

Геофизическая модель мантийной рудообразующей системы

Д. Йосифов¹, Р. Радичев², 2019

¹Горно-рудный геологический университет, София, Болгария

²Научно-технический союз по горному делу, София, Болгария

Поступила 17 апреля 2019 г.

Розглянуто геофізичну модель мантийної рудоутворювальної системи, яка складається з трьох частин: а) район зародження рудного речовини; б) зона його транспортування; в) ареал рудовідкладення — родовище. Модель ґрунтується, з одного боку, на використанні сучасних досягнень металогенії і методів глибинної геофізики, а з іншого — на оригінальних даних щодо будови тектоносфери у просторі великих рудних районів кольорових і благородних металів, розташованих у Центральному Середньогір'ї і Центральних Родопах. У результаті геофізичних досліджень простежено поздовжні і поперечні мантийні розломи, а також підняття розігрітої покривлі астеносферного шару. Отримано кількісні дані щодо значних вертикальних амплітуд (7—14 км і більше) тектонічних розривів, що відбуваються як на поділі Мохо, так і на верхній межі астеносферного шару (амплітуда понад 60 км). В описаній структурі ендегенної рудоутворювальної системи дві з її основних частин, а саме зародження і локалізація рудоносних продуктів, повністю розміщуються в астеносфері й земній корі відповідно. Третя основна частина — транспортна — займає обмежену ділянку верхньої мантиї і за вертикаллю охоплює земну кору, яка збігається з коромантийними вузлами.

Виявлені особливості тектоносфери в межах мантийних рудних районів, а також специфічна геофізична характеристика астеносферного шару засвідчують, що в їх просторі існували сприятливі умови для виникнення і функціонування конвективних комірок і висхідних магмофлюїдних потоків. Все це спричинило зародження рудоносних магм в астеносферному шарі і їх пересування до земної поверхні, де у верхній крейді (Середньогір'я) і палеогені (Родопах) формувалися мантийні родовища. Результати досліджень важливі для з'ясування проблеми зародження рудної речовини, яке відбувається в астеносфері.

Ключові слова: геофізична модель, поділ Мохо, літосфера, астеносфера, мантийні родовища, мантийні розломи, тектонічні розриви, рудні поля.

Введение. Построение моделей все шире применяется в изучении закономерностей, которым подчиняется эндогенное рудообразование, особенно в изучении процессов, обуславливающих формирование значительных промышленных месторождений и рудных районов. Исследования в этом направлении продвинулись вперед прежде всего в США [Cox, Singer, 1986] и России (СССР) [Казанский, 1998; Щеглов, 1987], на территории которых открыты многочисленные и богатые мантийные рудные объекты. Разработка различных по содержанию и объему моделей

осуществляется с целью создания обобщенной модели рудообразующей системы, содержащей главные характеристики естественных рудных месторождений. Неизбежная генерализация и обобщение при переходе от природных объектов к модельным построениям реально ограничивают их возможность содержать некоторые детали, но, во всяком случае, они должны отражать их основные особенности.

Не вызывает сомнений, что разработка и составление геофизической модели мантийной рудообразующей системы должны базироваться, с одной стороны,

на современных достижениях металлогенной науки, а с другой — на глубинной геофизике. Наиболее полное раскрытие процессов мантийного рудообразования можно достичь на основе использования существующей информации, а именно:

- об источниках металлов и флюидов;
- о магматизме и его области зарождения;
- об эндогенной динамике (тепломассопереносе);
- о пути миграции и переносе рудоносных растворов;
- о физико-химических и других благоприятных условиях и факторах для концентрированного отложения руд и формирования эндогенных месторождений;
- о глубинном строении литосферы и верхней мантии, включая астеносферу.

Необходимо отметить, что современный уровень изученности охарактеризованных элементов и факторов эндогенного рудогенеза существенно различен на разных глубинных уровнях тектоносферы. В значительной степени выяснены модельные построения зоны отложения руд, которая доступна для изучения и частичного наблюдения. Относительно хорошо изучена верхняя часть земной коры и все еще неудовлетворительно — ее глубокие части. Объем знаний о крупных структурных элементах глубоких уровней верхней мантии и астеносферы весьма ограничен. В научной литературе о металлогении отсутствует необходимое количество конкретных данных, характеризующих важные структурные особенности этих слоев. По этим причинам пока не разработаны обоснованные геофизические модели мантийной рудообразующей системы — состояние, что и вызвало необходимость написания настоящей статьи.

Общие принципы создания модели.

Предлагаемая геофизическая модель мантийной рудообразующей системы разработана с помощью следующих методических подходов:

- заимствованием конкретных данных

о составе и содержании металлогенных моделей, опубликованных в основном русскими и украинскими авторами;

- использованием новейших геофизических данных о структуре верхних оболочек Земли, ее динамике и флюидально-магматическом режиме, прежде всего, результатов сейсмической томографии, глубинного сейсмического и электромагнитного зондирования;

- использованием оригинальных достижений авторов относительно особенностей строения земной коры и астеносферного слоя в охвате крупных мантийных месторождений цветных металлов страны. Это — количественные данные о значительных вертикальных амплитудах разрывов, происходящих как на разделе Мохо, достигающих более 7—14 км, так и на верхней границе астеносферного слоя, где амплитуда более 40—50 км.

Безусловно, в модель эндогенной рудообразующей системы следует включать все основные элементы и факторы, характеризующие геологические и физико-химические условия, а также процессы, связанные с образованием мантийных месторождений, в том числе те, которые определяют миграцию и концентрацию рудного вещества. В самом общем виде мантийная рудообразующая система может определяться как совокупность источников рудных компонентов, путей миграции рудоносных растворов и флюидов и ареала месторождения рудных полезных ископаемых [Козеренко 1981; Казанский, 1998].

В соответствии с современными металлогеническими взглядами и возможностями геофизических методов интеграционная модель эндогенной рудообразующей системы должна объединять три основные части:

- *корневую часть*, которая охватывает пространство магмо-флюидо-рудного зарождения, в котором развивается вся совокупность эндогенных процессов. Согласно новым металлогенным исследованиям, эта часть расположена на самых возвышенных участках активной верхней мантии, где осуществляется отделение

магмы и рудоносных растворов [Щеглов, 1987; Watson, 1980]. В этой части определяются флюидный режим и энергетическое состояние всей рудообразующей системы;

– *зону транспорта*, включающую пути тепло- и массопереноса, т. е. каналы миграции магматических расплавов, рудоносных растворов и флюидов. В данном случае речь идет о реализации гидродинамического режима в литосфере и астеносфере, предполагающего наличие глубоких дренажных структур. К последним чаще всего относятся глубокопроникающие разломы и, прежде всего, тектонические узлы, обусловленные пересечением разнонаправленных (продольных и поперечных), разнообразных дизъюнктивных структур. Таким образом, в земной коре на рудоносных территориях создаются пространства, которые характеризуются высокой тектонической нарушенностью, магматической проницаемостью и значительной эндогенной активностью;

– *зону концентрированного рудоотложения*, представленную участками земной коры, расположенными на доступных глубинах, где происходит концентрированное рудоотложение. Эти участки должны содержать благоприятные физико-химические и структурные условия для реализации рудообразующей системы в виде промышленных месторождений, которые обычно группируются в рудные узлы, поля и районы.

Каждая из отмеченных частей эндогенной рудообразующей системы характеризуется специфическими физическими параметрами и набором их элементов, которые в той или иной степени могут быть исследованы различными геофизическими методами. Теоретическими основами, определяющими возможности этих методов для создания модели мантийной рудообразующей системы, служат различные физические неоднородности, которые прослеживаются по всему глубинному диапазону тектоносферы. В процессе исследований различных уровней устанавливаются скоростные, плотностные, магнитные, тепловые и электрические неод-

нородности, геологическая природа которых определяется посредством различных методов интерпретации. Так, на основе изучения скоростных неоднородностей эффективно прослеживаются сейсмические границы верхних оболочек планеты. Анализ термических неоднородностей создает предпосылки для исследования распределения температур на различных уровнях тектоносферы, а это позволяет судить не только о магмо-флюидном режиме, но и об интенсивности термодинамических процессов. Кроме того, градиентные изменения температуры могут быть использованы как критерии для трассирования мантийных разломов, если они являются естественным продолжением глубокопроникающих разрывных нарушениях земной коры, установленных методом ГСЗ.

На рис. 1 показан пример успешного прослеживания мантийных разломов в районе Центральных Родоп и Центрального Средногорья (пикеты 35—220 международного геофизического профиля). Как видно, на этом участке профиля наблюдаются наиболее существенные (градиентные) изменения теплового поля и кровли астеносферного слоя. Такое поведение изотерм и астеносферы дает основание утверждать, что резкие перепады поверхности астеносферного слоя приурочены к мантийным разломным зонам. В пределах этих зон происходили интенсивные перемещения магматических расплавов, флюидных растворов, а в отдельных случаях — рудоносного вещества. В соответствии с геологической эволюцией рассматриваемых рудных районов интенсивные проявления магматических процессов и тепловой активизации происходили в палеогене (Родопы) и верхнем мелу (Центральное Среднегорье).

Изучение электрических неоднородностей расширяет возможности получения информации о наличии и поведении квазигоризонтальных границ и их разрывах глубокопроникающих разломных нарушений. Важно отметить, что эндогенные процессы, как правило, реализуются одновременно, а их взаимодействия обуслов-

ливают физические зависимости нелинейного типа. Все это усложняет выяснение геологической сущности измеряемых геофизических аномалий, и для достижения более надежных и достоверных результатов заставляет исследователей применять методы комплексной интерпретации данных. Ниже приводятся обобщенные данные о крупных структурных элементах земной коры и верхней мантии, которые использованы при разработке предлагаемой модели.

Земная кора. На основании последних результатов геолого-геофизических исследований континентальный тип земной коры, составляющий около 35 % пространства планеты, состоит из трех слоев: *седиментного* — с ограниченной толщиной, достигающей нескольких километров, *гранитного и базальтового*, имеющих различную толщину. После изучения результатов бурения Кольской сверхглубокой скважины, доказавшей «обратный разрез», т. е. наличие базальтового типа пород в верх-

ней части разреза, а под ним гранитоидов, исследователи все чаще убеждаются, что более удачным является разделение земной коры на основании ее скоростных характеристик — очень важного геофизического параметра. Таким образом, верхний гранитно-метаморфический слой, отличающийся значениями скорости порядка 5,5—5,8 км/с и средними плотностями от 2,6 до 2,63 г/м³, следует назвать *основным низкоскоростным*, а нижний базальтовый слой, в котором сейсмическая скорость изменяется от 6,5 до 7,0 м/с, а плотность колеблется от 2,8 до 3,3 г/см³, — *основным высокоскоростным* слоем земной коры. К тому же толщина первого основного слоя достигает 30—35 км, а второго — 20÷40 км. Таким образом, общая толщина земной коры в среднем изменяется от 25—30 до 60—70 км в некоторых горных областях (например, в Гималаях).

В строении земной коры важную роль играют глубокие квазигоризонтальные и наклонные границы, как и различные по

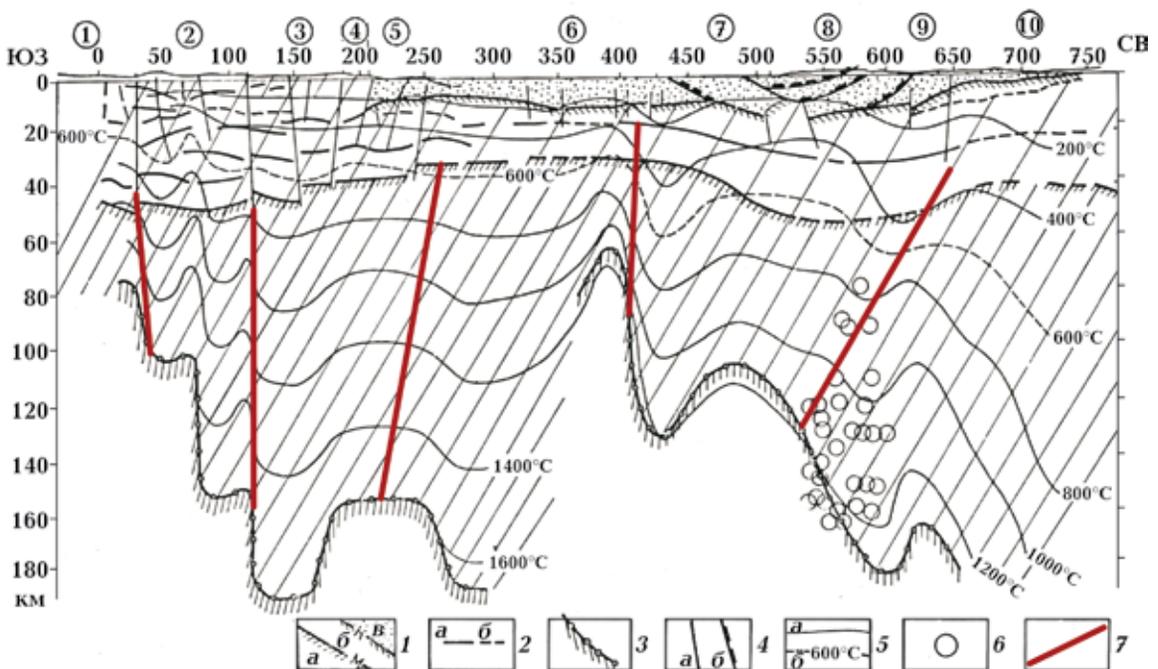


Рис. 1. Тепловая модель литосферы по VII международному геофизическому профилю Родопский массив — Мизийская плита — Вранча [Кутас, 1978, с дополнениями авторов]: 1 — литосфера (а — нижняя часть, б — земная кора, в — седиментный слой); 2 — границы (а — сейсмические, б — граница «Мохо»); 3 — кровля астеносферного слоя; 4 — разломы (а) и надвиги (б); 5 — изотермы (а), изотерма Кюри (б); 6 — землетрясения; 7 — мантийные разломы.

глубине и масштабу разломы. К первым относятся границы между отдельными основными скоростными слоями, среди которых выделяется раздел Мохо, имеющий планетарное значение. Он разделяет земную кору и верхнюю мантию, а в его ареале происходят специфические физико-химические процессы. Кроме того, было установлено множество ограниченных по простиранию коровых сейсмических границ, располагающихся на различных глубинах. С увеличением разделительной способности сейсмических методов все более уверенно осуществляется прослеживание отдельных слоев с относительно пониженными (волноводы) и повышенными скоростями. Такие слои установлены в Центральных и Западных Родопах, а при переинтерпретации материалов по VII Международному геофизическому профилю — и в Центральном Средногорье [Дачев, 1988]. Геологическая природа этих слоев различна, но они, очевидно, служат важным элементом строения земной коры.

Наряду с квазигоризонтальными границами основным элементом строения являются также глубокие разломы, играющие существенную роль в эволюции тектоносферы, в том числе в рудообразовании. Они распространены во всех тектонических единицах — щитах, платформах, срединных массивах, орогенных областях и др. В нашей стране, согласно геологическим и геофизическим данным, установлена серия такого типа структур, в том числе проникающих в верхнюю мантию, о которых уже было упомянуто. С их пространственным расположением и развитием связано блоковое расчленение земной коры и верхней мантии. Вместе с квазигоризонтальными границами глубинные разломы обуславливают слоисто-блоковое строение литосферы, представляющее ее фундаментальную характеристику.

Земная кора составлена в основном из сравнительно легкоплавких силикатных пород, в которых преобладают алюминиевые силикаты. Ее верхняя часть состоит преимущественно из гранитоидов и метаморфитов, а нижняя — из формаций

базальтоидного типа и ультраосновных пород. По мнению Виноградова, из химических элементов кислород имеет самое большое содержание — 43,13 %, за ним следует кремний — 26 %, алюминий — 7,45 % и другие элементы в виде окисных соединений: SiO_2 — 58 %, Al_2O_3 — 15 %, FeO и Fe_2O_3 — 8 %, CaO — 6 %, MgO — 4 %, K_2O — 2,5 % и т. д. В земной коре содержатся долгоживущие радиоактивные изотопы урана-238 и урана-235, тория-232 и калия-40, которые генерируют часть эндогенного тепла планеты.

Верхняя мантия. В зависимости от распределения скорости сейсмических волн *верхняя мантия делится на верхний слой (слой «В») на глубине до 400 км, средний слой «С» — до 1000 км и нижний слой «D» — около 2900 км.* Верхний слой мантии включает слой относительно более низких скоростей распространения поперечных сейсмических волн — астеносферы. Геофизическая информация о строении верхней мантии и, прежде всего, о ее слоенности за последние два десятилетия увеличилась, однако все еще остается ограниченной, что и является причиной проведения более обоснованных металлогенических анализов и построения различных моделей. Ниже поверхности Мохо сравнительно информативны скоростные, термические и электрические аномалии, которые изучены сейсмическими, геотермическими и магнитотеллурическими методами. Уже получены сейсмические данные о наличии границы в мантийных горизонтах на глубине ниже 200 км [Павленкова, 2004]. В мировой практике установлены и прослежены сравнительно выдержанные сейсмические границы и на глубине около 600—670 км. В нашей стране полученные результаты сейсмологических исследований подтверждают принципиально приведенные выше данные о слоистом строении верхней мантии [Спасов, Ботев, 1987; Ботев и др., 1996].

Концепции о минеральном и химическом составе верхней мантии построены преимущественно на основании анализа образцов кимберлитовых и самых при-

поднятых пород в срединноокеанических хребтах, т. е. там, где мантийное вещество приближается к поверхности. Результаты этих анализов свидетельствуют о том, что верхняя мантия характеризуется ультраосновным составом слагающих ее пород. Самая популярная и широко применяемая модель — это так называемая пиролитовая модель состава верхней мантии, но существуют и другие модели (например, лерцолитовая). Химический состав верхней мантии можно представить так: SiO_2 — 43,6 %, FeO — 6,66 %, Al_2O_3 — 3,99 %, Fe_2O_3 — 3,99 %, а остальные соединения составляют всего несколько процентов [Маракушев, 1988].

Важно отметить, что существует достаточное количество фактического материала, подтверждающего, что источниками рудного вещества и рудоносных магменных пород являются подкоровые оболочки Земли [Watson, 1980; Смирнов, 1981; Щеглов, 1987 и др.]. Согласно этим авторам, с достаточной уверенностью можно утверждать, что главными источниками рудного вещества являются толеитовые, щелочные и кимберлитовые магмы. Это утверждение слишком общее, так как все еще неизвестно в каких частях (латерально и на глубине) мантии располагаются источники рудного вещества и конкретно с каким типом магмы они связаны.

Астеносфера. Сейсмологические исследования подтверждают довольно старое предположение (гипотезу) Дж. Барелла (1916) о существовании так называемого астеносферного слоя, отличающегося более низкими скоростями сейсмических волн, контрастно выраженными для поперечных волн. В последнее время в Болгарии этот слой изучается довольно активно, а в ряде публикаций нашли отражение как особенности его строения, так и конкретные количественные данные о вертикальных амплитудах разрыва мантийных разломов, которые обобщены в статье [Йосифов, Георгиева, 2018]. Геолого-геофизические характеристики слоя (низкая скорость сейсмических волн, относительно высокая температура, по-

ниженная плотность, значительная электрическая проводимость, низкая вязкость и большая насыщенность флюидами) обуславливают его пластичность. Эти параметры по существу определяют природу слоя и возможность осуществления дрейфа литосферных плит. Его поверхность довольно динамична и расположена на разных глубинах: самая маленькая в зонах спрединга морского дна (от 7 до 10 км), увеличивается под молодыми платформами до 150—200 км, достигая 250—400 км под континентальными щитами. Необходимо отметить, что рассматриваемый слой не имеет планетарного распространения и отсутствует под некоторыми частями континентов.

Одной из важных характеристик астеносферы является ее флюидная насыщенность, которая вместе с другими параметрами (особенно при высокой температуре) создает предпосылки интенсификации всей системы эндогенных процессов и особенно тектономагматических [Дерябин, 1993, 2003; Menzies, Charot, 1995; Павленкова, 2004]. Исследователи полагают, что этот слой — наиболее мобильная, наиболее динамичная и энергетически активная часть верхней мантии. Можно утверждать, что в астеносфере совершается интенсивная динамика эндогенных процессов, наряду с которыми создаются благоприятные термодинамические условия для осуществления и отделения рудных магм и растворов. В этом аспекте логично лансирование идеи о том, что зарождение рудного вещества мантийных рудных месторождений происходит в астеносферном слое [Йосифов, Георгиева, 2018].

Характеристика мантийно-геофизической модели. В принципиальном аспекте, как уже отмечалось, предлагаемая модель содержит три главные части эндогенной рудообразующей системы, в частности корневую, охватывающую часть верхней мантии, в которой осуществляется магмофлюидо-рудообразование. В этой части реализуются эндогенные процессы, определяющие энергетическое состояние и флюидный режим всей системы. Важным элементом этой главной части явля-

ется значительная вертикальная амплитуда разломов и разрывов поверхности Мохо, как и верхней части астеносферы, в результате которой создаются специфические физико-химические предпосылки для динамического развития всей системы. Они выражаются в градиентных изменениях температуры и давления, которые

генерируют конвективные движения, исполняющие роль катализатора зарождения рудоносных потоков (рис. 2).

Зона рудообразования. Необходимо отметить, что в настоящее время исследователи располагают ограниченным фактическим материалом, позволяющим определить местоположение рудных неоднородностей в верхней мантии и наличие области повышенной рудоносности и «эмбриональных» месторождений. Несмотря на это, распространено общее мнение о том, что основными источниками рудного вещества являются первичная и истощенная магма с преобладающим толеитовым составом или обогащенная щелочной мантией на весь ее охват [Смирнов, 1978, Щеглов, 1987].

Наши усилия направлены на раскрытие и выяснение рудогенерирующих возможностей астеносферного слоя. Важно отметить, что в его пределах не только осуществляется дифференциация магмы, но и реализуется ряд эндогенных процессов — термодинамических, магматических, флюидных, окислительных и других, обусловленных главным образом вертикальным термическим и барическим градиентами. В этом слое зарождаются магменные флюидные потоки и рудоносные растворы [Дерябин, 2003], а также происходят процессы окисления флюидов с выделением огромной тепловой энергии, которая так необходима для рудообразования [Смирнов, 1981]. На основании проведенных исследований в нашей стране было установлено, что в пределах крупных мантийных месторождений цветных металлов (медных в Центральном Средногорьи и свинцово-цинковых в Центральных Родопях) верхняя часть астеносферного слоя сильно разорвана мантийными разломами (см. рис. 1). Они определены по данным глубокого сейсмического и магнитно-теллурического зондирования [Бердичевский, Жданов, 1981; Вольвовский и др., 1985; Дачев, 1988], анализа теплового поля [Кутас, 1978] и скоростной структуры [Йосифов, Георгиева, 2018], причем вертикальная амплитуда разрывов достигает

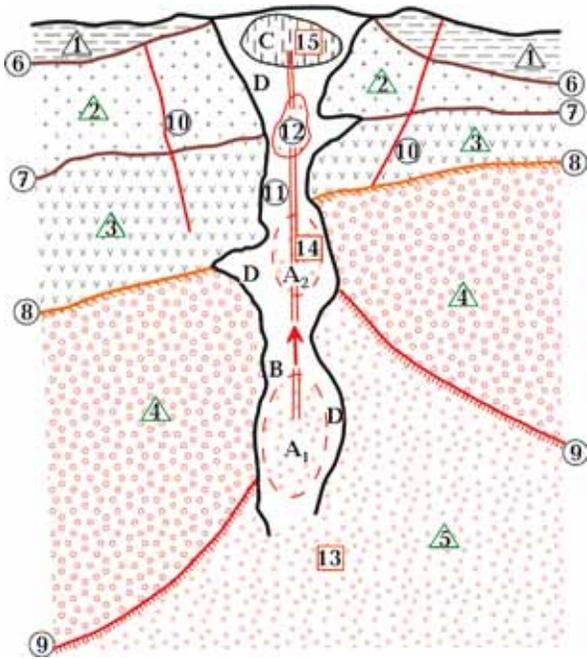


Рис. 2. Геофизическая модель мантийной рудообразующей системы. I Структурные элементы земной коры и верхней мантии: А — планетарные слои (треугольники) (1 — седиментный; 2 — гранитный; 3 — базальтовый; 4 — верхняя мантия, 5 — астеносфера); Б — основные квазигоризонтальные и субвертикальные границы (цифры в кружках): 6 — кристаллический фундамент; 7 — граница между гранитным и базальтовым слоями; 8 — раздел Мохо; 9 — верхняя граница астеносферы; 10 — коровые разломы; 11 — мантийные разломы; 12 — вторичные магменные камеры). II. Основные части рудообразующей системы (цифры в квадратах): 13 — корневая часть (область рудообразования — астеносфера); 14 — зона переноса (тепло- и массопереноса); 15 — ареал рудоотложения (концентрация и локализация рудного вещества — промышленные эндогенные месторождения). III Динамика и механизмы мантийной рудообразующей системы: А — конвективные клетки; А₁ — астеносферная; А₂ — коромантийная; В — восходящий мантийно-флюидный и рудоносный поток; С — физико-химические условия рудоотложения в виде рудных месторождений; D — ареал интенсивного термодинамического и метасоматического воздействия.

60—70 км. Последнее является реальной предпосылкой возникновения восходящих конвективных движений, ускоряющих протекание эндогенных процессов, в том числе рудообразующего. Все это является основанием предположить, что зарождение мантийной рудообразующей системы осуществляется в астеносферном слое.

Зона транспорта охватывает ограниченное пространство, в котором расположены пути и транспортирующие элементы тепло- и массопереноса (магмы, флюиды, рудоносные растворы, газы и др.), отражающие гидродинамический режим рудообразующей системы. Это изучается преимущественно методами глубинной геофизики. С точки зрения геотектоники эти зоны отличаются высокой раздробленностью, проницаемостью и эндогенной активностью, с наличием глубоко проникающих мантийных разломов, которые разрывают земную кору, частично верхнюю мантию, и проникают в астеносферу, где осуществляется зарождение магмофлюидо-рудного вещества.

В результате проведенных исследований было установлено, что на территории крупных месторождений цветных металлов в нашей стране прослеживаются мантийные и другие глубоко проникающие разломы, различного простирания, которые формируют тектонические узлы [Йосифов, Радичев, 2018]. В их строении обязательно участвуют разрывы мантийного типа, относящиеся к категории узлов коромантийного типа. Самая важная металлогеническая характеристика этих узлов состоит в том, что они участвуют в строении рудоконцентрирующих структур (Панаюрской и Центрально-Родопской) [Йосифов, 2007]. При этом отдельные рудные поля крупных месторождений пространственно приурочены к мантийным тектоническим узлам.

Геофизическими исследованиями в нашей стране установлено, что мантийные разломы разрывают основные квазигоризонтальные границы в тектоносфере довольно большими вертикальными амплитудами, причем она самая большая для

астеносферы (до 70 км) и является предпосылкой функционирования *крупных конвективных ячеек*. Это относится к поверхности Мохо и, вероятно, к остальным границам в земной коре, которые, однако, не были предметом целенаправленного изучения. Наиболее представительная количественная информация в этом аспекте получена для территории крупных месторождений цветных металлов, где в пределах четырех рудных полей вертикальная амплитуда соответственно изменяется от 7 до 14 км [Йосифов, Радичев, 2018]. Таким образом, формируются термобарические конвективные ячейки, масштаб которых ниже по сравнению с располагающимися в астеносферном слое.

Зона концентрированного рудоотложения представлена участками, где рудное вещество рудообразующей системы реализуется в виде месторождений и рудопроявлений, которые обычно группируются в рудные поля и районы. Рассматриваемая зона расположена в самой верхней части земной коры, которая доступна как для технической обработки и исследования, так и для непосредственного наблюдения. Вот почему эта зона сравнительно хорошо изучена как в геолого-тектоническом, геофизическом, так и физико-химическом отношении, и о ней опубликовано большое количество статей и монографий. Обычно рудовмещающими являются разломы локального типа и их пересечения, а также различные по масштабу трещины, вулканические аппараты, структуры центрального типа, кольцевые образования и др. Все они способствуют циркуляции рудоносных растворов и отложению рудного вещества. В некоторых случаях, однако, важен минеральный состав и петроструктурные особенности пород. Они также влияют на условия рудоконцентрирования и метасоматических преобразований. Большое значение для рудоотложения имеют физико-химические условия геологической среды. Процесс рудоотложения происходит в результате снижения температур при передвижении рудоносных растворов к поверхности и после воздей-

ствия флотационных эффектов и обменных реакций с вмещающими породами. На основании изложенного возникают химические барьеры, причем подвижность флюидов и рудоносных компонентов резко падает и последние переходят в фазу рудоотложения.

Заключение. На основе приведенной характеристики отдельных частей геофизической модели мантийной рудообразующей системы можно утверждать, что в принципиальном аспекте она содержит всю совокупность главных элементов тектонического строения и протекания важнейших эндогенных процессов, которые обуславливают формирование разных типов рудных месторождений. Соотношение и взаимная связь между рассмотренными тремя главными частями создают общую структуру мантийной рудообразующей системы. Содержащиеся в ней элементы определяют ее целостный вертикальный и латеральный масштаб, развернутый в верхней мантии, соответственно в астеносфере и земной коре. С использованием современной геофизической информации, как и оригинальных количественных данных, характеризующих важные структурные особенности тектоносферы в ареале крупных рудных месторождений и их комплексной интерпретации, сделана попытка синтезировать обобщенную геофизическую модель мантийной рудообразующей системы. Намечены типовые условия развития процесса рудогенерации на разных глубинных уровнях литосферы. Описанная структура эндогенной рудообразующей системы показывает, что две из ее основных частей, а именно зарождение и локализация рудоносных объектов,

происходят соответственно в астеносфере и земной коре. Третья основная часть — транспортная — занимает ограниченную область верхней мантии и весь вертикальный масштаб земной коры, совпадающий с коромантийными узлами. Специфическая геолого-геофизическая характеристика астеносферного слоя и, прежде всего, сравнительно высокая термодинамика и флюидная насыщенность свидетельствуют о важной роли в зарождении и развитии рудообразующих процессов.

Флюиды, характеризующиеся исключительной подвижностью, являются важным динамическим фактором, содействующим транспортировке вещества и энергии. В известной степени они выполняют несущую функцию и для рудоносных растворов. Поэтому в последние годы, главным образом русскими, украинскими и американскими исследователями, им уделяется большое внимание при изучении эндогенного рудообразования и металлогении земной коры [Menzies, Chazrot, 1995; Маракушев, 1997; Дерябин, 1999, 2003]. А наличие тектонических разломов и разрывов в астеносфере и на разделе Мохо создает благоприятные условия для активизации эндогенных процессов и возникновения восходящих конвективных потоков. Все это способствует зарождению и перемещению рудоносной магмы к земной поверхности и формированию крупных промышленных мантийных месторождений. На наш взгляд результаты проведенных исследований представляют собой еще одну важную ступень в выяснении проблемы зарождения рудного вещества, которое, вероятнее всего, осуществляется в астеносфере.

Список литературы

- Бердичевский М., Жданов М. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. Москва: Недра, 1981, 327 с.
- Ботев Е., Треусов А., Ефимова В. Скоростен модел на земната кора и горната мантия в България по данни от регистрацията на земетресения и взривове. *Българска геофизична списание*. 1996. Т. 22. Кн. 2. С. 50—61.
- Вольвовский И., Дачев Хр., Попова О., Велев А., Бабаинец В. А., Натрошвили Л. И. Строение земной коры территории Болгарии по профилю ГСЗ—МОВЗ, Петрич—Ни-

- кополь—Вранча. Бюл. Моск. об-ва испытателей природы. Отдел геолог. 1985. Т. 60. № 4. С. 38—45.
- Дачев Хр. Строеж на земната кора в България. София: Техника, 1988, 334 с.
- Дерябин Н. И. Флюидное рудообразование. Киев: Альфа-Принт, 1999, 278 с.
- Дерябин Н. И. Новые представления о флюидном рудообразовании в металлогении земной коры. Геол. журн. 2003. № 4. С. 107—116.
- Йосифов Д. Рудоконцентриращи структури в България. Геология и минерални ресурси. 2007. № 6. С. 14—17.
- Йосифов Д., Георгиева Г. Строежни особености на горната мантия на територията на крупните находища на цветни метали в България. Геология и минерални ресурси. 2018. № 2-3. С. 3—9.
- Йосифов Д., Радичев Р. Строеж на земната кора на територията на крупните находища на цветни метали в България. Минно дело и геология. 2018. № 10. С. 31—38.
- Казанский В. И. Эндогенные рудообразующие системы и генетические модели эндогенных рудных формаций. В сб.: Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций. Новосибирск: Наука, 1998, С. 10—18.
- Козеренко В. Эндогенная металлогения. Москва: Недра, 1981, 279 с.
- Кутас Р. Поле тепловых потоков и термическая модель земной коры. Киев: Наук. думка, 1978, 147 с.
- Маракушев А. Петрогенезис. Москва: Недра, 1988, 294 с.
- Маракушев А. Петрогенезис и рудообразование. Москва: Недра, 1997, 216 с.
- Павленкова Н. И. Эмпирические основы ротационно-флюидной гипотезы глобального тектоногенеза. Геофиз. журн. 2004. Т. 26. № 6. С. 41—60.
- Смирнов В. И. Эндогенная металлогения. В кн.: Тектоносфера Земли. Москва: Наука, 1978, С. 121—169.
- Смирнов В. И. Энергетические основы постмагматического рудообразования. Геология рудных месторождений. 1981. № 1. С. 5—17.
- Спасов Е., Ботев Е. Неоднородности и анизотропия в горната мантия на Балканите по телесеизмични данни. Българска геофизична списание. 1987. Кн. 13. С. 66—75.
- Щеглов А. Основные проблемы современной металлогений (вопросы теории и практики). Ленинград: Недра, 1987, 232 с.
- Cox, D. P., & Singer, D. A. (Eds.). (1986). Mineral deposit models. Washington, 175 p.
- Menzies, M., & Chazot, G. (1995). Fluid processes in diamond to spinel facies shallow mantle. *Journal of Geodynamics*, 20(4), 387—415. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(95\)00018-5](https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00018-5).
- Watson, J. (1980). Metallogeneses in relation to mantle heterogeneity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 297(1430), 347—352. <https://doi.org/10.1098/rsta.1980.0220>.

Geophysical model of the mantle ore-forming system

D. Yosifov, R. Radichev, 2019

The paper deals with a generalized geophysical model of the mantle ore-forming system that covers three main parts: a) the area of origin of the ore substance; b) its transportation zone and c) the area of concentrated ore-formation — a deposit. The essence of the model uses the modern achievements of metallogeny and deep geophysics on one hand, as well as original quantitative data on the structure of the asthenosphere in the regions of large deposits of non-ferrous and metal ores deposits in Central Srednogie and the Central Rhodopes on the other. As a result of geophysical studies longitudinal and transversal mantle faults have been tracked as well as the lifting of the heated roof of the asthenospheric layer. In addition quantitative data have been obtained on considerable vertical amplitudes of tectonic ruptures both on the Moho division of more than 7—14 km and on the upper boundary of asthenospheric layer where the amplitude is more than 60 km. The

structure of endogenous ore-forming system described shows that two of its main parts, namely origination and localization of ore-bearing products are completely situated in asthenosphere and earth crust respectively. The third main part — the transporting one occupies some restricted area of the upper mantle and the whole vertical size of the earth crust coincident with crust-mantle nodes. The features of tectonosphere revealed within the limits of the mantle ore areas as well as specific geophysical character of asthenospheric layer certificate that within these areas favorable conditions were generated for emergence and functioning of convecting cells and ascending magmo-fluid flows. All the mentioned, stimulated origination of ore-bearing magma in asthenosphere layer and their movement to the surface, where in the Late Cretaceous (Srednogorie) and Paleogenic (Rhodopes) the mantle deposits were formed. The results of the studies conducted are the important step in clearing the problem of origination of the ore matter realized in asthenosphere.

Key words: geophysical model, Moho division, lithosphere, asthenosphere, mantle deposits, mantle faults, tectonic ruptures, ore fields.

References

- Berdichevsky, M., & Zhdanov, M. (1981). Interpretation of anomalies of the variable electromagnetic field of the Earth. Moscow: Nedra, 327 p. (in Russian).
- Botev, E., Treusov, A., & Eftimova, V. (1996). High-speed model of the crust and upper mantle in Bulgaria according to the registration of earthquakes and explosions. *Bulgarian Geophysical Journal*, 22(2), 50—61 (in Bulgarian).
- Volvovsky, I., Dachev, Ch., Popova, O., Velev, A., Babinets, V. A., & Natroshvili, L. I. (1985). The crustal structure of the territory of Bulgaria according to the profile of the GSZ—MOVZ, Petrich—Nikopol—Vrancea. *Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel geologicheskiiy*, 60(4), 38—45 (in Russian).
- Datchev, Hr. (1988). *Construction of the crust in Bulgaria*. Sofia: Technique, 334 p. (in Bulgarian).
- Deryabin, N. I. (1999). Fluid ore formation. Kiev: Alfa-Print, 278 p. (in Russian).
- Derbyin, N. I. (2003). New ideas about fluid ore formation in metallogeny of the earth's crust. *Geologicheskiiy zhurnal*, (4), 107—116 (in Russian).
- Iosifov, D. (2007). Ore concentration structures in Bulgaria. *Geology and mineral resources*, (6), 14—17 (in Bulgarian).
- Yosifov, D., & Georgieva, G. (2018). Features of the structure of the upper mantle on the territory of large deposits of non-ferrous metals in Bulgaria. *Mining and Geology*, (2-3), 3—9 (in Bulgarian).
- Yosifov, D., & Radichev, R. (2018). The structure of the earth's crust on the territory of large deposits of non-ferrous metals in Bulgaria. *Mining and Geology*, (10), 31—38 (in Bulgarian).
- Kazansky, V. I. (1998). Endogenous ore-forming systems and genetic models of endogenous ore formations. In Ore formation and genetic models of endogenous ore formations (pp. 10—18). Novosibirsk: Science (in Russian).
- Kozerenko, V. (1981). *Endogenous metallogeny*. Moscow: Nedra, 279 p. (in Russian).
- Kutas, R. (1978). *Heat flow field and thermal model of the Earth's crust*. Kiev: Naukova Dumka, 147 p. (in Russian).
- Marakushev, A. (1988). *Petrogenesis*. Moscow: Nedra, 294 p. (in Russian).
- Marakushev, A. (1997). *Petrogenesis and ore formation*. Moscow: Nedra, 216 p. (in Russian).
- Pavlenkova, N. I. (2004). Empirical foundations of the rotational fluid hypothesis of global tectonogenesis. *Geofizicheskiiy zhurnal*, 26(6), 41—60 (in Russian).
- Smirnov, V. I. (1978). Endogenous metallogeny. In *Tectonosphere of the Earth* (pp. 121—169). Moscow: Nauka (in Russian).
- Smirnov, V. I. (1981). Energy bases of postmagmatic ore formation. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, (1), 5—17 (in Russian).
- Spasov, E., & Botev, E. (1987). Uniformity and anisotropy in the upper mantle of the Balkans

- according to tele-themitic data. *Bulgarian Geophysical Journal*, (13), 66—75 (in Bulgarian).
- Scheglov, A. (1987). *The main problems of modern metallogeny (theory and practice)*. Leningrad: Nedra, 232 p. (in Russian).
- Cox, D. P., & Singer, D. A. (Eds.). (1986). *Mineral deposit models*. Washington, 175 p.
- Menzies, M., & Chazot, G. (1995). Fluid processes in diamond to spinel facies shallow mantle. *Journal of Geodynamics*, 20(4), 387—415. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(95\)00018-5](https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00018-5).
- Watson, J. (1980). Metallogenesi in relation to mantle heterogeneity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 297(1430), 347—352. <https://doi.org/10.1098/rsta.1980.0220>.