тел внедрения, сложенных полигонально-зернистыми мраморами, залегающих среди слабо метаморфизованных известняков. Замещающий известняки материал, встречая на своем пути трещину, устремляется в нее, проры-

вая при этом коллоидно-дисперсную оболочку.

В качестве примера подобных явлений внедрения, сопутствующих реоморфическим трансформациям карбонатных пород, приведем дайкообразные тела рафинированных мраморов, залегающих в метаморфизованных известняках метаморфического обрамления Суундукского массива гранитоидов (Южный Урал). Эти тела обнажаются в долине ручья Каменка (левый приток р. Суундук, р-н пос. Кваркено), расположенной в узкой линейной зоне тектонических нарушений. Залегание тел мраморов в целом контролируется этой зоной. Характер контактов мраморов и вмещающих известняков указывает на то, что здесь имело место внедрение вязкой карбонатной массы в твердые вмещающие породы при значительном давлении. На рис. 3 схематично показано одно из обнажений упомянутого объекта. Примечательно деформирующее воздействие вязкой массы на вмещающую породу, результат которого - огибание контура тела внедрения системой трещин отдельности, согласной с кристаллизационной полосчатостью. На многочисленных близлежащих обнажениях можно наблюдать также секущее расположение контакта мрамора по отношению к кристаллизационной слоистости. Контакт мрамора с известняком здесь отчетливый, но полностью отсутствуют признаки концентрации аксессуариев. Это говорит о том, что перемещение вязкой массы происходило после разрыва коллоидно-дисперсной оболочки. Учитывая специфику поведения известняков при динамотермальном воздействии, происхождение указанных тел внедрения автор связывает с разогревом нижних горизонтов карбонатной толщи, происходившим в ходе развития гранито-гнейсового комплекса, который вызвал фор-

мирование локальной зоны пластифицированного очищенного карбонатного материала. Синхронные тектонические деформации послужили причиной «выдавливания» этого материала в верхние горизонты толщи, сложенные намного менее пластичным материалом.

Упомянутые объекты служат свидетельством того, что пластическое состояние карбонатной массы не исключает возможности ее контакта с открытыми трещинами. Взаимное расположение некогда пластичных мраморов и участка брекчирования, показанное на рис. 3, также говорит об этом. Поэтому одной из причин значительного выноса коллоидно-дисперсного материала, концентрирующегося при мраморизации, следует считать его попадание в систему открытых трещин. В этом плане зону прожилков, сложенных преимущественно органикой (рис. 2), можно рассматривать как своеобразную флюидопроводящую сеть, обеспечивающую эффективное перемещение и последующую концентрацию коллоидно-дисперсных масс.

Обнажающиеся на поверхности зоны обогащения органическим веществом, скорее всего, демонстрируют лишь незначительную часть концентрата. Очевидно, последний в ходе прогрессивного метаморфизма должен был вытесняться в наименее напряженные области. Вероятно, такие участки далеко не полностью вскрыты эрозией. В силу высокой дисперсности и преобладания органического вещества, зоны концентрации становились участками разгрузки тектонических напряжений при переходе к регрессивной стадии. Это также могло послужить причиной обогащения гидротермальных растворов значительными количествами тонкодисперсного органического материала и,

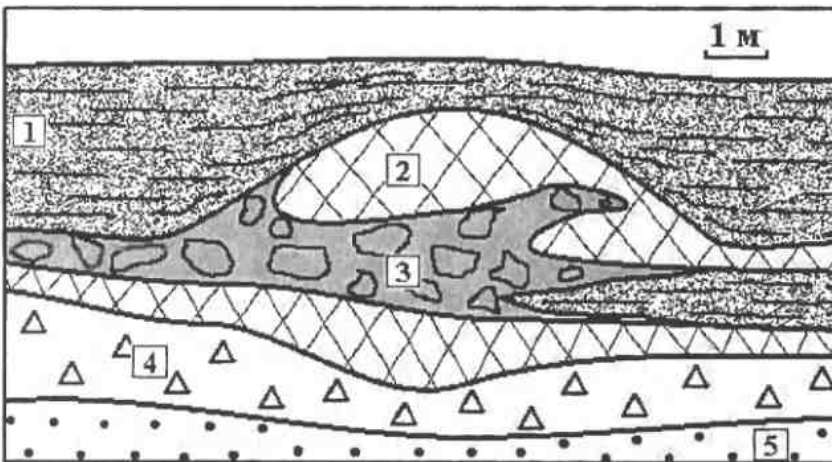


Рис. 3. Схематическая зарисовка обнажения долины р. Каменка.

1 - вмещающий известняк (темными линиями показана кристаллизационная полосчатость); 2 - внедрившееся тело мономинерального мрамора; 3 - зона брекчирования мрамора; 4 - зона позднего катаклаза в мраморе; 5 - осыпь.

следовательно, мобилизации рудных компонентов хемогенно-сорбционного генезиса, формирования восстановительных геохимических барьеров и т.п. Следствием таких преобразований, возможно, является ступенчатая концентрация металлов, фиксируемая на многих рудных месторождениях и рудопроявлениях черносланцевой формации.

Используемый в настоящей работе подход к изучению процессов преобразования осадочных карбонатных пород позволяет приблизиться к решению актуальной проблемы генезиса «гидротермальной органики» и ее роли в формировании оруденения указанных месторождений. В качестве примера следует привести Воронцовское золоторудное месторождение, при изучении которого с помощью реконструкции последовательности преобразований вмещающей карбонатной толщи удалось уточнить как связь органики с оруденением, так и историю становления объекта как геолого-структурного образования [Рахов, 1999].

Основной вывод работы заключается в следующем. Карбонатные породы осадочного происхождения, попадающие в особые термобароградиентные условия, создаваемые локальными источниками энергии, претерпевают механическую очистку от аксессуарных при-

месей, происходящую вследствие фронтального кристаллизационного замещения исходной породы новообразованным карбонатным агрегатом. Механическое вытеснение аксессуарив вызывает их концентрацию на границе мрамора и известняка, что становится причиной формирования подвижных коллоидно-дисперсных масс, образующих в дальнейшем локальные концентрации.

*Список литературы*

*Банникова Л.А.* Органическое вещество в гидротермальном рудообразовании. М.: Наука, 1990. 207 с.

*Корчагина Ю.И., Четверикова О.П.* Методы исследования рассеянного органического вещества осадочных пород. М.: Недра, 1976. 231 с.

*Поспелов Г.Л.* Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизмы метасоматоза. Новосибирск: Наука, 1973. 356 с.

*Рахов Е.В.* Рудоносные брекчии Воронцовского месторождения: их состав, генезис и роль в формировании золотого оруденения. Автореф. Дис.... канд. геол.-мин. Наук. Екатеринбург, 1999. 17 с.

*Рахов Е.В.* Образование мономинеральных агрегатов при раннем метаморфизме карбонатных пород // Ежегодник-2001. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2002. С. 195-203.

*Рейнер М.* Деформация и течение. М.: Гостехиздат, 1963. 381 с.