

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.40.03.021>

УДК 550 : 553

Г.Б. Наумов¹, Т.К. Беркелиев², О.Ф. Миронова³

¹ Государственный геологический музей РАН
125009, г. Москва, РФ, ул. Моховая, д. 11, корп. 11
E-mail: gbnaumov@yandex.ru

² ГПБ Нефтегаз Сервисиз Б.В.
109028, г. Москва, РФ, Серебряническая наб., 29
E-mail: berkeliev@gmail.com

³ Институт геохимии и аналитической химии (ГЕОХИ)
им. В.И. Вернадского РАН
119991, ГСП-1, г. Москва, В-334, РФ, ул. Косыгина, 19
E-mail: olgamironova@geokhi.ru

ТЕОРИЯ МЕТАМОРФОГЕННОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ В ПОСЛЕДНЮЮ ЧЕТВЕРТЬ ВЕКА

Прошло 25 лет после кончины председателя Комиссии по метаморфогенному рудообразованию Я.Н. Белевцева. За это время роль связанных с метаморфизмом процессов в гидротермальном рудообразовании становится все более отчетливой. Показано, что все компоненты рудообразующего флюида, включая саму воду, углекислоту, хлор и металлы, так или иначе формируются в ходе сложного комплекса метаморфических/метасоматических преобразований, и не требуют их привноса из удаленных источников. В процессе метаморфизма генерируются громадные объемы металлоносных флюидов, и дело только в создании условий их фокусированного поступления к местам рудоосаждения. Соответственно, меняется взгляд на рудоконцентрирующие структуры, которые рассматриваются не как "подводящие", а как разгружающие (дренирующие). С этих позиций становится понятна и большая длительность процессов формирования месторождений (десятки миллионов лет), и одновременность формирования одинаковых по составу ассоциаций ("стадий"). Интрузивный магматизм по-прежнему может играть важную роль в рудообразовании, но не как источник металлоносного флюида. Внедрение интрузий сопровождается мощным энергетическим импульсом, приводящим всю геологическую систему во временное состояние неустойчивости, и к длительной последовательности дальнейших преобразований с постепенным переходом к новым локальным равновесиям. Таким образом, основные теоретические положения Я.Н. Белевцева о метаморфогенном рудообразовании не только не опровергнуты, но и получили дальнейшее развитие.

Ключевые слова: метаморфизм, метасоматоз, рудообразование, миграция, фильтрация, диффузия, стадии.

Пути к пониманию природы образования метаморфогенных месторождений очень сложны и многообразны и лежат они через раскрытие сущности геологических процессов.

Я.Н. Белевцев

Прошло четверть века, как от нас ушел организатор и бессменный руководитель Комиссии по метаморфогенному рудообразованию Я.Н. Белевцев, приложивший немало усилий для выявления связей между процессами метаморфизма и рудообразования. Дальнейшее развитие этого направления он видел как "рас-

крытие сущности геологических процессов" [5, с. 4], и оказался совершенно прав. За это время появилось множество новых эмпирических фактов и обобщений, заставляющих изменить наши традиционные представления о роли метаморфизма в процессах консолидации отдельных элементов в обособленные геологические тела. И если магматогенная концепция по мере накопления нового материала постепенно теряет свои позиции, то роль про-

© Г.Б. НАУМОВ, Т.К. БЕРКЕЛИЕВ,
О.Ф. МИРОНОВА, 2018

mas. %

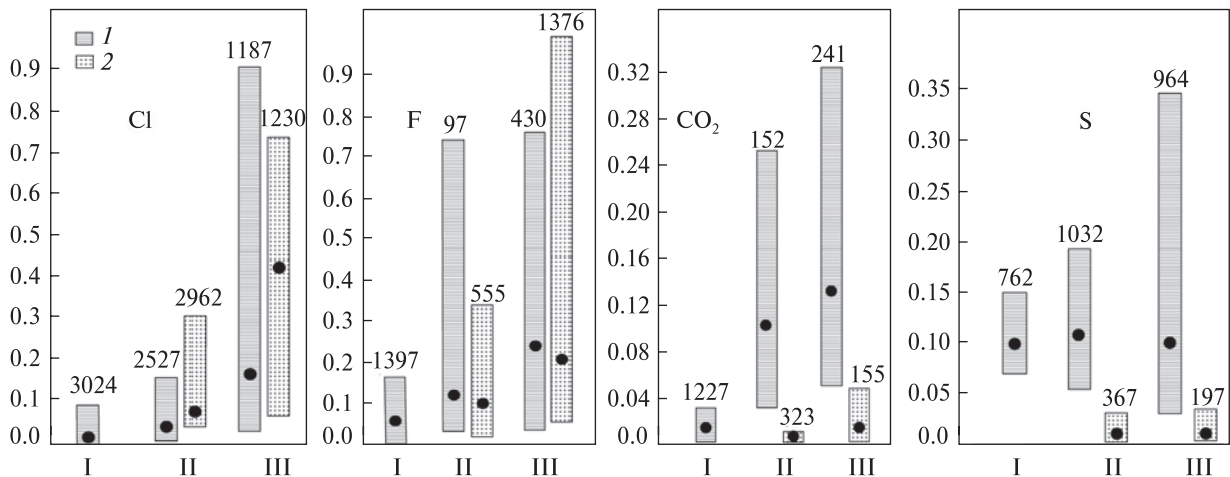


Рис. 1. Содержание летучих компонентов в расплавных включениях (1 — расплавы основного состава; 2 — расплавы кислого состава) различных геодинамических обстановок: I — зоны спрединга и плюмы океанических плит; II — активные континентальные окраины; III — внутриконтинентальные рифты. Цифры над колонками — объемы выборок (по данным В.Б. Наумов и др., 2010)

Fig. 1. Content of volatile components in melt inclusions (1 — melts of basic composition, 2 — melts of acidic composition) various geodynamic settings: I — spreading zones and plumes of oceanic plates; II — active continental margins; III — intercontinental rifts. The numbers above the columns are the sample sizes (according to V.B. Naumov et al., 2010)

цессов метаморфизма и метасоматоза приобретает вполне конкретные очертания. Рассмотрим эти положения на конкретных материалах.

Гидротермальные растворы. Ядром магматогенной концепции формирования гидротермальных рудных месторождений, укоренившейся после ряда обобщающих работ, основанных не столько на геологическом материале, сколько на физико-химических построениях [6, 12, 15], является магматогенная природа самих рудообразующих флюидов, которые "образуются в самом конце магматического процесса, когда собственно магматический этап уже закончился" [6, с. 462]. Реально измеренное содержание воды в расплавах оказалось явно недостаточным, равно как и целый ряд других показателей, которые мы подробно рассмотрели в работе [33]. С тех пор дополнительно были обработаны данные о содержании в магмах других летучих компонентов из работы [27] (рис. 1). Из этого графика видно, что вода и другие летучие, характерные для гидротермальных растворов, содержатся в магмах (именно в магмах, а не в породах, которые обычно подвержены постмагматическим изменениям) в ничтожном количестве. Особенно показательное содержание в гранитных расплавах углекислоты, наиболее характерного компонента (второй по массе после H₂O) гидротермальных растворов, которое составляет

для континентальных гранитов 0,01 масс. % и еще меньше в гранитах континентальных окраин.

Попытки "опустить" источник в мантию также опровергаются содержанием воды и других летучих в магмах зоны спрединга и плюмов океанических плит (рис. 1).

Экспериментальное определение коэффициентов распределения рудных элементов между гранитным расплавом и флюидом показали, что такие элементы, как Ba, Sr, Pb, Mo, Sn, U, Th, характерные для связанных с гранитами рудных жил, должны преимущественно накапливаться не во флюиде, а в гранитном расплаве ($K_p < 1$), тогда как Mn, Fe, Cu, Co, Ni, Cr ($K_p > 1$), типичные для жил базальтов, наоборот, преимущественно переходят во флюид [24]. Подробнее это мы уже рассматривали в [33, рис. 5]. Само появление водно-углекислого флюида обусловлено реакциями дегидратации и декарбонизации вмещающих пород в процессе контактового метаморфизма [11]. Не случайно наиболее высокое значение флюидного давления, достигающего 5–8 кбар и выше установлено в ранних метаморфогенных кварцах [35].

Гранитные массивы насыщаются водой уже в ходе постмагматических изменений. Содержание H₂O в неизменных гранитах обычно ~0,5–1,0 масс. %, (по Р. Дэли 0,84 масс. %) тог-

да как в подвергшихся постмагматическим изменениям (серицитизация, пропилитизация, хлоритизация и другие аналогичные процессы), а именно с такими гранитами обычно и связывается формирование рудных тел, увеличивается до 3—8 масс. % и более. Это уже никак не *магматогенная* вода, а вода, высвобождающаяся при контактовом метаморфизме вмещающих пород и вызывающая постмагматические изменения при остывании гранита.

В процессе постмагматической гидратации гранитных минералов хлор метаморфогенных растворов, инертный к порообразующим минеральным фазам и нелетучий компонент, будет оставаться во флюидной фазе, повышая ее соленость [33]. Наблюдаемая соленость высокотемпературных флюидных включений — это не их исходный магматогенный состав, а результат постмагматических преобразований метаморфогенных флюидов. Здесь можно подчеркнуть, что гранитные массивы, не затронутые постмагматическими изменениями, не перспективны для обнаружения рудных скоплений и не привлекают внимания геологов-поисковиков.

Роль магматизма. Полученные закономерности отрицают магму как источник гидротермальных флюидов, но только в этом аспекте. Выработанные многочисленными наблюдениями эмпирические закономерности по связи рудообразования с магматизмом сохраняют свое значение, хотя их понимание меняется. Здесь надо подойти к интерпретации выявленных связей с позиций В.И. Вернадского, отмечавшего, что эмпирические обобщения, созданные индуктивным путем, могут "очень долго существовать, не поддаваясь никаким гипотетическим объяснениям, являясь непонятным, и все же оказывать благотворное огромное влияние. Но затем часто наступает момент, когда оно вдруг начинает освещаться новым светом, становится областью создания гипотез, начинает менять наши схемы мироздания и само меняется. Очень часто в эмпирическом обобщении мы имели не то, что думали, или в действительности имели много больше, чем думали" [7].

Думается, что это время сейчас настает, и понимание роли магматизма в процессах рудообразования должно изменить свое содержание. Формирование магматического расплава может рассматриваться как рудоподготовительный процесс, такой же, как и накопление оса-

дочных толщ с потенциальными запасами тех или иных рудных элементов [36]. Но этим роль магматизма далеко не исчерпывается. Тектономагматический импульс — это еще энергетическая инъекция, часто являющаяся своего рода триггером, инициирующим дальнейшее развитие рудного процесса.

Эти, вполне реальные, а не мифические, роли магматизма в процессах эндогенного рудообразования, подлежат дальнейшему изучению на хорошей количественной эмпирической основе. Здесь следует ожидать много новых интересных открытий.

Движение флюидов. В настоящее время многие специалисты признают, что в процессе прогрессивного метаморфизма генерируются громадные объемы флюида. Основные возражения представителей "магматогенной школы" касаются самой возможности фокусированного поступления растворов к местам осаждения рудного вещества. В частности, указывается на несоответствие скорости метаморфического прогресса (10—20 °C/млн лет) и предположительно короткого периода формирования месторождений [50].

Если же речь идет о ретроградном метаморфизме, то говорится об "эпизодическом" проявлении этого процесса, активном поглощении ранее выделенного флюида и необходимости внешнего источника, под которым понимают метеорные воды или все тот же магматогенный флюид [49]. При этом совершенно упускается, что внедрение орогенных гранитоидных батолитов происходит — в региональном плане — на фоне регрессивного метаморфизма, но приводит к локальному прогрессивному метаморфизму контактового типа.

Активное расширение взглядов на естественные геологические процессы позволило снять жесткие ограничения относительно происхождения путей и механизмов движения гидротермальных растворов [32]. Изучение океанических "курильщиков" привело к созданию новой модели движения растворов в конвективных ячейках, где движущей силой гидродинамической системы оказывается вскипание просачивающихся, исходно морских, вод около горячего магматического тела, но магма служит источником не флюида, а движущего флюида тепла [23].

Целенаправленные исследования движения растворов на крупном жильном месторождении пятиэлементной формации [35], о кото-

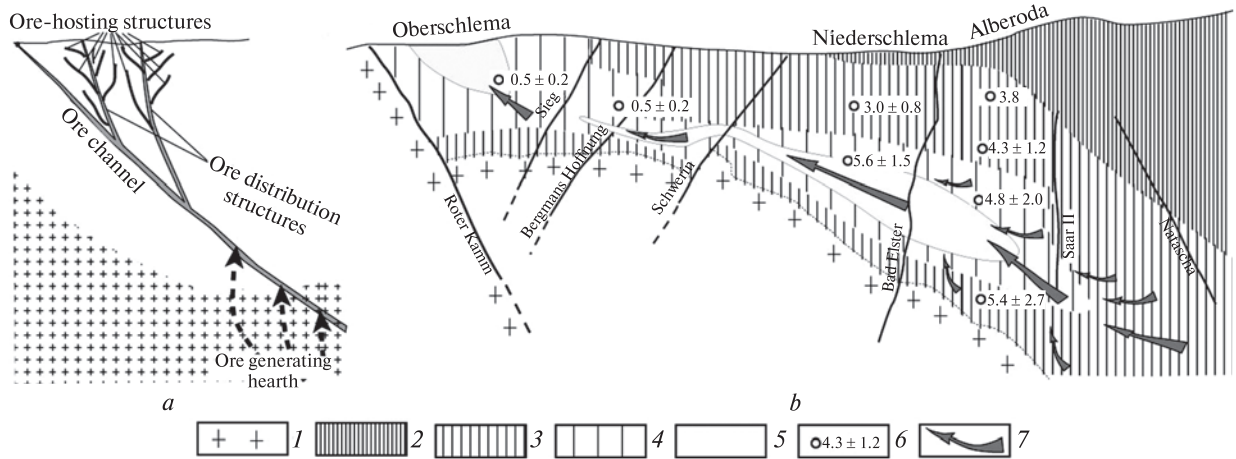


Рис. 2. Пути движения флюидов по классической схеме (а) и в реальности на месторождении Шлем-Альберода (b): 1 — гранит; 2–5 — жильная проницаемость: 2 — менее 0,2; 3 — 0,2–0,6; 4 — 0,5–1; 5 — более 1 усл. ед.; 6 — среднее содержание CO₂ (моль %) во флюидных включениях в кальците kku (кварц-кальцит-урановой) стадии; 7 — направление наименьшего гидравлического сопротивления

Fig. 2. Fluid flow pathways according to the classical scheme (a) and in the reality (b) at the deposit of Schlema-Alberoda: 1 — granite; 2–5 — vein permeability: 2 — less than 0.2; 3 — 0.2–0.6; 4 — 0.5–1; 5 — more than 1 (arbitrary units); 6 — average content of CO₂ (mol %) in fluid inclusions in calcite of the kku (quartz-calcite-uranium) stage; 7 — direction of the lowest hydraulic resistance

ром подробнее сообщалось в прошлогоднем номере журнала [32], показали, что вопреки традиционным представлениям о роли наиболее крупных разрывных нарушения как "рудоподводящих" (рис. 2, a), они могут играть прямо противоположную роль дренирующих систем (рис. 2, b).

Специальные исследования сверхглубокой Саатлинской скважины СГ-1 показали, что в результате процессов метаморфизма осадочных толщ происходят локальные разуплотнения, по которым водные и нефтегазовые флюиды перемещаются не только в горизонтальном направлении, но и сверху вниз, с чем связано и формирование залежей Мурадханлинского нефтяного месторождения [22].

К сожалению, специальных исследований, посвященных путям движения рудообразующих растворов в открытых публикациях пока немного, в особенности для "классических" эндогенных обстановок, где пространственный и временной анализ затруднен многочисленностью перекрывающихся гидротермальных событий.

Роль разгружающих структур в формировании руд песчаникового типа описана в отчетах Краснохолмской экспедиции Мингео СССР. Работы Р.И. Гольдштейна с сотрудниками показывают принципиальную роль областей разгрузки пластово-инфильтрационных и элизи-

онных вод в формировании уранового оруденения на геохимических барьерах [9, 26].

В области гидротермальных обстановок выделена большая группа "амагмагенных" месторождений, в которых решающую роль в рудообразовании играет латеральное и вертикальное движение флюида под действием гравитации [47] или тектонических напряжений [48]. Вероятно, детальное изучение этих вопросов может существенно повлиять на дальнейшее развитие теории рудообразования и иметь непосредственное практическое значение.

Переносчик или проводник. В современных теориях эндогенного рудообразования в качестве основного способа перемещения вещества "обычно рассматривается инфильтрация", поскольку "диффузия — исключительно медленный процесс" [44, с. 138]. Вопреки этим взглядам Я.Н. Белевцев фильтрацию и диффузию рассматривал как равнозначные механизмы. Он писал: "Перемещение рудных и нерудных компонентов в горных породах связано с ионным обменом, реакциями, приводящими к образованию комплексных ионов, более устойчивых в определенных физико-химических условиях, сорбцией, действием физических полей, в целом вызывающих выпадение в твердую фазу одних компонентов и растворение других. Перенос компонентов вследствие фильтрации неотделим от диффузии. Они как

бы переходят друг в друга или сопровождают один другого" [5, с. 216].

Однако к концу XX века диффузия, которую Д.С. Коржинский активно рассматривал как механизм миграции вещества в гидротермальных процессах [21], вообще исчезла со страниц геологической литературы, поскольку экспериментальные определения значений скорости перемещения элементов в трехмерно упорядоченных телах оказались слишком малы. При этом было упущено, что горная порода — это не твердая фаза, а агрегат разных фаз. Непосредственные экспериментальные исследования скорости диффузии через реальные горные породы, выполненные учеником Коржинского Г.П. Зарайским [3, 18, 19] показали, что в горных породах в условиях реального гидротермального процесса скорость диффузионного массопереноса может быть соизмерима со скоростью фильтрационного перемещения вещества, поскольку диффузия идет не сквозь твердую фазу породы, а по межзерновым поверхностям, которые и обеспечивают перенос в капиллярно-пористых телах. В результате поровый раствор может играть роль не только *переносчика*, но и *проводника* элементов, что меняет сам подход к моделям массопереноса. Поровый раствор может обеспечить миграцию элементов без всякой фильтрации, только за счет диффузии, что в общем виде и рассматривал Д.С. Коржинский [21].

Подробнее соотношение фильтрации и диффузии рассмотрено в работе [18].

Необходимо обратить внимание еще на одно отличие фильтрационного и диффузионного механизмов миграции вещества — разные действующие потенциалы, механический и химический. Для фильтрации это разница давлений, для диффузии — различие химических потенциалов. Без необходимых для фильтрации перепадов давления, но при различии в пространстве химических обстановок, диффузия может преобладать и при высокой пористости пород.

По мере развития геолого-геохимического изучения пространства и временных изменений гидротермальных месторождений накапливается все больше количественных эмпирических данных, исключаящих магму как непосредственный источник самого гидротермального флюида. К сожалению, в современной геологической литературе по-прежнему преобладают работы, в которых без всяких доказа-

тельств постулируется магматогенная природа рудообразующих гидротермальных флюидов.

Минеральные нагрузки. Иные результаты дает изучение минеральных нагрузок этого флюида. Здесь все большую роль приобретают метаморфические и метасоматические преобразования пород пространства месторождения, как предшествующие, так и сопровождающие формирование минерализованных тел. Химический состав растворов устанавливается локально по мере пространственного и временного изменения условий. "При диффузионном метасоматозе приближение к локальному равновесию имеет место в каждом участке, — пишет Д.С. Коржинский. — При инфильтрационном метасоматозе необратимые реакции совершаются на резких фронтах замещения, тогда как между ними раствор находится в равновесии с минералами породы. В этом случае можно говорить о "мозаичном" равновесии как частном случае локального равновесия" [21, с. 129]. И все это происходит на фоне постепенного снижения температуры, то есть в процессе регрессивного метаморфизма.

Наиболее детально метасоматические преобразования минеральных жил изучены для месторождений Рудных гор. Для них многообразные метасоматические преобразования отмечены еще в работах Л. Брейтгаупта и Г. Мюллера как отличительная черта месторождений мобильного обрамления Богемского массива.

Детальное изучение пятиэлементных месторождений Рудных гор позволило установить, что на прогрессивном этапе контактового метаморфизма за счет дегидратации и декарбонатизации происходит формирование высокоплотного водно-углекислого флюида и изменение форм нахождения некоторых рудных элементов пород, перевод их из инертной в потенциально подвижную форму, а на регрессивном этапе с понижением температуры пластические деформации сменяются хрупкими, создаются условия для формирования разрывных структур и движения растворов к областям разгрузки и осаждения элементов на геохимических барьерах. Массовые определения содержания урана в породах выявило значительные колебания в отдельных пробах, однако среднее содержание урана в каждой группе пород оказалось устойчиво более низким, чем за пределами месторождения (до 30% исходного содержания), что четко фиксируется в коэффициентах вариации [16] (рис. 3). Смена урана

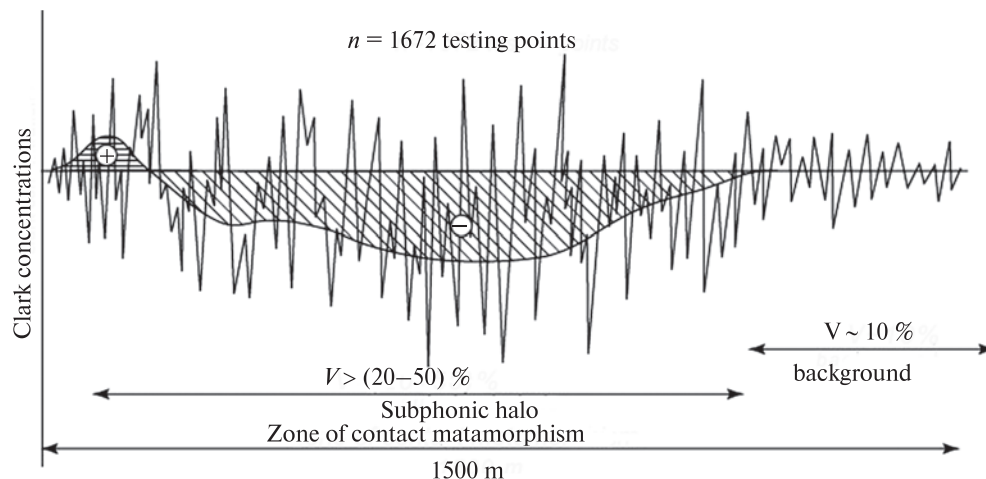


Рис. 3. Результаты массового опробования вмещающих пород месторождения Шлема-Альберода, вынесенные на профиль, перпендикулярный кровле гранита. V — коэффициент вариации $V = (\sigma/x_{cp}) \cdot 100 \%$

Fig. 3. The results of mass sampling of the Schlema-Alberoda deposit host rocks, charted on the profile perpendicular to the granite roof. V is the coefficient of variation $V = (\sigma/x_{cp}) \cdot 100 \%$

кобальтом, никелем и другими рудными элементами закономерно увязывается с метасоматическими изменениями отдельных типов пород [34].

Смена катионов в метасоматических карбонатах определялась последовательными изменениями концентрации углекислоты в поровых растворах, которая зависит от изменений температуры и реакций с твердой фазой вмещающих пород [28].

Для урановых месторождений Стрельцовой группы (Вост. Забайкалье) описаны метасоматические процессы как дорудные, так и более поздние [1], вызывающие локальные перемещения элементов. Так, подробно изучены процессы раскисления породообразующих плагиоклазов [39]. Здесь же в региональном масштабе установлена широкая полоса радиогеохимической дифференцированности пород фундамента рудоносной депрессии (рис. 4) [25].

На месторождении Антей данные глубинного бурения показали существенное увеличение содержания урана во вмещающих гранитах ниже уровня развития рудных тел (рис. 5). Расчет по радиогенному свинцу первичных содержаний урана (U_{eq}) показал, что этот уран был вынесен из вмещающих пород в период формирования рудных тел [20]. Эти данные позволили выявить обширную область его дефицита (рис. 5, заштриховано) и, таким образом, идентифицировать его источник.

Относительно колымских месторождений золота исследователи все чаще приходят к вы-

воду, что источником рудного вещества был геологический субстрат, содержащий исходный набор химических элементов. Далее произошло метасоматическое перераспределение элементов. Подобные процессы детально описаны для Наталкинского [13, 14], Майского [2] и ряда других месторождений.

Очень сложные, многоступенчатые перераспределения элементов с образованием локальных минеральных скоплений наблюдаются в течении длительных метасоматических преобразований по мере остывания на месторождениях Норильского рудного узла, осложненные явлениями контаминации материалом окружающих пород [43].

Подобных описаний метасоматических преобразований вмещающей среды становится все больше. Просто раньше подобные исследования ограничивались анализом узкого пространства околосильных изменений.

Непрерывность и дискретность. В соответствии с магматогенной стадийной концепцией формирования гидротермальных жильных месторождений, время их формирования должно укладываться в относительно короткий отрезок, начало которого совпадает с моментом отделения флюида от застывающего расплава. Далее по мере остывания процесс движется однонаправленно, проходя ряд закономерно сменяющих друг друга стадий. Соответственно, определение возраста рудных тел обычно ограничивается единичными измерениями, результаты которых экстраполи-

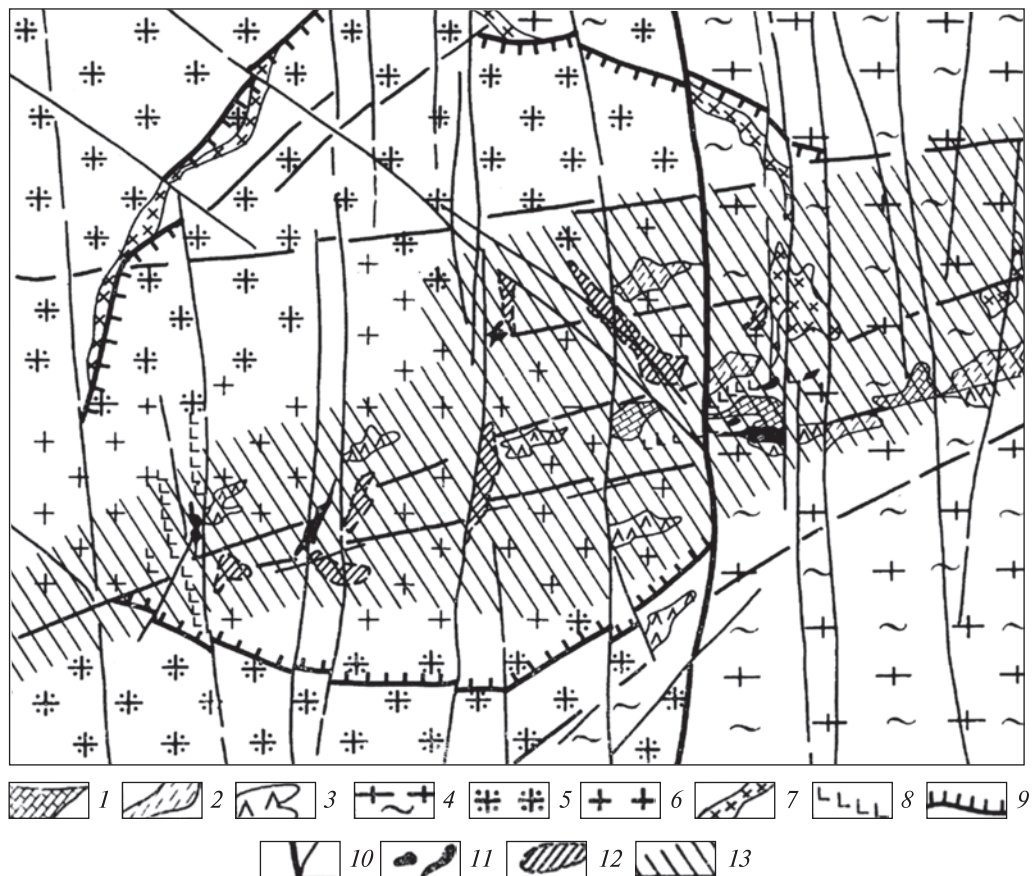


Рис. 4. Схема строения и особенности зоны радиогеохимической дифференцированности пород фундамента рудоносной депрессии (по Модников, Сычев): 1 — известняки доломитизированные, 2 — сланцы кристаллические, 3 — амфиболиты, 4 — гранитогнейсы, 5 — граниты порфиробластовые биотитсодержащие, 6 — граниты среднезернистые лейкократовые, 7 — субвулканические тела сиенит-, гранит-порфиров, 8 — дайки основного состава, 9 — разломы кальциевые, 10 — разломы орто- и диагональные, 11 — урановая минерализация в породах фундамента, 12 — урановая минерализация в породах вулканогенно-осадочного чехла (проекция на кровлю фундамента), 13 — области максимальной радиогеохимической дифференцированности

Fig. 4. Schematic structure and features of the area of radio-geochemical differentiation of the rocks of the foundation of ore-bearing depression (according to Modnikov and Sychev): 1 — dolomitized limestone, 2 — shists, 3 — amphibolites, 4 — granite gneisses, 5 — porphyroblast biotite granite, 6 — medium-grained leucocratic granite, 7 — subvolcanic bodies of syenite-porphury and granite-porphury, 8 — basic dikes, 9 — circular faults, 10 — orthogonal and diagonal fractures, 11 — uranium mineralization in the basement rocks, 12 — uranium mineralization in the volcano-genic-sedimentary cover (projection on the basement roof), 13 — area of maximum radio-geochemical differentiation

руются по принципу: одинаковое, значит одновозрастное.

Пока есть только одно месторождение, для которого по представительной коллекции с маркшейдерской привязкой образцов было выполнено более 50 определений радиологического возраста настурана одной кварц-карбонат-настурановой (*kku*) стадии. Полученные значения заняли временной интервал от 300 до 120 млн лет (от карбона до мела) [46]. Более того, значения распределились не хаотично, а с определенной закономерностью. Наиболее древние настураны тяготеют к центральным участкам рудных узлов, а по мере перемеще-

ния от центра к периферии возраст ураноносных жил постепенно уменьшается (рис. 6). Такая закономерность, полученная впервые, исключает одновременное внедрение единого специализированного раствора, а скорее говорит об эволюционном развитии минерального выполнения жил по мере формирования жильного штокверка.

Полученные результаты оказались столь неожиданными для самих исследователей, находившихся в плену магматогенной стадийной теории, что они не нашли другого объяснения полученным эмпирическим данным, как постулировать образование по меньшей мере че-

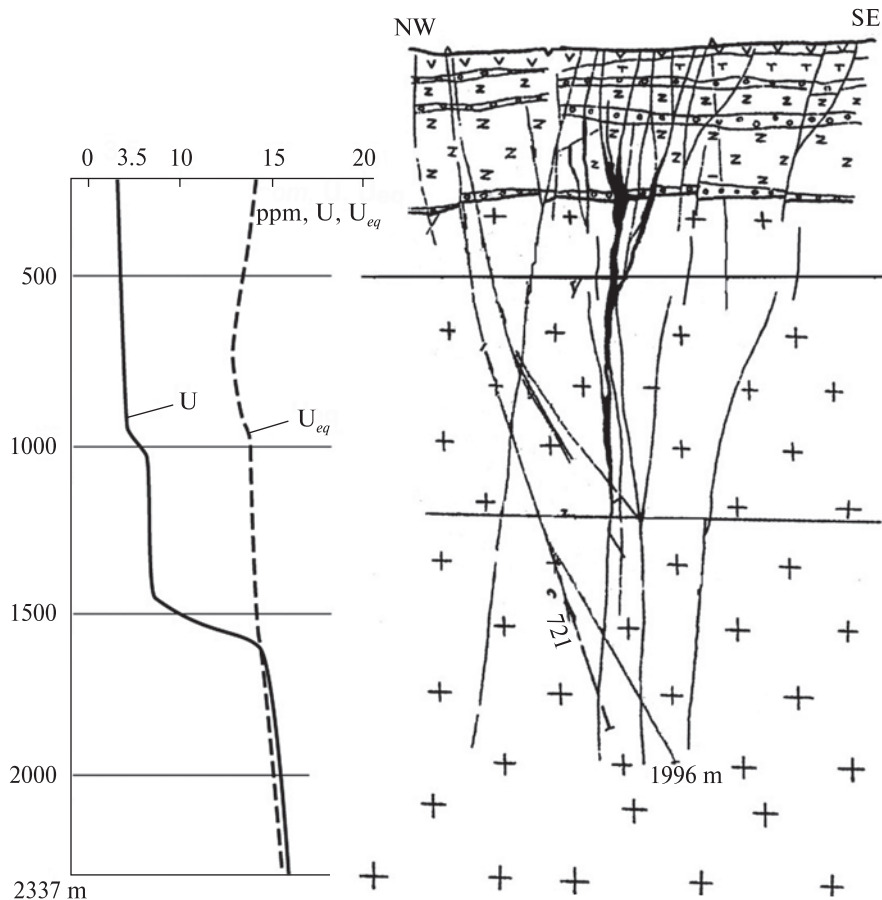


Рис. 5. Изменение содержания урана в современных породах (U) и его палеосодержания (рассчитано по радиогенному свинцу — U_{eq}). Месторождение Антей
 Fig. 5. Change of the current uranium contents (U) versus its original contents (calculated by radiogenic lead — U_{eq}). The Antey deposit

тырех максимумов формирования минерализации одной *kku* стадии: 300—270; 250—240; 200—190 и 170—150 млн лет. Решение по меньшей мере странное, поскольку данные, приведенные авторами, с учетом допустимой погрешности (\pm от 5 до 28) покрывают весь интервал от 300 до 120 млн лет, с максимальной плотностью в интервале 150—200 млн лет (на 30 % временного интервала отложения урана приходится 60 % датировок, рис. 7), когда в районе прочно установился платформенный режим.

Такое длительное развитие может быть связано с изменением метасоматических процессов по мере понижения температуры окружающей среды, хотя не исключена и неоднородность исходной коллекции, которую подбирали с иными целями.

Тем не менее, эти данные еще раз указывают на сложные геохимические процессы, включающие не одноактное поступление и отложе-

ние рудного вещества, а его длительное и неоднократное преобразование в ходе эволюции рудообразующей системы. Вероятно, тезис "одинаковое — значит одновозрастное" неприменим к реальным геологическим ситуациям. Одни и те же минеральные ассоциации в разных участках месторождения могут возникать не одновременно, поскольку единая система формирования месторождения состоит из разных более локальных подсистем. Эволюция этих подсистем происходит не синхронно, зависит и от тектонического развития отдельных участков, и от местных процессов взаимодействия раствор — порода, связанных, в свою очередь, с изменением температуры окружающей среды.

С этих позиций важен фундаментальный вопрос о дискретности и непрерывности процессов гидротермального рудообразования, и в частности, о понятии *стадия рудообразования*. Если в общеязыковом понимании *ста-*

дия — это период развития чего-либо, отличающийся специфическими особенностями, то здесь "стадией рудообразования называется период времени, в течение которого происходит накопление рудообразующих минералов определенного состава, отделенный перерывом минерализации от других стадий" [42, с. 55]. Подразумевается сугубо дискретный процесс, что не всегда следует из результатов реальных минералогических работ. Так, для гидротермальных месторождений Рудных гор достаточно обычны внутрижильные метасоматические наложения более поздних стадий на более ранние без признаков дробления или иных показателей перерывов минералообразования. "Преобразования минералов начинаются с момента их зарождения и продолжается в период их роста и последующего существования", — пишет знаток минералогии этого района Ю.М. Дымков [17].

В то же время взаимные пересечения жил и прожилков могут происходить и в пределах времени формирования одной стадии (рис. 8) [4].

Учитывая все накопившиеся материалы, мы должны признать, что процесс гидротермального рудообразования является непрерывно-прерывистым. Эволюция состава поровых растворов, находящихся в пространстве месторождения, происходит непрерывно, по мере изменения внешних условий, прежде всего температуры, а отложение рудных минеральных ассоциаций происходит дискретно и зависит от развития разрывных структур.

При такой трактовке процесса понятие "стадия рудообразования" становится таким же, как в биологии и других естественных науках. Это условно выделяемый период, занимающий вполне определенное место в общей последовательности развития объекта. В биологии это: зародышевая; младенческая; юношеская; взрослая; старческая. Названия могут меняться, но относительная последовательность строго определена.

Данные изотопной геохронологии позволяют выразить возраст объекта в астрономических величинах, что, к сожалению, несколько затмило тщательное изучение относительной последовательности конкретных геологических явлений. Такая последовательность, выраженная в виде стадийности развития геологического объекта, имеет не меньшую ценность, чем точная привязка к геохронологической шкале. Начало отсчета, начало развития оди-

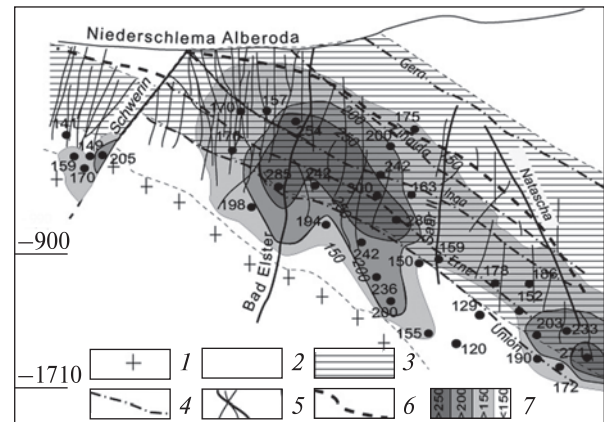


Рис. 6. Схема распределения значений возраста кварц-карбонат-настурановых жил в проекции на вертикальную плоскость месторождения Шлема-Альберода (по данным Ю.А. Шуколюкова и др., 1992, с коррекцией): 1 — граниты, 2 — слюдистые сланцы, 3 — породы "продуктивной" пачки, 4 — послонные нарушения, 5 — секущие жилы, 6 — граница зон контактового метаморфизма, 7 — области развития оруденения разного возраста

Fig. 6. Scheme of radiological age distribution of quartz-carbonate-pitchblende veins on vertical projection of the Schlema-Alberoda deposit (according to Yu.A. Shukolyukov et al., 1992, with correction): 1 — granites, 2 — mica shists, 3 — rocks of the "productive" unit, 4 — subconcordant faults, 5 — rake veins, 6 — boundary of contact metamorphism zone, 7 — areas of different age mineralization

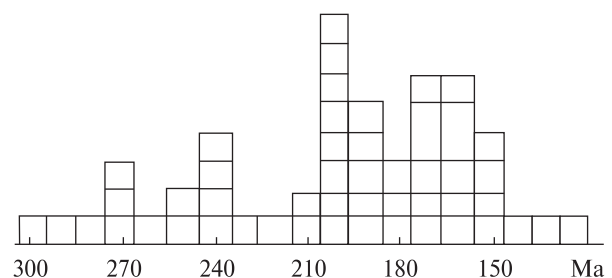


Рис. 7. Распределение значений возраста настуранов, отобранных из kku-жил (по данным Ю.А. Шуколюкова и др., 1992)

Fig. 7. Radiological ages histogram of the pitchblende samples from kku-veins (according to Yu.A. Shukolyukov et al., 1992)

наковых процессов в разных точках пространства может быть сдвинуто в шкале астрономического времени. В этом случае односторонний упор на сопоставление астрономических возрастных данных отвлекает от понимания внутренних закономерностей природных процессов [29].

Этап формирования жил в общей линейке процессов рудообразования. Длительный и сложный процесс последовательной стадийной

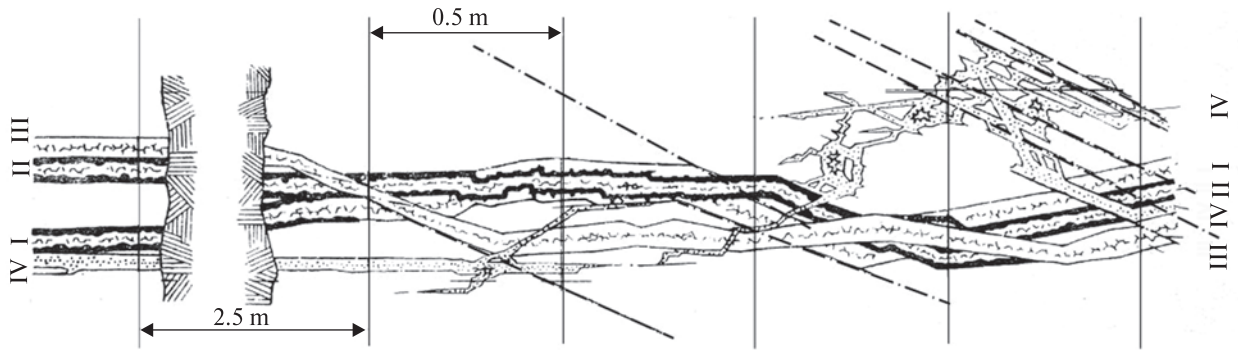


Рис. 8. Взаимные пересечения четырех *kku* жил. Римскими цифрами обозначены разновозрастные жилы одной стадии в порядке их образования. Зарисовка кровли, месторождение Шлема, гор. –990 (по Викт.Л. Барсукову и др., 1991)

Fig. 8. The mutual intersection of the four *kku*-veins. Roman numerals denote different-age veins of one stage, in the order of their formation. Sketching of the drift roof, Schlema deposit, level –990 m (according to Vikt.L. Barsukov et al., 1991)

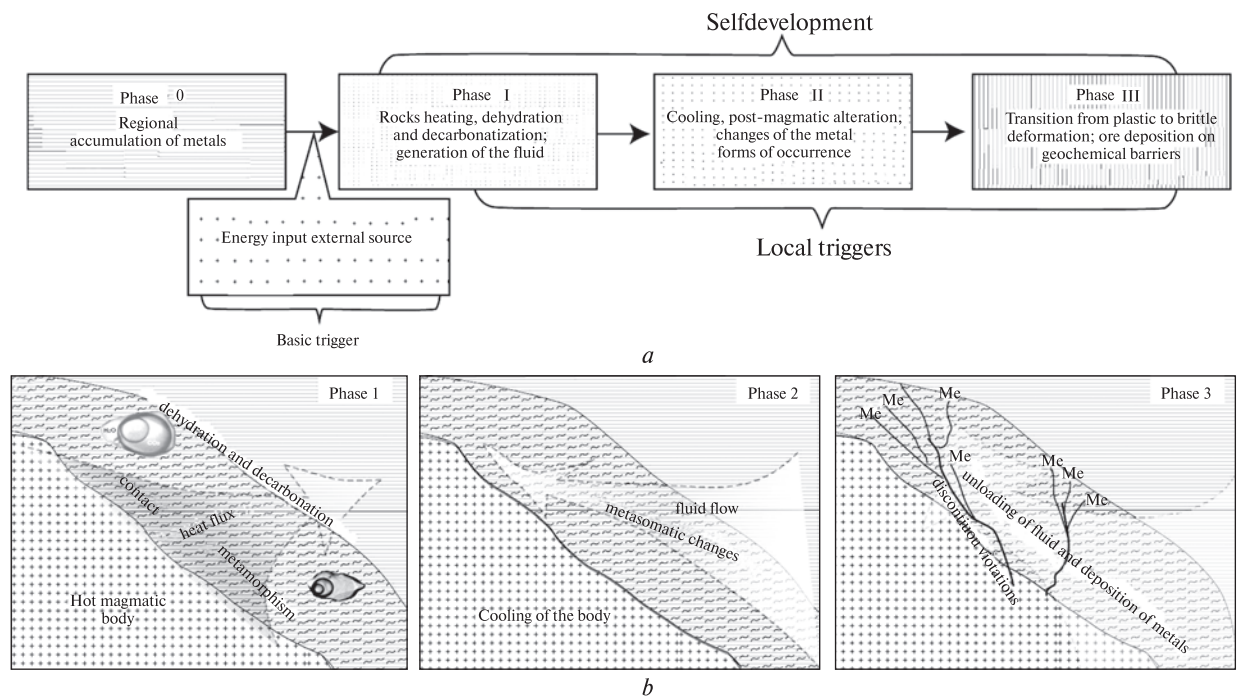


Рис. 9. Схема последовательности этапов формирования гидротермального рудообразования месторождения Шлема-Альберода (а) и их макеты (b)

Fig. 9. Schematic diagram of the stages of hydrothermal ore-forming process on the Schlema-Alberoda deposit (a) and their maquettes (b)

смены минеральных жил не начинается с нуля, а наследует особенности предшествующего геолого-геохимического развития конкретных территорий [41]. Процесс формирования рудных провинций [45] может намного опережать само рудообразование, долгое время находясь в латентном состоянии [36], пока естественный триггер не включит процесс саморазвития. Основным триггером [31, 37], запустив-

шим всю систему формирования месторождения Шлема, стало внедрение гранитного массива, который принес в сложившуюся геологическую систему мощный энергетический импульс, положив начало длительной последовательности физико-химических и механических процессов, направленных на достижение локальных равновесий в новых условиях. Схематически весь этот комплекс рудоподго-

товительных и рудоконцентрирующих явлений для наиболее детально изученного месторождения Шлема-Альберода [8], с учетом материалов предыдущих статей, изображен на рис. 9.

Собственно, процесс рудообразования здесь сконцентрирован в зоне контактового метаморфизма гранитного массива Ауэ.

На этапе I в результате прогрева пород, вмещающих граниты в ходе прогрессивного метаморфизма, происходит их дегидратация, декарбонатизация и формирование высокоплотного водно-углекислого флюида. Перегруппировка породообразующих минералов приводит к освобождению некоторых примесных элементов и их переход в потенциально подвижную форму [38].

Этап II — регрессивный метаморфизм, медленное остывание и постмагматические преобразования пород (раскисление плагиоклазов, серицитизация, карбонатизация, хлоритизация и т. д.), которые вновь приводят к изменению форм нахождения рудных элементов, переходу из инертного в подвижное состояние.

Этап III. Дальнейшее снижение температуры приводит к уменьшению возможных остаточных деформаций и переходу пород из пластических к хрупким состояниям [10]. Релаксация остаточных напряжений приводит к появлению разрывных нарушений [40].

Совместное рассмотрение процессов выполнения минеральных жил и ретроградного изменения вмещающих пород позволяет сместить акценты анализа источников жильного и рудного вещества. Не "откуда взять" рудные компоненты, а "куда сбросить" излишние элементы, появившиеся в результате регрессивных метасоматических изменений.

Рассмотренные выше стадии минералообразования, источники и механизмы формирования жильных тел, и сопутствующие преобразования на этой схеме сконцентрированы в третьем этапе, который завершает геологиче-

скую историю формирования месторождения. Но история начинается задолго до этого формирования.

Следуя этой схеме, геологические исследования, направленные на поиски эндогенных месторождений полезных ископаемых, целесообразно концентрировать не на анализе возможных "глубинных источников" рудного вещества, а на геолого-геохимическом анализе истории развития территорий. Такой анализ на примере месторождения Кёнигштайн (Германия) показал историческую взаимосвязь геологических процессов от нижнего палеозоя до современности [30].

Выводы. Комплексное рассмотрение истории развития жильных образований и вмещающих их пород позволяет установить:

1. Основные теоретические положения метаморфогенного рудообразования Я.Н. Белевцева не только не опровергнуты, но и получили дальнейшее развитие.

2. Все компоненты минерального выполнения жил (и жильные, и рудные) имеют местное происхождение и не требуют их привноса из удаленных источников.

3. Последовательность отдельных стадий минералообразования определяется эволюционными преобразованиями всей геологической системы, а не внешней инъекцией гипотетических специализированных растворов.

4. Формирование водно-углекислого эндогенного флюида происходит на этапе прогрессивного метаморфизма в результате метаморфогенной дегидратации и декарбонатизации вмещающих пород.

5. Образовавшийся флюид не остается неизменным, а эволюционирует в соответствии с принципом мозаичного равновесия по мере изменения внешних параметров равновесия системы.

6. Формирование рудных тел происходит на этапе регрессивного метаморфизма в результате выполнения образующихся пустот и метасоматических изменений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева О.В., Головин В.А. Метасоматические процессы на урановом месторождении Тулукуевской кальдеры в Восточном Забайкалье (Россия) // Геология рудных месторождений. — 1998. — 40, № 3. — С. 205—220.
2. Артемьев Д.С. Особенности геологического строения и вертикальной зональности рудных тел Майского золоторудного месторождения (Центральная Чукотка) // Регион. геология и металлогения. — 2015. — № 64. — С. 94—100.
3. Балашов В.Н., Зарайский Т.П., Тихомирова В.И., Постнова Л.Е. Экспериментальное исследование диффузии породообразующих компонентов в поровых растворах при $T = 250$ °С и $P = 100$ МПа // Геохимия. — 1983. — № 1. — С. 30—42.

4. Барсуков В.И., Соколова Н.Т., Иваницкий О.М. Распределение U, Th и K в гранитах массивов Ауэ и Айбеншток (Рудные горы, ФРГ) // Геохимия. — 1996. — № 12. — С. 1157—1174.
5. Белевцев Я.Н. Метаморфогенное рудообразование. — М.: Недра, 1979. — 275 с.
6. Бетехтин А.Г. (ред.) Основные проблемы магматогенного рудообразования. — М.: Изд-во АН СССР, 1953. — 615 с.
7. Вернадский В.И. Избр. соч., Т. V. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — С. 19.
8. Власов Б.П., Матюшин Л.В., Наумов Г.Б. Жильное урановое месторождение Шлема-Альберода (Рудные горы) // Геология рудных месторождений. — 1993. — 35, № 3. — С. 205—221.
9. Гольдштейн Р.И., Бровин К.Г., Каримов Х.К. и др. Металлогения артезианских бассейнов Средней Азии. — Ташкент: Фан, 1992. — 272 с.
10. Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику. — М.: Университет, 2005. — 496 с.
11. Граменицкий Е.Н., Котельников А.Р., Батанова А.М., Щеккина Т.И., Плечов П.Ю. Экспериментальная и техническая петрология. — М.: Науч. мир, 2000. — 416 с.
12. Грейтон Л. Природа рудообразующего флюида. — М.-Л.: Госгеолиздат, 1946. — 184 с.
13. Григоров С.А. Генезис и динамика формирования Наталкинского золоторудного месторождения по данным системного анализа геохимического поля // Руды и металлы. — 2006. — № 3. — С. 44—49.
14. Григоров С.А. Нелинейная структура геохимического поля рудообразующей системы // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 8. — С. 50—54.
15. Григорьев И.Ф. (ред.) Геология рудных месторождений Западных штатов США. Сборник, посвященный В. Линдгрону. — М.-Л.: ОНТИ НКТП, 1937. — 650 с.
16. Гуревич В.Л., Каницель А.В. Субфоновые ореолы гидротермальных урановых месторождений // Геология рудных месторождений. — 1984. — № 4. — С. 65—71.
17. Дымков Ю.М. Парагенезис минералов ураноносных жил. — М.: Недра, 1985. — 207 с.
18. Зарайский Г.П. Зональность и условия образования метасоматических пород. — М.: Наука, 1989. — 344 с.
19. Зарайский Г.П. Эксперимент в решении проблем метасоматизма. — М.: ГЕОС, 2007. — 136 с.
20. Ищукова Л.П., Авдеев Б.В., Губкин Г.Н., Игошин Ю.А., Макушин М.Ф., Попова А.И., Рогова В.П., Спиринов Э.К., Филипченко Ю.А., Хоментовский Б.Н. Геология Урулунгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля / Ред. Л.П. Ищукова, С.С. Наумов. — М.: Геоинформмарк, 1998. — 382 с.
21. Коржинский Д.С. Основы метасоматизма и метамагматизма. Избр. тр. — М.: Наука, 1993. — 239 с.
22. Кременицкий А.А. Глубинные исследования недр: результаты и перспективы // Минерально-сырьевая политика и национальная безопасность: Материалы науч.-практ. конф. — М.: ФГУП ВНИИгеосистем, 2009. — С. 53—82.
23. Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г. Гидротермальные образования рифтовых зон океана. — М.: Наука, 1990. — 256 с.
24. Малинин С.Д., Хитаров Н.И. Рудные и петрогенные элементы в системе магматический расплав-флюид // Геохимия. — 1984. — № 2. — С. 183—196.
25. Модников И.В., Сычев И.В. Условия формирования уранового оруденения в вулканических депрессиях проседания // Геология рудных месторождений. — 1984. — № 1. — С. 31—41.
26. Натальченко Б.И., Гольдштейн Р.И. Очаги разгрузки подземных вод как рудомобилизирующие структуры в формировании гидротермальных месторождений урана // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. — 1981. — № 9. — С. 90—96.
27. Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения включений в минералах и закалочных стеклах пород // Геохимия. — 2010. — № 12. — С. 1266—1288.
28. Наумов Г.Б. Миграция урана в гидротермальных растворах // Геология рудных месторождений. — 1998. — 40, № 4. — С. 307—325.
29. Наумов Г.Б. Вернадский и проблемы радиогеологии // Проблемы радиогеологии. — М.: Наука, 1983. — С. 5—20.
30. Наумов Г.Б. Взаимодействие экзогенных и эндогенных факторов уранового рудообразования // ВИМС: Сб. КНТС по урану. — 2017. — № 160. — С. 89—94.
31. Наумов Г.Б. Триггерные эффекты в геосистемах. — М.: ГЕОС, 2015. — С. 164—173.
32. Наумов Г.Б. Пути и механизмы миграции вещества в гидротермальном процессе // Минерал. журн. — 2017. — 39, № 2. — С. 75—91.
33. Наумов Г.Б., Беркелиев Т.К., Миронова О.Ф. Метасоматическая природа гидротермальных рудообразующих растворов // Минерал. журн. — 2012. — 34, № 2. — С. 100—111.
34. Наумов Г.Б., Власов Б.П., Голубев В.Н., Миронова О.Ф. Урановое пятиметальное месторождение Шлема-Альберода (ФРГ): пример саморазвивающейся гидротермальной системы // Геология рудных месторождений. — 2017. — 59, № 1. — С. 3—16. — doi: <https://doi.org/10.7868/S0016777017010051>
35. Наумов Г.Б., Власов Б.П., Миронова О.Ф. К вопросу о движении гидротермальных растворов (на примере жильного месторождения Шлема-Альберода) // Геология рудных месторождений. — 2014. — 56, № 5. — С. 387—398. — doi: <https://doi.org/10.7868/S0016777014050074>

36. Наумов Г.Б., Ермолаев Н.П., Моторина З.М., Никитин А.А., Соколова Н.Т., Цимбал Л.Ф. Геохимическая роль и место рудоподготовительных процессов в моделях эндогенного рудообразования // Генетические модели эндогенных рудных формаций. — Новосибирск : Наука, 1983. — Т. 1. — С. 34—42.
37. Наумов Г.Б., Миронова О.Ф. Миграция рудных элементов в гидротермальном процессе в свете новых методических подходов и эмпирических данных // Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты : Сб. материалов Всерос. конф., посвящ. 120-летию со дня рожд. акад. А.Г. Бетехтина. — М. : ИГЕМ РАН, 2017. — Р. 170—172.
38. Наумов Г.Б., Цимбал Л.Ф. Метаморфогенные источники рудного вещества // Процессы и закономерности метаморфогенного рудообразования. — Киев : Наук. думка, 1988. — С. 34—44.
39. Погудина М.А. Деанортизация плагиоклаза в процессе гидротермального изменения пород // Геохимия. — 1987. — № 1. — С. 76—86.
40. Пономарев В.С. Энергонасыщенность геологической среды. — М. : Наука, 2008. — 378 с.
41. Рундквист Д.В. Общие принципы построения геолого-генетических моделей рудных формаций // Генетические модели эндогенных рудных формаций. — Новосибирск : Наука, 1983. — С. 14—26.
42. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. — М. : Недра, 1976. — 668 с.
43. Спиридонов Э.М., Гриценко Ю.Д. Эпигенетический низкоградный метаморфизм и Co-Ni-Sb-As минерализация в Норильском рудном поле. — М. : Науч. мир, 2009. — 218 с.
44. Старостин В.И., Игнатов П.А. Геология полезных ископаемых: Учеб. для высш. шк. — М. : Академич. проект, 2004. — 512 с.
45. Тугаринов А.И. О причинах формирования рудных провинций // Химия земной коры. — М. : Изд-во АН СССР, 1963. — Т. 1. — С. 153—177.
46. Шуколюков Ю.А., Соколова Н.Т., Мешик А.П. и др. Возраст кварц-кальцит-настурановых жил месторождения Шлема-Альберода (Рудные горы, Германия) // Изв. АН. Сер. геол. — 1992. — № 1. — С. 78—91.
47. Leach D.L., Taylor R.D., Fey D.L., Diehl S.F., Saltus R.W. A Deposit Model for Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Ores // Scientific Investigations Report 2010-5070-A U.S. — Geol. Survey, 2010. — 64 p.
48. Cline J., Muntean J., Longo A., Cassinero M. Collaborative research on fluid pathways and metal transport in Carlin-type gold deposits: Insights from the Getchell deposit: Final Report for the U.S. Geol. Survey, 2006. — Mineral Resources External Research Program (MRERP), 2008. — 128 p.
49. Yardley B., Gleeson S., Bruce S., Banks D. Origin of retrograde fluids in metamorphic rocks // J. Geochemical Exploration. — 2000. — 69—70. — P. 281—285.
50. Yardley B.W.D., Cleverley J.S. The role of metamorphic fluids in the formation of ore deposits // Geol. Soc. — 2015. — 393. — P. 117—134. — (London, Spec. Publ.). — doi: <https://doi.org/10.1144/SP393.5>

Поступила 23.09.2018

REFERENCES

1. Andreeva, O.V. and Golovin, V.A. (1998), *Geology of ore deposits*, Vol. 40, No. 4, Nauka, Moscow, RU, pp. 205-220.
2. Artemyev, D.S. (2015), *Regional geology and metallogeny*, No. 64, VSEGEI, Sankt-Petersburg, RU, pp. 94-100.
3. Balashov, V.N., Zaraisky, T.P., Tikhomirova, V.I. and Postnova, L.E. (1983), *Geochimiya*, No. 1, Moscow, RU, pp. 30-42.
4. Barsukov, Vikt.L., Sokolova, N.T. and Ivanitsky, O.M. (1996), *Geochimiya*, No. 12, Moscow, RU, pp. 1157-1174.
5. Belevtsev, Ya.N. (1975), *Metamorphogenic Ore Formation*, Nedra, Moscow, RU, 275 p.
6. Betekhtin, A.G. (ed.) (1953), *The main problems of magmatogenic ore formation*, Izd-vo AN SSSR, Moscow, RU, 615 p.
7. Vernadsky, V.I. (1960), *Selected works*, Vol. V, Izd-vo AN SSSR, Moscow, RU, p. 19.
8. Vlasov, B.P., Matyushin, L.V. and Naumov, G.B. (1993), *Geology of ore deposits*, Vol. 35, No. 3, Moscow, RU, pp. 205-221.
9. Goldshtein, R.I., Brovin, K.G., Karimov, H.K., and et al. (1992), *Metallogeny of artesian basins of Central Asia*, Fan, Tashkent, UZ, 272 p.
10. Goncharov, M.A., Talitsky, V.G. and Frolova, N.S. (2005), *Introduction to Tectonophysics*, Universitet Publ. House, Moscow, RU, 496 p.
11. Gramenetsky, E.N., Kotelnikov, A.R., Batanova, A.M., Shchekina, T.I. and Plechov, P.Yu. (2000), *Experimental and technical petrology*, Nauchnyi Mir press, Moscow, RU, 416 p.
12. Graton, L.G. (1946), *Nature of the ore-forming fluid*, Gosgeolizdat, Moscow-Leningrad, RU, 184 p.
13. Grigorov, S.A. (2006), *Ores and Metals*, No. 3, Moscow, RU, pp. 44-49.
14. Grigorov, S.A. (2013), *Razvedka i ohrana neдр*, No. 8, Moscow, RU, pp. 50-54.
15. Grigoryev, I.F. (ed.) (1937), *Geology of the ore deposits of Western states of USA*, ONTI NKTP press, Moscow-Leningrad, RU, 650 p.
16. Gurevich, V.L. and Kantsel, A.V. (1984), *Geology of ore deposits*, No. 4, Moscow, RU, pp. 65-71.
17. Dymkov, Yu.M. (1985), *Mineral paragenesis of Uranium-bearing veins*, Nedra, Moscow, RU, 207 p.
18. Zaraisky, G.P. (1989), *Zoning and formation conditions of metasomatic rocks*, Nauka, Moscow, RU, 344 p.

19. Zaraisky, G.P. (2007), *The Experiment in solving the problems of metasomatism*, GEOS Publ., Moscow, RU, 136 p.
20. Ischukova, L.P., Avdeev, B.V., Gubkin, G.N., Igoshin, Yu.A., Makushin, M.F., Popova, A.I., Rogova, V.P., Spirin, E.K., Filipchenko, Yu.A. and Khomentovsky, B.N. (1998), *Geology of the Urulunguyevsky ore region and molybdenum-uranium deposits of the Streltsov ore field*, in Ishukova, L.P. and Naumov, S.S. (eds), ZAO Geoformmark press, Moscow, RU, 382 p.
21. Korzhinskiy, D.S. (1993), *Foundations of metasomatizm and meta-magmatizm*, Selected works. Nauka, Moscow, RU, 239 p.
22. Kremenetskiy, A.A. (2009), *Mineral resources policy and national security*, Proc. of sci.-pract. conf., Institute VNIIGeosystems press, Moscow, RU, pp. 53-82.
23. Lisitsyn, A.P., Bogdanov, Yu.A. and Gurchich, E.G. (1990), *Hydrothermal formation of rift zones of the ocean*, Nauka, Moscow, RU, 256 p.
24. Malinin, S.D. and Khitarov, N.I. (1984), *Geochimiya*, No. 2, Moscow, RU, pp. 183-196.
25. Modnikov, I.V. and Sychev, I.V. (1984), *Geology of ore deposits*, No. 1, Moscow, RU, pp. 31-41.
26. Natalchenko, B.I. and Goldshtein, R.I. (1981), *Izv. VUZov, Geologiya i razvedka*, No. 9, Moscow, RU, pp. 90-96.
27. Naumov, V.B., Kovalenko, V.I., Dorofeyeva, V.A., Girmis, A.V. and Yarmolyuk, V.V. (2010), *Geochimiya*, No. 12, Moscow, RU, pp. 1266-1288.
28. Naumov, G.B. (1998), *Geology of ore deposits*, Vol. 40, No. 4, Moscow, RU, pp. 307-325.
29. Naumov, G.B. (1983), *Problems of radiogeology*, Nauka, Moscow, RU, pp. 5-20.
30. Naumov, G.B. (2017), *Coordinating Scientific and Technical Council on geology, prospecting and exploration of uranium deposits: Inform. digest*, No. 160, Moscow, RU, pp. 89-94.
31. Naumov, G.B. (2015), *Triggering effects in the geosystems*, GEOS, Moscow, RU, pp. 164-173.
32. Naumov, G.B. (2017), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 39, No. 2, Kyiv, UA, pp. 75-91.
33. Naumov, G.B., Berkeliev, T.K. and Mironova, O.F. (2012), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 34, No. 2, Kyiv, UA, pp. 100-111.
34. Naumov, G.B., Vlasov, B.P., Golubev, V.N. and Mironova, O.F. (2017), *Geology of ore deposits*, Vol. 59, No. 1, Moscow, RU, pp. 3-16, doi: <https://doi.org/10.7868/S0016777017010051>
35. Naumov, G.B., Vlasov, B.P. and Mironova, O.F. (2014), *Geology of ore deposits*, Vol. 56, No. 5, Moscow, RU, pp. 387-398, doi: <https://doi.org/10.7868/S0016777014050074>
36. Naumov, G.B., Ermolaev, N.P., Motorina, Z.M., Nikitin, A.A., Sokolova, N.T. and Tsymbal, L.F. (1983), *Genetic models of endogenous ore formations*, Vol. 1, Nauka, Novosibirsk, RU, pp. 34-42.
37. Naumov, G.B. and Mironova, O.F. (2017), *Main problems in the theory of the endogenous ore deposits: New horizons*, IGEM RAN, Moscow, RU, pp. 170-172.
38. Naumov, G.B. and Tsymbal, L.F. (1988), *Processes and regularities of metamorphogenous ore formation*, Nauk. dumka, Kyiv, UA, pp. 34-44.
39. Pogudina, M.A. (1987), *Geochimiya*, No. 1, Moscow, RU, pp. 76-86.
40. Ponomaryov, V.S. (2008), *The energy saturation of the geological environment*, Nauka, Moscow, RU, 378 p.
41. Rundkvist, D.V. (1993), *Genetical models of the endogenous ore formations*, Nauka, Novosibirsk, RU, pp. 14-26.
42. Smirnov, V.I. (1976), *Geology of mineral resources*, Nedra, Moscow, RU, 668 p.
43. Spiridonov, E.M. and Gritsenko, Yu.D. (2009), *Epigenetical low-grade metamorphism and Co-Ni-Sb-As mineralization of Norilsk ore field*, Nauchnyi Mir, Moscow, RU, 218 p.
44. Starostin, V.I. and Ignatov, P.A. (2004), *Geology of mineral resources*, Akademicheskyy project, Moscow, RU, 512 p.
45. Tugarinov, A.I. (1963), *Earth Crust Chemistry*, Vol. 1, Izd-vo AN SSSR, Moscow, RU, pp. 153-177.
46. Shukolyukov, Yu.A., Sokolova, N.T., Meshik, A.P., and et al. (1992), *Proceedings Acad. Sci., Geol. Ser.*, No. 1, Moscow, RU, pp. 78-91.
47. Leach, D.L., Taylor, R.D., Fey, D.L., Diehl, S.F. and Saltus, R.W. (2010), *Scientific Investigations Report 2010-5070-A* U.S. Geol. Survey, 64 p., <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/a/pdf/SIR10-5070A.pdf>
48. Cline, J., Muntean, J., Longo, A. and Cassinero, M. (2008), *Final Report for the U.S. Geol. Survey, 2006, Mineral Resources External Research Program (MRERP)*, 128 p., <http://minerals.usgs.gov/mrerp/reports/Cline06HQGR0179.pdf>.
49. Yardley, B., Gleeson, S., Bruce, S. and Banks, D. (2000), *J. Geochemical Exploration*, Vol. 69-70, pp. 281-285.
50. Yardley, B.W.D. and Cleverley, J.S. (2015), *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, Vol. 393, pp. 117-134, doi: <https://doi.org/10.1144/SP393.5>

Received 23.09.2018

Г.Б. Наумов¹, Т.К. Беркелієв², О.Ф. Миронова³

¹ Державний геологічний музей імені В.І. Вернадського РАН
125009, м. Москва, РФ, вул. Мохова, б. 11, корп. 11
E-mail: gbnaumov@yandex.ru

² ГПБ Нефтегаз Сервисиз Б.В.
109028, м. Москва, РФ, Серебрянічеська наб., 29
E-mail: berkeliev@gmail.com

³ Інститут геохімії і аналітичної хімії (ГЕОХИ) ім. В.І. Вернадського РАН
119991, м. Москва, В-334, РФ, вул. Косігіна, 19
E-mail: olgamiroнова@geokhi.ru

ТЕОРИЯ МЕТАМОРФОГЕННОГО РУДОУТВОРЕННЯ ЗА ОСТАННЮ ЧВЕРТЬ СТОЛІТТЯ

Минуло 25 років після смерті голови Комісії з метаморфогенного рудоутворення Я.М. Белєвцева. За цей час роль пов'язаних з метаморфізмом процесів у гідротермальному рудоутворенні стає все більш виразною. Показано, що всі компоненти рудоутворювального флюїду, у т. ч. сама вода, вуглекислота, хлор і метали так чи інакше формуються в ході складного комплексу метаморфічних/метасоматичних перетворень, і не потребують їх привнесення із віддалених джерел. У процесі метаморфізму генеруються величезні обсяги металоносних флюїдів, і справа тільки у створенні умов їх сфокусованого надходження до місць рудоосадження. Відповідно, змінюється погляд на рудоконцентрувальні структури, які розглядаються нині не як підвідні канали, а як такі, що розвантажують (дренувальні). З цих позицій стає зрозумілою і значна тривалість процесів формування родовищ (десятки мільйонів років), і неодноразовість формування однакових за складом асоціацій ("стадій"). Інтрузивний магматизм як і раніше може відігравати важливу роль у рудоутворенні, але не як джерело металоносного флюїду. Укорінення інтрузій супроводжується потужним енергетичним імпульсом, що обумовлює тимчасовий стан нестабільності всієї геологічної системи, а також тривалу послідовність подальших перетворень із поступовим переходом до нових локальних рівноваг. Таким чином, основні теоретичні положення Я.М. Белєвцева щодо метаморфогенного рудоутворення не тільки не спростовані, а й отримали подальший розвиток.

Ключові слова: метаморфізм, метасоматоз, рудоутворення, міграція, фільтрація, дифузія, стадії.

G.B. Naumov¹, T.K. Berkeliev², O.F. Mironova³

¹ V.I. Vernadsky State Geological Museum of RAS
11/11, Mokhovaya Str., Moscow, Russia, 125009
E-mail: gbnaumov@yandex.ru

² GPB Neftegaz Services B.V.
29, Serebryanicheskaya nab., Moscow, Russia, 109028
E-mail: berkeliev@gmail.com

³ V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS
19, Kosygin Str., Moscow, B-334, Russia, 119991
E-mail: olgamiroнова@geokhi.ru

THE THEORY OF THE METAMORPHOGENIC ORE FORMATION IN THE LAST QUARTER CENTURY

It has been 25 years since the passing of the Chair of the Committee on metamorphogenic ore formation, Ya.N. Belevtsev. During this time, the role of the metamorphism-related processes in hydrothermal ore formation becomes more and more distinct. It is shown that all components of the ore-forming fluid, including water itself, carbon dioxide, chlorine and metals somehow form during a complex set of metamorphic/metasomatic transformations, and do not require their injection from remote sources. In the process of metamorphism, enormous volumes of metal-bearing fluids are generated, and the only matter is the pathways for their focused entry to the ore-deposition traps. Accordingly, it changes the view on the ore-concentrating structures, which are considered not as "supplying", but as unloading (draining). From these positions, it becomes clear that the long duration of the formation of deposits (tens of millions of years), and the non-simultaneous deposition of associations of the same composition ("stages"). Intrusive magmatism can still play an important role in ore formation, but not as a source of metal-bearing fluid. Magma intrusion is accompanied by a powerful energy impulse, leading the entire geological system to a temporary state of instability, and to a long sequence of further transformations with a gradual transition to new local equilibria. Thus, the principled provisions outlined by Ya.N. Belevtsev regarding metamorphogenic ore formation, are not disproved, but gained further development

Keywords: metamorphism, metasomatism, ore formation, migration, filtration, diffusion, stages.