МІНЕРАЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ
MINERALOGICAL JOURNAL
(UKRAINE)

УДК 550 : 553.2

Г.Б. Наумов

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

ПУТИ И МЕХАНИЗМЫ МИГРАЦИИ ВЕЩЕСТВА В ГИДРОТЕРМАЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

Рассмотрены существующие представления о путях и механизмах движения эндогенных гидротермальных растворов с учетом количественных наблюдений и экспериментальных данных, полученных в последнее время. Показано, что наиболее крупные разрывные нарушения могут играть роль не рудоподводящих, а дренирующих систем. Обращено внимание на пульсационный характер тектонических движений в период формирования рудных скоплений, что непосредственно влияет на миграцию вещества и энергии. Подчеркнута возможная роль диффузионных механизмов переноса вещества в масштабе месторождения, в результате чего поровый раствор может играть роль не только переносчика, но и проводника элементов. Особо рассмотрено влияние вибрации на процессы переноса, фильтрации флюидов и диффузию отдельных компонентов. Показано, что в реальных условиях наиболее вероятна совокупность разных механизмов транспортировки рудообразующего вещества, что требует индивидуального подхода к изучению с позиций синергетики и термодинамики открытых систем.

Ключевые слова: гидротермальные растворы, фильтрация, диффузия, вибрация, зоны питания, зоны разгрузки.

Для формирования эндогенных гидротермальных новообразований в любом случае необходимы не только наличие флюида [36], но и пространственное перемещение отдельных элементов. Этот вопрос всегда привлекал внимание исследователей [3], однако до специального анализа этих процессов на базе эмпирических данных с позиций фундаментальных законов физики и химии дело не доходило. В.И. Смирнов отмечал, что нет единого мнения о причинах движения гидротермальных растворов, и все существующие представления, которые могут быть разделены на четыре группы, сводятся к фильтрационным механизмам [48, с. 319]. В то же время Д.С. Коржинский [25] наряду с фильтрацией растворов рассматривал и диффузию элементов в неподвижном растворе. Г.Л. Поспелов отметил, что "физические модели этих явлений остались в основном без изменений со времени формулирования их в виде отдельных понятий" [43, с. 5]. Предпринятая им попытка сосредоточить внимание геологов на интерстиционном переносе и связанных с этим явлениях не нашла адекватного резонанса в последующих исследованиях.

В результате наибольшее распространение получила магматогенная гипотеза, исторические корни которой уходят в вековой спор между плутонистами и нептунистами [49]. В начале XIX века В. Линдгрен опубликовал знаменитую классификацию рудных месторождений, в которой рассмотрен широкий круг процессов, приводящих к формированию рудных скоплений [61]. В ее основу были положены не генетические, а физико-химические критерии. Эта схема была активно поддержана П. Ниггли [62], который, однако, повернул ее на 180°: поставив в начало собственно магматогенные и пегматитовые месторождения, и связав все гидротермальные образования с магматогенными флюидами, он придал ей "генетический" смысл. Именно в таком виде эта классификация, с теми или иными вариациями, многократно тиражировалась в литературе и в боль-

© Г.Б. НАУМОВ, 2017

шинстве учебных пособий под именем классификации Линдгрена. Эти представления долгое время "оставались в основном без изменений со времени оформления их в виде отдельных понятий" [43]. Несмотря на накапливающийся фактический материал о большой группе стратиформных месторождений цветных и редких металлов, модели их связи с магматическими очагами, находящимися "на разных уровнях верхней мантии" [10, с. 231] упорно продолжали свое шествие.

Изучение океанических "курильщиков" послужило основой новой модели движения растворов в конвективных ячейках [59], где движущая сила гидродинамической системы — вскипание просачивающихся, исходно морских, вод около горячего магматического тела. Дальнейшие исследования показали, что "доля магматических флюидов в гидротермах срединно-океанических хребтов очень мала и не может превышать $0{,}0n - 0{,}n$ %" [15]. Модель конвективных ячеек приобрела большую популярность и стала распространяться и на другие геологические объекты. В последних работах, где проведено сложное компьютерное моделирование взаимодействия водных и тепловых потоков, структура модели, начальные и граничные условия взяты не из эмпирических данных, а из общепринятых представлений [60]. Там же сделана попытка глобализировать эти модели, распространив их даже на плюмы.

Развивающиеся в последнее время компьютерные модели путей и механизмов миграции элементов в процессах эндогенного минералообразования в большинстве случаев опираются на традиционные модели, сложившиеся в начале прошлого века. Они не анализируют новые реальные эмпирические данные, которых во время создания этих моделей просто не существовало [26].

В данной статье сделана попытка в какой-то мере восполнить указанный пробел, и привлечь внимание к этим вопросам с учетом многочисленных эмпирических данных, полученных в последнее время.

Пути миграции растворов. В обобщающих моделях эндогенных минералообразующих систем, вошедших в учебную литературу, в большинстве случаев принимается, что раствор поступает к участку минерального новообразования, двигаясь вверх по наиболее крупному "подводящему" нарушению, и затем распределяется в трещины все более низких порядков [48]. Откуда и как поступает "рудоносный флюид" в "рудоподводящий разлом" и куда поступает "отработанный раствор" обычно не исследуют. Все слова и их сочетания, взятые в кавычки, неоднократно встречаются в работах, касающихся процессов формирования гидротермальных месторождений. На их основе строится структура модели, и принимаются ее начальные и граничные условия. Количественные расчеты в параметрах давлений и гидродинамических сопротивлений, *снятые с реальных природных объектов*, обычно выносятся за рамки рассмотрения. Так, в обширной монографии [56] есть попытки использовать при моделировании конкретные термобарические параметры гидротермальных минералов, но сама структура моделей априори принимается как магматогенная, а потому центр тяжести перенесен на магматические, а не гидротермальные процессы.

В обстоятельной обзорной работе "Состояние и перспективы развития учения о структурах рудных полей и месторождений" [46] подробно проанализированы существующие подходы к решению этих задач, вытекающие из сложившихся представлений. Рассматривая пути движения рудообразующих растворов, исследователи проводят детальное количественное моделирование исходя из "*общепринятых представлений*": "1) источник растворов — нижнекоровые метаморфические флюиды; 2) источник рудных элементов — нижняя кора". Эти достаточно жесткие условия базируются скорее на представлениях, чем на обобщении натурных наблюдений и экспериментальных данных. Аналогично принимаются и численные величины начальных и граничных условий: глубина системы (H = 20 км), вертикальная протяженность (L = 10 км), исходная температура T_1 = 500 °С, "давление флюидов на нижней границе области моделирования (т. е. на глубине 20 км) не должно превышать литостатическое давление" [46, с. 405]. Уже сама структура модели и принятые значения параметров априори подразумевают зарождение и пути движения растворов.

В то же время флюидное давление может быть не связано с литостатическим давлением и существенно зависит от "открытости — закрытости" всей гидротермальной системы [22]. Многочисленные новые данные, не согласующиеся с принятыми значениями, сейчас нака-

пливаются в результате появления новых методических и технических возможностей [40].

В результате в [46] авторы приходят к совершенно справедливому выводу, что рассмотренные материалы "отражают необходимость изменения содержания исследований по этим направлениям адекватно тем, которые накопились за последний период" [46, с. 417].

Классическая магматогенная модель далеко не всегда подтверждается при более детальных исследованиях.

В качестве примера приведем результаты специального целенаправленного изучения возможных путей движения растворов на крупном урановом месторождении Шлема-Альберода (Рудные горы, Германия), где особенности пространственного распределения рудных тел заставляли существенно сгущать сеть разведочных и эксплуатационных выработок.

В силу существовавшей в то время секретности, эти данные остались в фондовых материалах, и нашли свое отражение лишь в кратких анонимных изложениях отдельных вопросов [34, 35]. Общие сведения о месторождении, где густая сеть горных выработок достигала глубины 2000 м, даны в более поздних описаниях [9].

Целенаправленное изучение вопросов динамики рудообразующих растворов, включающее макро- и микроанализ геологической структуры, специальные подсчеты удельной трещиноватости и изучение температуры, давления и химического состава флюидных включений, позволили получить статистически надежные результаты [37].

По разным моделям средний градиент давления составлял от 36 ± 8 бар/100 м до 60—70 бар/100 м, что в любом случае значительно превышает нормальные гидростатические перепады. Содержание CO_2 сокращается: от 5,5 г/кг H_2O на глубоких горизонтах, удаленных от главного разлома до 0,5 г/кг H_2O в примыкающих к нему участках на верхних горизонтах.

Все эти и другие данные показали, что в такой обстановке растворы должны были двигаться не от наиболее крупного разлома, а в сторону примыкающего к нему наиболее нарушенного участка, который был областью разгрузки, а не зоной питания гидродинамических систем (рис. 1).

Изучение Саатлинской сверхглубокой скв. СГ-1 и прилегающих территорий показало, что в результате процессов метаморфизма неоднородных осадочных толщ происходят локальные разуплотнения, по которым водные и нефтегазовые флюиды перемещаются не только в горизонтальном направлении, но и сверху вниз (рис. 2). С этими процессами связано и формирование залежей Мурадханлинского нефтяного месторождения, что подтверждено распределением изотопов водорода, кислорода и углерода [27].

К сожалению, подобные специальные детальные исследования путей движения гидротермальных растворов в открытых публикациях пока единичны. 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 элизионных вод в формировании уранового оруденения на геохимических барьерах [31, 13]. Вероятно, детальное изучение этих вопросов может существенно повлиять на дальнейшее развитие теории рудообразования и иметь непосредственное практическое значение.

Даже те немногие материалы, которые уже появились в геологической литературе, показывают, что во многих случаях область питания гидротермальной системы может иметь не сосредоточенную, а рассредоточенную конфигурацию, а "спусковым крючком" ее функционирования может служить появление *области разгрузки* единой гидродинамической системы.

Механизмы движения растворов. Любое детальное картирование рудных жил по мере их отработки всегда показывает, что конкретные жильные тела, выполненные гидротермальными минеральными новообразованиями, всегда представляют собой систему кулис и пересекающихся прожилков, объединенных в одну жильную систему. Но это не один открытый канал, по которому может перемещаться рудный раствор. В этой системе имеются локальные открытые полости и участки, где раствор должен фильтроваться через слабопроницаемые участки.

С гидродинамической точки зрения они требуют наличия избыточного градиента давлений (I_i), превышающего начальный градиент фильтрации (I_0) [47].

В отличие от межгранулярной проницаемости трещинная проницаемость резко сокраща-

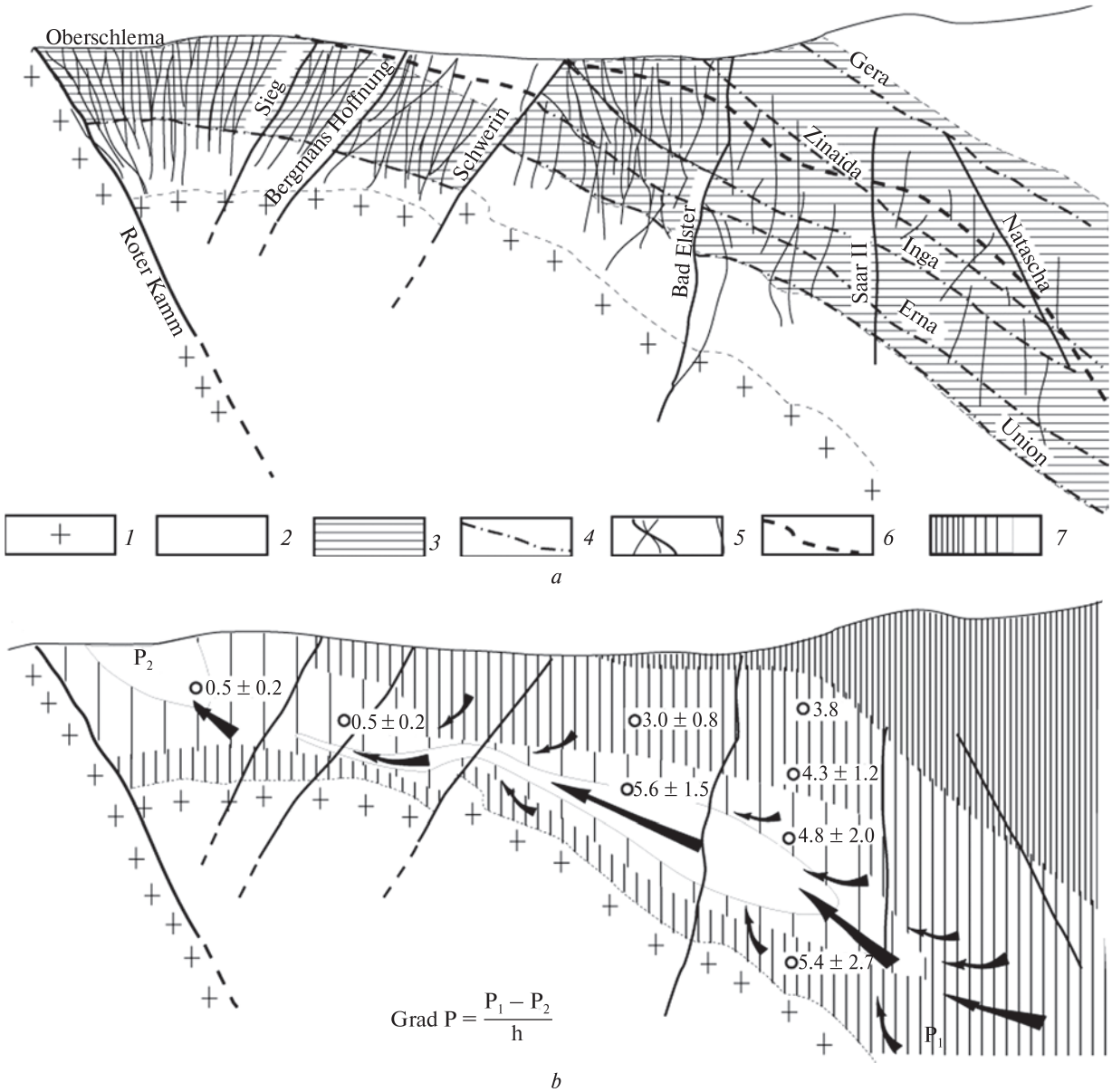

Рис. 1. Схематический разрез месторождения Шлема-Альберода. Вертикальный разрез (*a*) и изолинии густоты жильной сети (специальное картирование) в проекции на вертикальную плоскость (*b*): *1* — граниты, *2* — кварцево-слюдистые сланцы, *3* — пачка переслаивающихся пород основного и кислого состава, *4* — продольные и *5* — поперечные нарушения, *6* — граница зоны контактового метаморфизма, *7* — удельное гидродинамическое сопротивление среды (слева — минимальная, справа — максимальная; без гранитов), цифры (*на рисунке*) — средние значения содержаний углекислоты во флюидных включениях в минералах рудной стадии в г/кг H_2O. $P_1 > P_2$. Стрелками показано наиболее вероятное генеральное направления движения растворов [9, 37]

Fig. 1. Schematic section of Shlema-Alberoda deposit. Profile (*a*) and vertical projection of vein density isolines (special mapping) (*b*): *1* — granites, *2* — quartz-micaceous schist, *3* — a pack of interbedded rocks of basic and acidic composition, *4* — longitudinal faults, *5* — transversal faults, *6* — boundary of the contact-metamorphism zone, *7* — specific hydrodynamic resistance of the medium (left — minimal and right — maximal ones; without granites), numerical symbols — carbon-dioxide average values for fluid inclusions in ore-stage minerals in g/kg H_2O. $P_1 > P_2$. Arrows indicate the most probable general direction of solutions course [9, 37]

ется между пучками жильных тел и требует для движения всей гидродинамической системы значительных градиентов давления. В ряде случаев во включениях кварцев зон метаморфизма мы действительно фиксируем высокие флюидные давления, достигающие 5—7 кбар и даже более [40], поскольку оно определяется не только литологической нагрузкой, но и тер-

мическими и динамическими факторами. Такой рассредоточенный высокоплотный флюид обладает значительными запасами энергии, чтобы продвигать колонну раствора после того, как разрывные нарушения создадут области гидродинамической разгрузки. И все же его энергетическая емкость вряд ли столь велика, чтобы длительное время сохранять движущую силу, необходимую для продавливания всей флюидной системы.

Существенное осложнение для длительного функционирования всей гидротермальной системы — процесс кольматации жил и прожилков — отложения в них новообразованных гидротермальных минералов. Особенно быстро "закупориваются" мелкие трещинки в местах их сочленения с более крупными полостями.

Однако гидротермальная рудообразующая система возникает и существует не после одноактного тектонического импульса, а в результате периодически возобновляющихся многочисленных подвижек. Наблюдения за современными гидротермальными системами показывают, что они тяготеют к областям высокой сейсмичности, при которой частота землетрясений составляет десятки, а иногда и сотни толчков в сутки. Именно они поддерживают функционирование системы подводных "курильщиков", постоянно обновляя пути фильтрации термальных растворов в конвективных ячейках [29, 8]. Высокочастотные колебания земной коры весьма характерны для сейсмоактивных ее зон. Они не вызывают катастрофических разрушений и на них не обращают особого внимания, называя "рутинными сейсмическими событиями" и даже "сейсмическим шумом", но вызываемые ими интегральные следствия могут иметь огромное значение [33].

Вероятно, такого рода колебания характерны для периодов рудообразования. Хорошо известно, что крупные разрывные нарушения обычно имеют либо дорудный, либо пострудный возраст, а для момента отложения руд наиболее типичны мелкие подвижки, приводящие к образованию многочисленных небольших смещений и пересечений, обычно хорошо фиксируемых при отработке жильных рудных тел (рис. 3).

Изучение самих минералов рудных жил обнаруживает еще более мелкие вибрационные подвижки, отражающиеся в ритмически-зональном строении отдельных кристаллов.

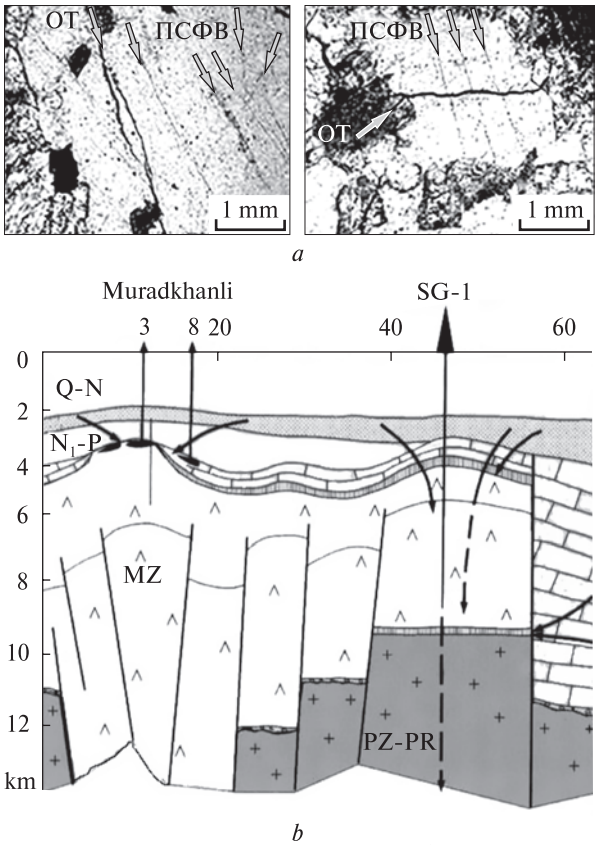

Рис. 2. Явления разуплотнения, зафиксированные микротрещинами (ОТ) и системой планарных флюидных включений (ПСФВ) (*a*), и нисходящая фильтрация (стрелки) подземных вод (*b*) [28]

Fig. 2. Decompaction occurrences fixed by microfissures (ОТ) and a system of planar fluid inclusions (ПСФВ) (*a*) and by underground — water falling filtration (arrows) (*b*) [28]

Н.П. Юшкин неоднократно обращал внимание на "*пульсационный* (курсив — Г.Н.) характер изменения состояния минералообразующей среды" [57].

Тектоническое "дрожание" в период формирования эндогенных рудных месторождений обычно фиксируется в самых разных новообразованиях (рис. 4). Сама жильная сеть месторождений обычно состоит из многочисленных взаимно пересекающихся жил и прожилков (рис. 4, *a*, *b*). В крустификационных жилах часто наблюдается многократное чередование повторяющихся минеральных ритмов (рис. 4, *c*). Аналогичные ритмы можно наблюдать под микроскопом (рис. 4, *d*), и даже на ультрамикроуровне (рис. 4, *i*).

Микросейсмы и вызванные ими микродробления могут иметь самые разные причины. В пределах области формирования жильных скоплений их может вызывать не только возобновление тектонической активности, но и

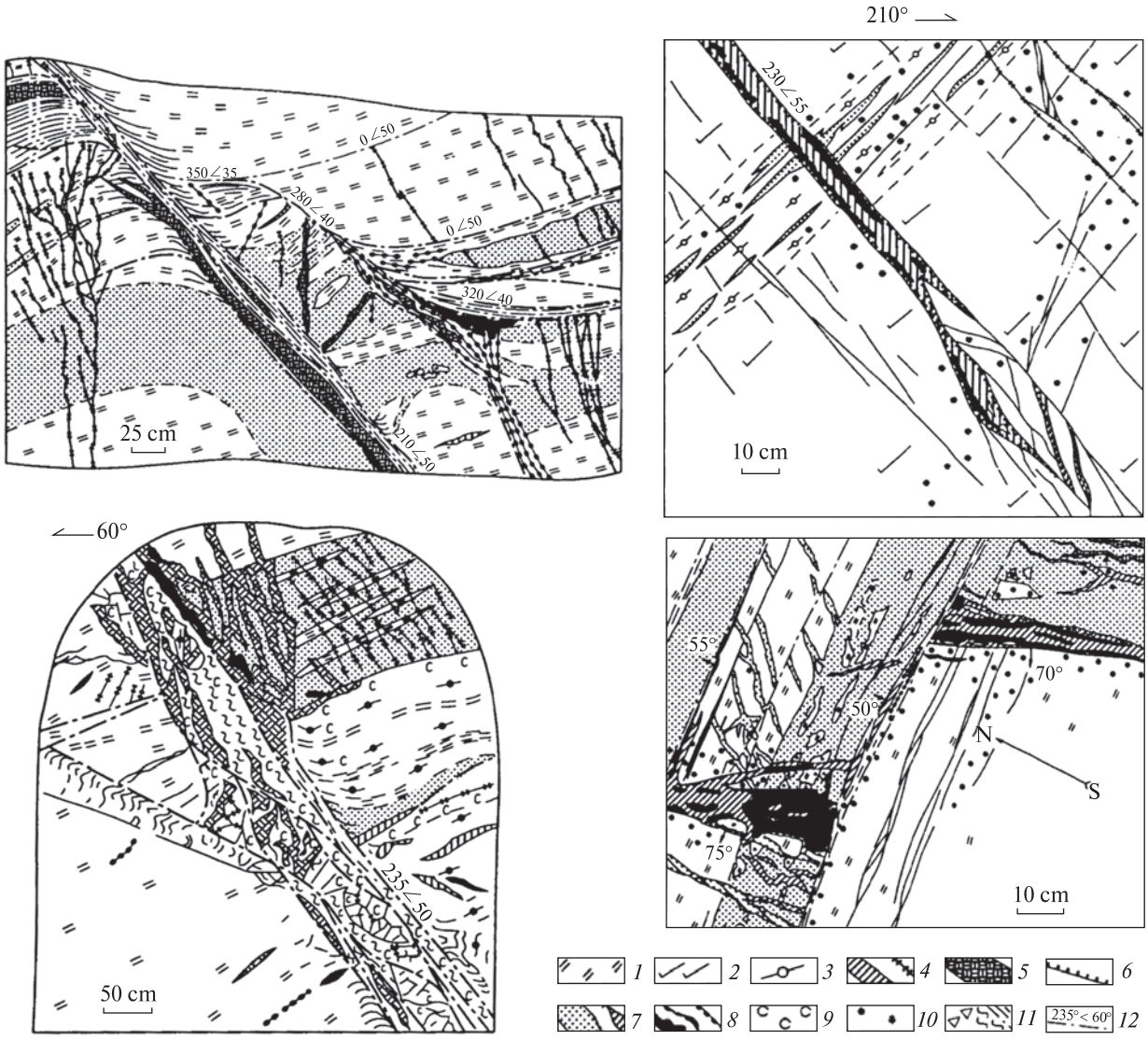

Рис. 3. Строение рудных жил, иллюстрирующее многочисленное их дробление (по Б.П. Власову): *1* — углисто-кремнистые и углеродсодержащие темные слюдяные сланцы; *2* — амфиболовые сланцы; *3* — светлые кварц-слюдяные сланцы; *4* — кальцитовые жилы; *5* — доломитовые жилы; *6* — гребенчатый кварц; *7* — кварцевые жилы; *8* — урановая смолка и урансодержащие прожилки; *9* — серицитизация; *10* — гематитизация; *11* — тектонический материал; *12* — тектонические швы, их азимуты и углы падения

Fig. 3. Structure of ore veins, illustrating their multiple crushing (after B.P. Vlasov): *1* — carbonaceous chert and carbonaceous dark mica shale; *2* — amphibole schist; *3* — light quartz-mica schist; *4* — calcite veins; *5* — dolomite veins; *6* — comb-shaped quartz; *7* — quartz veins; *8* — pitchblende and uraniferous veinlets; *9* — sericitization; *10* — hematitization; *11* — tectonic material; *12* — tectonic seams, their azimuth and dip angles

смена свойств пород при их остывании (уменьшение объема и замещение пластичных деформаций хрупкими), разрешение внутренних остаточных напряжений, явления гидроразрыва [24] и процессов метасоматических преобразований вмещающих пород. В любом случае они будут влиять на возобновление трещиноватости, поддерживая и направляя фильтрацию гидротермальных растворов и перенос вещества в недрах земной коры [39].

И переносчик, и проводник. Ко всему сказанному следует добавить еще один немаловажный аспект влияния сейсмической активности на процессы переноса вещества в гидротермальном минералообразовании. Традиционно в теориях гидротермального рудообразования термальный флюид рассматривается только как транспортирующий агент тех или иных элементов в зону рудоотложения. Судя по всему, во многих случаях это действительно так, но не всегда.

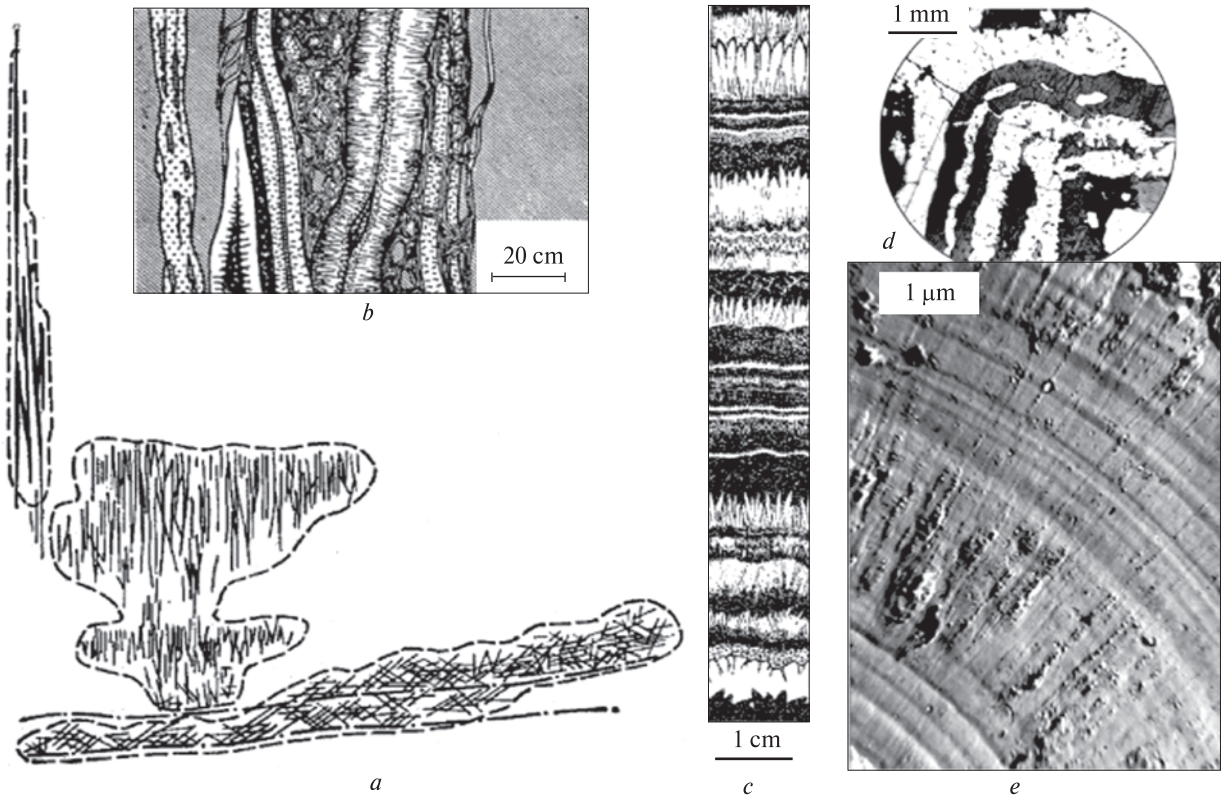

Рис. 4. Микроритмичность в гидротермальных жилах: *a* — жильная сеть месторождения Чаули, *b*, *c* — настуран-карбонатные жилы, Чехия (рис. Ю.М. Дымкова), *d* — уран-молибденитовые почки, месторождения Чаули, *e* — почка настурана, Рудные горы

Fig. 4. Microrhythmicity in hydrothermal veins: *a* — vein system of Chauli deposit, *b*, *c* — pitchblende-carbonate veins, Czech Republic (Fig. by Yu.M. Dymkov), *d* — uranium-molybdenite reniform aggregates, Chauli deposit, *e* — reniform pitchblende, Erzgebirge

В рамках моделей об исключительности фильтрационного флюидного переноса вещества не находят места такие эмпирические факты, как встречная миграция отдельных элементов. Классическим примером служат изученные еще Д.С. Коржинским биметасоматические скарны [25].

Публикуемые в последнее время результаты изучения перераспределения элементов в сопряженных геологических системах показывают, что разнонаправленные векторы их миграции достаточно обычны и захватывают пространства, далеко выходящие за пределы отдельных гидротермальных тел [42]. Противоположные векторы миграции устанавливаются и в сопряженных ареалах гидротермально-метасоматических изменений (рис. 5). Аналогичные закономерности наблюдаются в сопряженных региональных зонах калиевых и натриевых метасоматитов [52] и в других геологических образованиях.

Все эти сложности, которые уже нельзя игнорировать как "несущественные", возникают в том случае, если основным видом транспорта элементов, мигрирующих в эндогенных условиях, допускается лишь их перенос фильтрующимся сквозь породы флюидом. Если обратиться к эмпирическим данным, то надо признать, что мы не имеем доказательств исключительности фильтрационного флюидного переноса. Наблюдения свидетельствуют о широком развитии миграции элементов, но не о механизме этой миграции. Тем не менее фильтрационный механизм, реальный для локальных областей разгрузки глубинных вод, распространяется на все возможные и невозможные случаи. Видимо, необходимо подвергнуть сомнению не сам факт фильтрационного массопереноса, а его исключительность в процессах эндогенной миграции элементов.

При отрицании диффузионного массопереноса, вызванного низкими значениями коэффициентов диффузии в твердых телах, было упущено, что горная порода представляет собой не сплошную твердую фазу, а агрегат фаз со значительной величиной поверхности со-

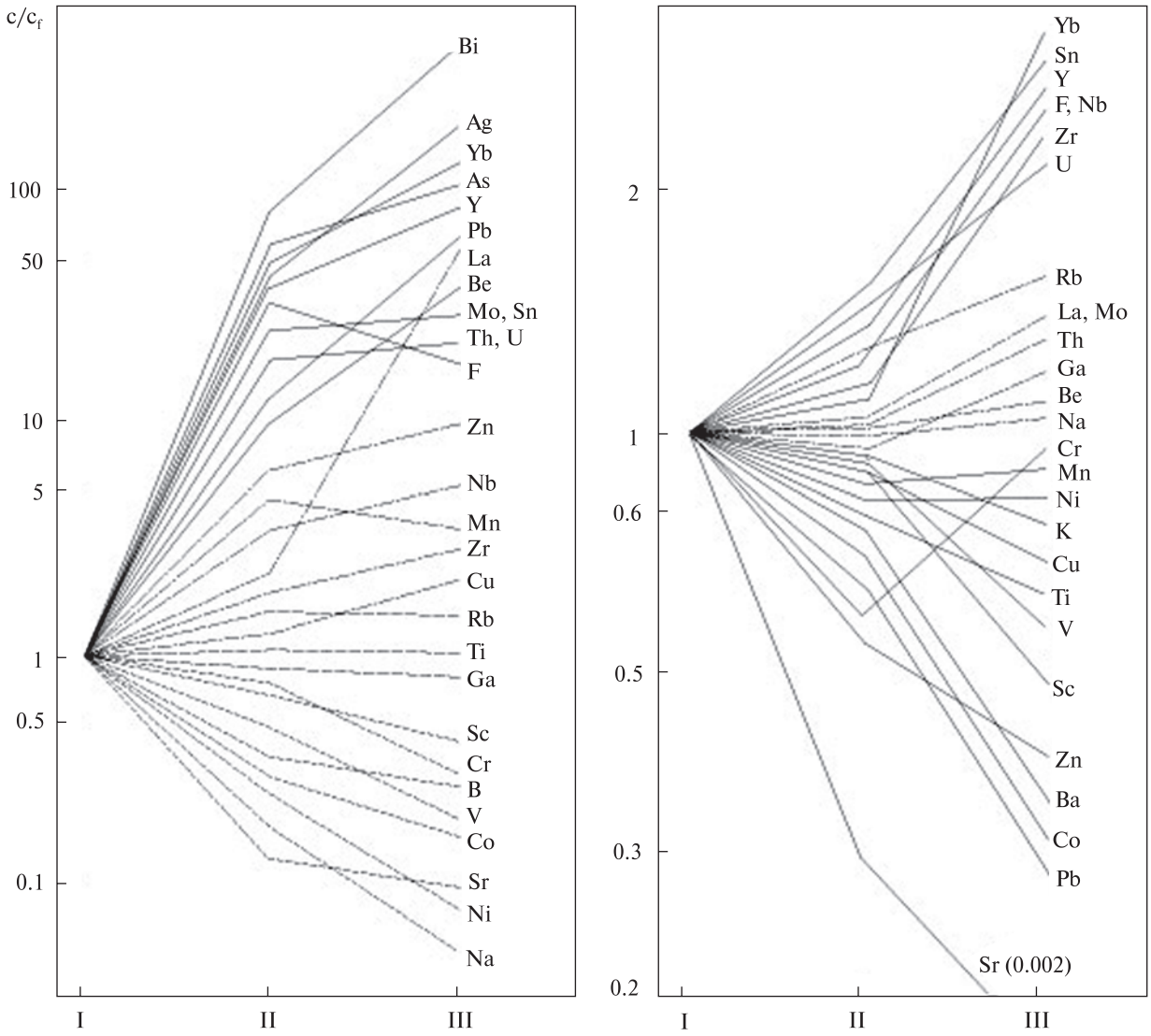

Рис. 5. Изменение содержания элементов при березитизации и альбитизации гранитоидов: *I—III* — степень изменения исходной породы (*I* — слабая (5—15 %), *II* — значительная (15—50 %), *III* — высокая (>50 %)), по [42]

Fig. 5. Changing elemental contents under beresitization and albitization of granitoids: I—III — alteration stage of parent rocks (I — low (5—15 %), II — substantial (15—50 %), and III — high (>50 %)), [42]

прикосновения между ними. Характер непосредственно наблюдаемых метасоматических изменений тонкозернистых пород (рис. 6, *a*), исключает их омывание фильтрующимся раствором. На рис. 6 хорошо видна равномерная смена цветности монолитных участков, в то время как тончайшие кварцевые прожилки ограничивают диффундирующий поток, создавая резкие цветовые смены соприкасающихся участков. В метаморфических сланцах метасоматические изменения часто развиваются по тонким трещинкам кливажа (рис. 6, *b*), мало пригодным для фильтрации растворов.

Более 40 лет назад Г.Л. Поспелов на основе многочисленных наблюдений природных объектов и количественных величин, заимствованных из смежных областей знания, попытался сосредоточить внимание геологов на диффузионном переносе и связанных с ним явлениях [43], однако, из-за отсутствия непосредственных экспериментальных измерений, его попытка не вызвала адекватного отклика в геологических исследованиях.

Появившиеся в последнее время новые экспериментальные определения вновь заставляют нас вернуться к этим вопросам. Так, если коэффициент самодиффузии одновалентных ионов в водном растворе при 25 °C $D = n \times 10^{-5}$ см^2/с, то для образцов песка $D = n \times 10^{-6}$ см^2/с, а для глин еще больше [2, 17]. Из-

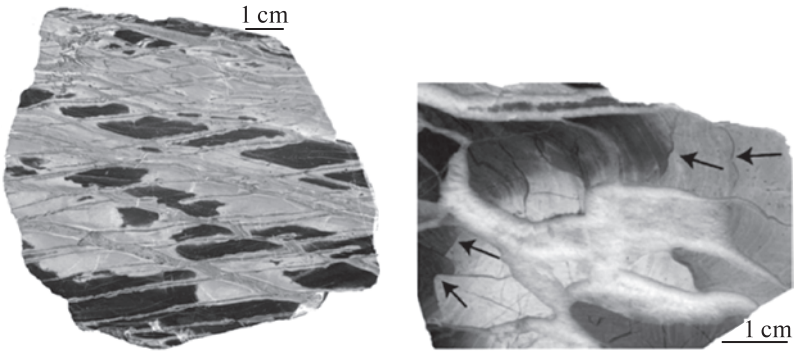

Рис. 6. Диффузионные изменения: *a* — по трещинам кливажа, *b* — в яшме (стрелками показаны направления изменений и их ограничения тонкими кварцевыми прожилками)

Fig. 6. Diffusion alterations: *a* — along cleavage fissures, *b* — in jasper (arrows show alteration directions and alteration limitation by thin quartz veinlets)

менение проницаемости этих пород на порядки весьма незначительно влияет на колебания коэффициента диффузии: уменьшение размера пор компенсируется возрастанием поверхности твердых фаз, которое оказывает решающее влияние на процессы диффузий [11].

Повышение температуры ведет к росту скорости диффузии. Так, при T = 250 °C эффективный коэффициент диффузии NaCl в поровом пространстве гранита составляет $n \times 10^{-4}$ см^2/с [1]. Такие величины нельзя считать пренебрежимо малыми. Так при $D = n \times 10^{-6}$ см^2/с глубина диффузионного проникновения за 1 млн лет составит ~100 м, а при 10^{-4} см^2/с ~1 км.

Соотношение скоростей фильтрационного и диффузионного перемещения элементов в гидротермальном процессе количественно было оценено Г.П. Зарайским (рис. 7) [19, 20]. Например, при проницаемости 1,0 мД фронт фильтрационной миграции может продвинуться за 1000 лет на 100 м и будет обгонять фронт диффузионного перемещения. Однако при проницаемости пород порядка 10^{-3} мД и ниже эффективность фильтрации становится крайне незначительной, в этих условиях должен заметно преобладать диффузионный массоперенос.

Естественно, что эти приближенные оценки относятся не к твердой фазе породы, а к той межзерновой поверхности, которая и обеспечивает диффузионный перенос в капиллярно-пористых телах. Условия для максимального развития этой поверхности наилучшим образом реализуются не в стабильных геотектонических блоках, а в мобильных зонах активизации. При этом основную роль в диффузионном перемещении вещества будут играть не крупные разломы, а области зон смятия, насыщенные различными малоамплитудными дислокациями, суммарная мощность которых обычно намного превышает мощность крупного разлома.

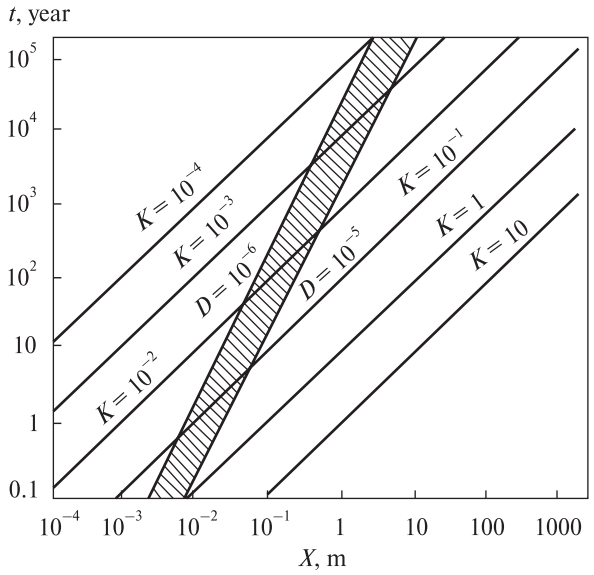

Рис. 7. Сопоставление значений скорости распространения инфильтрационного и диффузионного метасоматоза при разных значениях проницаемости горных пород (K, мД) и коэффициентов диффузии (D, см^2/с), по Г.П. Зарайскому

Fig. 7. Comparison of spreading rates of infiltration alterations and diffusion metasomatism under varied rock permeability (K, mD) and diffusion coefficients (D, cm^2/s), after G.P. Zaraisky

При диффузионной миграции поровые растворы могут оставаться на месте, а растворенные компоненты мигрировать в сторону понижения их химических потенциалов. В результате рудообразующий раствор становится не *переносчиком* компонентов, а их *проводником*. Чем выше растворимость отдельных компонентов в таком поровом растворе, тем выше его проводимость. Таким путем может происходить встречная диффузия отдельных

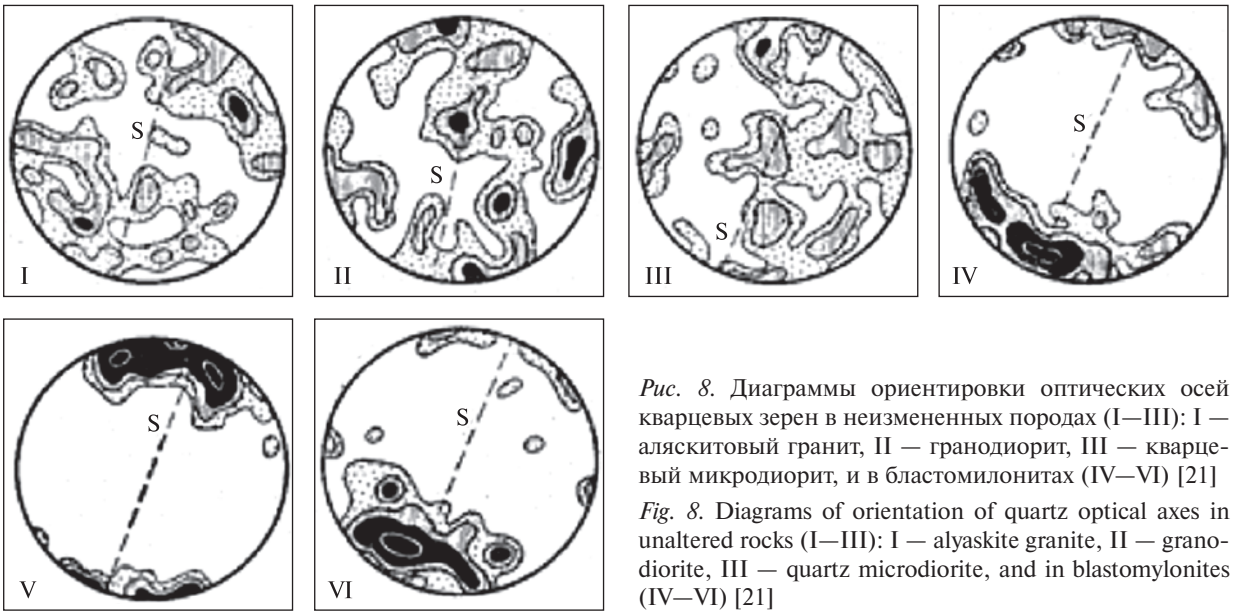

Рис. 8. Диаграммы ориентировки оптических осей кварцевых зерен в неизмененных породах (I—III): I — аляскитовый гранит, II — гранодиорит, III — кварцевый микродиорит, и в бластомилонитах (IV—VI) [21]

Fig. 8. Diagrams of orientation of quartz optical axes in unaltered rocks (I—III): I — alyaskite granite, II — granodiorite, III — quartz microdiorite, and in blastomylonites (IV—VI) [21]

компонентов, дающая картину, изображенную на рис. 5.

Вибрационная миграция. Выше отмечено, что для момента формирования рудных тел наиболее типичны мелкие подвижки. Они хорошо фиксируются многочисленными мелкими смещениями и пересечениями. Крупные разрывные нарушения обычно имеют либо дорудный, либо пострудный возраст. Образно говоря, участок жильного и штокверкового рудообразования в это время буквально "трясет".

В технике упругие механические колебания высокой частоты и малой амплитуды носят название вибрация (от лат. vibratio — колебание). Обычно рассматриваемая частота, оказывающая заметное влияние на наблюдаемые объекты, в привычных нам масштабах пространства и времени, начинается с 0,1 Гц. Для геологических объектов и процессов, происходящих в иных временных масштабах и с другими временами релаксации, диапазон частот может быть значительно шире. Заметим, что многие живые организмы (рыбы, рептилии и др.) чутко реагируют на геологическую вибрацию.

Тектоническая активность может влиять на миграцию вещества не только через структуру дислоцированных пород (увеличение проницаемости и коэффициента диффузии), но и в результате вибрационного воздействия на фильтрационные и диффузионные явления, приводя к появлению ступенчатой миграции. Упрощенная модель такого процесса рассмотрена ранее [32].

Ее суть сводится к переходу от непрерывного движения, при котором действие движущей силы экспоненциально убывает с расстоянием, к ступенчатому перемещению под влиянием вибрационных сил, в результате действия которых происходят многократные микроперемещения растворов (вибро-фильтрация) и отдельных элементов (вибро-диффузия).

Следы вибрационного воздействия фиксируются в зонах тектонических нарушений. Если за пределами зон тектонических нарушений оптические оси породообразующего кварца имеют неупорядоченную пространственную ориентацию, то в зонах дислокаций они переориентированы в соответствии с векторами напряжений (рис. 8) [21]. Это результат многократного проявления принципа рикке.*

Такая перекристаллизация зерен кварца — хороший индикатор изменений, происходящих в зонах тектонических напряжений в условиях регулярных многочисленных и длительно действующих тектонических "встряхиваний", где

* *Принцип рикке* — термодинамический закон, согласно которому в породе, подверженной одностороннему давлению, минералы растворяются по направлению давления (в участках максимального давления) и снова кристаллизуются в направлении, перпендикулярном к давлению (в местах минимального давления). Данное явление вызывает образование параллельной текстуры и сланцеватости в метаморфических породах (Геологический толковый словарь).

структурные преобразования имеют не шоковый, а последовательно эволюционный характер [55].

Реакционная активность в твердых телах под действием вибрационных сил может повышаться на порядки (10^4—10^8) даже по сравнению с аналогичными реакциями в жидкой фазе [18]. Конечно, такие ускорения уникальны и требуют особых условий, но тенденции очевидны.

Хорошо известно, что землетрясения обычно сопровождаются изменением дебита природных источников, уровня воды в колодцах, изменения газового режима и минерального состава вод. Эти изменения могут возникать задолго, иногда за несколько дней и даже недель, до землетрясения и проявляться на расстоянии многих километров от очага землетрясения [23]. Все эти гидрогеологические и гидрохимические изменения вызваны сейсмическими процессами, связанными с форшоковыми разночастотными явлениями, меняющими привычные линейные процессы механики [55, 5].

Нефтяники давно используют **вибрационные методы очистки закупоренных в результате кольматажа скважин и вибрационное воздействие на пласт** для повышения нефтеотдачи коллекторов [44, 45, 54, 14, 57, 30 и др.].

При вибрационной диффузии растворенные компоненты ведут себя аналогично, песчинкам на вибрационных столах, которые не только перемещаются вдоль линии изменения потенциала, но и разделяются по удельному весу. Элементы в поровых растворах будут разделяться в пространстве в соответствии с величинами разницы их химических потенциалов.

Ступенчатая нелинейная миграция пока не рассматривается в геологической литературе, хотя в целом ряде работ отмечалось значение сейсмоактивности в процессах рудообразования [4, 16 и др.]. Такой вывод напрашивается из сопоставления природных наблюдений и экспериментальных данных, фиксирующих, с одной стороны, различия в состоянии и поведении вещества в стабильных и сейсмоактивных тектонических блоках, с другой — ускорение протекания физических и химических процессов под влиянием периодических воздействий на систему.

Перенос объекта в пространстве параллельно самому себе на некоторое расстояние вдоль оси в физике называется трансляцией [51].

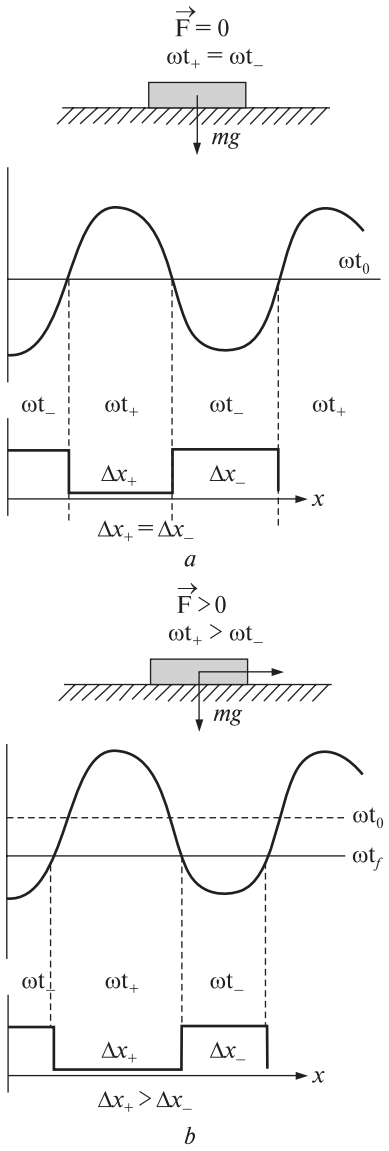

Рис. 9. Графическое изображение действия на материальное тело вибрационных (ωt) сил (*a*) и совместного воздействия вибрационных и обычных (*F*) сил (*b*)

Fig. 9. Diagram, showing action of vibration forces (ωt) on material body (*a*) and joint action (*b*) of vibration and usual forces (F)

Миграцию элементов, происходящую подобным образом, можно назвать *трансляционной миграцией*.

Важно отметить, что в данной модели полностью сохраняют свое значение все те эмпирические данные и закономерности, которые были получены в рамках традиционных моделей. Только связи между ними получают новое понимание, позволяя связать в единую адекватную систему большее количество эмпирических данных, постепенно приближая нас к реальному природному процессу.

В системах, находящихся в вибрационном поле, наряду с обычными силами начинают действовать некоторые дополнительные силы или моменты. Вслед за П.Л. Капицей их называют *вибрационными* силами. В рамках вибрационной механики находит объяснение широкий круг процессов, протекающих при действии вибрации на нелинейные системы [6].

Вибрационный процесс в общем виде обычно записывается в виде уравнения:

$$x = F(t) + \Psi(t, \omega t),$$

где x — текущая координата, F — обычная "медленная" сила, Ψ — вибрационная сила, зависящая от частоты вибрации ω, t — время. Графически влияние вибрации на преодоление сил трения изображено на рис. 9.

Поскольку в геологии вибрационные процессы обычно не рассматриваются, остановимся вкратце на сути этих явлений. Если материальное тело находится в поле только вибрационных сил, имеющих синусоидальный характер, то его смещение под действием этих сил будет иметь симметричный характер $\Delta x_+ = \Delta x_-$ (рис. 9, *а*). Если же материальное тело подвергается действию как обычных, так и вибрационных сил, то их суммарный эффект не будет симметричен $\Delta x_+ \neq \Delta x_-$ (рис. 9, *b*).

В условиях вибрации снижается коэффициент сухого трения, возникает эффект ползучести, разрыхление сыпучей среды, образование "виброкипящего" слоя, "всплывание" крупных тяжелых частиц в слое мелких легких и многое другое.

Вибрация широко распространена в природе и активно используется в технике. Для уплотнения бетона и удаления из него газовых пузырьков используются не статические нагрузки, а вибрирующие плиты, перемещаемые по поверхности залитого бетона. Вибрирующие насадки на забиваемые сваи значительно быстрее погружают их в грунт, чем удары тяжелого молота. Обогатители давно используют наклонные вибрационные столы для разделения тяжелой и легкой фракций. При этом не только преодолевается "сухое трение", но и каждая фракция начинает двигаться с разной скоростью. Живые организмы, и даже каждый их орган имеют свою характерную частоту вибрации. И, тем не менее, до сих пор отсутствует общее понимание причин, по которым природа часто "предпочитает" колебания монотонному течению процессов.

После работ И. Пригожина, Г. Хакена и Брюссельской школы физиков [12, 41, 53] стало ясно, что практически в любых открытых, диссипативных и нелинейных системах неизбежно возникают автоколебательные процессы *, поддерживаемые внешними источниками энергии, в результате которых происходит самоорганизация внутри системы. Для геологических систем воздействия короткопериодных колебаний и автоколебательные процессы представляют собой распространенное явление: гейзеры и грязевые вулканы [50], флишевые толщи и турбидиты, формирование рудоносных структур [7] и др.

Механизмы формирования подобных структур в геологической литературе обсуждается явно недостаточно, хотя еще в 1985 г. академик М.А. Садовский в статье "Голос Земли" писал: "вибрирование, существенно меняя свойства самой вмещающей среды (горной породы) и свойства флюидов и газов, ее наполняющих, может стать инструментом управления тепломассопереносом" [44].

Тем не менее, в общем плане можно утверждать, что эволюция минеральных рудных образований происходит ступенчато [38], возобновляясь при актах тектонической активизации и прерываясь в периоды покоя.

Выводы. Учет новых эмпирических данных и их количественных характеристик позволяет внести коррективы в наши теоретические представления о путях и механизмах миграции рудных элементов в процессах эндогенного рудообразования.

1. Области геологического пространства, примыкающие к крупным тектоническим нарушениям, могут быть не "зонами питания", а "областями разгрузки".

2. Наряду с фильтрационным переносом элементов существенное значение может иметь их диффузионный перенос.

3. Гидротермальный флюид может играть роль не только *переносчика*, но и *проводника* элементов.

4. Сейсмические вибрационные процессы могут существенно интенсифицировать формирование минеральных скоплений, в том числе и углеводородных.

---

* *Автоколебания* — незатухающие периодические движения, систематически возбуждаемые и поддерживаемые внешними не колебательными силами при отсутствии внешнего переменного воздействия.

5. В реальных природных условиях наиболее вероятна совокупность разных механизмов транспортировки рудообразующего вещества, что требует индивидуального подхода при решении этих вопросов для конкретных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Балашов В.Н., Зарайский Г.П., Тихомирова В.И. и др.* Экспериментальное исследование диффузии породообразующих компонентов в поровых растворах при T = 250 °С и P = 100 МПа // Геохимия. — 1983. — № 1. — С. 30—42.
2. *Белова Л.Л., Наумов Г.Б., Правикова В.А.* Поведение урана в фильтрационно-диффузионном процессе // Геохимия. — 1988. — № 10. — С. 1517—1522.
3. *Бетехтин А.Г.* О причинах движения гидротермальных растворов // Основные проблемы магматогенного рудообразования. — М. : Изд-во АН СССР, 1953. — С. 453—461.
4. *Билибина Т.В., Дашкова А.Д., Казанский В.И. и др.* Дислокационный метаморфизм пород центральной части Украинского щита // Сов. геология. — 1974. — № 1. — С. 68—77.
5. *Блехман И.И.* Вибрационная механика. — М. : Наука, 1994. — 398 с.
6. *Блехман И.И.* Вибрация "изменяет законы механики" // Природа. — 2003. — № 11. — С. 42—53.
7. *Богацкий В.В.* Механизм формирования структур рудных полей. — М. : Недра, 1986. — 89 с.
8. *Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г.* Гидротермальный рудогенез океанского дна. — М. : Наука, 2006. — 527 с.
9. *Власов Б.П., Матюшин Л.В., Наумов Г.Б.* Жильное урановое месторождение Шлема-Альберода (Рудные горы) // Геология рудн. месторождений. — 1993. — **35**, № 3. — С. 205—221.
10. *Вольфсон Ф.И., Архангельская В.В.* Стратиформные месторождения цветных металлов. — М. : Недра, 1987. — 254 с.
11. *Гегузин Б.Я.* Диффузионная зона. — М. : Наука, 1979. — 344 с.
12. *Гленсдорф Л., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций ; Пер. с англ. Н.В. Вдовиченко, В.А. Онищука / Под ред. Ю.А. Чизмаджева. — М. : Мир, 1973. — 280 с.
13. *Гольдштейн Р.И., Бровин К.Г., Каримов Х.К. и др.* Металлогения артезианских бассейнов Средней Азии. — Ташкент : Фан, 1992. — 272 с.
14. *Горбачев Ю.И., Иванова Н.И., Никитин А.А., Колесников Т.В., Орентлихерман Э.И.* Акустические методы повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти // Нефтяное хозяйство. — 2002. — № 5. — С. 87—91.
15. *Гричук Д.В.* Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. — М. : Науч. мир, 2000. — 304 с.
16. *Громов В.К., Карус Е.В., Кузнецов О.Л. и др.* Динамика формирования месторождений полезных ископаемых // Докл. АН СССР. — 1981. — **256**, № 5. — С. 1197—1200.
17. *Дубинчук В.Т., Лаптева О.Ф., Плотникова Р.И.* Изучение диффузии ионов натрия, йода, брома в образцах пород месторождения йодо-бромистых вод методом меченых атомов // Геохимия. — 1984. — № 10. — С. 1503—1510.
18. *Ениколопян Н.С., Мхитарян А.А., Карагезян А.С.* Сверхбыстрые химические реакции в твердых телах // Докл. АН СССР. — 1986. — **288**, № 3. — С. 657—660.
19. *Зарайский Г.П.* Зональность и условия образования метасоматических пород. — М. : Наука, 1989. — 344 с.
20. *Зарайский Г.П.* Эксперимент в решении проблем метасоматизма. — М. : ГЕОС, 2007. — 136 с.
21. *Казанский В.И.* Рудоносные тектонические структуры активизированных областей. — М. : Недра, 1972. — 240 с.
22. *Казанский В.И., Малиновский Е.Я., Наумов, Г.Б. и др.* Влияние структурных факторов на гидротермальное рудообразование // Геологические структуры гидротермальных месторождений. — М. : Наука, 1978. — С. 21—40.
23. *Кисин И.Г.* Землетрясения и подземные воды. — М. : Наука, 1982. — 176 с.
24. *Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. — М. : Наука, 2009. — 328 с.
25. *Коржинский Д.С.* Очерк метасоматических процессов // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. — М. : Изд-во АН СССР, 1953. — С. 332—352.
26. *Коробейников А.Ф.* Теоретические основы моделирования месторождений полезных ископаемых. — Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2009. — 182 с.
27. *Кременецкий А.А.* Глубинные исследования недр: результаты и перспективы // Минерально-сырьевая политика и национальная безопасность : Материалы науч.-практ. конф. — М. : ВНИИгеосистем, 2009. — С. 53—82.
28. *Попов В.С., Кременецкий А.А.* Глубокое и сверхглубокое научное бурение на континентах // Соросовский образоват. журн. — 1999. — № 11. — С. 61—68.
29. *Лисицин А.П., Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г.* Гидротермальные образования рифтовых зон океана. — М. : Наука, 1990. — 256 с.

30. *Мохов М.А., Сахаров В.А., Хабибуллин Х.Х.* Виброволновое и вибросейсмическое воздействие на нефтяные пласты // Нефтепромысловое дело. — 2004. — № 4. — С. 24—28.
31. *Натальченко Б.И., Гольдштейн Р.И.* Очаги разгрузки подземных вод как рудомобилизующие структуры в формировании гидрогенных месторождений урана // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. — 1981. — № 9. — С. 90—96.
32. *Наумов Г.Б.* Структурно-геохимический подход к решению вопросов рудообразования // Основные проблемы рудообразования. — М. : Наука, 1990. — С. 167—183.
33. *Наумов Г.Б.* Энергетика процессов рудообразования // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2008. — № 3. — С. 40—55.
34. *Наумов Г.Б., Ачеев Б.Н., Ермолаев Н.П.* К вопросу о движении гидротермальных растворов // Геология рудн. месторождений. — 1968. — **10**, № 4. — С. 29—39.
35. *Наумов Г.Б., Ачеев Б.Н., Ермолаев Н.П.* К замечаниям о движении гидротермальных растворов // Геология рудн. месторождений. — 1971. — **13**, № 1. — С. 117—120.
36. *Наумов Г.Б., Беркелиев Т.К., Миронова О.Ф.* Метасоматическая природа гидротермальных рудообразующих растворов // Мінерал. журн. — 2012. — **34**, № 2. — С. 100—111.
37. *Наумов Г.Б., Власов Б.П., Миронова О.Ф.* К вопросу о движении гидротермальных растворов (на примере жильного месторождения Шлема-Альберода) // Геология рудн. месторождений. — 2014. — **56**, № 5. — С. 387—398.
38. *Наумов Г.Б., Ермолаев Н.П., Моторина З.М. и др.* Геохимическая роль и место рудоподготовительных процессов в моделях эпигенетического рудообразования // Генетические модели эндогенных рудных формаций. — Новосибирск : Наука, 1983. — Т. 1. — С. 34—42.
39. *Наумов Г.Б., Кременецкий А.А.* Комплексный геолого-геохимический анализ перспектив конкретных территорий на твердые полезные ископаемые // Благородные, редкие и радиоактивные элементы в рудообразующих системах : Всерос. науч. конф. с междунар. участием к 120-ию со дня рожд. Ф.Н. Шахова (ИГМ СО РАН, 28—30 окт., 2014). — Новосибирск, 2014. — С. 484—505. [Электрон. ресурс]. — Режим доступа : http ://shakhov.igm.nsc.ru/pdf/Shakhov120-p484_505.pdf
40. *Наумов Г.Б., Миронова О.Ф.* Гидротермальные флюиды: термобарические параметры и их роль в процессах рудообразования // Зап. Рос. минерал. об-ва. — 2009. — Ч. CXXXVIII, № 3. — С. 56—69.
41. *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. — М. : Мир, 1979. — 512 с.
42. *Плющев Е.В., Шатов В.В.* Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. — Л. : Недра, 1985. — 247 с.
43. *Поспелов Г.Л.* Парадоксы, геолого-геофизическая сущность и механизмы метасоматоза. — Новосибирск : Наука, 1973. — 355 с.
44. *Садовский М.А.* Голос Земли // Химия и жизнь. — 1985. — № 1. — С. 42—47.
45. *Садовский М.А., Абасов М.Т., Николаев А.В.* Перспективы вибрационного воздействия на нефтяную залежь с целью повышения нефтеотдачи // Вест. АН СССР. — 1986. — № 9. — С. 95—99.
46. *Сафонов Ю.Г., Горбунов Г.И., Пэк А.А., Волков А.В., Злобина Т.М., Кравченко Г.Г., Малиновский Е.П.* Состояние и перспективы развития учения о структурах рудных полей и месторождений // Геология рудн. месторождений. — 2007. — **49**, № 5. — С. 386—420.
47. *Силин-Бекчурин А.И.* Динамика подземных вод. — М. : Изд-во Моск. гос. ун-та, 1965. — 380 с.
48. *Смирнов В.И.* Геология полезных ископаемых. — М. : Недра, 1976. — 668 с.
49. *Смирнов В.И.* Плутонизм и нептунизм в развитии учения о рудных месторождениях. — М. : Наука, 1987. — 92 с.
50. *Собисевич А.Л., Горбатиков А.В., Овсюченко А.Н.* Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова // Докл. акад. наук. — 2008. — **422**, № 4. — С. 542—546.
51. *Физический* энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. — М. : Сов. энциклопедия, 1984. — 944 с.
52. *Формации* метаморфогенных рудных месторождений / Я.Н. Белевцев, В.С. Домарев, Е.А. Кулиш. — Киев : Наук. думка, 1986. — 166 с.
53. *Хакен Г.* Синергетика / Ред. Ю.Л. Климонтович, С.М. Осовец ; Пер. с англ. В.И. Емельянов. — М. : Мир, 1980. — 404 с. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-10186-5
54. *Царев В.П.* Особенности нефтегазообразования в зонах тектоно-сейсмической активности. — Новосибирск : Наука, 1988. — 189 с.
55. *Чиков Б.М.* Короткопериодные колебания в геологических процессах литосферы (обзор проблемы) // Литосфера. — 2005. — № 2. — С. 3—20.
56. *Шарапов В.Н., Борисенко А.С., Мазуров М.П., Лебедев В.И., Павлова Г.А., Сотников В.И., Гаськов И.В., Пономарчук В.А., Житова Л.М., Перепечко Ю.В., Попов В.Н., Черепанова В.К., Черепанов А.Н.* Модельный анализ развития континентальных мантийно-коровых рудообразующих систем. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. — 409 с.
57. *Юркив Н.И.* Физико-химические основы нефтеизвлечения. — М. : ОАО ВНИИОЭНГ, 2005. — 366 с.
58. *Юшкин Н.П.* Теория и методы минералогии. — Л. : Наука, 1977. — 291 с.
59. *Edmonds H.N., Edmond J.M.* A three-component mixing model for ridge-crest hydrothermal fluids // Earth and Planet. Sci. Lett. — 1995. — **134**, No 1/2. — P. 53—67.

60. *Ingebritsen S.E., Appold M.S.* The Physical Hydrogeology of Ore Deposits // Econom. Geol. — 2012. — **107**, No 4. — P. 559—584.
61. *Lindgren W.* Mineral Deposits. — New York and London : Third Edition, 1928. — 929 p.
62. *Niggli P.* Ore Deposits of Magmatic Origin. — London : Tomas Murby and Co, 1929. — 93 p.

Поступила 18.03.2017

REFERENCES

1. Balashov, V.N., Zaraisky, G.P., Tikhomirova, V.I. and Postnova, L.E. (1983), *Geochemistry*, No 1, Moscow, RU, pp. 30-42.
2. Belova, L.L., Naumov, G.B. and Pravikova, V.A. (1988), *Geochemistry*, No 10, Moscow, RU, pp. 1517-1522.
3. Betekhtin, A.G. (1953), *The main problems magmatogene ore formation*, Izd-vo AN SSSR, Moscow, RU, pp. 453-461.
4. Bilibina, T.V., Dashkova, A.D., Kazanskiy, V.I. and et al. (1974), *Sov. Geology*, No 1, RU, pp. 68-77.
5. Blekhman, I.I. (1994), *Vibriation mechanics*, Nauka, Moscow, RU, 398 p.
6. Blekhman, I.I. (2003), *Nature*, No 11, Nauka, Moscow, RU, pp. 42-53.
7. Bogatsky, V.V. (1986), *Mechanism of formation of structures of ore fields*, Nedra, Moscow, RU, 89 p.
8. Bogdanov, Yu.A., Lisitsyn, A.P., Sagalevich, A.M. and Gurvich, E.G. (2006), *Hydrothermal ore Genesis of the ocean floor*, Nauka, Moscow, RU, 527 p.
9. Vlasov, B.P., Matyushin, L.V. and Naumov, G.B. (1993), *Geology of ore deposits*, Vol. 35, No 3, Nauka, Moscow, RU, pp. 205-221.
10. Vol'fson, F.I. and Arkhangel'skaya, V.V. (1987), *Stratiform deposits of nonferrous metals*, Nedra, Moscow, RU, 254 p.
11. Geguzin, B.Ya. (1979), *Diffusion area*, Nauka, Moscow, RU, 344 p.
12. Glensdorf, L. and Prigogine, I. (1973), *Thermodynamic theory of structures, stability and fluctuations*, Mir, Moscow, RU, 280 p.
13. Goldshtein, R.I., Brovin, K.G. Karimov, H.K. and et al. (1992), *Metallogeny of artesian basins of Central Asia*, Fan, Tashkent, 272 p.
14. Gorbachev, Yu.I., Ivanova, N.I., Nikitin, A.A., Kolesnikov, T.V. and Orentlikherman, E.I. (2002), *Oil industry,* No 5, RU, pp. 87-91.
15. Grichuk, D.V. (2000), *Thermodynamic models of submarine hydrothermal systems,* Scientific world Publ., Moscow, RU, 304 p.
16. Gromov, V.K., Karus, E.V., Kuznetsov, O.L. and et al. (1981), *Dokl. AN SSSR,* Vol. 256, No 5, RU, pp. 1197-1200.
17. Dubinchuk, T.V., Lapteva, O.F. and Plotnikova, R.I. (1984), *Geochemistry,* No 10, Moscow, RU, pp. 1503-1510.
18. Enikolopyan, N.S., Mkhitaryan, AA. and Karagezyan, A.S. (1986), *Dokl. AN SSSR,* Vol. 288, No 3, RU, pp. 657-660.
19. Zaraisky, G.P. (1989), *Zoning and formation conditions of metasomatic rocks*, Nauka, Moscow, RU, 344 p.
20. Zaraisky, G.P. (2007), *The Experiment in solving the problems of metasomatism*, GEOS Publ., Moscow, RU, 136 p.
21. Kazanskiy, V.I. (1972), *Ore-bearing tectonic structures of the activated areas*, Nedra, Moscow, RU, 240 p.
22. Kazanskiy, V.I., Malinowski, E.Ya, Naumov, G.B. and Peck, A.A. (1978), *The Geological structure of hydrothermal deposits*, Nauka, Moscow, RU, pp. 21-40.
23. Kissin, I.G. (1982), *Earthquakes and groundwater*, Nauka, Moscow, RU, 176 p.
24. Kissin, I.G. (2009), *Fluids in the crust. Geophysical and tectonic aspects*, Nauka, Moscow, RU, 328 p.
25. Korzhinskiy, D.S. (1953), *Basic problems in the study of magmatic ore deposits*, Izd-vo AN SSSR, Moscow, RU, pp. 330-452.
26. Korobeynikov, A.F. (2009), *Theoretical bases of the modeling of mineral deposits*, Tomsk Politekh. Univ. Publ. house, Tomsk, RU, 182 p.
27. Kremenetskiy, A.A. (2009), *Mineral resources policy and national security, Proc. of sci.-pract. conf.* VNIIgeosystem, Moscow, RU, pp. 53-82.
28. Popov, V.S. and Kremenetskiy, A.A. (1999), *Soros Educational Journ.*, No 11, RU, pp. 61-68.
29. Lisitsin, A.P., Bogdanov, Yu.A. and Gurvich, E.G. (1990), *Hydrothermal formation of rift zones of the ocean*, Nauka, Moscow, RU, 256 p.
30. Mokhov, M.A., Sakharov, V.A. and Khabibullin, H.H. (2004), *Oilfield business,* No 4, RU, Moscow, RU, pp. 24-28.
31. Natalchenko, B.I. and Goldshtein, R.I. (1981), *Izv. VUZov, Geologiya i razvedka*, No 9, Moscow, RU, pp. 90-96.
32. Naumov, G.B. (1990), *Main problems of ore formation*, Nauka, Moscow, RU, pp. 167-183.
33. Naumov, G.B. (2008), *Geology and mineral resources of the World ocean*, No 3, Kyiv, UA, pp. 40-55.
34. Naumov, G.B., Acheev, B.N. and Ermolaev, N.P. (1968), *Geology of ore deposits*, No 4, Nauka, Moscow, RU, pp. 29-39.
35. Naumov, G.B., Acheev, B.N. and Ermolaev, N.P. (1971), *Geology of ore deposits*, No 1, Nauka, Moscow, RU, pp. 117-120.
36. Naumov, G.B., Berkeliev, T.K. and Mironova, O.F. (2012), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 34, No 2, Kyiv, UA, pp. 100-111.
37. Naumov, G.B., Vlasov, B.P. and Mironova, O.F. (2014), *Geology of ore deposits*, Vol. 56, No 5, Nauka, Moscow, RU, pp. 387-398.

38. 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.
39. Naumov, G.B. and Kremenetskiy, A.A. (2014), *Noble, rare and radioactive elements in ore-forming systems, Vseros. nauch. konf. (28-30 okt., 2014), IGM SO RAN*, Novosibirsk, RU, pp. 484-505, available at: http://shakhov.igm.nsc.ru/pdf/Shakhov120-p484_505.pdf
40. Naumov, G.B. and Mironova, O.F. (2009), *Zapiski RMO,* Ch. 138, No 3, Leningrad, RU, pp. 56-69, available at: http://www.minsoc.ru/FilesBase/138304.pdf
41. Nicolis, G. and Prigogine, I. (1979), *Self-organization in nonequilibrium systems*, Mir, Moscow, RU, 512 p.
42. Plyushchev, E.V. and Shatov, V.V. (1985), *Geochemistry and ore bearing hydrothermal-metasomatic formations*, Nedra, Leningrad, RU, 247 p.
43. Pospelov, G.L. (1973), *Paradoxes, geological and geophysical nature and mechanisms of metasomatism*, Nauka, Novosibirsk, RU, 355 p.
44. Sadovsky, M.A. (1985), *Chemistry and life*, No 1, Nauka, Moscow, RU, pp. 42-47.
45. Sadovsky, M.A., Abasov, M.T. and Nikolaev, A.V. (1986), *Vestnik SSSR Acad. Sci.*, No 9, Moscow, RU, p. 95-99.
46. Safonov, Yu.G., Gorbunov, G.I., Pek, A.A., Volkov, A.V., Zlobina, T.M., Kravchenko, G.G. and Malinovski, E.P. (2007), *Geology of ore deposits*, No 5, Nauka, Moscow, RU, pp. 386-420.
47. Silin-Bekchurin, A.I. (1965), *Dynamics of groundwater*, Izd-vo Moscow Gos. Univ., Moscow, RU, 380 p.
48. Smirnov, V.I. (1976), *Geology of mineral resources*, Nedra, Moscow, RU, 668 p.
49. Smirnov, V.I. (1987), *Plutonism and neptunism in the development of the theory of ore deposits*, Nauka, Moscow, RU, 92 p.
50. Sobisevich, A.L., Gorbatikov, A.V. and Ovsyuchenko, A.N. (2008), *DAN SSSR*, Vol. 422, No 4, Moscow, RU, pp. 542-546.
51. Prohorov, A.M. (ed.) (1984), *Fizicheskiy enciklopedicheskiy slovar'*, Sov. Enciklopediya press, Moscow, RU, 944 p.
52. Belevtsev, Ya.N., Domarev, V.S. and Kulish, E.A. (1986), *Formacii metamorfogennyh rudnyh mestorozhdeniy*, Nauk. dumka, Kyiv, UA, 166 p.
53. Haken, G. (1980), *Sinergetika*, in Klimontovich, Yu.L. and Osovets, S.M. (eds), Mir, Moscow, RU, 404 p., DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-10186-5
54. Tsarev, V.P. (1988), *Characteristics of oil and gas formation in zones of tectonic and seismic activity*, Nauka, Novosibirsk, RU, 189 p.
55. Chikov, B.M. (2005), *Litosfera*, No 2, Ekaterinburg, RU, pp. 3-20.
56. Sharapov, V.N., Borisenko, A.S., Mazurov, M.P., Lebedev, V.I., Pavlova, G.A., Sotnikov, V.I., Gaskov, I.V., Ponomarchuk, V.A., Zhitova, L.M., Perepechko, Yu.V., Popov, V.N., Cherepanova, V.K. and Cherepanov, A.N. (2009), *Model analysis of the development of the continental mantle-crustal ore-forming systems*, Izd-vo SB RAS, Novosibirsk, RU, 409 p.
57. Yurkiv, N.I. (2005), *Physico-chemical basics of oil recovery*, OAO VNIIOENG Publ., Moscow, RU, 366 p.
58. Yushkin, N.P. (1977), *Theory and methods of Mineralogy*, Nauka, Leningrad, RU, 291 p.
59. Edmonds, H.N. and Edmond, J.M. (1995), *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol. 134, No 1-2, pp. 53-67.
60. Ingebritsen, S.E. and Appold, M.S. (2012), *Econom. Geology*, Vol. 107, No 4, pp. 559-584.
61. Lindgren, W. (1928), *Mineral Deposits*, Third Edition, New York and London, 929 p.
62. Niggli, P. (1929), *Ore Deposits of Magmatic Origin*, Tomas Murby and Co., London, 93 p.

Received 18.03.2017

Г.Б. Наумов

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

ШЛЯХИ ТА МЕХАНІЗМИ МІГРАЦІЇ РЕЧОВИНИ У ГІДРОТЕРМАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ

Розглянуто уявлення щодо шляхів і механізмів руху ендогенних гідротермальних розчинів із урахуванням отриманих останнім часом кількісних спостережень та експериментальних даних. Показано, що значніші порушення у вмісних породах можуть відігравати роль в утворенні не підвідних, а дренувальних систем. Зазначено можливу роль дифузійних механізмів і явищ вібрації у загальному процесі перенесення рудних елементів. Акцентовано увагу на пульсаційному характері тектонічних порушень у період формування рудних скупчень, що безпосередньо впливає на міграцію речовини й енергії. Підкреслено можливу роль дифузійних механізмів переносу речовини у масштабі родовища, в результаті чого поровий розчин може відігравати роль не тільки *переносника*, а й *провідника* елементів. Особливо розглянуто вплив вібрації на процеси перенесення, фільтрації флюїдів і дифузії окремих компонентів. Показано, що за реальних умов найбільш імовірною є сукупність різних механізмів транспортування рудоутворювальної речовини, що потребує індивідуального підходу до вивчення з позицій синергетики і термодинаміки відкритих систем.

Ключові слова: гідротермальні розчини, фільтрація, дифузія, вібрація, зони живлення, зони розвантаження.

G.B. Naumov

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

WAYS AND MECHANISMS OF MIGRATION OF SUBSTANCES IN THE HYDROTHERMAL PROCESS

Reviewed existing ideas about the ways and mechanisms of the movement of endogenous hydrothermal solutions with allowance for the recent quantitative observations and obtained experimental data. It is shown that the major faults can play the role of not ore transportation but drainage systems. Attention is drawn to the pulsating character of tectonic movements during the formation of ore clusters that directly affect the migration of the matter and energy. A possible role of diffusion mechanisms of mass transfer in scale deposits was highlighted, the pore solution can play the role of not only the *carrier* but also of the *conductor* the elements. Particularly, the author has considered the role of vibration in the processes of the transfer, filtration of fluids and diffusion of the individual components. Finally, it is shown that in real conditions a set of different mechanisms for the transport of ore-forming substances is the most probable that requires individual approach to the study of synergetic and thermodynamics of open systems.

Keywords: hydrothermal solutions, filtration, diffusion, vibration, feed zone, unloading zone.