

Иерархия конвективных геологических систем и их минерагеническое значение

А.Н.БАРЫШЕВ (Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ФГУП ЦНИГРИ); 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1).

Выделяются геологические системы девяти размерных порядков, которые обусловлены конвекцией, охватывающей разные уровни и слои Земли: ядро, нижнюю мантию, астеносферу, магматические очаги, литифицированные и нелитифицированные осадки. Обоснована взаимосвязь мощности конвектирующего слоя, усредненной вязкости его вещества и расстояния между конвективными ячейками для каждого порядка систем, соответствие им геологических структур, металлогенических таксонов, месторождений, частных текстур руд.

Ключевые слова: конвекция, фрактальность, пространственная периодичность, система, минерагения.

Барышев Александр Николаевич



khachatryan_g_k@mail.ru

The hierarchy of convective geological systems and their mineragenetic significance

A.N.BARYSHEV

Geological systems have been classified by size to nine magnitude orders, which are caused by convection, spanning different levels and layers of the Earth: the core, lower mantle, the asthenosphere, magma chambers, and lithified and nonlithified sedimentary deposits. The relationship between convecting layer thickness, the average viscosity of its materials and the distance between the convective cells for each order system, compliance with geological structures, metallogenic taxa, deposits, specific ore textures was proved.

Key words: convection, fractality, space periodicity, system, minerageny.

Рудообразование, создающее крупные компактные концентрированные массы полезного ископаемого, относится к завершению длительного и сложного процесса общей дифференциации вещества Земли. Эта дифференциация происходит на разных масштабных и глубинных уровнях не только в расплавленном, но и в практически твердом состоянии, чему в эндогенной металлогении внимания уделяется недостаточно. В.И.Смирнов отмечал: «Отсутствует полный научно обоснованный анализ общих закономерностей размещения полезных ископаемых на планете в целом... все еще глубоко не изучены особенности регионального размещения многих важных видов минерального сырья и причины, обуславливающие их концентрацию в одних зонах Земли в ущерб другим ее территориям...» [12, с. 630]. По мнению автора, ряд вопросов этой фундаментальной проблемы металлогении может получить освещение, если рассмотреть всю систему металлогенических подразделений разного ранга в связи с разномасштабными геодинамическими системами [4]. Общее определение металлогении, впервые данное Л. де Лоне в 1892 г. как область знаний, исследующую

«законы, управляющие распределением ассоциаций и разделением элементов в доступной части земной коры» [14], целесообразно расширить, охватывая всю минерагению, учитывая современный уровень развития наук о Земле. Минерагению следует рассматривать как дисциплину (науку) о процессах общей дифференциации вещества Земли, его движения и структурирования, последовательно способствующих образованию полезных ископаемых, а в конечном итоге – руд месторождений. Весьма важную роль в дифференциации и структурировании вещества играет конвекция (лат. convectio – перенесение), основной причиной которой является гравитационная неустойчивость либо неустойчивость в ином градиентном силовом поле.

Геологические структуры отдельных фаз и пространственных частей конвекции на разных масштабных уровнях в литературе именуют по-разному. В глобальном масштабе нижнюю восходящую часть конвективных систем относят к суперплюмам, а верхнюю часть аппроксимируют расходящимися литосферными плитами. В провинциальных конвективных системах нижнюю восходящую часть именуют плюмами,

верхнюю – областью рассеянного спрединга (например, под задуговым морем), а периферическую нисходящую – зонами субдукции. Часть ограниченной по фазе конвекции именуют адвекцией (лат. *advection* – доставка). В геотектонике В.В.Белоусовым к ней относится восходящая часть конвективной системы (диапир), а в метеорологии – горизонтальное перемещение облаков. Исследование генетических основ геодинамических процессов и их функционирования требует рассмотрения во взаимосвязи всех частей конвективной системы, учитывая закон сохранения вещества или компенсационную организацию тектонического течения (по М.А.Гончарову). Рассмотрение частей по отдельности в виде плит, плюмов, диапиров и др. допустимо при морфологическом их описании. Игнорирование взаимосвязей приводит к неоправданной остроте дискуссий между сторонниками фиксизма и мобилизма.

Условия развития конвекции и конвективные системы в Земле. Проявление конвекции в разных условиях имеет свои особенности. В наиболее простом случае, в однородной по составу (однослойной) среде, например водной, конвекция характеризует перенос массы и теплоты за счет разуплотнения нижней части слоя при нагревании. Такая гравитационная неустойчивость носит название неустойчивости Рэлея. Ее условия описываются уравнением Рэлея:

$$R = \frac{\rho \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot H^3}{a \cdot \eta} \quad \text{или} \quad R = \frac{\Delta \rho \cdot g \cdot H^3}{a \cdot \eta}$$

где R – критическое число Рэлея, ρ – плотность, ΔT – перепад температур в слое, β – коэффициент температурного расширения, g – ускорение силы тяжести, H – мощность конвектирующего слоя, a – коэффициент температуропроводности (скорости выравнивания температур) или релаксации, η – динамическая вязкость, $\Delta \rho$ – разуплотнение.

Физическая сущность формулы весьма проста: числитель характеризует архимедову силу, а знаменатель – факторы, препятствующие всплыванию (вязкость, снижающая скорость течения, температуропроводность, ускоряющая остывание, что снижает разуплотнение). Неустойчивость вызывает конвекцию при достижении определенной величины критических чисел Рэлея. При первом числе $R_1 \approx 1700$ конвекция осуществляется в виде вала (стоячей волны), а при втором числе $R_2 \approx 10^4$ – в виде ячеистого поднятия [6]. Возрастание неустойчивости после условий, характеризуемых R_1 , приводит к зарождению на гребне вала дополнительных волн двух других направлений, интерференция которых по достижению R_2 приводит к развитию гексагональной ячеи.

По сравнению с упомянутым выше простым случаем, геологические факторы, регулирующие конвекцию в Земле, более многообразны. Нарастание температуры с глубиной в любом случае способствует конвекции.

Сложности вызывает слоистая структура, наличие слоев, вещество которых обладает большой вязкостью. В связи с этим Л.И.Лобковский и В.Е.Хаин выдвинули концепцию многоярусной конвекции, осуществляемой в разных оболочках расслоенной Земли, начиная с внешнего жидкого ядра. Позже было отмечено [17], что развитие упомянутой концепции видится «*в уточнении и конкретизации иерархии конвективных потоков, образующих в теле планеты многоуровневую разноразмерную систему*» (курсив А.Барышева).

Разные геологические структуры, обусловленные конвекцией, отражают не только ее масштабный уровень, но и весьма разные фазы ее завершения к определенному времени. Поэтому говорить о полном подобии конвекции в геологических процессах нельзя, но важно другое. Зарождение конвекции происходит по волновому закону. Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшиц отмечали: «Возникающее конвективное движение имеет своеобразный характер. Уже в силу неограниченности пространства в горизонтальных направлениях очевидно, что движение должно обладать периодичностью в горизонтальной плоскости» [8, с. 256]. Эта закономерность весьма важна для теоретического обоснования периодического повторения геологических структур, связанных с конвекцией.

Когда сверху залегает слой более плотный, чем нижний, на границе слоев возникают волны разной длины, стремящиеся перевести систему в устойчивое состояние. В зависимости от мощности слоев, вязкости и разницы плотности их веществ существует такая доминирующая длина волны, при которой рост амплитуды происходит наиболее быстро [11, 19]. Поэтому зарождение адвекции или конвекции происходит дискретно в участках, расположенных через определенный шаг, равный длине этой волны, определяя периодичность конвективных структур в пространстве. Следует отметить, что Х.Рамберг [19] теоретически предвосхитил и экспериментально обосновал те закономерности волновой самоорганизации систем в геологии, которые позже стали рассматриваться в аспекте синергетики Г.Хакена и теории диссипативных структур И.Пригожина [14]. Выбор системой доминирующей длины волны на границе сред соответствует «резонансному возбуждению» по И.Пригожину. Этот выбор приводит к «режиму с обострением», а критические числа Рэлея соответствуют «точкам бифуркации». В отличие от закрытых систем, в которых возрастает энтропия, конвекция осуществляется в открытой системе внешнего градиентного поля (главным образом гравитационного), при котором система получает энергию, способствующую структурированию и понижению энтропии.

Гравитационную неустойчивость в слоистой среде относят к неустойчивости Рэлея-Тейлора. Расчет условий конвекции в этом случае более сложен. Х.Рамбергом составлена диаграмма, позволяющая учитывать соотношение параметров питающего и перекрывающего

слоев в такой ситуации [11]. Из диаграммы следует, что если в гравитационно неустойчивой системе перекрывающий слой имеет бесконечную мощность, а вязкость в 50 раз большую, чем вязкость нижнего (питающего) слоя, то размер конвективной системы будет отличаться, но не более, чем на один порядок, по сравнению с тем случаем, если вязкость перекрывающей среды бесконечно мала и нет препятствий для конвекции со стороны перекрывающего слоя. К тому же, как отмечает Х.Рамберг, если мощность перекрывающего слоя меньше длины волны, то это создает эффект, аналогичный уменьшению его вязкости. Таким образом, ранжировать конвективные системы по размерам в двухслойных моделях можно по условиям однослойных моделей с точностью до порядка. Главную роль при этом играет величина мощности всплывающего слоя («высота поплавка»), возведенная в третью степень, регулирующая архимедову силу. Разуплотнение важно, но оно в природе, как правило, невелико, и его величина играет подчиненную роль.

Другой важный аспект конвекции, приводящий к самоорганизации геологических систем, обусловлен тем, что при подъеме нагретого глубинного вещества в области меньшего общего (литостатического) давления уменьшается вязкость. При таких условиях становится реальной конвекция в меньших по мощности слоях. Отсюда формируется фрактальная структура системы, то есть от крупного поднятия всплывает серия мелких, а от каждого мелкого – серия еще более мелких поднятий. Особенно резко вязкость меняется в субсолидусном состоянии вещества и частичном его плавлении в обстановке декомпрессии. Вероятно, поэтому первичные базальтоидные магматические очаги периодически чередуются через одинаковые расстояния, кратные около 30 км, в разных тектонических обстановках. Это присуще базальтоидным очагам, формирующимся при спрединге, деятельность которых приводит к колчеданообразованию, а также очагам дунит-пироксенит-габбровым с титано-магнетитовой, ванадий-железо-медной и золотоплатиноидной металлогенией, формирующимся при сдвиговой трансенсии.

Все упомянутые конвективные системы характеризуют глубинную геодинамику и связанную с ней эндогенную металлогению. Естественно, что системы разных размерных масштабов достигают лишь определенных фаз развития. Подобны лишь их начальные условия зарождения, выраженные характерными длинами волн при соответствующих мощностях конвектирующего слоя и вязкости его вещества. Путем наблюдений непосредственно определить мощность питающего слоя в геологических конвективных системах в большинстве случаев весьма затруднительно, а чаще всего невозможно. Но так как мощность конвектирующего слоя H и длина волн в значительной степени связаны, то в основание схемы иерархии конвективных структур можно положить длину волн.

Такой принцип иерархии будет отражать и глубинный масштаб конвекции. Этот принцип согласуется с принципом иерархии ундаций в земной коре и мантии, предложенным Р.Беммеленом¹ [18].

В методологии ранжирования систем может быть использовано уравнение подобия, выводимое из уравнения Рэлея, и характерные для него коэффициенты подобия параметров [2]. Коэффициент подобия – отношение параметров одной из физических величин в подобных системах, например, $H_1 : H_2 = C_H$.

Уравнение подобия легко выводится путем деления уравнения, описывающего одну систему, на уравнение, описывающее другую подобную систему. Из уравнения Рэлея следует:

$$C_{\Delta\rho} \cdot C_g \cdot C_H^3 = C_a \cdot C_\eta,$$

где C – коэффициент подобия величин, соответствующих индексам: $\Delta\rho$ – разуплотнения, g – ускорения силы тяжести, H – мощности (размерного параметра), a – коэффициента релаксации (температуропроводности), η – вязкости.

Для горных пород $a=(6\div 13)\times 10^{-3}$ см²/с [16]. Поэтому можно принять $C_a \approx 1$. В природе, в отличие от экспериментов на центрифугах, ускорение силы тяжести практически одинаково. Поэтому $C_g = 1$. При ограниченной степени разуплотнения можно принять $C_{\Delta\rho} \approx 1$.

Отсюда следует, что:

$$C_H^3 \approx C_\eta.$$

Иначе говоря, для принятых условий при уменьшении размера системы на один порядок вязкость в подобной системе должна быть на три порядка меньше.

Другая важная особенность развития конвективных систем та, что в природных системах, определяемых гравитационной неустойчивостью, с увеличением размера на один порядок время протекания её подобных фаз увеличивается на два порядка [2, 5]. Это следует, с одной стороны, из уравнения подобия медленных пластических деформаций, по М.В.Гзовскому:

$$C_\eta = C_\rho \cdot C_g \cdot C_l \cdot C_t,$$

где l – размерный параметр, как и H , а C_t – коэффициент подобия времени, а с другой стороны – из подобия иных параметров, рассмотренных выше. То есть

$$C_t \approx C_l^2$$

¹Р. ван Беммелен связывал ундации возрастающих по размерам классов с все более глубинными слоями: локальные ундации при поперечнике до 1 км – с верхней частью тектоносферы, малые ундации (10 км) – с корой, мезоундации (100 км) – с нижней частью тектоносферы, геоундации (1000 км) – с астеносферой, мегаундации (10 000 км) – с нижней мантией.

Иерархия геологических структур, вызванных ячеистой конвекцией в гравитационном поле

Порядок фактала	Масштабный тип геологических структур	Поперечный размер	Характеристика слоя, инициирующего конвекцию		Шаг между смежными ячейками	Металлогенический таксон, соответствующий ячее
			Природа	Мощность		
I	<i>Глобальный:</i> океан; супер-плум	>5000 км	Жидкое ядро и мантия под астеносферой	~2900 км	10^4-10^9 ядра $10^{23}-10^{25}$ мантии	Планетарная металлогеническая провинция
II	<i>Провинциальный:</i> ячеистое окраинное море; континентальная депрессия, обрамляемая орогенами; раздувы астеносферы; мантийный плум	1000–2000 км	Астеносфера	200–300 км	$10^{20}-10^{21}$	Металлогеническая провинция
III	<i>Региональный:</i> частные впадины окраинных морей, континентальных депрессий с выпуклостями астеносферы под ними	50–150 км	Верхняя часть астеносферы	30–60 км	$10^{17}-10^{18}$	Металлогеническая область Суперрайон
IV	<i>Очаговый:</i> мантийно-коротый магматический очаг, его окружение; соляной купол	10–30 км	Субсолидусные магмы и их рестиг; толщи эвапоритов	2–10 км	$10^{14}-10^{15}$	Магматогенно-рудный узел
V	<i>Камерный:</i> интрузивный шток; экструзив	0,5–3,5 км	Разуплотненные выплавки в коровом базитовом очаге	0,2–1 км	$10^{11}-10^{12}$	Месторождение
VI	<i>Апофизный:</i> мелкие штоки-апофизы в интрузивных массивах	0,1–0,3 км	Флюидонасыщенные магмы апикальных частей магматических камер	0,02–0,1 км	10^8-10^9	Мелкое месторождение
VII	<i>Грунтовый:</i> выпуклости и впадины грунтов	10–30 м	Пласты влажных песков, глин	2–10 м	10^5-10^6	
VIII	<i>Мегатектурный:</i> мелкие выпуклости и вогнутости пластов	1–3 м	Нелитифицированные водонасыщенные илы	0,2–1 м	10^2-10^3	
IX	<i>Тектурный:</i> мелкие апофизы в градационно-слоистых осадках	0,1–0,3 м	Жидкие гели, золи	2–10 см	0,1–1	2–10 см*

Примечание. * – возможны значительные вариации при наличии разрывов в породах кровли и по другим причинам; П – пуаз.

Приведенные коэффициенты подобия размеров и вязкостей положены в основу ранжирования конвективных систем по их латеральным размерным десятичным порядкам. Системы I–VI порядка сопоставляются с размерами металлогенических систем тех же порядков.

На основе уравнения подобия систем составлена таблица.

Мощность питающего слоя в системах разного порядка определена разными способами. Во-первых, мощность астеносферы определена по полю пониженной плотности очагов землетрясений под островными дугами Курильской и Тонга с прилежащими морями (использованы данные Р.З.Тараканова и Л.Сайкса) [2]. Во-вторых, расчетом, исходя из диаграммы Х.Рамберга, связывающей соотношение длины доминирующей волны и мощности питающего слоя. Для систем I порядка в качестве мощности принято расстояние до ядра Земли.

Правомерность соотношения параметров систем, указанных в таблице, подтверждается тем, что экстраполяция величины вязкости от 10^{20} – 10^{21} пуаз (в системе II порядка), к 10^{11} – 10^{12} пуаз (в системе V порядка) соответствует изменению вязкости, от определенной ранее для астеносферы Е.В.Артюшковым, к вязкости обсидиана при температурах 800 – 1000° (по лабораторным определениям Х.Рамберга), а также дацита и риолита при $T 800^\circ$, определенных при современном извержении вулкана Трайидент на Аляске (данные Г.Макдоналда) [2]. Рассчитанные девять размерных порядков охватывают практически все возможные в природе геологические гравитационные системы, связанные с плотностной инверсией, так как для десятого порядка потребовалась бы вязкость меньше, чем у воды.

Отраженный в таблице принцип иерархии по десятичным порядкам не означает, что в природе отсутствует иная фрактальность (дробность) конвективных и соответствующих им тектонических и металлогенических систем. Системы могут дробиться на две-три подсистемы (не переходя в другой порядок), определяя, например, разделение структур ячеистых морей на частные впадины. Примером могут служить конвективная система под Карибским морем, определяющая Западно-Карибскую и Восточно-Карибскую впадины [2], Черноморская система, которая определяет развитие Восточно-Черноморской, Западно-Черноморской и Мизийской впадин [17].

В Земле, имеющей общее слоистое строение, гравитационная неустойчивость может быть связана не обязательно с повышенной температурой нижнего слоя. В крупных по размеру структурах неустойчивость могут вызывать шарьяжи, а в весьма малых - разная плотность осадков. Таковую ситуацию в таблице представляют системы VII – IX порядков. Их конвективная сущность наблюдается в слабо литифицированных породах (грунтах) [1] и текстурах руд (рис. 1).

Характеристика конвективных систем I–VI порядков, условия их размещения, их металлогеническое

значение неоднократно рассматривались автором в работах [2, 3, 5]. Напомнить о них и дополнить иерархический ряд системами VII–IX порядков побуждает то обстоятельство, что на периодичность повторения геодинамических и металлогенических систем недостаточно обращается внимание при решении генетических проблем металлогении и в прогнозно-поисковых комплексах. В геологоразведочной практике системы VII–IX порядков иногда требуют учета при интерполяции мощности между рудными пересечениями.

Следует отметить и то, что в природе широко развиты чередующиеся по волновому закону структуры пластического выжимания и нагнетания в толщах, подвергшихся региональному метаморфизму. Особенно они характерны для золоторудных месторождений в терригенно-сланцевых толщах. Метаморфогенные геологические структуры, в известной мере, морфологически подобны структурам термогравитационной конвекции на ранних фазах ее проявления. Подобие характерно и тем, что размерность произведения $\Delta\rho \cdot g$ в числителе формулы Рэлея аналогична размерности градиента тектонических напряжений при стрессе (масса, умноженная на ускорение, деленная на объем, аналогична силе, деленной на площадь и на единицу расстояния). Разница состоит в том, что градиент тектонических напряжений, как правило, существенно больше градиента, обусловленного разуплотнением в поле силы тяжести, а направление градиента (вектора) стресса, как правило, не горизонтальное. Большой градиент стрессовых напряжений обеспечивает возможность перенесения масс из областей выжимания в области нагнетания при существенно больших вязкостях вещества и меньших размерах деформируемых структур, по сравнению с обстановкой термогравитационной конвекции. Из-за неопределенности градиента напряжений и вязкости вещества выстроить закономерный иерархический ряд структур, связанных со стрессом, затруднительно. Однако учитывать волновую фрактальность метаморфогенных структур необходимо.

Геодинамика и металлогеническое значение конвективных систем разного порядка. Еще в середине прошлого века большие глубины Земли не рассматривались в качестве тектоносферы, а обсуждение вопросов металлогении ограничивалось литосферой. Последующее изучение больших глубин геофизическими методами (главным образом сейсмотомографией) в сочетании с анализом особенностей рудоносности больших пространств вызвало необходимость искать связи металлогении с общей геодинамикой Земли. Металлогеническое значение суперплюмов, берущих начало от ядра Земли, стало подчеркиваться в последние годы Н.Л.Добрецовым с соавторами [7]. Большой вклад в развитие идей глубинной геодинамики внес О.Г.Сорохтин, а также его соавторы. О.Г.Сорохтиным и С.А.Ушаковым была предложена модель глубинной структуры Земли в архее с одноячеистым осложнением ядра в виде

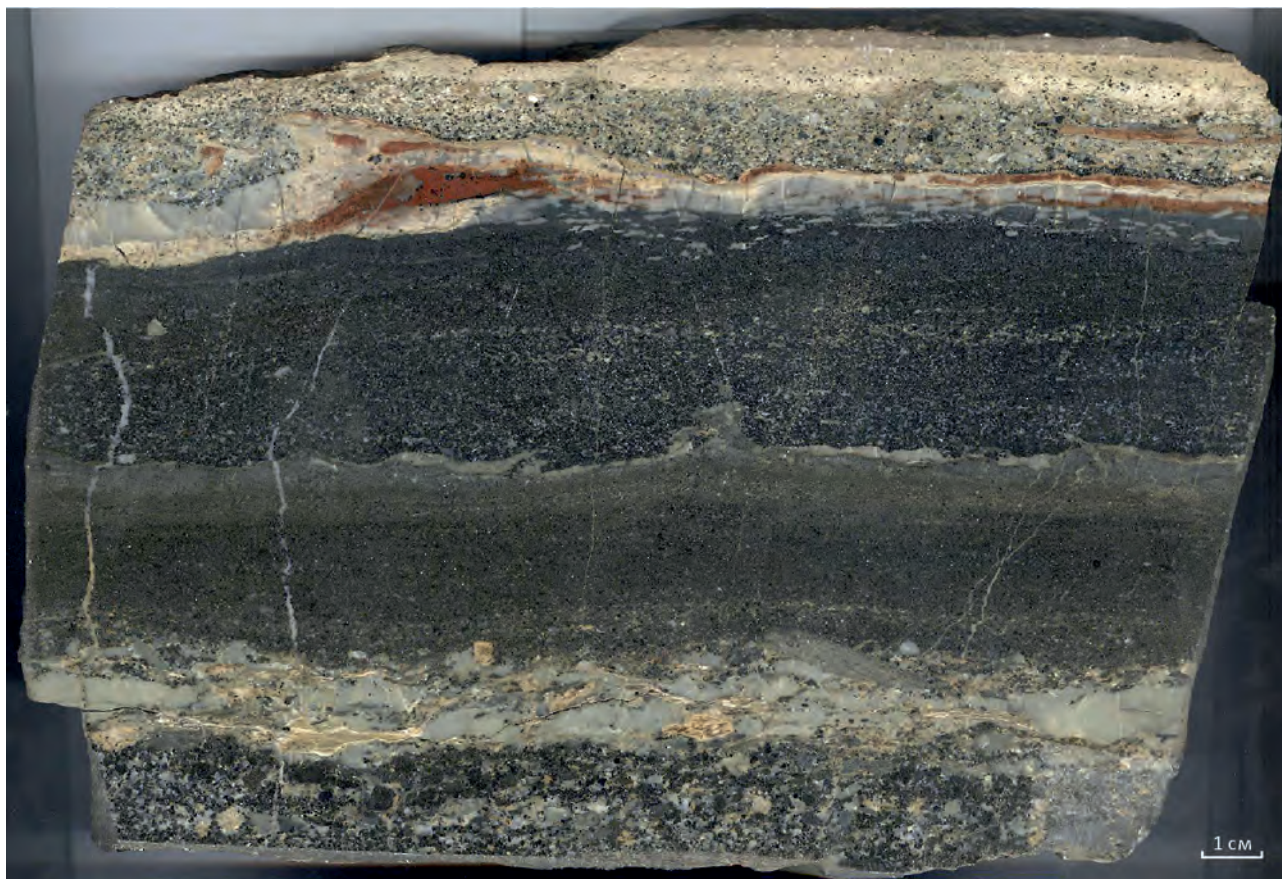


Рис. 1. Конвекция кремнистых масс из нижнего слоя в основание сульфидных осадков перекрывающего слоя. Образец градиционно-слоистой руды из карьера Николаевского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай).

выпуклости и вогнутости, которые определили диссимметризацию Земли, ее разделение на Палеопацифику (Панталассу) и Пангею [13]. В древней конвективной системе глобального ранга весьма длительное перемещение масс коры и верхней мантии, вероятно, является одной из главных причин того, что полоса Пангеи, прилегающая к Палеопацифике, была обогащена оловом в ущерб самому океану. В настоящее время перемещенные фрагменты этой полосы – Восточная и Юго-Восточная Азия, Австралия, южная часть Африки, Южная Америка, разобщенные Индийским и Атлантическим океанами, содержат подавляющее большинство месторождений олова. Такое объяснение может служить ответом на один из вопросов В.И.Смирнова, приведенных в начале настоящей статьи.

Смена одноячейистой конвекции мантии на четырехячейистую была обусловлена диссимметризацией ядра Земли. Это привело к формированию четырех современных океанов над восходящими ветвями конвекции (подобными расположению вершин тетраэдра) с соответствующей металлогенией. Скучивание разогретой мантии в стороны от восходящего потока масс об-

условило зарождение зон астеносферы с повышенной мощностью над впадинами ядра (рис. 2). Такие зоны соответствуют западной и восточной окраинам Тихого океана, восточному обрамлению Африки, Тетису (включая Карибский бассейн) [2, 4].

Конвективные системы, зарождающиеся из одной или из четырех ячеек у поверхности ядра, могут рассматриваться как разноранговые, но характеризующиеся сходными процессами дифференциации Земли и принадлежащие к одному размерному порядку (первые десятки тысяч километров).

Из рис. 2 следует важное отличие конвекции в системах I и II порядков. Системы II порядка, как известно [2], охватывающие астеносферу и литосферу, определяют развитие ячейистых окраинных морей, островных дуг, зон субдукции, а системы I порядка охватывают внешнее ядро и мантию и определяют развитие океанов. В системах II порядка при вязкости астеносферы около 10^{20} , а литосферы 10^{22} пуаз, конвекция достигает фаз, в которых восходящий плюм способен «вывернуть наизнанку» недра, сопровождаясь субдукцией по краям системы [5]. В системах I порядка ситуация иная.

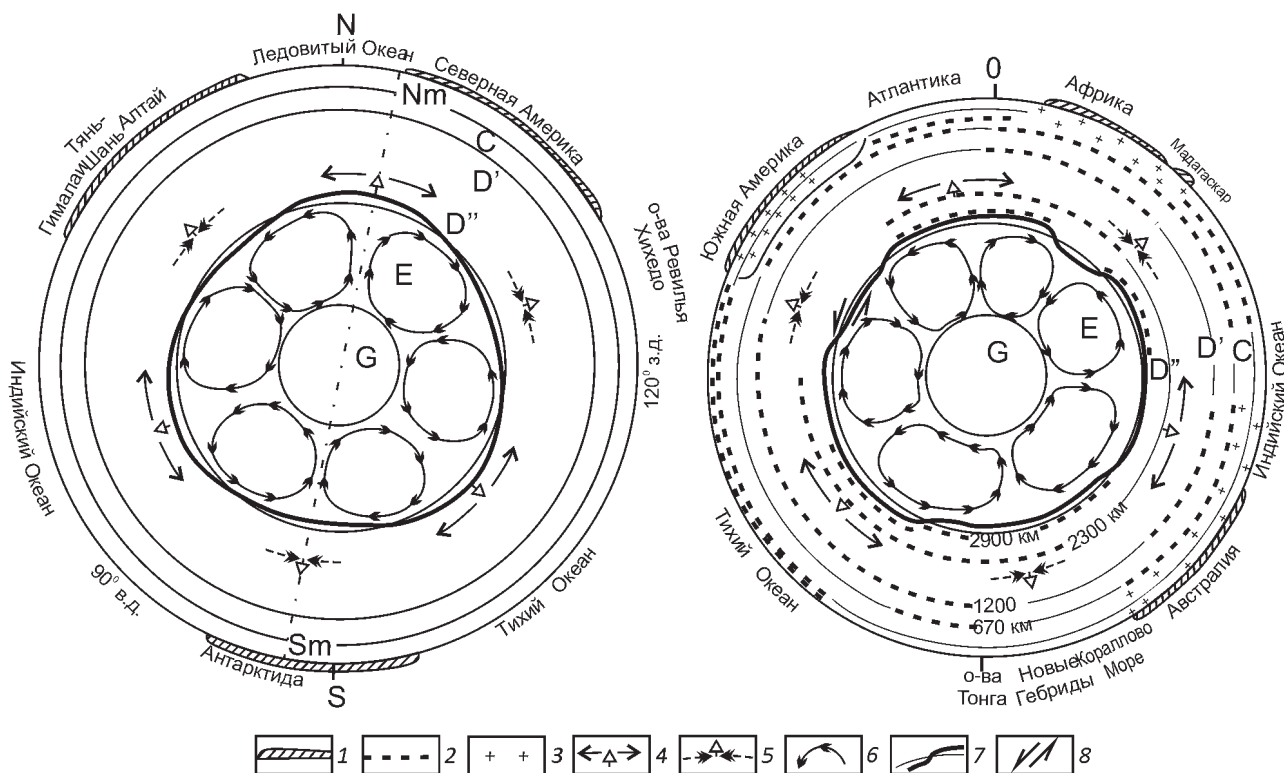


Рис. 2. Схематические разрезы Земли, модели ядерно-мантийных конвективных ячеек:

А – теоретическая модель ядра в разрезе-развертке по меридиану 90° в.д. – оси Земли – меридиану 120° з.д.; Б – разрез по параллели 20° ю.ш. (вид с юга, по данным сейсмотомографии А. Морелли и А. Дзевонского с дополнениями автора); С, D', D'', E, F, G – слои по К. Буллену, N–S – ось вращения Земли, Nm–Sm – предполагаемая ось вращения ядра относительно мантии (магнитная ось); 1 – континенты; области скоростей сейсмических волн: 2 – аномально пониженных и 3 – повышенных; 4 – подъем и вызванный им спрединг нижней мантии; 5 – продольное расплющивание (скупчивание) и вызванный им подъем мантии; 6 – направление генерализованных конвективных потоков во внешнем ядре; 7 – отклонения поверхности внешнего ядра от шарообразной формы (вне масштаба); 8 – направление вращения ядра относительно мантии

В жидком ядре, обладающем весьма малой вязкостью, по-видимому, присутствуют мелкие конвективные системы, но отражаться в глобальном масштабе могут лишь крупные, так как деформирующее воздействие волновых неоднородностей проникает в выше расположенную среду на высоту не более длины волны [11]. Очевидно, что развитие крупных конвективных систем в условиях внешнего ядра может соответствовать весьма продвинутым фазам. В отличие от этого, в нижней мантии, обладающей вязкостью около 10^{23} – 10^{25} пуаз, конвекция соответствует лишь начальным фазам, при которых субдукция еще не проявляется. И это вполне закономерно. Судя по временному интервалу, охватывающему ряды геологических формаций в системах II порядка, их развитие происходит в течение многих десятков миллионов лет. Так как при возрастании размера системы на один порядок время для развития соответствующей фазы возрастает на два порядка, то для развития фаз, при которых происходила бы субдукция в нижней мантии, потребуются многие миллиарды лет, то есть более возраста Земли. Если же в формулу Рэлея

подставить 100 км в качестве порядка величины мощности литосферной плиты, то потребуются совершенно нереальное разуплотнение $\Delta\rho$ среды в конвектирующей системе. Отсюда следует, что встречающееся в литературе представление о субдукции литосферных плит до ядра Земли отдельно от остальной части мантии некорректно.

Рис. 2, кроме того, демонстрирует важную особенность позиции пассивных континентальных окраин в глобальных конвективных системах и литосферных плитах. Пассивные окраины, для которых не характерен мантийный магматизм, в глобальной конвекции занимают нейтральную позицию: ни над восходящими, ни над нисходящими зонами. Поэтому в них отсутствует рифтогенез, свойственный срединно-океаническим хребтам, и субдукция, свойственная активным окраинам континентов и океанов. Это подчеркивает и то, что нельзя рифтогенез рассматривать как свидетельство пассивного режима развития окраин континентов, что нередко встречается в геологической литературе. Рифтогенез может относиться к системам иного

размерного порядка, не характеризуя пассивную окраину континента. Термином континент корректно называть часть Земли, которая по своим размерам относится к тектонической системе I порядка. Блоки меньшего размера, хотя и обладающие континентальным типом земной коры, некорректно именовать континентами, как и пользоваться номенклатурой окраин систем I порядка.

Проведенное ранжирование конвективных систем демонстрирует еще один важный аспект тектоники. Спрединг глобальных литосферных плит является атрибутом систем I порядка. С краевыми эффектами этих систем сопряжено формирование протяженных зон астеносферы с повышенной мощностью. Субдукция связана с краевыми эффектами ячеистой конвекции, зарождаемой в мощной астеносфере и реализуемой в системах II порядка. Ячей II порядка формируются вновь и вновь, а места их зарождения перемещаются, как правило, с запада на восток. Поэтому некорректно определять скорость субдукции по скорости спрединга литосферных плит, что встречается в литературе.

Рис. 2 показывает и то, что из частных морей, имеющих океанический тип земной коры, нельзя вновь выстраивать глобальный океан и в противоположность ему – очередную новую Пангею. Новая одноячеистая модель ядра вступит в противоречие с принципом В.С. Урусова о диссимметризации при синергетической самоорганизации [15]. На это же указывает критика существующей концепции неоднократных распадов суперконтинентов с последующими их сборками воедино [5, 9, 14].

На поведение конвективных систем I порядка и связанных с ними геологических структур значительное влияние оказывает ротационный режим Земли. Из-за разницы глубины (радиуса вращения масс) переносимые количества движения при конвекции приводят к ускорению вращения глубинных слоев и замедлению верхних. Это вызывает западный дрейф континентов и определяет существенные различия геодинамики, тектоники и металлогении западной и восточной окраин Тихого океана. Кроме того, при существенно разном возрасте смежных ячеистых конвективных систем II порядка по их границам могут развиваться трансформные сдвиги и связанная с ними обстановка трансенсии, способствующая проявлению магматизма. То есть в синергизм гравитационного и теплового полей Земли вплетается ротационное поле. На самих системах II порядка ротационный режим тоже сказывается, но менее. Об этом можно судить по тому, что островные дуги, расположенные на восточном обрамлении ячей (окраинных, «задуговых» морей), поднятые относительно глубоководных впадин и желобов, смещаются к востоку, а не к западу, как смещаются континенты в ротационном поле Земли. Примером служат дуги западной окраины Тихого океана, дуги Малая Антильская и Южно-Антильская на западе Атлантического океана. Даже вулканоплутонический

пояс и сопровождающие его шарьяжи на Апеннинском полуострове смещаются от центра Тирренской ячей к востоку [10]. Иначе говоря, режим конвекции оказывает неизмеримо большее влияние на тектонику, чем ротационный режим Земли. Ротационный режим оказывает влияние на величину угла падения зон субдукции [2].

Все изложенное позволяет суммировать главные аспекты влияния конвективных систем разного порядка на геодинамику, металлогению, условия формирования и размещения рудных месторождений, в том числе крупных.

Развитие общей геодинамической системы инициируется тепловой конвекцией в жидком ядре и далее, главным образом синергизмом (кооперативным действием) гравитационных сил и градиентного температурного поля Земли. Синергизм приводит к формированию фрактальной структуры системы, в которой периодическое размещение в пространстве металлогенических систем разного порядка определяется конвективными (адвективными) волнами разной длины.

Геодинамическое развитие систем I–III порядков, в которых перемещение вещества происходит в квазитвердом состоянии, косвенным образом влияет на дальнейшее образование крупных рудных месторождений. Главными факторами влияния в разных системах являются:

В системах I порядка – общая геохимическая специализация (например, оловоносность) литосферы, обусловленная перемещениями геологической среды от древнейшего океана Земли – Палеоокеана;

вскрытие литосферы трансформными крутопадающими глубинными разломами, возникающими в неоднородном поле ротационных сил Земли, что может способствовать миграции легкоподвижных (в том числе летучих) фаз глубинных компонентов (например, ртути) по разломам;

перемещение во времени астеносферных зон с запада на восток в ротационном поле Земли, определяющих позицию зарождения ячеистых конвективных систем II порядка: под мощной континентальной литосферой на восточной окраине Пацифики и под субокеанической и океанической литосферой на западной окраине. Это определяет различие сочетаний факторов – разной по составу литосферы над конвектирующей мантией в виде плюмов II размерного порядка и мантийных валов, контролируемых океаническими хребты и поднятия, то есть наличие разных типов источников (протолита) магматических очагов (систем IV порядка).

В системах II порядка – осуществляется дальнейшее преобразование строения литосферы и собственно земной коры, их общей геохимической и металлогенической специализации; в центре ячей (окраинные моря, внутриконтинентальные изометричные депрессии, фундамент платформ) в литосфере относительно

усиливаются симатические черты специализации, а по периферии ячей (островные дуги, орогены активных континентальных окраин, щиты, обрамляющие платформы) усиливаются сиалические черты специализации;

краевые эффекты процессов, формирующих системы II порядка, определяют региональный метаморфизм в зонах субдукции и обдукции, способствующий отжиманию сред пониженной вязкости (в том числе рудоносных флюидов) в области нагнетания;

весьма важным фактором может быть приобретение субдуцированными рудоносными толщами вертикального положения при их извлечении вверх конвективным потоком, когда оформляется фундамент краевых вулканоплутонических поясов, что обеспечивает регенерацию больших масс рудного вещества раннеорогенными интрузиями, несмотря на ограниченную площадь их горизонтального сечения. Пример – формирование крупнейших месторождений медно-порфиrowого семейства.

В системах III порядка осуществляется дифференциация верхних слоев астеносферы по волновому закону, над положительными фазами волн приводящая к образованию таких металлогенических областей (суперрайонов), в которых наиболее благоприятны условия для образования крупных рудогенерирующих магматических очагов.

В системах IV порядка – магматических очагах и надочаговом пространстве реализуются подготовительные факторы систем I–III порядков (мощность перерабатываемой литосферы и земной коры, их суммарная геохимическая специализация, геологическая структура среды, превращаемой в магмы, структуры надочаговой области). Сосредоточению руд в виде одного крупного месторождения может препятствовать кальдерообразование, которое приводит к расчленению магматического очага на частные камеры, а общей рудной массы системы – на множество относительно мелких месторождений. Кальдерообразование является естественным звеном в развитии вулканической системы, образованием в ней более мелких фракталов.

Таким образом, одной из весьма существенных геодинамических предпосылок образования крупных рудных месторождений является приуроченность рудоконтролирующего магматического очага к суперрайону, то есть металлогенической области, занимающей позицию над положительной фазой адвективной волны (III порядок). Длина этой волны составляет, как правило, около 300 км [3]. Важная закономерность размещения крупных месторождений – их приуроченность к магматогенно-рудным узлам, занимающим позицию магматического очага и надочаговой области. Узлы периодически повторяются в пространстве с расстояниями между их центрами около 30 км.

Конвективные системы более высоких порядков влияют на особенности месторождений, но существенно затушевываются иными факторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артюшков Е.В.* Образование конвективных деформаций в слабо литифицированных осадочных породах // Изв. АН СССР. Серия геол. 1965. № 12. С. 79–101.
2. *Барышев А.Н.* Периодические геодинамические и металлогенические системы, их развитие и взаимодействие. –М., 1999.
3. *Барышев А.Н.* Позиция крупнейших рудных районов и узлов в системе адвективных структур Земли // Отечественная геология. 2001. № 2. С. 6–11.
4. *Барышев А.Н.* Периодические геодинамические и металлогенические системы и их синергетика / Фундаментальные проблемы геологии полезных ископаемых и металлогении. –М.: МГУ, 2010. Т. 2. С. 398–414.
5. *Барышев А.Н.* Тектоника и металлогения: системный геодинамический и формационный анализ. –М.: Новый хронограф, 2013.
6. *Гончаров М.А.* Инверсия плотности в земной коре и складкообразование. –М.: Недра, 1979.
7. *Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э.* Термохимические глубинные мантийные плюмы – источник рудного богатства планеты // Наука из первых рук. 2011. № 6 (42), С. 37–43.
8. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика сплошных сред. 2-е изд. –М.: Гостехиздат, 1954.
9. *Миц М.В.* Неоархей-протерозойский суперконтинент (2,75–0,9 млрд. лет): альтернатива модели суперконтинентальных циклов / Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ. Маг-лы XLVIII тектонического совещания. –М.: ГЕОС, 2016. Т. 2. С. 17–21.
10. *Палеоструктуры и минералогия Средиземноморья / Б.Д. Углов, А.Н. Барышев, Ю.Г. Зорина и др.* –М.: ЦНИГРИ, 2005.
11. *Рамберг Х.* Моделирование деформаций земной коры с применением центрифуги. –М.: Мир, 1970.
12. *Смирнов В.И.* Геология полезных ископаемых. –М.: Недра, 1982.
13. *Сорохтин О.Г., Ушаков С.А.* Глобальная эволюция Земли. –М.: Изд-во МГУ, 1991.
14. *Старостин В.И.* Металлогения: учебник / 2-е издание. –М.: КДУ, 2012.
15. *Урусов В.С.* Эволюция Земли и Космоса в свете концепции симметрии-диссимметрии / Смирновский сборник. –М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 11–50.
16. *Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика).* Справочник геофизика / Под ред. Н.Б.Дортман. –М.: Недра, 1984.
17. *Хайн В.Е., Зверев А.Т.* Сейсмическая томография и геодинамика // Геотектоника. 1992. № 1. С. 34–46.
18. *Bemmelen R.W.van.* The undation theory of development of the Earth's crust. Trans. Int. Geol. Congr., XVI sess. USA. 1933. Vol. II. 1936.
19. *Ramberg H.* Gravity, Deformation and the Earths Crust, 1st edition, Academic Press, London, New York, 1967.