

Пространственные соотношения полиметаллических месторождений и глубинного строения земной коры Западно-Европейской плиты (по гравитационным данным спутника GOCE)

Галямов А. Л.^{ID}, Волков А. В.^{ID}, Лобанов К. В.^{ID}

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, a-galyamov@yandex.ru*

Аннотация. Сравнительный анализ геодинамических обстановок формирования полиметаллических месторождений Западной Европы и Средиземноморского сегмента пояса Тетис базируется на современных представлениях о строении земной коры на основе гравитационных данных спутника GOCE. Показано, что эксгальационные колчеданные месторождения (SEDEX) и медистые песчаники и сланцы (SSC) размещаются на земной коре с преимущественным развитием нижнего слоя земной коры. Колчеданные медные и свинцово-цинковые месторождения в вулканогенных породах (VMS), а также некоторые проявления SEDEX типа чаще встречаются в надсубдукционных островодужных и аккреционных обстановках на коре с преимущественным развитием ее среднего слоя. Свинцово-цинковые руды миссиссипского типа (MVT) залегают в глубоких перикратонных осадочных бассейнах с нефтегазоносной специализацией на шельфе и континентальном склоне, вне связи со стратификацией земной коры.

Ключевые слова: Западная Европа, литосфера, земная кора, месторождение, SEDEX, MVT, VMS, SSC.

Spatial relationships of polymetallic deposits and the deep structure of the earth's crust of the Western European Plate (according to gravitational data from the GOCE satellite)

Galyamov A. L.^{ID}, Volkov A. V.^{ID}, Lobanov K. V.^{ID}

FGBUN Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, a-galyamov@yandex.ru

Abstract. A comparative analysis of the geodynamic settings of polymetallic deposits in Western Europe and the Mediterranean segment of the Tethys belt is based on modern ideas about the structure of the earth's crust based on gravitational data from the GOCE satellite. It is shown that exhalative sulfide deposits (SEDEX) and cuprous sandstones and shales (SSC) are located on the earth's crust with a predominant development of the lower crust. Pyrite copper and lead-zinc deposits in volcanogenic rocks (VMS), as well as some SEDEX deposits, are more often found in supra-subduction island-arc and accretionary environments on the crust with a predominant development of its middle layer. Lead-zinc ores of the Mississippian type (MVT) occur in deep pericratonic basins with petroleum-bearing specialization on the shelf and continental slope, regardless of the stratification of the earth's crust.

Keywords: Western Europe, Tethys, lithosphere, Earth's crust, base metal, deposit, SEDEX, MVT, VMS, SSC.

Введение

Свинцово-цинковые месторождения, широко распространенные в мире, – один из важнейших источников стратегических металлов: Cu, Pb, Zn, Ag, Au, PGE, Te, Se, Ge, Ga, Bi, Cd, In, Re, REE (Бортников и др., 2016; Галямов и др., 2021). Основная часть мировых запасов свинца и цинка (60 %) приходится на колчеданно-полиметаллические месторождения в терригенных и карбонатно-терригенных формациях (тип SEDEX); запасы свинцово-цинковых месторождений в карбонатных формациях (MVT типа) и колчеданно-полиметаллических месторождений в вулканогенных формациях (VMS типа) составляют около 20 % каждый (Дергачев и др., 2008). При этом более 40 % запасов и около половины ресурсов приходится на объекты типа SEDEX в докембрийских породах.

В Западной Европе известно около четырехсот свинцово-цинковых и медных объектов, в том числе два десятка крупных месторождений. Колчеданные месторождения размещаются в каледонидах и альпидах – Kristineberg, Garpenbergfaltet, Renstrom, Boliden (Швеция), Rammelsberg (ФРГ), Rio Tinto, Angostura (Испания), Horni Kalna, Kostalov (Чехия). Стратиформные месторождения из-

вестны в герцинских и альпийских комплексах Польши (Верхняя Силезия, Miedziana, Pomorzany и др.), Италии (Iglesiente), Швеции (Horntraskviken и др.), Ирландии (Navan и др.). Жильные полиметаллические (в т.ч. с серебром) месторождения размещаются в альпидах и герцинидах Болгарии (Madan и др.), Северной Македонии (Sasa и др.), Словакии (Banska Stiavnica и др.), Франции (L'Argentiere и др.).

Происхождение крупных концентраций полиметаллов и, особенно, их источники представляют большой интерес для прогнозирования и выявления новых месторождений. Для изучения геодинамических обстановок формирования месторождений в литосфере значительный интерес представляют особенности глубинного строения земной коры. В исследованиях использовалась глобальная геофизическая модель земной коры CRUST1.0, составленная по результатам дистанционных гравитационных измерений из космоса в рамках проекта GOCE (Laske et al., 2013; Reguzzoni et al, 2015).

Представленная статья является продолжением исследований глобальных и региональных закономерностей размещения свинцово-цинковых месторождений (Галямов и др., 2021; Галямов и др., 2022; Галямов и др., 2023) с учетом их пространственных соотношений с особенностями глубинного строения земной коры Западной Европы и Средиземноморского сегмента пояса Тетис.

Глубинное строение земной коры Западной Европы и размещение полиметаллических месторождений

В мире накоплен огромный материал в результате сейсмических исследований земной коры методами ГСЗ (глубинное сейсмическое зондирование) и МОВ–ОГТ (метод отраженных волн – общей глубинной точки). В Западной Европе сейсмическое изучение в конце прошлого века проводилось на множестве профилей со средней плотностью профилей (4.5 пог. км.) на тыс. км², обеспечивших изучение земной коры и верхней мантии (Fountain et al., 1993; Hasterok et al., 2022). Наиболее полной современной системой дистанционных данных о земной коре, базирующихся на измерениях по равномерной сети, являются результаты космических гравиметрических измерений по проекту GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer). Полученные гравиметрические данные стимулировали развитие глобальных моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии (GEMMA1.0, CRUST1.0), способствовавших пониманию металлогенической специализации крупных рудных районов и провинций. Проект GEMMA (GOCE Exploitation for Moho Modeling and Applications), также финансируемый ESA, на основе полученных GOCE данных выполнил уточненную оценку и существенно детализировал границы Мохо (Reguzzoni et al., 2015).

Осадочный чехол образует самый верхний слой земной коры (Laske et al., 2013). Его мощность варьирует от нуля на щитах до более 20 км в глубоких осадочных бассейнах. Верхний горизонт, мощностью до 2 км, представленный наименее плотными и слабо метаморфизованными осадочными комплексами, имеет наиболее широкое распространение (более 500 млн км²), его комплексы слагают глубокие прогибы, приуроченные к нефтегазоносным провинциям. Средний горизонт, мощностью до 4 км, обладает сравнительно меньшим распространением (около 100 млн км²) и охватывает многие углеводородные провинции и их обрамление. Нижний горизонт осадочного слоя литосферы, распространенный в мире слабее всего (менее 20 млн км²), сложен наиболее мощными комплексами (свыше 14 км), часто в центральных областях крупных углеводородных провинций.

Консолидированная кора, согласно модели CRUST1.0, состоит из трех слоев. Верхний и средний слои континентальной коры сложены, главным образом, метаморфическими комплексами, гнейсами, гранитами и гранодиоритами. Граница между верхним «метаморфическим» и средним «гранитным» слоями – часто условная и проходит по разделу скоростей около 6.3 км/сек. Нижняя «базальтовая» кора, как считается, сложена породами амфиболитовой фации, хотя не исключено, что нижняя кора может по составу относиться к андезитам и дацитам (Bradley et al., 2015). Сейсмологические и геолого-геофизические исследования показали, что нижний, средний и верхний слои консолидированной коры невыдержанны по мощности. Деформация слоев коры выражена в виде контрастных выступов и погружений поверхности Мохо, аномального раздува или утонения нижней и средней коры.

Главными причинами увеличения мощности земной коры служат тектоническое взаимодействие плит и термохимическое мантийное воздействие, сопровождающиеся магматизмом, андерплейтингом и расслоением коры и мантии. Основное следствие утолщения коры – ее расслоение, конвекция, метасоматоз и последующее разуплотнение ее и кровли верхней мантии, что соответственно выражается в виде утолщения в сейсмическом представлении. Тектоническое утолщение земной коры обычно связывается с коллизионными процессами при столкновении, субдукции плит и т. п. При коллизии отмечают почти удвоение мощности земной коры (Пиренеи, Альпы, Апеннины, Динариды, Карпаты). В результате орогенного утолщения происходит термическая эрозия коры (Zhang, 2007) и деламинация, при которой нижняя «базитовая» кора и подстилающая ее литосферная мантия расслаиваются на блоки, из которых более плотные опускаются в астеносферу (Houseman et al., 1997; Pirajno, 2009; Bradley et al., 2015). Это приводит к быстрому компенсирующему подъему менее плотной астеносферной мантии с последующим декомпрессионным плавлением (Лучицкая, 2014), базитовым андерплейтингом, частичным плавлением материалов нижней коры (Pirajno, 2009; Artemieva et al., 2012) и внутриплитным базальтовым магматизмом (Mo et al., 2007). Все это приводит в общему разуплотнению коры и соответственному утолщению в сейсмическом отображении (Современная геодинамика..., 2005).

Западно-Европейская – молодая платформа, ее складчатый фундамент сформирован, преимущественно, в палеозойские эпохи орогенеза. Для нее характерно отчетливое блоковое строение: выступы фундамента – массивы (Богемский, Рейнский, Армориканский, Центральный), древние выступы (Гарц, Вогезы, Шварцвальд) и наложенные впадины (Польско-Германская, Северо-Германская, Парижская, Аквитанская, Тюрингская, Субгерцинская). Альпийская активизация в Западной Европе проявлена, в основном, в виде активных зон средиземноморского сегмента пояса Тетис. Ось сегмента располагается между южной континентальной окраиной Евразии и Афро-Арабской плитой. Севернее в результате растяжения герцинской коры развивалась рифтовая система Западной Европы, сопровождавшаяся щелочно-базальтовым и щелочным вулканизмом (Трифонов, 2017).

Земная кора Западной Европы отличается от коры Восточно-Европейской платформы (Белюсов, Павленкова, 1989; Галамов и др., 2023). Наибольшая мощность первой не превышает 48 км (в среднем 30 км) по сравнению с 57 км (в среднем 39 км) Восточно-Европейской платформы. Средние скорости в ней тоже несколько ниже: 6.3–6.4 км/сек по сравнению с 6.5–6.6 км/сек на древней платформе. Особенность коры Западной Европы, кроме того выражается в существенном расслоении ее нижнего слоя (по материалам профилей ОГТ). Пространственный анализ показывает, что древние выступы (Богемский, Армориканский и Центральный) приурочены к областям утолщенного нижнего слоя коры (рис. 1), в то время как области альпийского орогенеза пространственно связаны с участками повышенной мощности верхнего (Понтиды и Тавриды в Турции) и, отчасти, среднего слоя.

Полиметаллические месторождения неравномерно распространены в структуре Европы. В пределах вулканических и магматических дуг преобладают (более 30 % от количества полиметаллических объектов) VMS-месторождения Швеции (Renstrom, Kristineberg, Boliden и др.), Финляндии (Pyhasalmi, Outokumpu, Vihanti, Pirttilampi, Verttuunjärvi, Korppisjärvi, Muittari и др.), Испании (Angostura, Rio Tinto, Cueva de la Mora, San Telmo, San Miguel и др.), в аккреционных комплексах надсубдукционных зон (Сербия – Zimovnik, Tisovik, Brskovo Zuta Prla, Kaporic и др.).

В орогенных областях также размещаются VMS-руды Норвегии (Tverrfjellet, Fosdalen, Sel, Nordre Gjettryggen, Grimsdalen и др.) и Испании (Arinteiro, Bama, Filon Sur-Esperanza, Vuelta Falsa и др.). Здесь также известны эксгальсионные месторождения Германии (Rammelsberg, Meggen и др.); по соседству с ними в обломочных и глинистых фациях «редбед» залегают стратиформные месторождения медистых песчаников и сланцев (SSC) – в Германии (Leitmar, Korbach, Konrad), в Польше (Lubin, Malomice), в Испании (Granada, Menorca, Santomera), во Франции (Bancairon, Cap Garonne, Cerisier).

В карбонатных формациях палеозойского основания и мезозойско-кайнозойского чехла размещаются месторождения MVT типа (около 15 %) в Ирландии (Navan, Abbeytown, Ballinalack, Tatestown и др.), Бельгии (Verviers), Польше (Верхнесилезский бассейн, Pomorzany), в Испании

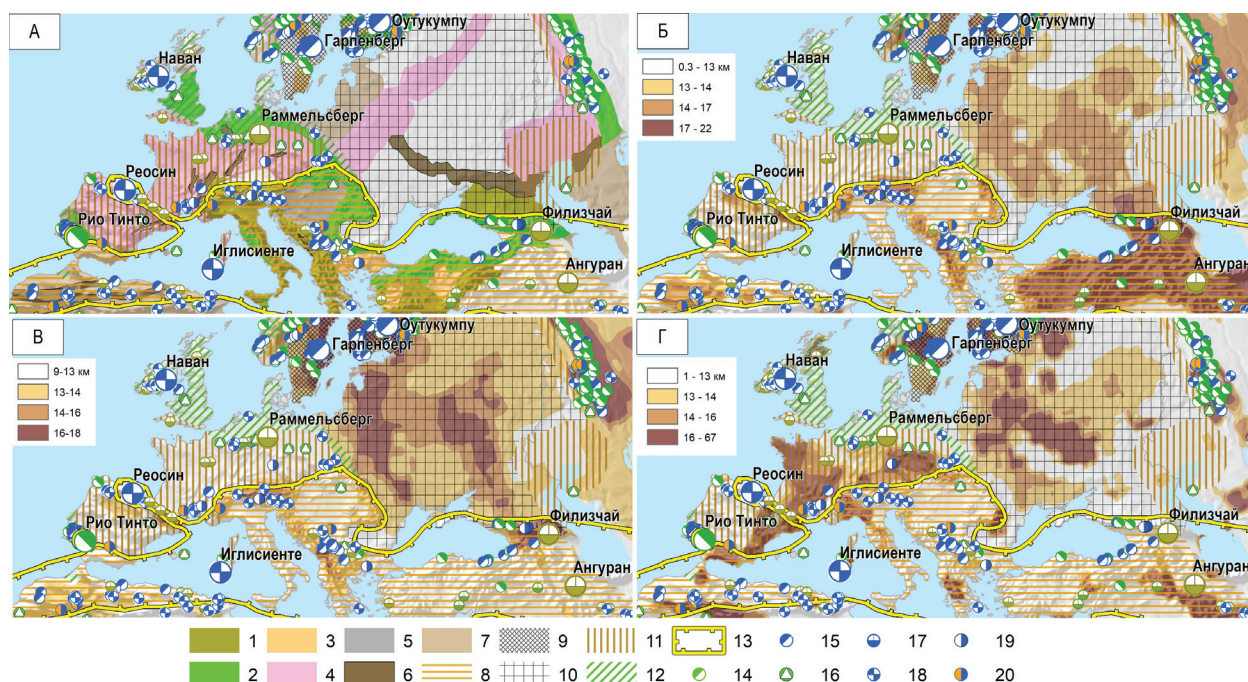


Рис. 1. Размещение полиметаллических месторождений, геодинамические области Европы (А) и мощность слоев земной коры: верхнего (Б), среднего (В) и нижнего (Г) (по материалам Laske et al., 2013; Richards, 2015; Hasterok et al., 2022).

1 – аккреционные комплексы, 2 – островные дуги, 3 – магматические дуги, 4 – орогенные пояса, 5 – наложенные впадины, 6 – рифты, 7 – пассивная окраина, 8–12 – возраст орогенеза: 8 – альпиды (Ап, МЗ-КЗ бассейны), 9 – герциниды (Гц, Гц+Ап), 10 – каледониды (Кд), 11 – кратоны, 12 – щиты; 13 – контуры пояса Тетис, 14–20 – типы месторождений: 14 – медно-колчеданный в вулканогенно-осадочных породах, 15 – свинцово-цинковый вулканогенно-карбонатный стратиформный, 16 – медистых песчаников и сланцев, 17 – колчеданно-полиметаллический в терригенных породах, 18 – свинцово-цинковый стратиформный в карбонатных породах, 19 – полиметаллический жильный, 20 – серебро-полиметаллический.

Fig. 1. Location of polymetallic deposits, geodynamic regions of Europe (A) and thickness of the layers of the Earth's crust: upper (B), middle (C) and lower (D) (based on Laske et al., 2013; Richards, 2015; Hasterok et al., 2022).

1 – accretion complexes, 2 – island arcs, 3 – magmatic arcs, 4 – orogenic belts, 5 – superimposed depressions, 6 – rifts, 7 – passive margin, 8–12 – age of orogeny: 8 – alpides (Ap, MZ-KZ basins), 9 – hercynides (Hz, Hz+Ap), 10 – caledonides (Cd), 11 – cratons, 12 – shields; 13 – contours of the Tethys belt, 14–20 – Types of deposits: 14 – copper-pyrite in volcanogenic sedimentary rocks, 15 – lead-zinc volcanogenic-carbonate stratiform, 16 – copper sandstones and shales, 17 – pyrite-polymetallic in terrigenous rocks, 18 – lead-zinc stratiform in carbonate rocks, 19 – polymetallic vein, 20 – silver-polymetallic.

(Reocin, Rubiales, Picos de Europa, Troya). Часть мелких месторождений этого типа залегает в ранне-палеозойских формациях на периферии герцинских блок-массивов (Центрально-Французский, Мезетта, Чешский и др.). Стратиформные проявления Швеции большей частью преобразованы в скарноиды (Svardsjo, Lovasfaltet, Kalvbacksfaltet).

Субдукция, аккреция и VMS месторождения. Мощность верхней «гранито-гнейсовой» коры могла быть увеличена за счет субдукции, обдукции, аккреции и магматизма в ходе коллизионного орогенеза (Artemieva et al., 2012). Это находит отражение в существовании мощной «кислой» средней коры под деформированными комплексами вулканических дуг и аккреционной призмы (Динариды и Западных Альпы). Субдукционный палеотетический островодужный процесс в Альпах в девонском периоде обусловил задуговый спрединг, рифтогенез и формирование офиолитов (Graciansky et al., 2010). Позднее, сложившиеся к этому времени формационные комплексы были аккретированы к зоне субдукции и обдукции под Апулийско-Африканскую плиту, а дальнейшая коллизия европейской и африканской плит привела к утолщению аккреционной призмы.

Динариды, как и Альпы, представляют собой складчато-надвиговый пояс, который простирается от Южных Альп на северо-западе до эллинид на юго-востоке (Van Unen et al., 2019). Основные

структурные элементы динарид проявлены в ранне-среднетриасовых рифтогенных прогибах и сопутствующем магматизме (Huisman et al., 2002; Robertson et al., 2009). Субдукция и последующее разуплотнение континентальной коры привело к формированию задугового бассейна с проявлениями офиолитового меланжа, с влиянием которого связывается образование колчеданных месторождений VMS (кипрского) типа в Сербо-Македонском вулканическом поясе.

VMS месторождения в Свекофеннского аккреционного орогена приурочены к областям утолщения средней коры. Свекофеннский орогенный блок формировался в результате субдукции океанической коры под Карельский кратон (Балаганский и др., 2016) и образования островных дуг, вмещающих многочисленные колчеданные вулканогенные месторождения. Многоэтапность аккреции орогена определила сложный характер свекофенских аккреционных структур и последующий рифтогенез Карельского кратона, который обусловил внутриплитный магматизм и проявление сопутствующего медно-никелевого оруденения.

В пределах Иберийского колчеданного пояса герцинский металлогенез обусловлен транспрессионными деформациями коры (Tornos et al., 2004), которая представляла собой активную континентальную окраину. При последующих движениях она трансформировалась в коллизионную зону, что могло бы сказаться на утолщении верхней и средней коры, относительно нижней коры. Однако, недавние сейсмические исследования показали, что на глубине 10–15 км, под зоной Осса-Морена обнаруживается крупное плоское и плотное магматическое тело герцинского возраста, возможно, базит-ультрабазитового состава, что могло вызвать искажения сейсмических характеристик среднего слоя (Tornos et al., 2004).

Рифтогенез и месторождения SEDEX и SSC. Одним следствием утолщения, расслоения и разуплотнения земной коры является рифтогенез (Pirajno, 2009), с развитием которого связывают формирование многих месторождений (карлинского, стратиформного, эпитермального и других типов). В целом, рифтогенез характеризуется также утонением среднего «кислого» слоя и утолщением «базитового» слоя земной коры (Artemieva et al., 2019). Приуроченность полиметаллических SEDEX-месторождений к областям задугового и континентально-окраинного рифтогенеза – распространенное явление в мире (Groves et al., 2007). При этом для рифтогенных областей отмечается особенность глубинного строения земной коры – локальное утолщение ее нижнего «базитового» слоя (рис. 1 Г). Утолщение нижней «базитовой» коры наблюдается, в основном, в широких областях спрединга и рифтогенеза континентальной окраины.

В Западных Альпах, где отмечается локальное утолщение нижней коры, рифтогенез происходил в раннемеловой период и обусловлен общим растяжением и утонением континентальной литосферы (Graciansky et al., 2010). Ранние фазы растяжения связаны с развитием Тетиса в Восточном Средиземноморье. Месторождения Центральной Европы (Раммельсберг, Bieber и др.) образовались в период ранней рифтовой фазы развития пассивной континентальной окраины (Leach et al., 2005). Колчеданные свинцово-цинковые руды тяготеют к области утолщения нижней коры (рис. 1 Г) на пассивной континентальной окраине с рифтовыми структурами (Лиманская, Бресская, Рейнские и др.) среди богатых органическими веществами среднедевонских кремнисто-обломочных пород.

В областях рифтогенеза (рис. 1 А) также размещаются месторождения медистых песчаников и сланцев (Франция, Германия, Польша). В настоящее время принята модель образования этих руд в период диагенеза. Проявления медистых песчаников и сланцев (SSC) залегают в породах цехштейна в бассейне пермского периода, простирающегося от Великобритании через южную часть Северного моря, северную Германию и Польшу до Литвы. Бассейн представляет собой внутриконтинентальный прогиб и содержит карбоновые отложения с мощными залежами угля. Роль металлоносных флюидов играла морская вода, которая мигрировала вниз сквозь осадки в фундамент (Blundell et al., 2005). В областях триасового рифтогенеза и повышенного термального режима, рудоносные флюиды мигрировали вверх по разломам и трещинам.

Пиренейская Осевая Зона на северо-востоке Иберийского полуострова, в пределах которой размещены свинцово-цинковые ордовикские месторождения SEDEX типа, является частью альпийского орогенеза, связанного коллизией между Иберийским блоком и Европейской плитой.

Этот складчатый пояс характеризуется локальным утолщением земной коры, причем утолщение нижней коры охватывает более значительные территории (рис. 1 Г). Ранняя история развития Зоны связана с позднеюрским рифтогенезом в Северном Пиренейском и Субпиренейском бассейнах, разделявших Иберийский полуостров от Армориканского массива.

В Западном Средиземноморье фации «редбед» схожи по возрасту, литологическому составу и истории осадконакопления, диагенеза и орогенеза с отдельными мезозойскими отложениями внутренних областей Апеннин и Магриба (Petti et al., 2013). Они состоят в основном из кремнисто-обломочных обломочных материалов, включая песчаник, алевроит и глины, привнесенных из областей палеозойских метаосадочных и метвулканических пород. Медная минерализация представлена хризокolloй, азури́том и малахитом. Глубина захоронения руд составляет не менее 4–6 км с температурами 140–160 °C, типичными для диагенетического этапа.

Осадочный чехол и Pb-Zn месторождения MVT типа. Месторождения миссиссипского и аналогичного им типа, в отличие от VMS и SEDEX, формировались из источников, имеющих весьма сложную историю. Как показывает пространственный анализ, формирование руд не связано с динамичным взаимодействием плит, также не наблюдаются какие-либо закономерности в размещении руд относительно соотношения слоев коры. Согласно распространенным представлениям (Leach et al., 2005), формирование этих руд определялось тектоническими деформациями и метасоматическими изменениями рудовмещающих толщ субплатформенного чехла. Месторождения этого типа локализованы на флангах формировавшихся в режиме растяжения пассивной окраины (рис. 2) интра- и перикратонных бассейнов с терригенно-карбонатным осадконакоплением с углеводородной специализацией и коровыми источниками металлов и серы (Горжевский и др., 1982; Павлов и др., 1988; Ручкин и др., 2002; Leach et al., 2005). При этом, месторождения тяготеют к глубоким осадочным бассейнам, охватывающим в разрезе верхний и средний слои осадочной коры.

Конседиментационные тектонические движения, связанные с рифтогенезом мощных мезозойских бассейнов Кантабрийского региона со стратиформными MVT месторождениями, обусловили фаціальную изменчивость осадков, наличие несогласий и палеокарста (Velasco et al., 2003).

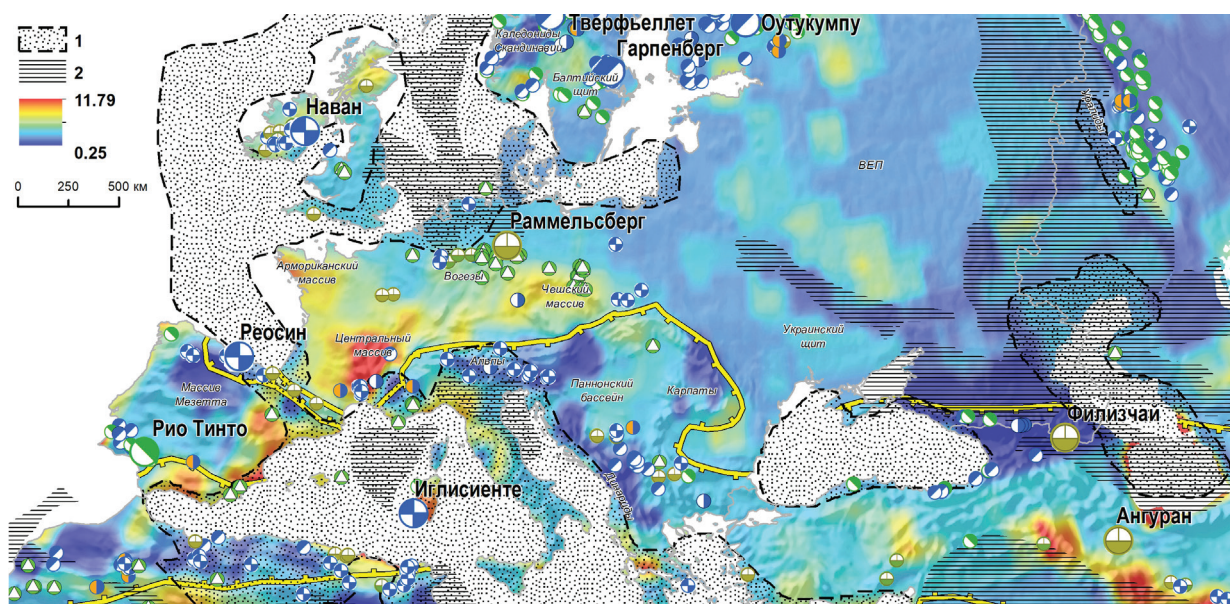


Рис. 2. Полиметаллические месторождения Европы и соотношение (от 4:1 до 1:11) нижнего и среднего слоев земной коры (по материалам Map of undiscovered..., 2012; Laske, 2013; Richards, 2015). 1 – прогибы осадочной коры, 2 – нефтегазоносные провинции.

Fig. 2. Polymetallic deposits of Europe and the ratio (from 4:1 to 1:11) of the lower and middle crustal layers (based on materials Map of undiscovered..., 2012; Laske, 2013; Richards, 2015). 1 – sedimentary crust troughs, 2 – oil and gas bearing provinces.

На месторождении Reosín продуктивная рудная стадия проявилось в поздние этапы доломитизации, когда отложение руд происходило в карстовых полостях.

Циркуляция металлоносных флюидов и заполнение карстовых полостей, происходила в послеоальбское время. Изотопия углерода и кислорода показывает, что металлоносные флюиды представляли собой типичные придонные рассолы (Velasco et al., 2003). Основным источником металлов, скорее всего, были алевролиты и черные углеродистые сланцы. Рассолы, богатые хлоридами металлов, вероятно, были вытеснены из нижележащих отложений во время диагенеза и катагенеза. Основным вмещающими металлы породами, скорее всего, были нижележащие формации. Изотопия свинца указывает на его верхнекоровое происхождение (Velasco et al., 2003).

В триасовых отложениях Восточных и Южных Альп известны многочисленные свинцово-цинковые проявления миссиссипского типа. Они также встречаются в Центральных Альпах и в соседней Австрии. Экономически важные месторождения – это Bleiberg (Австрия), Mesice и Topla (Словения) и на юге итальянские – Raibl и Salafossa. Все эти Pb-Zn месторождения отнесены к альпийскому подтипу (Schroll, 2005) и располагаются вдоль северной периферии нефтегазоносного бассейна р. По (Map of undiscovered..., 2012). Рудоносные мезозойские карбонаты налегают на пермские и раннетриасовые песчаники, перекрывающие метаморфический фундамент. Происхождение месторождений этого подтипа связано с развитием бассейна на платформенном этапе и последующими тектоническими событиями. В целом, характеристики этих месторождений определяют подкласс «низкотемпературных Pb-Zn объектов в карбонатных породах», руды которых располагались в придонных условиях платформенного карбонатного осадконакопления, не подвергаясь воздействию термической сульфат-редукции (Schroll, 2005).

Стратиформные месторождения MVT типа распространены также на Северо-Востоке Алжира, который представляет собой важнейшую металлогеническую зону месторождений Pb-Zn-Fe-Ba (Cu, F, Sr) руд. Минеральная ассоциация представлена галенитом, сфалеритом, баритом, целестинитом, пиритом, халькопиритом и марказитом в доломитах и известняках (Ysbaa et al., 2021). Стратиформные свинцово-цинковые месторождения и проявления MVT типа (Ain Kahla, Chellala, Djebel Gustar, El Abed и др.) располагаются в разрезе вблизи герцинского фундамента, на периферии мезозойских осадочных бассейнов. Формирование месторождений связано с бассейновыми рассолами, миграция которых была обусловлена атласской складчатостью и, вероятно, миоценовой тектонической активизацией.

Заключение

Сравнение позиции полиметаллических месторождений в различных тектонических обстановках показывает, что выделяются два типовых соотношения слоев земной коры (табл. 1): 1) надсубдукционные и задуговые рифтогенные области локального утолщения среднего «гранитного» и верхнего «метаморфического» слев земной коры (балканские Динариды, Тавриды и Понтиды в Турции); 2) рифтогенные структуры пассивной окраины с преимущественным развитием нижнего «базитового» слоя коры (Центральная Европа, Пиренейская Зона, турецкие Тавриды). Отдельно выделяются обстановки перикратонных прогибов с субплатформенными нефтегазоносными комплексами (бассейны – Англо-Датский, По в Италии, Загрос в Турции).

К участкам с преимущественным развитием нижнего «базитового» слоя земной коры приурочены осадочно-эксгальационные полиметаллические и серебро-полиметаллические месторождения. Приуроченность полиметаллических месторождений SEDEX и SSC типов к рифтовым структурам, может указывать на их связь с процессами взаимодействия нижнекорового и мантийного флюидного материала за счет деляминации и мантийной конвекции.

Колчеданные эксгальационные руды, медистые песчаники и сланцы, отлагавшиеся близкоодновременно с вмещающими породами, связаны с рифтогенными обстановками базитового вулканизма активной и пассивной континентальной окраины, с глубинными источниками флюидов нижнекорового и верхнемантийного уровня. Колчеданные медные и свинцово-цинковые месторождения размещаются, чаще, в надсубдукционных островодужных и аккреционных обстановках на кон-

солидированной коре с преимущественным развитием среднего «гранитового» слоя. Их генезис связан с верхне- и среднекоревыми флюидами, которые в результате субдукции и орогенеза, последующего утолщения коры, ее деламинации и метасоматоза, в конечном счете, являются продуктом взаимодействия мантийно-нижнекорового и средне-верхнекорового вещества. Все это не противоречит устоявшимся представлениям об общности обстановок и механизма образования руд этих типов, как членов непрерывного ряда (Ручкин, 1984; Донец и др., 2017).

Таблица 1. Типовые соотношения слоев земной коры и геодинамические режимы в обрамлении Западно-Европейской платформы и средиземноморского сегмента пояса Тетис

Table 1. Typical relationships of crustal layers and geodynamic regimes in the frame of the Western European Platform and the Mediterranean segment of the Tethys belt

Соотношение слоев земной коры	Утолщенный средний «гранитный» слой коры	Утолщенный нижний «базальтовый» слой коры	Обрамление платформ
Геодинамические режимы	Надсубдукционные и аккреционные обстановки	Рифтогенез на пассивной окраине и в тыловых зонах островных дуг активных окраин	Перикратонные прогибы платформенного чехла с углеводородной специализацией
Механизм массообмена «мантия-кора»	Субдукция и расслоение переносят материал коры в мантию, наращивание континентальной коры	Мафический магматизм мантии переносит материал мантии вверх и участвует в росте новой коры.	
Глубиность источников металлов	Средняя и нижняя кора	Мантия – нижняя кора	Осадочная и верхняя кора.
Рудно-формационный тип месторождений	Колчеданно-вулканогенные VMS месторождения	Колчеданные SEDEX и стратиформные SSC месторождения.	Pb-Zn месторождения MVT в карбонатных породах

Стратиформные свинцово-цинковые руды MVT-типа тесно связаны с перикратонными глубокими осадочными нефтегазоносными бассейнами на шельфе и континентальном склоне. При этом, их пространственная связь со стратификацией земной коры не наблюдается. В обрамлении платформ руды этого типа формировались в карбонатной вмещающей среде в осадочных бассейнах с углеводородной специализацией в течение длительного времени, что определяет полихронность их генезиса и эпигенетический облик руд. Согласно недавним результатам исследований (Zhou et al., 2022) на китайских месторождениях SEDEX- и MVT- типа источником серы в SEDEX рудах была морская вода, а в MVT рудах – катагенетические элизонные растворы. Источником металлов для SEDEX руд служили, в основном, породы глубинного фундамента, а для MVT руд – вмещающие осадочные толщи.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы Госзадания ИГЕМ РАН (№ госрегистрации 124022400144-6) «Фундаментальные основы прогноза и поисков крупных месторождений стратегических видов минерального сырья в рудных районах Северо-Востока и других регионов России».

Литература

1. Балаганский В. В., Горбунов И. А., Мудрук С. В. Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свеконенский орогены (Балтийский щит) // Вестник КНЦ РАН. 2016. № 3 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/paleoproterozoyskie-laplandsko-kolskiy-i-svekonen-skiy-orogeny-baltiyskiy-schit>.
2. Белоусов В. В., Павленкова Н. И. Типы земной коры Европы и Северной Атлантики // Геотектоника. 1989. № 3. С. 3–14.
3. Бортников Н. С., Волков А. В., Галямов А. Л., Викентьев И. В., Аристов В. В., Лаломов А. В., Мурашов К. Ю. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97. DOI 10.7868/S0016777016020027. – EDN VTOUMD.
4. Галямов А. Л., Волков А. В., Лобанов К. В. Применение моделей глубинного строения земной коры, созданных на основе гравитационных данных спутника GOCE, для прогноза и поисков Pb–Zn месторождений в арктической зоне России // Исследование Земли из космоса. 2021. № 4. С. 15–27. DOI 10.31857/S0205961421040035. – EDN ZRWWIG.

5. Галямов А. Л., Волков А. В., Лобанов К. В. Литосферный контроль полиметаллических месторождений в складчатом обрамлении Сибирской платформы // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 188–193. DOI 10.31857/S2686739722600709. – EDN ZTMZRU.
6. Галямов А. Л., Волков А. В., Лобанов К. В., Мурашов К. Ю. Строение земной коры по гравитационным данным спутника GOCE и закономерности размещения полиметаллических месторождений в обрамлении сибирской и Восточно-Европейской платформ // Исследование Земли из космоса. 2023. № 1. С. 3–23. DOI 10.31857/S0205961423010049. – EDN MLTXIF.
7. Горжевский Д. И., Макеева И. Т. Стратиформные месторождения цветных металлов : (Условия локализации и происхождение стратиформных месторождений свинца, цинка и меди). М. Изд-во: ВИНТИ, 1982. 167 с.
8. Дергачев А. Л., Еремин Н. И. Соотношение вулканогенного колчеданного и стратиформного свинцово-цинкового оруденения в истории Земли // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2008. № 4. С. 26–34. EDN JVAPUT.
9. Донец А. И., Конкин В. Д. Геолого-промышленные типы и региональные геологические особенности стратиформных свинцово-цинковых месторождений в карбонатных толщах // Отечественная геология. 2017. № 6. С. 31–39. EDN ZWQMHR.
10. Лучицкая М. В. Гранитоидный магматизм и становление континентальной коры северного обрамления Тихого океана в мезозое-кайнозое // Труды ФНС ГИ КНЦ РАН. 2014. № 607. С. 1–360. EDN XRALJB.
11. Павлов Д. И., Галямов А. Л. Геологические соотношения стратиформного свинцово-цинкового оруденения и нефтепродуцирующих толщ (на примере Южного Верхоянья) // Литология и полезные ископаемые. 1988. № 3. С. 89–100. URL: <http://ginras.ru/library/papers.php?m=lip&p=0&l=30000>.
12. Ручкин Г. В. Стратиформные полиметаллические месторождения докембрия. М. Изд-во: Недра, 1984. 237 с. URL: <https://rusist.info/book/6041298>.
13. Ручкин Г. В., Донец А. И. Стратиформные свинцово-цинковые месторождения в карбонатных толщах. Серия: Модели месторождений благородных и цветных металлов. М-во природ. ресурсов Р.Ф. ЦНИГРИ. М. Изд-во: ЦНИГРИ, 2002. 123 с. URL: <https://rusist.info/book/513076>.
14. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / ред. В. И. Макаров. М. Изд-во: Научный мир, 2005. 400 с. URL: <http://www.gdirc.ru/files/libs/6.pdf>.
15. Трифонов В. Г. Неотектоника подвижных поясов // Труды ФНС ГИ КНЦ РАН. 2017. № 614. С. 1–180. EDN RTGVPV.
16. Artemieva I. M., Meissner R. Crustal thickness controlled by plate tectonics: A review of crust-mantle interaction processes illustrated by European examples // Tectonophysics. 2012. V. 530–531. P. 18–49. DOI 10.1016/j.tecto.2011.12.037. EDN PGPTQX.
17. Artemieva I. M., Shulgin A. Making and altering the crust: A global perspective on crustal structure and evolution // Earth and Planetary Science Letters. 2019. V. 512. P. 8–16. DOI 10.1016/j.epsl.2019.01.033. EDN MKCXGQ.
18. Blundell D., Arndt N., Cobbold P. R. & Heinrich C. Geodynamics and Ore deposit evolution in Europe // Special issue of Ore geology Reviews. 2005. No 27. Parts 1–3. IX. 349 p. Amsterdam: Elsevier B.V. ISBN 0 444 52233 6 / Ch. Moon // Geological Magazine. 2007. V. 144. No. 3. P. 604. DOI 10.1017/S0016756806002743. EDN HZKEHL.
19. Bradley R., Hacker, Kelemen P. B., Behn M. D. Continental Lower Crust // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2015. V. 43. P. 67–205. DOI:10.1146/annurev-earth-050212-124117.
20. Fountain D. M., Arculus R., Kay R.W. (Eds). Continental Lower Crust, Developments in Geotectonics. Elsevier. 1993. No 23. 485 p. URL: https://www.academia.edu/29386552/Continental_lower_crust.
21. Graciansky P. C., Roberts D. G., Tricart P. The Western Alps, from Rift to Passive Margin to Orogenic Belt: An Integrated Geoscience Overview. 2010. URL: <https://shop.elsevier.com/books/the-western-alps-from-rift-to-passive-margin-to-orogenic-belt/de-graciansky/978-0-444-53724-9>.
22. Groves D., Bierlein F. Geodynamic settings of mineral deposit systems // Journal of the Geological Society. 2007. V. 164(1). P. 19–30. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-065>.
23. Hasterok D., Halpin J., Collins A. S. et al. New maps of global geological provinces and tectonic plates // Earth-Science Reviews. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104069>.
24. Houseman G. A., Molnar P. Gravitational (Rayleigh–Taylor) instability of a layer with non-linear viscosity and convective thinning of continental lithosphere // Geophysical Journal International. 1997. V. 128. P. 125–150. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb04075.x>.
25. Huisman R. S., Podladchikov Y. Y., Cloetingh S. A. P. L. The Pannonian Basin: dynamic modelling of the transition from passive to active rifting // Stephan Mueller Special Publication Series. 2002. V. 3. P. 41–63. DOI:10.5194/SMSPS-3-41-2002.

26. Laske G., Masters G., Ma Z. Pasyanos M.E. Update on CRUST1.0-A 1-degree global model of Earth's crust. // *Geophys. Res. Abstr.* 2013. V. 15. EGU2013-2658. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA..15.2658L/abstract>.
27. Leach D. L., Sangster D. F., Kelley K. D., Large R. R., Garven G., Allen C. R., Gutzmer J., Walters S. Sediment-hosted lead-zinc deposits; a global perspective / in Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds. // *Economic Geology; one hundredth anniversary volume, 1905–2005*: Littleton, CO, Society of Economic Geologists. 2005. P. 561–607. DOI: <https://doi.org/10.5382/AV100.18>.
28. Map of undiscovered conventional oil and gas resources of the world. 2012. <https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/world-energy/?resource=conventional>.
29. Mo X. X., Hou Z. Q., Niu Y. L. et al. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet // *Lithos*. 2007. V. 96. P. 225–242. DOI: 10.1016/j.lithos.2006.10.005.
30. Perri F., Critelli S., Martin-Algarra A., Martm-Martm M., Perrone V., Mongelli G., Zattin M. Triassic redbeds in the Malaguide Complex (Betic Cordillera – Spain): Petrography, geochemistry and geodynamic implications. *Earth-Science Reviews*. 2013. V. 117. P. 1–28. DOI:10.1016/j.earscirev.2012.11.002.
31. Pirajno F. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems* // Springer science. 2009. 1250 pp. ISBN 978-1-4020-8612-0. – EDN SQMGED.
32. Reguzzoni M., Sampietro D. GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.* 2015. V. 35. P. 31–43. DOI: 10.1016/j.jag.2014.04.002.
33. Richards J. P. Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogeny: From subduction to collision // *Ore Geol. Rev.* 2015. V. 70. P. 323–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.11.009>.
34. Robertson A., Karamata S., Šarić K. Overview of ophiolites and related units in the Late Palaeozoic–Early Cenozoic magmatic and tectonic development of Tethys in the northern part of the Balkan region. *Lithos*, 2009. V. 108(1–4). P. 1–36. <https://doi.org/10.1016/J.LITHOS.2008.09.007>.
35. Schroll E. Alpine type Pb-Zn-deposits (APT) hosted by Triassic carbonates // In: Mao, J., Bierlein, F.P. (eds) *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2005. https://doi.org/10.1007/3-540-27946-6_46.
36. Tornos F., Inverno C., Casquet C., Mateus A., Ortiz G., Oliveira V. Metallogenic evolution of the Ossa Morena zone // *Journal of Iberian Geology*. 2004. V. 30. P. 143–180. DOI: <https://digital.csic.es/handle/10261/5514>.
37. Van Unen M., Matenco L., Nader F. H., Darnault R., Mandic O., Demir V. Kinematics of Foreland Vergent Crustal Accretion: Inferences From the Dinarides Evolution // *Tectonics*. 2019. V. 38. P. 49–76. DOI:10.1029/2018TC005066.
38. Velasco F., Herrero J., Yusta I., Alonso J. A., Seebold I., Leach D. L. Geology and Geochemistry of the Reocín Zinc-Lead Deposit, Basque-Cantabrian Basin, Northern Spain // *Economic Geology*. 2003. V. 98. P. 1371–1396. DOI: 10.2113/98.7.1371.
39. Ysbaa S., Haddouche O., Boutaleb A. et al. Mineralization and fluid inclusion characteristics of Pb-Zn-Fe-Ba (Cu, F, Sr) ore-deposits in northern east of Algeria // *Arab J Geosci.* 2021. V. 14. P. 957. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07281-2>.
40. Zhang H. F. Temporal and spatial distribution of Mesozoic mafic magmatism in the North China Craton and implications for secular lithospheric evolution // *Geological Society*. 2007. London. Sp Publ. V. 280. P. 35–54. DOI: 10.1144/SP280.2.
41. Zhou Z., Wen H., de Fourestier J., Qin C., Liu L. Sulphur and metal sources of polymetallic vein-type, sedimentary exhalative-type and Mississippi Valley-type Zn–Pb deposits along the southeast margin of the Yangtze Block // *Ore Geology Reviews*. 2022. V. 147. P. 104957. DOI:10.1016/j.oregeorev.2022.104957.