

УДК 553.411.071

## МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АНДСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОЯСА В ПЕРУ, В СВЕТЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

© 2021 г. Ю. С. Савчук<sup>а</sup> \*, А. В. Волков<sup>а</sup>, А. Л. Галямов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН),  
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: yurasavchuk@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.

После доработки 10.03.2021 г.

Принята к публикации 17.06.2021 г.

Перуанская часть Андского вулканического пояса (АВП) характеризуется значительной рудоносностью. Здесь разведаны Au–Ag эпитеpмальные, Cu–порфиpовые, скарновые, Fe-оксидные (IOCG-типа) и полиметаллические месторождения. Металлогения АВП определяется субдукционным процессом – поддвигом океанической плиты Наска под окраину Южно-Американского континента. Особенности металлогении АВП рассмотрены на основе результатов современных геофизических исследований литосферы с использованием данных спутника GOCE: гравитационного поля, поверхности Мохо, термального режима верхней мантии. Аномалия в линейном размещении рудных объектов на юго-востоке изученной территории АВП, по-видимому, обусловлена влиянием “горячей точки” на состав магматических образований и рудоносных растворов, а объекты IOCG-типа могут быть индикаторами таких обстановок.

Ключевые слова: Анды, Перу, IOCG-тип, эпитеpмальный, медно-порфиpовый, полиметаллический, Мохо, верхняя мантия

DOI: 10.31857/S0203030621050059

### ВВЕДЕНИЕ

Тихоокеанский рудный пояс [Смирнов, 1946] – чрезвычайно насыщенный рудными месторождениями блок земной коры. Ранее показана четкая корреляция металлогенической зональности от состояния недр всего этого пояса [Сидоров и др., 2018], а также детализация для Чилийского сегмента [Волков и др., 2020]. В последнем случае, практически линейный характер металлогенических поясов определяется равномерным распределением параметров погружающейся плиты Наска, что отмечалось Р. Силлитое [Sillitoe, 2003, 2010]. Но, если двигаться к северу, на Большой детальной карте рельефа дна Тихого океана (программа Google Earth Pro), в плите Наска выделяется Хребет Наска (Nazca Ridge), имеющий северо-восточную ориентировку, разделяющий Перуанский и Чилийский бассейны и упирающийся в Перуано-Чилийский желоб. Соответственно, на территории Перу здесь наблюдается аномальное нарушение линейности в размещении различных металлогенических поясов.

Для объяснения закономерностей размещения месторождений в перуанском отрезке АВП проведен анализ результатов современных гео-

физических исследований глубинного строения литосферы, с использованием данных спутника GOCE: гравитационного поля, поверхности Мохо, термального режима верхней мантии. Кроме того, в статье использованы личные наблюдения авторов, посетивших ряд рудных районов и месторождений в перуанском отрезке АВП, а также результаты анализа большого массива опубликованной информации по рудоносности этой территории.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Космические технологии крайне важны для металлогенического анализа, особенно удаленных, слабо освоенных территорий. Полученные космическим аппаратом GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) гравиметрические данные стимулировали развитие глобальных моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии, способствовавших пониманию металлогенической специализации рудных районов [Волков и др., 2020].

Для объяснения закономерностей размещения месторождений в перуанском отрезке АВП проведен анализ результатов современных геофизических исследований литосферы: гравитационного поля, мощности коры, поверхности Мохо, термального режима верхней мантии<sup>1</sup>. Новая модель CRUST1.0 определена сетью  $1 \times 1'$  и основана на базе данных о толщине земной коры по результатам сейсмических исследований. Модель земной коры унаследована из модели CRUST2.0<sup>2</sup> [Bassin et al., 2000]. Типы коры определялись в зависимости от возраста фундамента или тектонических условий [Bouman et al., 2015] и для каждой ячейки сети даны глубина границы Мохо, скорость сжатия и скорость сдвига, а также плотность для 8 слоев: воды, льда, трехслойного осадочного чехла и верхней, средней и нижней кристаллической коры. Данные осадочных слоев, в основном, соответствует модели [Laske, Masters, 1997].

Современные прогнозно-металлогенические построения на основе космических данных невозможны без составления ГИС-проекта, включающего картографический материал и глобальную базу данных месторождений стратегических металлов. При проведении пространственно-статистического ГИС-анализа применялись известные методические приемы, заложенные в аналитический аппарат ARCMAP, MAPINFO и других картографических математико-аналитических систем, а также разработанные авторами новые методические подходы.

### ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И МЕТАЛЛОГЕНИИ ПЕРУАНСКОГО ОТРЕЗКА АВП

Прибрежная территория Перу принадлежит к Андской вулcano-плутонической дуге активной континентальной окраины Южно-Американского континента, чем определяются основные особенности геологического строения [Хаин, 1971; Геологическая карта ..., 1979; Geologia del Peru, 1995]. В строении этой окраины выделяются продольные поднятия Восточной и Центральной Кордильеры, сложенные докембрийскими (верхнепротерозойскими) и нижнепалеозойскими метаморфитами, незначительно прорванные позднепалеозойскими и кайнозойскими гранитоидами. К палеозойским метаморфитам приурочены проявления золота, а к кайнозойским интрузиям месторождения олова. В Западной Кордильере докембрийско-нижнепалеозойское метаморфическое основание почти полностью перекрыто средними—кислыми вулканитами мезозоя—кайнозоя, в которых развиты месторождения сереб-

ра. В осевой части распространены гранитоидные интрузивы Андийского батолита (верхний мел—палеоген), с которыми ассоциируют крупнейшие медно-молибденовые и серебро-полиметаллические месторождения. В докембрийских метаморфитах и осадочных породах Береговой Кордильеры, прорванных средними и кислыми интрузиями мела—палеогена, размещаются месторождения железных руд.

На Металлогенической карте Перу<sup>3</sup> выделено 26 вытянутых в северо-западном направлении металлогенических поясов и зон, которые характеризуются приуроченностью к геологическим формациям определенного возраста и состава и иллюстрируют размещение основных рудных объектов. Эти пояса имеют линейный характер и их конфигурация в большей степени зависит от распространения конкретных геологических формаций. Согласно современным тектоническим концепциям их положение обусловлено особенностями субдукционного процесса на Андской активной окраине, а также геохимической специализацией вмещающих пород.

Для анализа особенностей размещения разнотипного оруденения в зависимости от глубинного строения территории, нами использованы результаты геологических исследований последних лет<sup>4</sup>, что позволило уточнить эту схему и в общем виде представить основные металлогенические пояса: железорудный (ЮСГ) пояс, площадь развития жильных золото-кварцевых и золото-сульфидно-кварцевых месторождения и проявлений, медно-порфиновый пояс, пояс эпитермальных золотых и полиметаллических месторождений (рис. 1).

Такой генерализованный подход дал возможность выявить осложнения в линейном характере традиционно выделяемых металлогенических поясов (см. рис. 1). Особенно это видно на примере месторождений ЮСГ-типа. В целом, все железорудные объекты Перу (кроме Тамбо-Гранде) концентрируются довольно компактно и совместно с другими проявлениями, в т.ч. мелкими жильными медными и медно-золотыми, входят в вытянутую непосредственно вдоль побережья область месторождений ЮСГ-типа. В нашем случае здесь обращает на себя внимание значительное по размерам ответвление в восточном направлении, где сравнительно далеко от береговой линии выявлены несколько месторождений железных руд — Ферробамба, Хиерро Апуримак и ряд проявлений.

<sup>3</sup> Metallogenic Map of Peru: Mining operations and Project. <http://www.ingemet.gob.pe/metallogenic>

<sup>4</sup> Peru: Cartera de Proyectos de Construcción de Mina [http://mineria.minem.gob.pe/proyectos\\_mineros/proyectos-de-construccion-de-mina](http://mineria.minem.gob.pe/proyectos_mineros/proyectos-de-construccion-de-mina)

<sup>1</sup> <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>

<sup>2</sup> <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>



Также к юго-востоку от этого ответвления предполагается изометричная область развития мелких золотых кварцево-жильно-прожилковых и золото-серебряных эпитермальных месторождений. Здесь в породах проявлены нарушения, входящие в региональные системы сдвигов, являющихся важными металлогеническими элементами. Например, сдвиговая система Инкапукуйо—Синча—Йюта, проходящая с юго-востока на северо-запад (Андская система), к ней приурочены золотые месторождения Санто-Доминго, Маурисио-Фабiano, также целый ряд медно-порфировых месторождений — Токепала, Куйавеко, Куахоне, Лос Калатос, Чапи, Серро-Верде, Зафраналь.

Аномалии в линейном размещении различных рудных объектов в юго-восточном Перу, а также приуроченность здесь золотых и ряда медно-порфировых месторождений к региональным сдвиговым системам приводят к выводу о недостаточности учета только формационных данных и о значительной роли глубинных факторов в металлогеническом облике этого блока земной коры. Роль этих факторов мы попытались рассмотреть ниже.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ ПЕРУАНСКОГО ОТРЕЗКА АВП

Большая часть Тихоокеанского побережья Перу представляет собой магматическую дугу, связанную с субдукцией океанической плиты Наска под Южно-Американский континент. Особенности морфологии этой плиты выражаются в ее рельефе. Так, на схеме рельефа морского дна (программа Google Earth Pro) четко видны основные структуры: Перуано-Чилийский желоб и Хребет Наска, разделяющий две океанические котловины — Перуанскую и Чилийскую (см. рис. 1). Представления о строении земной коры и состоянии верхней мантии в пределах плиты Наска и Тихоокеанского побережья Перу, основанные на материалах и базах проекта<sup>5</sup> (рис. 2а—д), позволяют понять и объяснить основные особенности металлогении территории Перу.

Гравиметрические данные (см. рис. 2а) в океанической части показывают самые высокие значения, хребет Наска характеризуется несколько пониженными данными, континентальная часть — при общем линейном характере постепенного убывания, самый минимум на крайнем юго-востоке.

Глубина залегания Мохо (см. рис. 2б) минимальная в океане, в районе хребта Наска небольшое увеличение глубины, далее закономерное

увеличение глубин в сторону континента, с максимальными глубинами под обнаженной частью континента, с небольшим расширением области максимальных глубин к юго-востоку территории.

Мощность коры (см. рис. 2в): в океане — самые низкие значения, под хребтом Наска небольшое увеличение мощности, северо-восточнее желоба постепенное увеличение мощности до максимальных значений под обнаженной частью, с расширением области максимальных значений к юго-востоку.

Температура мантии (см. рис. 2г): наиболее разогретая мантия в широкой полосе вокруг и к северу от хребта, эта разогретая область распространяется к юго-востоку под континент, достигая там максимальных значений, и более холодная на значительном удалении от этих областей.

Плотность мантии (см. рис. 2д): области минимальных значений повторяют контур наиболее высоких температур мантии.

Таким образом, океаническая область характеризуется высокими значениями гравиметрических данных, высоким залеганием Мохо, наименьшей мощностью коры, сравнительно холодной и плотной мантией. Такие характеристики обычны для океанической коры.

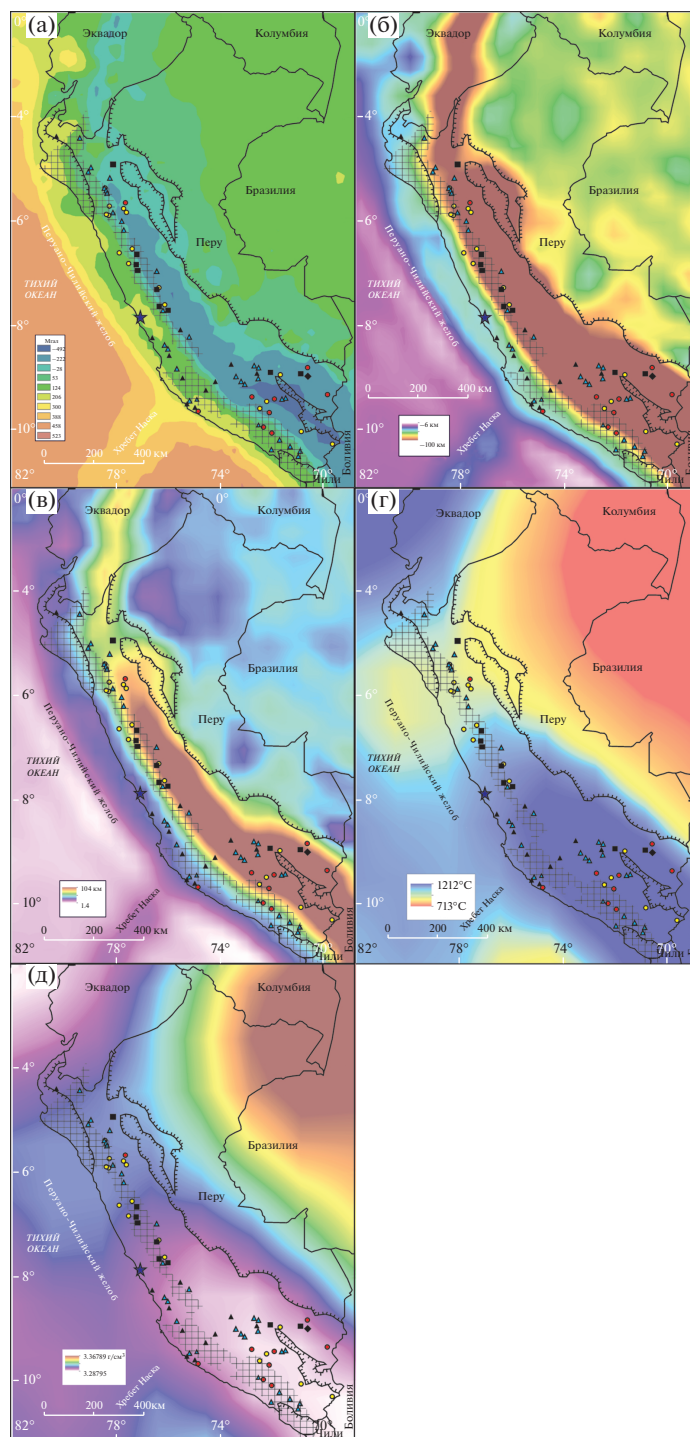
Хребет Наска, по сравнению с океаном, отличается пониженными значениями гравиметрических данных, увеличением глубины залегания Мохо, небольшим увеличением мощности коры, наиболее разогретой мантией, с ее минимальной плотностью.

Для континентальной части характерны: линейный характер изолиний, при постепенном понижении гравиметрических значений, максимальной глубине залегания Мохо, увеличении мощности коры. В юго-восточной части Перу заметно выделяется расширение области с самыми низкими значениями гравиметрии, наибольшей глубиной залегания Мохо, максимальной мощностью коры, а для мантии здесь характерно резкое повышение температуры до максимальных значений и минимальная плотность.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Размещение железорудных, медно-порфировых, медных скарновых, а также эпитермальных золото-серебряных и полиметаллических месторождений в перуанском отрезке АВП четко подчиняется строению геофизических полей: полоса их развития фактически повторяет полосу с низкими значениями гравитационного поля, увеличенной глубиной залегания Мохо и максимальной мощностью коры. Также рудные объекты больше тяготеют к зоне с максимальными значениями температуры и минимальными плотностями верхней мантии.

<sup>5</sup> <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>



**Рис. 2.** Геофизические данные территории Перу.

а – гравитационное поле, мГал (использована “Глобальная модель гравитационного поля Земли масштаба 1 : 5000 000”); б–д – на основе материалов и базы данных проекта<sup>6</sup>: б – глубина залегания Мохо в км, в – мощность коры в км, г – температура верхней мантии на глубине 60 км, д – плотность верхней мантии на глубине 60 км.

Распространение месторождений железа **IOCG-типа** в Андском поясе и особенности их строения рассмотрены Р. Силлитое, П. Вильям-

сом, М. Бартоном и другими [Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005]. В Перу эти месторождения распространены в прибрежной полосе, где сравнительно высокие значения гравитационного поля, небольшая глубина залегания Мохо и минималь-

<sup>6</sup> <https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>

ная мощность коры. Особенности состояния верхней мантии не так важны, хотя несколько железорудных месторождений приурочены к области с максимальными значениями температуры и, соответственно, минимальной плотности. В прибрежной полосе также распространены многочисленные жильные медные и железорудные объекты — Пампа де Понго (Fe), Мина Хуста (Cu), Тинко (Fe), Локони-Монтерросас (Cu), Рио Секо (Fe), Санта-Барбара (Cu), Рубини (Cu), Синко-Чинча (Cu), трассирующиеся на одной линии, выраженной серией сдвигов. Примечательным является позиция золотого месторождения Сан-Франциско, также приуроченного к этой сдвиговой зоне.

Де Халлер с соавторами [De Haller et al., 2006], изучавший месторождение Рауль-Кондестабль, прямо указывает на образование месторождений IOCG-типа на конвергентных границах плит, а в Перу они приурочены к вулканической дуге, активность которой, возможно, началась уже в поздней юре и продолжалась вплоть до эоцена. Минерализация залегает в ядре дацитово-андезитового вулканического сооружения, а результаты исследований по изотопии цирконов и Рb указывают что вмещающие породы образованы в результате частичного плавления обогащенной верхней мантии.

Таким образом, все исследователи согласны с гидротермальным происхождением IOCG-типа месторождений, но источники металлов и флюидов остаются спорными. Шимин Шу [Zhimin Zhu, 2016] рассмотрел особенности распределения золота в таких месторождениях и отметил положительную корреляцию между содержаниями меди и золота, хотя отношения Cu/Au в различных месторождениях IOCG существенно различаются в диапазоне 0.7–64. Также отмечается, что вмещающие породы могут быть основным источником золота, а охлаждение, взаимодействие флюида и пород, а также смешивание флюидов является основным контролем осаждения золота и меди в месторождениях IOCG-типа.

Значительный интерес представляют золотые месторождения Перу, среди которых выделяются несколько генетических типов. Так, изучение строения и состава россыпного золота в северной части Перу [Мильтон, 2013] указывает на то, что золото принесено из разных коренных источников, большинство из которых относятся к кварц-золоторудной формации (высокопробное золото), а некоторая часть — к эпитермальным месторождениям (средне- и низкопробное золото). Медистое золото может быть связано с золото-медно-порфирированными месторождениями, которые характерны для АВП.

**Золоторудные прожилково-жильные** месторождения Береговых и Западных Кордильер разме-

щаются в разнообразных породах, например, для проявления Сан-Франциско вмещающие представлены вулканогенно-осадочными породами, потоками порфирированных лав и диабазами, которые прорваны гранитоидным массивом. Жильные тела мелкого месторождения Фабиано-Маурисио расположены в пределах Берегового батолита, сложенного габбро-диоритами, тоналитами и монцогранитами, пересеченного дайками аплитов, микродиоритов и роговообманковых диоритов. Местами наблюдается маломощный покров плиоценовых туфов дацитов и риолитов. В целом, изометричная область распространения золотых месторождений, располагающаяся на юго-востоке Перу, характеризуется аномальными низкими и переходными к более высоким значениям гравитационного поля, сравнительно большой глубиной залегания Мохо и максимальной и средней мощностями коры. Здесь также максимальны значения температуры и минимальные плотности верхней мантии. Основную роль в рудолокализации имеют нарушения, входящие в региональную систему сдвига Инкапукуйо—Синча—Йюта, проходящего с юго-востока на северо-запад (Андская система), и трещины от северо-восточного до северо-северо-восточного направлений. К этой региональной сдвиговой системе нарушений приурочен также целый ряд медно-порфирированных месторождений — Куейавеко, Куахоне, Лос Калатос, Дон Хавьер, Зафраналь и золотое месторождение Санто-Доминго.

**Медно-порфирированные** месторождения в Западной Кордильере связаны с верхнемеловыми и палеогеновыми интрузивами, а на месторождении Токепала руды содержатся в трубчатом крутопадающем теле брекчий в теле кварцевых порфиров. Скарновые медные месторождения Восточной Кордильеры локализируются в меловых известняках, на контактах с гранитоидами палеогена. В целом, для медных месторождений устанавливается четкая связь с магматизмом.

Жильные гидротермальные и скарновые месторождения **свинца и цинка**, развитые в мезозойских карбонатных породах и вулканитах, ассоциируются с кайнозойскими интрузиями, а **эпитермальные золото-серебряные месторождения** располагаются в миоценовых андезитах, их туфах и туфобрекчиях и локализируются в зонах трещиноватости на пересечении продольных и поперечных разрывных нарушений. С. Видал и Д. Нобль [Vidal, Noble, 1993] отмечают, что в регионе Западных Кордильер и Альтиплано, к востоку от Серро-де-Паско, развита система разломов северо-восточного простирания. Эта система опознается по ряду косвенных свидетельств, таких как изгибы складок, грабен- и горстовый рельеф, а также расположение штоков, вулканов и прожилковых скоплений серебряных и полиметаллических руд. Месторождения барита и мас-



сивных сульфидов среднемиоценового возраста активно разрабатываются в горнодобывающем районе Санта-Крус де Кочачакра, в 50 км к востоку от Лимы [Vidal, 1987]. Оруденение приурочено к подводным пирокластическим потокам, куполам кислой лавы и гидротермальным жерл, которые перекрыты известковыми отложениями. Обосновывается связь месторождений с миоценовым вулканизмом [Silbermann, Noble, 1977; Vidal et al., 1984].

Отдельную группу представляют золотые месторождения в северо-восточных и юго-восточных областях Перу, отличающиеся от развитых рядом эпitherмальных объектов. Одной из таких площадей является провинция Патаз в Восточной Кордильере. Здесь развиты **золотоносные кварц-сульфидные жилы**, из которых за последние 100 лет на более чем 16 месторождениях было добыто 6 млн унций золота и по данным И. Аберлина [Haeblerlin, 2002] ресурсы золота здесь оцениваются в 40 млн унций для всего минерализованного пояса. Характерна следующая ассоциация металлов: Au, Ag, As, Fe, Pb, Zn,  $\pm$ Cu,  $\pm$ Sb,  $\pm$ (Bi-Te-W) и два рудных парагенезиса, богатых сульфидами, первый сложен молочным кварцем, пиритом, арсенопиритом и анкеритом, а второй — серым микрозернистым кварцем, галенитом, сфалеритом, халькопиритом, Sb-сульфосолями, электрумом и самородным золотом.

Эти месторождения жильного типа, относимые к классу орогенных (или мезотермальных), расположены вдоль западной и восточной окраины батолита Патаз (возраст интрузии по U/Pb,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ : 329–328 млн лет) и реже в пределах вмещающих метаосадочных пород от верхнего протерозоя до ордовика. Возраст золотой минерализации как средний карбон определен по мусковиту из жил в 314–312 млн лет по  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . Такая разница в датировках батолита и золотого оруденения позволила исключить их генетическую связь и интерпретирована как использование рудоносными растворами ослабленных зон вдоль контактов интрузива [Haeblerlin, 2002]. Вероятно, эта золото-сульфидная минерализация относится к ранним стадиям развития территории, в отличие от остальных объектов кайнозойского возраста.

Таким образом, среди рассмотренных месторождений по генезису выделяются две крупные группы — непосредственно связанные с интрузивным магматизмом и гидротермальные в региональных сдвиговых зонах, для которых также подразумевается связь с магматическими продуктами.

В целом, геологическое строение и металлогения рассматриваемой территории определяются ее положением в пределах Андской вулканоплутонической дуги на активной окраине Южно-

Американского континента. Особенности геодинамической обстановки формирования крупных минеральных месторождений в более южном Центрально-Андском районе (22°–34° ю.ш.) рассмотрели С.М. Кей и К. Мподозис [Kay, Mpodosis, 2001]. По их данным, главным для магматизма и рудообразования является флюидогенерация из постепенно выполаживающейся и холодной субдуцирующей океанической плиты. С этим процессом связана гидратация мантии и нижней коры над субдуцирующей плитой. Минералообразующие флюиды высвобождаются по мере утолщения коры и ее дегидратации, а критическими событиями при этом является процесс разрушения амфибол-содержащих комплексов в коровых зонах плавления.

Регионы размещения месторождений железа IOCG-типа разнообразны в тектоническом отношении, но выявлена [Hitzman et al., 1992; Иогансон, 2015] их приуроченность к зонам растяжения в активных континентальных окраинах. Варианты модели и обстановки образования месторождений железа IOCG-типа и ряда сопутствующих элементов рассмотрены М.Д. Бартоном [Barton, 2014], который отметил множественность источников рудообразующих флюидов — магматический, верхнекоровый, метаморфический и т.д. В любом случае отмечена локализация месторождений в зонах региональных глубинных разломов, по которым осуществлялся подток флюидов. Г. Корбетт [Corbett, 2009] рассмотрел зональность рудных месторождений в активной окраине: ближе к желобу располагаются золото-серебряные месторождения с высоким содержанием сульфидов (high sulphidation epithermal), затем в “осевой” части вулканоплутонической дуги медно-порфиоровые и полиметаллические серебро- и золотосодержащие, а наиболее удалены эпitherмальные низкосульфидные проявления (low sulphidation epithermal). Модель медно-порфиоровых с золотом месторождений является одной из наиболее хорошо разработанных [Sillitoe, 2000; Richards, 2003; Cooke et al., 2004; Seedorff et al., 2005] и обосновывается связью этих месторождений с эпitherмальными золото-серебряными и полиметаллическими объектами [Hedenquist et al., 2000]. Наглядно продемонстрировали связь различного эпitherмального и медно-порфиорового оруденения Е. Ермолин с соавторами [Ermolin et al., 2018] в своем докладе на EMW в 2018 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее информативными при анализе металлогении региона являются геофизические данные по состоянию гравитационного поля, глубине залегания Мохо и мощности коры. На геофизических схемах выделяется своей

повышенной рудоносностью изометричная область на юго-востоке Перу с аномальными значениями температуры и плотности верхней мантии. Эти аномальные характеристики в районе хребта Наска и юго-восточной части Перу можно объяснить влиянием “горячей точки” в мантии и ее миграцией.

В целом, металлогения прибрежной территории Перу обусловлена взаимодействием нескольких факторов: 1) субдукция океанической коры плиты Наска под континентальную окраину, обеспечившая генерализованно-линейный (параллельно глубоководному желобу) характер металлогенических зон; 2) влияние “горячей точки” на состав магматитов и рудоносных растворов, что определило расширение металлогенических зон на юго-востоке и аномальное ответвление к востоку области распространения железорудных месторождений. Вероятно, с этим же фактором связана также изометричная площадь развития небольших прожилково- жильных золото-сульфидно-кварцевых проявлений на юго-востоке Перу; 3) определяющая роль серии продольных (северо-западных и северо-северо-западных) сдвиговых структур на размещение многих золотых, золото-серебряных, полиметаллических, железорудных и медных объектов, что позволяет выделять своеобразные “тренды”; 4) при размещении рудной минерализации, особенно удаленной эпиптермальной, значителен фактор поперечных (северо-восточных) нарушений.

Судя по косому расположению основных сдвиговых зон, ориентированных в северо-северо-западном направлении: первая прослеживается от месторождения Синко-Чинча (Cu) до проявления Сан-Франциско (Au); вторая от месторождения Хиерро Апуримак (Fe) до месторождения Токепала (Cu), при подвиге плиты Наска под Южно-Американский континент наблюдается правая сдвиговая компонента значительной амплитуды и, таким образом, взаимодействие плит имеет транспрессионный характер. Таким образом, прослеживанием этих сдвиговых зон выделяются т. н. рудные тренды, причем тип минерализации в конкретной секции тренда, по-видимому, определяется глубинными факторами, особенно глубиной залегания Мохо, мощностью коры, температурой и плотностью мантии.

Объекты IOCG-типа могут являться индикаторами, по распространению которых удобнее всего выявлять региональные аномалии в размещении рудных объектов, а также использовать

для реставрации палеогеодинамических обстановок в пределах окраинно-континентальных вулканоплутонических поясов различного возраста — подвиг океанических хребтов, обусловленных функционированием “горячих точек”. Также важно трассирование транспрессионных сдвиговых зон, которые контролируют размещение гидротермальных прожилково- жильных рудных месторождений.

Приведенные исследования, с применением данных со спутников наиболее актуальны для территории Северо-Востока России, где в обстановке активной континентальной окраины сформирован Охотско-Чукотский вулканический пояс. Ранее варианты использования при прогнозе эпиптермальных месторождений геофизических методов для этих территорий рассмотрели Е.Ю. Ермолин, О. Ингеров, А.А. Савичев<sup>7</sup>, космоструктурных схем — Ю.С. Ананьев, В.Г. Житков, А.А. Поцелуев [2019], хотя здесь наблюдаются определенные различия с эталонными объектами в типе, составе и геохимических характеристиках сопутствующих изменений [Волков и др., 2015].

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы ИГЕМ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Поцелуев А.А.* Прогнозно-поисковая модель эпиптермальных Au–Ag месторождений кислотно-сульфатного типа по данным дешифрирования современных космических снимков (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 5. С. 84–92.

*Волков А.В., Савва Н.Е., Сидоров А.А., Колова Е.Е., Чижова И.А., Алексеев В.Ю.* Эпиптермальное золото-серебряное месторождение Аган и перспективы выявления минерализации высокосульфидизированного типа на Северо-Востоке России // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 1. С. 25–47.

*Волков А.В., Галямов А.Л., Савчук Ю.С.* Применение моделей глубинного строения Земной коры и верхней мантии, созданных на основе гравитационных данных спутника GOCE, в металлогеническом анализе // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 41–50.

Геологическая карта Южной Америки. Масштаб 1 : 5000000 / Гл. ред. Н.А. Беляевский. М.: *ВНИИ Зарубежгеология*, 1979.

<sup>7</sup> <http://geophysmethod.ru/images/Gold-Physic-GeoModel>



- Йогансон А.К.* К проблеме закономерностей формирования протерозойских железоокисно-редкоземельных (с медью, ураном, золотом) месторождений типа Олимпик-Дэм – Баян-Обо // Региональная геология и металлогения. 2015. № 64. С. 101–113.
- Ермолин Е.Ю., Ингеров О., Савичев А.А.* Физико-геологическая модель эпitherмального Au–Ag месторождения (Чукотка) на основе комплекса геофизических и геохимических исследований. <http://geophysmeth.od.ru/images/Gold-Physic-GeoModel.pdf> (22.12.2020).
- Мильтон В.* Особенности вещественного состава россыпного золота реки Мараньон (Перу) // Записки Горного института. СПб. 2013. Т. 200. С. 172–178.
- Сидоров А.А., Волков А.В., Галямов А.Л., Чижова И.А.* Вопросы глобальной металлогенической зональности Тихоокеанского рудного пояса // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2018. № 2. С. 3–17.
- Смирнов С.С.* О Тихоокеанском рудном поясе // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1946. № 2. С. 13–28.
- Хаун В. Е.* Региональная геотектоника. Северная и Южная Америка, Антарктида и Африка. М.: Недра, 1971. 548 с.
- Barton M.D.* Iron Oxide (–Cu–Au–REE–P–Ag–U–Co) systems. Tucson, AZ, USA: University of Arizona, 2014. P. 515–541. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01123>
- Bassin C., Laske G., Masters G.* The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America // EOS Trans AGU. 2000. V. 81. № 48. F897. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>
- Bouman J., Ebbin J., Meekes S. et al.* GOCE gravity gradient data for lithospheric modeling // Intern. J. Appl. Earth Observ. Geoinf. 2015. V. 35. P. 16–30.
- Cooke D.R., Wilson A.J., Davies A.G.S.* Characteristics and genesis of porphyry copper-gold deposits. Tasmania: University of Tasmania, Centre for Ore Deposit Research Special Publication, 2004. № 5. P. 17–34.
- Corbett G.* Anatomy of porphyry-related Au–Cu–Ag–Mo mineralised systems: some exploration implications // Australian Institute of Geoscientists North Queensland Exploration Conference // AIG Bull. 2009. V. 49. P. 36–46.
- De Haller A., Fontboté L.* The Raul-Condostable iron oxide copper-gold deposit, central coast of Peru: Ore and related hydrothermal alteration, sulfur isotopes, and thermodynamic constraints // Econ. Geol. 2009. V. 104. № 3. P. 365–384.
- Ermolin E., Ingerov O., Savichev A.A., Smirnov M.* The physical-geological model of the LS-epithermal Au–Ag deposit (Chukotka) on the result of AMT data integration // EMIW. Presentation. 2018. 75 p.
- Geologia del Peru // Instituto Geologico Minero y Metalurgico. Boletín № 55. Lima–Peru, 1995. 177 p.
- Haerberlin Y.* Geological and structural setting, age, and geochemistry of the orogenic gold deposits at the Patate Province, eastern Andean Cordillera, Peru // Genève. Terre & Environnement. 2002. V. 36. 182 p.
- Hedenquist J.W., Arribas A.R., Gonzalez-Urien E.* Exploration for Epithermal Gold Deposits // SEG Reviews. 2002. V. 13. P. 245–277.
- Hitzman M.W., Oreskes N., Einaudi M.T.* Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron-oxide (Cu–U–Au–REE) deposits // Precambrian Res. 1992. 58. P. 241–287.
- Kay S.M., Mpodozis C.* Central Andean Ore Deposits Linked to Evolving Shallow Subduction Systems and Thickening Crust // GSA Today. 2001. P. 4–9.
- Laske G., Masters G. A.* Global Digital Map of Sediment Thickness // EOS Trans. AGU. 1997. V. 78. F483.
- Metallogenic Map of Peru: Mining operations and Projects. URL: <http://www.ingemet.gob.pe/metallogenic> (03.12.2020).
- Peru: Cartera de Proyectos de Construcción de Mina. URL: [http://mineria.minem.gob.pe/proyectos\\_mineros/proyectos-de-construccion-de-mina](http://mineria.minem.gob.pe/proyectos_mineros/proyectos-de-construccion-de-mina) (21.08.2020).
- Richards J.* Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu–(Mo–Au) deposit formation // Econ. Geol. 2003. V. 98. P. 1515–1533.
- Seedorff E., Dilles J.H., Proffett J.M., Einaud M.T., Zurcher L., Stavast W.J.A., Johnson D.A., Barton M.D.* Porphyry deposits: characteristics and origin of hypogene features // Econ. Geol. One Hundredth Anniversary. 2005. P. 251–298.
- Silbermann M.L., Noble D.C.* Age of igneous activity and mineralization, Cerro de Pasco, Peru // Econ. Geol. 1977. V. 72. P. 925–930.
- Sillitoe R.H.* Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery // Reviews in Economic Geology. 2000. V. 13. P. 315–345.
- Sillitoe R.H.* Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view // Miner. Deposita. 2003. V. 38. P. 787–812.
- Sillitoe R.H.* Porphyry Copper Systems // Econ. Geol. 2010. V. 105. P. 3–41.
- Vidal C.E.* Kuroko-type deposits in the middle Cretaceous marginal basin of Central Peru // Econ. Geol. 1987. V. 82. P. 1409–1430.
- Vidal C.E., Maya O., Noble D.C., McKee E.H.* Sobre la evolución de soluciones hidrotermales desde el centro volcánico Marcapunta en Colquijirca-Pasco // Soc. Geol. Peru. 1984. V. 10. 14 p.
- Williams P. J., Barton M.D., Johnson D.A., Fontboté L., Haller A., DE, Marc G., Oliver N.H.S., Marschik R.* Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Modes of Origin // Econ. Geol. 100th Anniversary Volume. 2005. P. 371–405.
- Zhimin Zhu.* Gold in iron oxide copper–gold deposits // Ore Geol. Rev. 2016. № 72. P. 37–42.

## **Metallogenic Features of The Andean Volcanic Belt in Peru, in the Light of Satellite Data on the Deep Structure of the Earth's Crust and Upper Mantle**

**Yu. S. Savchuk<sup>1, \*</sup>, A. V. Volkov<sup>1</sup>, and A. L. Galyamov<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry,  
Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia*

*\*e-mail: yurasavchuk@yandex.ru*

The Peruvian part of the Andean volcanic belt (AVB) is characterized by significant ore content. There are explored Au–Ag epithermal, Cu-porphyry, skarn, Fe-oxide (IOCG-type) and polymetallic deposits. Metallogeny of AVB is determined by the subduction process – the underthrusting of the Nazca oceanic plate under the margin of the South American continent. The features of metallogeny of AVB are considered on the basis of the results of modern geophysical studies of the lithosphere using data from the GOCE satellite: the gravity field, the Moho surface, and the thermal regime of the upper mantle. The anomaly in the linear distribution of ore objects in the southeast of the studied area of the AVB is apparently due to the influence of the “hot spot” on the composition of magmatic formations and ore-bearing solutions, and IOCG-type objects can be indicators of such environments.

*Keywords:* Andes, Peru, IOCG-type, epithermal, copper-porphyry, polymetallic, Moho, upper mantle