Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН, 2018, № 1, с. 3–19

ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.441.571.65

ПЕРСПЕКТИВЫ ОТКРЫТИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕДИ ТИПА «МАНТО» НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ И В ДРУГИХ РЕГИОНАХ РОССИИ

А. В. Волков

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва
E-mail: tma2105@mail.ru

Обсуждаются геолого-структурные и минералого-геохимические особенности месторождений Cu (Ag) типа «манто» (МТМ) – третьего основного источника Cu в Чили. Руды, кроме Cu, содержат первые десятки граммов на 1 т Ag. МТМ локализованы в юрских и нижнемеловых вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах, распространенных вдоль прибрежных Кордильер на севере Чили. Типичные МТМ обычно представлены слоистыми или стратиформными рудными залежами, но иногда включают жилы, рудные брекчии и штокверки. Обычно богатая Cu минерализация замещает амигдулы в стратиформных лавовых потоках. Парагенезис первичных руд довольно простой и представлен халькозином, борнитом, халькопиритом, пиритом и гематитом. На МТМ широко проявлены коры выветривания и зона вторичного обогащения руд (хризоколла, атакамит), которые в основном извлекают методом кучного выщелачивания. Примечательная особенность этих месторождений – практически полное отсутствие в рудных телах кварца. Околорудные изменения представлены пропилитизацией. Минерализация типа «манто» отложилась в эпитермальном низкотемпературном диапазоне. Рассмотрены наиболее важные характеристики (индикаторные факторы формирования) МТМ. Показаны перспективы открытия МТМ на территории России.

***Ключевые слова*: Кордильеры, Чили, месторождение, медь, серебро, «манто», вулканический пояс, андезит, лава, генезис, поисковая модель.**

ВВЕДЕНИЕ

Богатые месторождений Cu типа «манто» с переменным количеством Ag в качестве побочного продукта локализованы в юрских и нижнемеловых вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах на высоте 800–1000 м над океаном, недалеко от берегового уступа – уникальная особенность прибрежных Кордильер на севере Чили (рис. 1, рис. 2,*а*). Подобные месторождения распространены и в Северной Америке, преимущественно на северо-западе Канады, севере Мичиганского района США и Аляске, где их называют «red-bed» типом (Cabral, Beaudoin, 2007) и сравнительно недавно были обнаружены в Иране (Konari et al., 2013; Maghfour et al., 2017).

Термин «манто» происходит от испанского слова «мантия» или «плащ». Большинство МТМ залегают в андезитовых и базальтовых породах, преобладающих в вулканогенно-осадочных толщах мезозойского и кайнозойского возраста (Чили, Иран), и значительно более древних породах от протерозойского до триасового возраста (Северная Америка). К сожалению, в настоящее время рудники, производящие заметное количество Cu и Ag как побочный продукт, действуют только на севере Чили. Следовательно, детальная геологическая информация накоплена в основном на чилийских МТМ (табл. 1). Несмотря на это, большинство исследований МТМ ограничены только местной металлогенией. Поэтому генетическая модель МТМ до сих пор остается под вопросом, по сравнению с чилийскими Cu-порфировыми месторождениями. На рис. 2. показаны характерные МТМ в рудном районе Мичилла, северное Чили.

В настоящем исследовании предпринята попытка предложить на основе имеющихся опубликованных данных и личных впечатлений автора от посещения нескольких МТМ в рай-

© Волков А. В., 2018

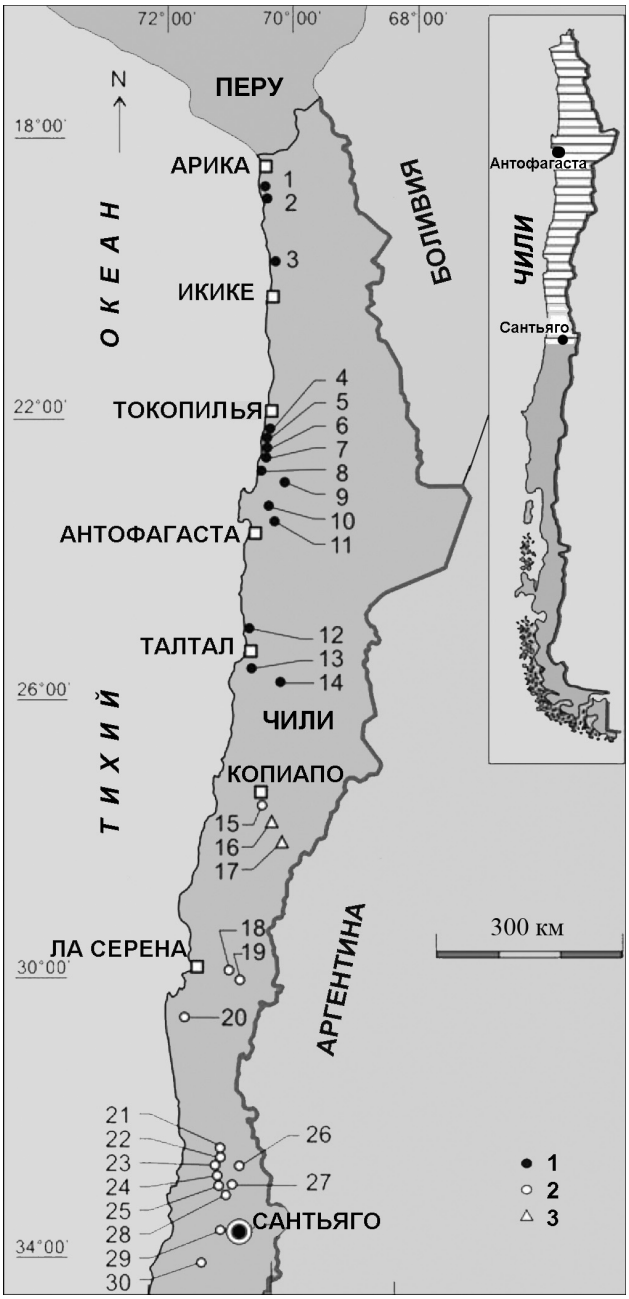

Рис. 1. Пространственное положение основных МТМ на севере Чили (Kojima et al., 2009). Рудные районы и месторождения: 1–3 – Арика-Икикейский район: 1 – Навидад, 2 – Каса Гранде-Аргола, 3 – Мезилон дель Норте; 4–14 – Токопилья-Талталский район: 4 – Буэна Эсперансе-Гимена, 5 – Мантос де Малакоф, 6 – Мантос-де-ла-Луна, 7 – Мантос дель Пасифико, 8 – Мичилла, 9 – Еленита-Ренкорет, 10 – Иван-Царь, 11 – Мантос Бланкос, 12 – Санто Доминго, 13 – Лас Луцес, 14 – Алтамира; 15–17 – район Копиапо: 15 – Окоита-Пабелон, 16 – Жарден, 17 – Амоланас; 18–20 – район Ла Серена: 18 – Талкуна, 19 – Уцуми, 20 – Пунитаку; 21–30 – район Сантьяго: 21 – Ла Торре, 22 – Пеумо-Руса, 23 – Гуайякан, 24 – Эль Сольдадо, 25 – Вета Негро, 26 – Серро-Негро, 27 – Мантос де Катему, 28 – Ель Саладо, 29 – Ла Агуира, 30 – Мелипилла. Возраст МТМ: 1 – юрский, 2 – раннемеловой, 3 – эоценовый

Fig. 1. Spatial distribution of basic MTD in Northern Chile (Kojima et al., 2009). Ore districts and deposits: 1–3 – Arica-Iquique district: 1 – Navidad, 2 – Casa Grande-Argolla, 3 – Mejillones del Norte; 4–14 – Tocopilla-Taltal district: 4 – Buena Esperanza-Gimena, 5 – Mantos de Malakoff, 6 – Mantos de La Luna, 7 – Mantos del Pacífico, 8 – Michilla, 9 – Elenita-Rencoret, 10 – Ivan-Zar, 11 – Mantos Blancos, 12 – Santo Domingo, 13 – Las Luces, 14 – Altamira; 15–17 – Copiapo district: 15 – Okoita-Pabellon, 16 – Jardin, 17 – Amolanas; 18–20 – La Serena district: 18 – Talcuna, 19 – Ushumi, 20 – Punitaqui; 21–30 – Santiago district: 21 – La Torre, 22 – Peumo-Rusa, 23 – Guayacan, 24 – El Soldado, 25 – Veta Negro, 26 – Cerro Negro, 27 – Mantos de Catemu, 28 – El Salado, 29 – Lo Aguirre, 30 – Melipilla. MTD age: 1 – Jurassic, 2 – Cretaceous, 3 – Lower Tertiary

оне г. Антофагаста, северного Чили прогнозно-поисковую модель этих месторождений и оценить перспективы их выявлений в вулканических поясах России.

КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Южная Америка имеет долгую историю добычи металлов из вулканогенных месторождений. Во многом история Южной Америки – это история развития горнодобывающей промышленности. Само открытие континента связано с поисками новых источников Au и Ag испанцами и португальцами. Колумб нашел немного Au на островах в Карибском бассейне, а затем испанские конкистадоры в Мексике и Андах обнаружили значительно больше Au и невероятно богатые залежи Ag. Многие из месторождений уже давно (до 1492 г.) разрабатывало коренное население, в частности, инки, которые имели самые передовые технологии горного дела и металлургии в доколумбовой эпохе. Кроме Au и Ag, они добывали Cu, Sn, Hg, Pb и Sb. В колониальные времена Перу (в том числе и современная Боливия), а затем и Чили были главными испанскими центрами добычи благородных и цветных металлов.

В постколониальную эпоху на континенте интенсивно развивается добыча Cu, главным образом в Чили и Перу. Незначительное количество медных руд также добывалось в Боливии, Эквадоре, Аргентине и Колумбии. Добыча Sn, Sb и Hg была сосредоточена в Боливии. Новое дыхание добыча цветных металлов Au и Ag в Южной

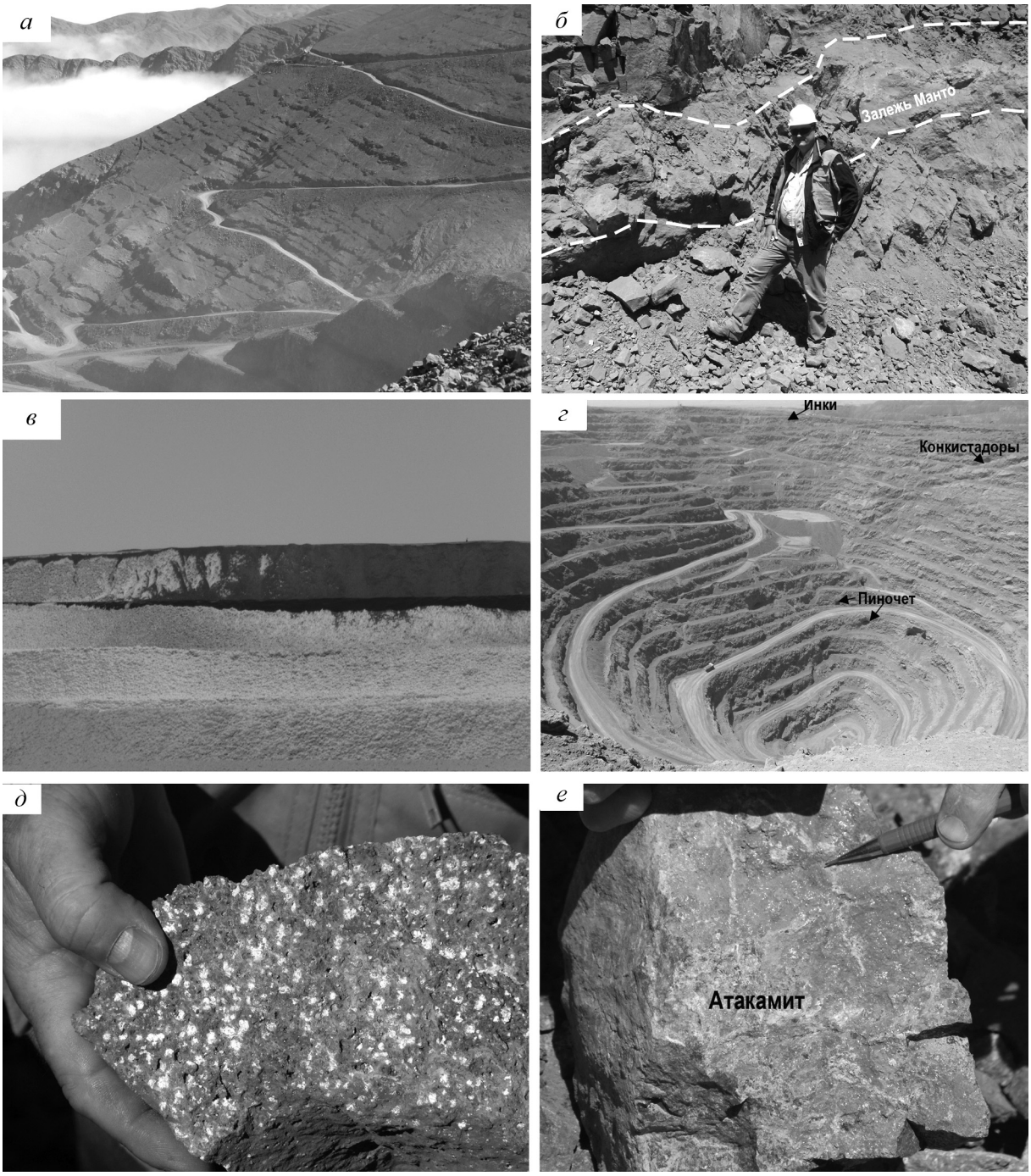

Рис. 2. Месторождения меди типа «манто» в чилийских Андах (фото А. В. Волкова, 2011 г.): *а* – вид в сторону океана (сплошная облачность) с края карьера месторождения Мантос-де-ла-Луна; *б* – стратифицированная рудная залежь «манто» в уступе карьера того же месторождения; *в* – вид на поле кучного выщелачивание рудника Мантос-де-ла-Луна; *г* – карьер на месторождении Линсе-Естефания, отмечены исторические горные выработки разных периодов, вскрытые уступами карьера на разной глубине; *д* – амигдолоиды в андезит-порфирах; *е* – хризоколла и атакамит – главные минералы, слагающие залежь «манто» см. (*б*)

Fig. 2. Manto-type copper deposits in the Chilean Andes (photos by A. V. Volkov, 2011): *а* – view toward the Pacific Ocean (overcast) from the edge of the open pit at the Mantos de La Luna deposit ; *б* – stratified Manto ore body in the open pit bench at the same deposit; *в* – heap leaching field at the Mantos de La Luna mine; *г* – open pit at the Lins Estephania deposit with historical minings of different periods marked; *д* – amygdaloides in andesite-porphyries; *е* – chrysocolla and atacamite – principal minerals building the Manto body, see (*б*)

Америке получила в первом десятилетии XXI в. в связи с резким ростом цен на эти металлы в мире.

Как видно на рис. 2,*г*, борта карьера МТМ Линсе-Естефания вскрыли на приповерхностных горизонтах горные выработки еще инкских

Таблица 1. **Классификационные признаки МТМ**
Table 1. **Classification features of MTD**

Критерий	Характерные признаки МТМ
Особенность геологического строения	Халькозин, борнит и/или самородная Cu встречаются в темноцветных, от основных до кислых вулканических лавовых потоках, туфах и брекчиях и родственных осадочных породах в виде вкрапленности, прожилков и заполняют амигдулы, трещины и каналы брекчий
Морфология рудных тел	Некоторые МТМ представлены пластовыми, стратифицированными залежами, в то время как другие контролируются дискордантными структурами
Тектоническое положение	МТМ возникают во внутриконтинентальных рифтах с базальтовыми субаэральными толщами, вблизи границ плиты с островодужными и континентальными вулканическими поясами
Обстановка формирования	МТМ формируются в континентальных до мелководные вулканических обстановках, в «низких и средних широтах» с пустынным или полупустынным климатом
Степень метаморфизма	Субзеленосланцевая
Геохимическая подпись	Простая рудная минералогия выражается весьма специфической геохимической подписью, включающей Cu и, как правило, Ag. Литогеохимические пробы и потоки рассеяния характеризуются высокими значениями Cu и Ag, обычны высокие Cu/Zn отношения и низкие значения Au

времен, которыми отрабатывались руды зоны вторичного обогащения с содержанием Cu > 5%, ниже находятся штольни испанских колонизаторов, добывавших также богатые руды с содержанием Cu 3–5%, еще ниже расположены штольни XIX в. (Cu – 2–3%), затем штольни XX в. – времен Пиночета (Cu – 1,5–2,5%), и, наконец, все перечисленные горизонты руд были вскрыты современным карьером (среднее содержание в руде Cu – 1,0%).

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МТМ

Мезозойские МТМ исторически были вторым источником чилийского производства Cu (примерно 500 тыс. т в год) после кайнозойских порфировых месторождений, но в начале XXI в. были перемещены на 3-е место в связи с началом эксплуатации крупных раннемеловых Fe-Cu-Au-оксидных (IOCG) месторождений, таких как Канделярия и Манто Вердемина (Marschik et al., 2003). Добыча Cu и попутного Ag из МТМ производится главным образом методом «кучного выщелачивания» (см. рис. 2,*в*).

В Чили известны две группы МТМ: (а) от 22 до 26º южной широты месторождения первой группы приурочены к верхнеюрским вулканитам формации Ла Негра и (б) от 30 до 34º месторождения второй группы локализованы в нижнемеловых вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах (см. рис. 1).

Крупнейшее МТМ *юрской группы* – Мантос Бланкос в прибрежных Кордильерах провинции Антофагаста на севере Чили, где в 1960–1995 гг. было добыто 1 643 715 т меди (содержания Cu – 1,18% и Ag – 12 г/т; Maksaev, Zentilli, 2002). В 2010 г. добыча Cu здесь составила около 77 тыс. т. Второе по величине в этой группе – месторождение Мантос-де-ла-Луна, которое насчитывает запасы 40,5 млн т на 1,39% Cu плюс прогнозные ресурсы 6 млн т на 1,4% Cu (Maksaev, Zentilli, 2002). Другие юрские месторождения значительно меньше, хотя запасы и добыча некоторых обычно составляют около миллиона тонн руды на уровне содержаний от 1 до 3,8% Cu и от 8 до 25 г/т Ag. Наиболее значительные месторождения Линсе-Естефания, Сусана и Хуарес в районе Мичилла, Буэна Эсперансе и Мантос дель Пасифико в районе Санто Доминго (см. рис. 1) (Maksaev, Zentilli, 2002).

Крупнейшее МТМ *группы в раннемеловых вулканитах* – Эль Сольдадо в прибрежных Кордильерах центрального Чили, чье производство вместе с запасами руды составляет более 200 млн т при 1,35% Cu (Maksaev, Zentilli, 2002). Второе по величине МТМ в вулканитах нижнемеловой группы – Ла Агуира (в настоящее время отработано), находится к западу от города Сантьяго, где добыто 11,1 млн т руды при 2,14% Cu. Нижнемеловая группа МТМ в вулканогенно-осадочных породах в центральной части Чили относительно небольшая. Типичные примеры: Талкуна и Серро-Негро. На последнем добыто 6 млн т руды, при 1–3% Cu и 31 г/т Ag, в то время как средний тоннаж других месторождений – около 2 млн т на 1,7% Cu и 25 г/т Ag (Maksaev, Zentilli, 2002).

Таким образом запасы руды МТМ достигают до 500 млн т, содержащей 1–2% Cu (Мантос Бланкос, Эль Сольдадо), но обычно находятся в пределах 1–10 млн т руды (Талкуна, Серро-Негро и др.).

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ МТМ

Мезозойский магматизм в прибрежных чилийских Кордильерах связан с субдукцией Фаралонской плиты. С ранней до средней юры формация Ла Негра, состоящая преимущественно из вулканической толщи переслаивающихся базальтовых, андезитовых лав и туфобрекчий, была сформирована как толстая континентальная кора в северной части Чили. Вулканический разрез был интенсивно интрудирован позднеюрско-раннемеловыми плутонами габбро-гранодиоритового состава, которые сопровождались термальным метаморфизмом переменной степени (Palacios, 1977). Первым событием стала экструзия мощной толщи базальтовых лав формации Ла Негра, 159,9±1,0 млн лет верхней части серии. Синхронная интрузия датируется 159,6±1,1 млн лет, и более поздние интрузивные события датируются 145,5±2,8 и 137,4±1,1 млн лет соответственно (Oliveros et al., 2008). Тепловой эффект от этих интрузий мог генерировать гидротермальные растворы, которые индуцируют транспорт и концентрацию металлических элементов. Предполагается, что МТМ были сформированы в моноклинальной структуре стратифицированных вмещающих пород (Kojima et al., 2003). Геохронологические данные свидетельствуют о том, что рудные тела образовались после отложения вмещающих пород (около 1 млн лет на юрском месторождении Мичилла, Oliveros et al., 2008 и примерно 10 млн лет на меловом месторождении Эль Сольдадо, Wilson et al., 2003б).

Таким образом, МТМ сформировались на первой стадии андской эволюции, характеризующейся экстенсивным развитием дугового магматизма вдоль активной окраины Южной Америки. Они формировались в течение двух металлогенических эпох – в поздней юре и раннем и позднем меле. Минерализация проходила во время структурно контролируемого размещения батолитов в мезозойских вулканических и осадочных слоях.

Основные МТМ в Северном регионе Чили разделены на следующие пять областей (Kojima et al., 2009): Арика – Икике, Токопилья – Талтал, Копиапо, Ла Серена и Сантьяго (см. рис. 1). Большинство залежей в этих областях и их геологические характеристики были обобщены в обзорной статье (Sato, 1984). МТМ северных районов (Арика – Икике и Токопилья – Талтал) находятся в боковых поясах вдоль берегового хребта, в отличие от центральных районов (Копиапо, Ла Серена, Сантьяго), распределенных во внутриконтинентальных задуговых бассейнах (Sillitoe, 2003). Кроме того, были установлены некоторые геологические различия между этими двумя группами рудных районов (Sato, 1984): МТМ северных районов размещены преимущественно в толщах андезибазальтового до андезитового состава юрского возраста формации Ла Негра, за исключением месторождения Мантос Бланкос, которое локализовано в юрских кислых вулканитах и субвулканических интрузивах. Напротив, МТМ центральной зоны залегают в нижнемеловых (в основном неокомовых) вулканогенно-осадочных породах, которые включают мощные пласты песчаников, туфогенных алевролитов и известняков (Kojima et al., 2009). Возраст МТМ варьирует от ранне-позднеюрского до позднего раннемелового (160–100 млн лет; Wilson et al., 2003б; Tristá-Aguilera et al., 2006). За исключением МТМ Жарден и Амоланас в районе Копиапо, приуроченных к эоценовым кислым вулканитам (Sato, 1984).

Вмещающие МТМ вулканические породы, как правило, характеризуется моноклинальным стратифицированным экструзивным залеганием (см. рис. 2,*а*) и составами от базальтового до риодацитового. Типичные свиты таких бимодальных вулканических пород наблюдаются районе Сантьяго (Wilson et al., 2003б). Этот факт выглядит как признак вулканизма, связанного тектоническим растяжением, как в японских районах «куроко» (Urabe, 1987).

Вмещающие вулканические породы характеризуются различными текстурами, такими как порфиритовая («ocoitic»), амигдоидальная и афанитовая, и состоят из известково-щелочных с подчиненным количеством толеитовых и щелочных разностей (Kramer et al., 2005). Все вулканогенно-осадочные толщи, вмещающие МТМ, имеют значительную мощность, по крайней мере, 2 км, и, таким образом, прошли от цеолитовой до низкой зеленосланцевой фации регионального метаморфизма (Shiba et al., 2006).

Метаморфизм формации Ла Негра варьирует от высокотемпературной пренит-актинолитовой до низкотемпературной зеленосланцевой фации на основе петрогенетической сетки (Liou et al., 1985) при XFe = 0,23 эпидота и температуре образования 310°C (максимальная, оцененная с использованием хлоритового геотермометра), значение давления при метаморфизме определяется 1,75 кбар. Такое давление согласуется с общей мощностью (7–10 км) формации Ла Негра (Buchelt, Tellez, 1988). Расчетный геотермический градиент составляет 40–50°C/км, что несколько выше, чем у активных континентальных окраин (Shiba et al., 2006).

Объемные юрско-раннемеловые плутонические комплексы обычно наблюдаются в рудных районах всех областей и характеризуются отчетливыми пространственными связями с рудными телами в северной области. В противоположность этому, интрузивные массивы находятся в доволь-

но удаленных от рудных тел секторах в ряде рудных районов центральных областей, таких как Талкуна (Oyarzun et al., 1998) и Эль Сольдадо (Boric et al., 2002). Этот комплекс – материнский для кислых штоков и даек известково-щелочных разностей и состоит преимущественно из габбро, диоритов, монцонитов, гранодиоритов и кварцевых монцонитов с характеристиками I-типа магнетитовой серии (Marschik et al., 2003).

МТМ в рудных районах северной области в прибрежных Кордильерах расположены рядом с основными ветвями N-S-тренда Атакамской зоны разломов, протяженность которой более 1000 км вдоль Чилийского прибрежного хребта между районами Икике и Ла Серена. Эта зона характеризуется левосторонними сбросо-сдвигами, образовавшимися во время поперечной косой юрско-раннемеловой субдукции (Scheuber, Andriessen, 1990), а также типичными сдвиговыми дуплексами в основной зоне разломов, которые преобладают в Икике – Талтал районе (Cembrano et al., 2005). Левосторонняя сбросо-сдвиговая система также выявлена в районе Сантьяго (Boric et al., 2002).

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МТМ

Первичная Cu минерализация обычно распространена в миндалинах наполнения (амигдулах) и штокверковых тонких прожилках во вмещающих породах (см. рис. 2,*д,е*). МТМ разделены на следующих три типа в соответствии с их морфологией и режимом образования: (1) стратифицированный пластовый (например, Мантос-де-ла-Луна, см. рис. 2,*б*); (2) эшелонированный пластовый (например, Линсе-Естефания, рис. 3) и (3) псевдостратифицированный тип (например, Мантос Бланкос).

В типе 1 рудные тела представлены многочисленными пластами, залегающими в одном стратиграфическом вмещающем горизонте, в то время как в типе 2 многочисленные стратифицированные рудные тела локализованы избирательно в проницаемых породах, таких как амигдоидальные лавовые потоки. В нескольких залежах типа 2 (например, Буэна Эсперансе, Линсе-Естефания) брекчиевидные трубообразные тела развиваются вокруг неминерализованных габброидных до диоритовых даек (см. рис. 3). Месторождения типа 3 состоят из сложных по морфологии рудных залежей, структурно контролируемых разрывными нарушениями и связанными с ними дайками (Boric et al., 2002).

Таким образом, типы 2 и 3 месторождений отвечают эпигенетическому режиму образования. В случае типа 1 минерализованные зоны тесно связаны с другими видами рудных тел, например, прожилками и брекчиями, трассирующими рудоподводящие каналы, и, как правило, образу-

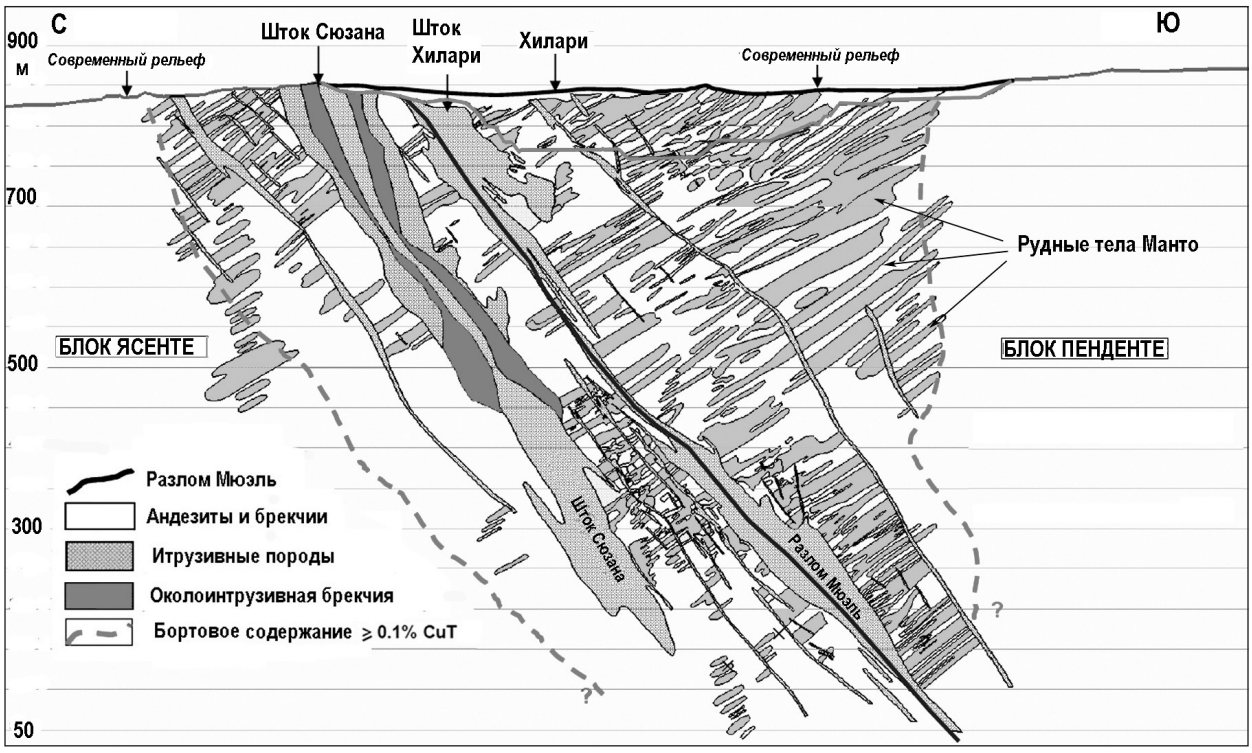

Рис. 3. Морфология эшелона рудных тел типа «манто» в разрезе месторождения Линсе-Естефания, по данным компании Minera Michilla

Fig. 3. Manto ore bodies echelon in the Lins Estephania deposit, according to the Minera Michilla company

ются в проницаемых горизонтах, благоприятных для минерализации. Эти особенности предполагают, что залежи типа 1 также могли быть эпигенетическими (Kojima et al., 2009).

Околорудные изменения. Как правило, во вмещающих породах вблизи рудных тел не отмечаются гидротермальные изменения, генетически связанные с первичной минерализацией. Обычны обширные ореолы пропилитовых метасоматитов, иногда отмечаются натровые изменения (альбитизация) и последовательная кальцитизация эпидота, а также образование кальцита, хлорита, серицита, Ca-амфибола (актинолита) и кварца (Kojima et al., 2003). Более того, на месторождении Мантос Бланкос широко развиты калийные изменения, такие же, как и в IOCG типе месторождений. В этих метасоматитах преобладает биотит и/или K-полевой шпат с незначительным количеством турмалина – более ранний этап изменений перед пропилитизацией (Ramirez et al., 2006).

Вещественный состав руд. Медная минерализация в МТМ в перечисленных выше областях различается по составу (Kojima et al., 2009): халькозин (дигенит)-борнитовая ассоциация преобладает в северных районах, а в центральных областях – халькопирит является основным минералом. Кроме отмеченных минералов, в рудах в меньших количествах встречаются: пирит, самородная Cu, самородное Ag, тетраэдрит-теннантит, галенит, сфалерит, магнетит и гематит; в нескольких центральных рудных районах спорадически наблюдаются арсенопирит, марказит, энаргит, сафлорит, каролит и штромейерит. На месторождении Эль Сольдадо и в Окоита-Пабелонском рудном районе (область Копиапо) органическое вещество в виде твердого битума и других асфальтенов находится в тесной связи с первичными рудными минералами.

Геохимические особенности. Рудные образцы МТМ характеризуются обогащением Ba, Th, Tb и U и обеднением Rb, Nb, Sr, Zr и Tl, как и вмещающие породы (Figueroa-Cisterna et al., 2011). Такая же особенность наблюдается в месторождениях IOCG типа (+ обогащение La и Ce). По сравнению с вмещающими породами, рудные образцы МТМ показывают общее истощение РЗЭ (немного выше в тяжелой части спектра Sm/Yb_N = 1,0–2,8), отличаются широким диапазоном легких РЗЭ (La/Yb_N = 1,0–15,1; La/Sm_N = 0,8–5,4) и отсутствием отрицательной Eu аномалии (Figueroa-Cisterna et al., 2011). Диаграмма отношений La/Sm_N и Sm/Yb_N показывает, что образцы МТМ образуют довольно ограниченное поле с низкими и почти постоянными отношениями La/Sm_N и Sm/Yb_N по сравнению с другими типами чилийских месторождений Cu (рис. 4).

Это поле, в частности, перекрывает поле месторождений IOCG типа. Однако последние показывают самый широкий диапазон соотношений La/Sm_N по отношению с другими типами месторождений Cu, они также отличаются самым высоким содержанием LREE (см. рис. 4). Напротив, порфировые месторождения меди показывают более высокие значения La/Sm_N и Sm/Yb_N, чем образцы МТМ (рис. 4).

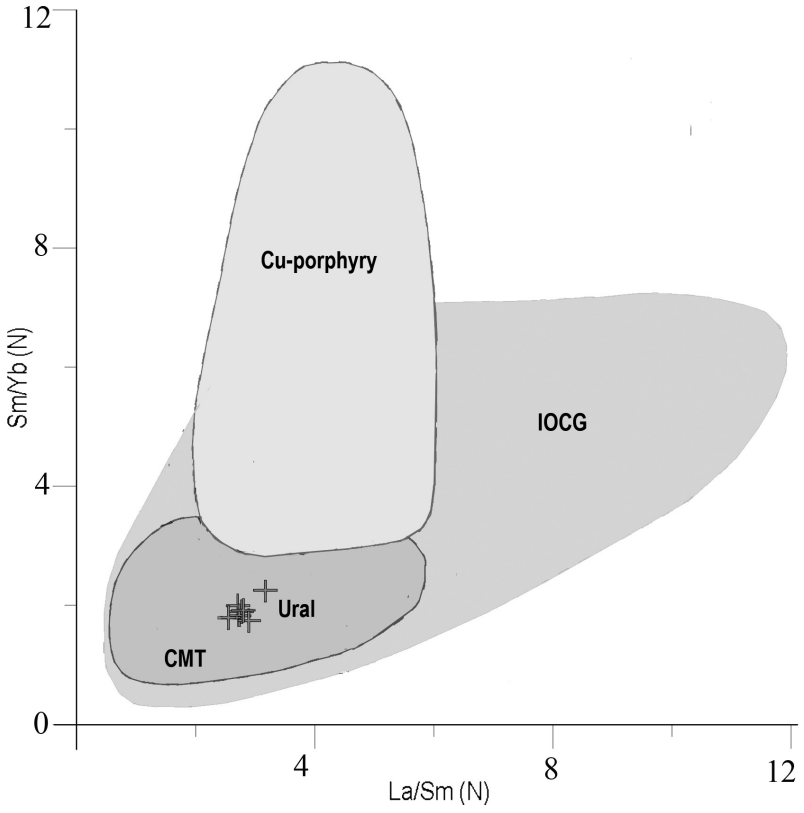

Рис 4. Классификация проб МТМ на диаграмме нормированных на хондрит La/Sm к Sm/Yb (Figueroa-Cisterna et al., 2011): CMT – поле месторождений Cu манто типа, IOCG – Cu месторождения Fe-оксидного типа, Cu-porphyry – Cu месторождения порфирового типа (Figueroa-Cisterna et al., 2011). Крестики – медистые песчаники Оренбургского Приуралья.

Fig. 4. Classification of MTD samples on the chondrite La/Sm – Sm/Yb normalized diagram (Figueroa-Cisterna et al., 2011): MTD – field of Manto-type Cu deposits, IOCG – field of Fe-oxide-type Cu deposits, Cu-porphyry – Cu porphyry-type deposits (Figueroa-Cisterna et al., 2011). Crosses designate copper sandstone samples from the Orenburg Cisurals

На диаграмме La/Sm_N и Sm/Yb_N (см. рис. 4) индикаторные показатели МП Оренбургского Приуралья отчетливо попадают в центр поля значений медных месторождений типа «манто», что свидетельствует о конвергентных условиях образования месторождений этих типов.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МТМ

Результаты изучения флюидных включений (ФВ). Их исследования проводили в кварце и кальците, ассоциирующими с первичными медными минералами. Были получены значимые данные об условиях формирования первичной минерализации (Kojima et al., 2003). Наблюдаемые первичные ФВ представлены в основном жидкими, не содержащими CO_2 + пар и жидкость + пар + соль (NaCl) включениями и паро-доминантными газообразными включениями, иногда сосуществуют с ними (Kojima et al., 2003). Сосуществование жидких (или многофазных) и газообразных включений служит доказательством кипящих растворов и предполагает, что гипогенное оруденение образовалось условиях относительно низкого давления. Этот эффект может объяснить отмеченную разницу в солености (Kojima et al., 2009). В месторождениях Окоита-Пабелонского рудного района сообщается о сырой нефти в существенно жидких ФВ (Cisternas, Hermosilla, 2006). Недавно Tristá-Aguilera (2007) использовал хлоритовый геотермометр (Cathelineau, 1988), который показал температурный диапазон 230–299°C формирования первичной минерализации месторождения Линсе-Естефания (район Мичилла), что согласуется с результатами исследования ФВ (Kojima et al., 2009). Таким образом, МТМ формировались из гидротермальных растворов с температурой в диапазоне 150–360°C.

Изотопная характеристика. Изотопные отношения $^{207}Pb/^{204}Pb$ – $^{206}Pb/^{204}Pb$ в МТМ центральной области в существенно вулканических (Эль Сольдадо, Ла Агуира) и в вулканогенно-осадочных толщах (Талкуна, Серро-Негро) характеризуются однородным составом и незначительно отличаются от соответствующих магматических пород (Tosdal, Munizaga, 2003). Эти особенности позволяют предположить, что в рудах МТМ центральной области свинец в основном магматического происхождения с незначительным поступлением свинца из меловых осадочных пород (Tosdal, Munizaga, 2003). В МТМ Токопилья-Талталского района изотопные отношения Pb показали значительно более радиогенные составы, чем в упомянутых выше нижнемеловых районах, что интерпретируется как примесь юрского осадочного свинца, отличающегося широким ураногенным диапазоном (Kojima et al., 2009). Наличие домезозойского (палеозойского) фундамента, состоящего в основном из гнейсов и гранитоидов, обнажающихся в северных районах, позволяет предполагать также контаминацию палеозойским − рудного свинца. Однако изотопные Pb отношения пород фундамента отчетливо отличаются от рудно-свинцовых отношений (Kojima et al., 2009). В Токопилья-Талталском районе рудно-свинцовые изотопные отношения близки к средним коровым значениям (Stacey, Kramers, 1975), что может свидетельствовать о коровом происхождении рудного свинца. В отличие от свинцов центральной области рудные свинцы имеют несколько более низкие диапазоны в обоих ($^{207}Pb/^{204}Pb$ и $^{206}Pb/^{204}Pb$) показателях, чем в МТМ Токопилья-Талталского района. Это предполагает меньшую ассимиляцию корового свинца и соответствует малой мощности континентальной коры в центральной области (Macfarlane et al., 1990).

Аналогичная особенность также была обнаружена в изотопии Os, позволившая оценить происхождение рудообразующих халькофильных металлов (Tristá-Aguilera et al., 2006). Значения первичных $^{187}Os/^{188}Os$ отношений в медных сульфатах из руд месторождений Линсе-Естефания (1,06) и Эль Сольдадо (3,94977) намного выше, чем из континентальной мантии (0,128±0,006). Эти данные свидетельствуют о том, что Os в рудной минерализации МТМ корового происхождения. В частности, рудный свинец Эль Сольдадо имеет весьма высокое отношение $^{187}Os/^{188}Os$, которое, вероятно, учитывает вклад высокого черносланцевого Re/Os отношения. Эта интерпретация соответствует упомянутым выше геологическим особенностям района, а также характеристикам изотопов серы и углерода (см. ниже).

В отличие от изотопов Pb, составы $\delta^{34}S$ из первичных Cu сульфидов северной области достаточно однородны, в основном варьируя в незначительном отрицательном диапазоне (Kojima et al., 2009). Такие однородные $\delta^{34}S$ отвечают одному магматическая источнику рудообразующей серы. Напротив, Cu сульфиды из нескольких МТМ центральных районов имеют чрезвычайно широкий спектр значений $\delta^{34}S$ (от минимума $\delta^{34}S$ = -44,7‰ до максимума $\delta^{34}S$ = +19,0‰). Этот широкий диапазон значений $\delta^{34}S$, как правило, учитывает вклад биогенной серы (Wilson et al., 2003a); действительно, в геологическом строении центральных районов участвуют богатые эвапоритами осадочные бассейны (Oyarzun et al., 1998).

В нескольких МТМ северной области известковистые угли, как правило, показывают незначительные отрицательные значения $\delta^{13}C$ (от -6,9 до -0,8‰), а в месторождениях центральной об-

ласти распространены значения в более широком отрицательном диапазоне, в частности, в Эль Сольдадо ($\delta^{13}C$ = -20,2 до -4,2‰). В последнем случае значения $\delta^{13}C$ попадают в диапазон, характерный для органического углерода (рис. 5). Это свидетельствует о примеси биогенного углерода, такого, как окисленное вещество пиробитумов (Wilson et al., 2003a).

С. Кодзима с соавторами (Kojima et al., 2003) предположили, основываясь на изотопном фракционировании углерода при температурах, предполагаемых по данным изучения ФВ, что углерод из кальцита месторождения Линсе-Естефания образовался из магматического углерода или осадочного карбоната, интеркалированного во вмещающих породах формации Ла Негра. Напротив, $\delta^{18}O$ из кальцита месторождений северной области, в частности, из Мантос Бланкос, имеют широкий диапазон, удлиненный в сторону ^{18}O-богатых составов. Неясно, зависит ли это событие от теплового воздействия на изотопное фракционирование между кальцитом и минералообразующим раствором или от добавления ^{18}O-богатого компонента осадочного происхождения. Рисунок 5 показывает, что большинство $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ анализируемых кальцитов северной области распределяются между магматическими и морскими карбонатами. Это соотношение приводит к выводу, что карбонатные компоненты могли быть из магматических и осадочных источников.

Диапазон $^{87}Sr/^{86}Sr$ из гидротермального кальцита из Эль Сольдадо и других месторождений центральной области показывает связь с магматизмом и одновременно с морской водой. Отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ Эль Сольдадо и Мантос-де-ла-Луна близки к магматическим породам, и поэтому формировавшие кальцит флюиды могли быть связаны с вулканическими породами. Напротив, кальциты из Мантос Бланкос и Санто Доминго показали гораздо более высокие значения $^{87}Sr/^{86}Sr$ отношений, чем из магматических пород. Это объясняется вероятным вкладом Sr поверхностного происхождения, включенного одновременно с морской водой ($^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,7067–0,7076; Veizer et al., 1999) и осадочных карбонатов ($^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,7067), упоминавшихся выше.

Данные по изотопии водорода и кислорода незаменимы для оценки происхождения гидротермальных растворов, ответственных за формирование первичной медной минерализации. Однако данные по изотопам водорода пока не получены.

Генетическая модель. Исторически сингенетическая и эпигенетическая концепции формирования МТМ широко дискутировались, и были предложены три генетические модели (Kojima et al., 2009): (1) образованные сингенетически вулканогенные месторождения; (2) эпигенетические залежи, образованные магматическими эманациями, связанными с глубинными интрузиями, и (3) эпигенетические месторождения, образующиеся в результате метасоматического взаимодействия с участием Cu-содержащих вмещающих пород.

Рассмотренные генетические особенности МТМ позволяют сделать следующие выводы (Kojima et al., 2009). По данным изучения ФВ выявлено, что первичная Cu минерализация МТМ обычно генерируется в диапазоне температур 150–360°C, в условиях низкого давления вблизи кривой кипения, из относительно минерализованных рассолов. Как правило, однородный Pb и S изотопный состав первичных минералов Cu подразумевает, что их прямым источником были магмы или выщелачивание изверженных пород. Pb и Os изотопные дан-

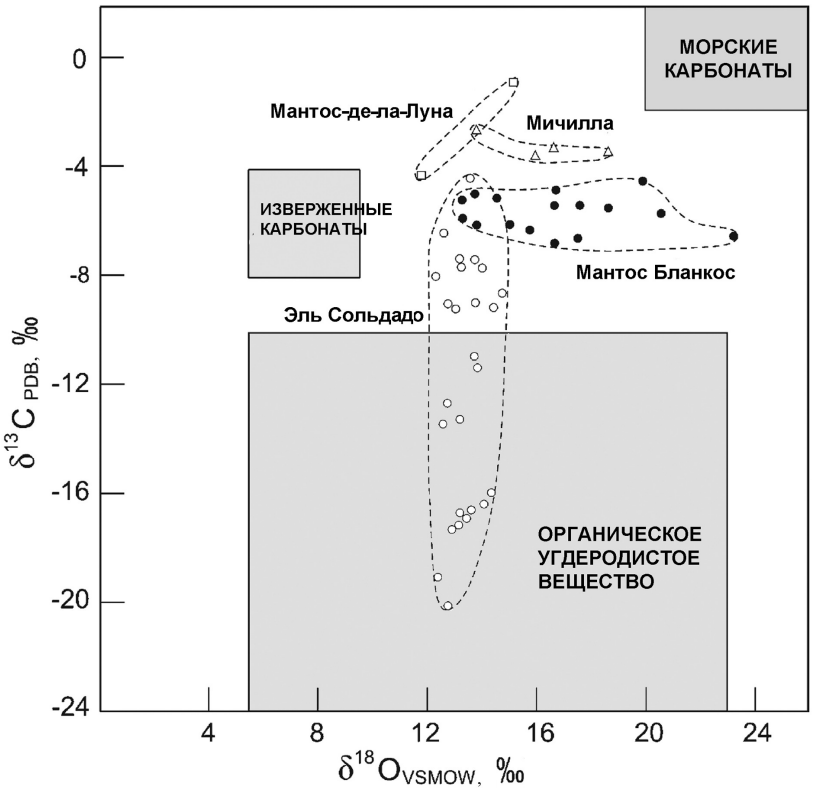

Рис. 5. Изотопный состав углерода и кислорода гидротермальных кальцитов из основных чилийских МТМ (Kojima et al., 2009)

Fig. 5. Isotopic composition of carbon and oxygen in hydrothermal calcites from principal Chilean MTD (Kojima et al., 2009)

ные, опубликованные по некоторым месторождениям, однако предполагают, что рудообразующие металлы были получены в основном из вулканогенно-осадочных пород. Явно отрицательные соотношения изотопов S первичных сульфидов и $\delta^{13}C$ гидротермального кальцита некоторых месторождений указывают на приток компонентов из осадочных пород, а высокое $^{87}Sr/^{86}Sr$ отношение в гидротермальном кальците из месторождений зоны Токопилья – Талтал подразумевает в качестве источника морскую воду и/или морские карбонаты. Эти изотопные ограничения позволяют предложить механизм формирования, в котором чилийские МТМ образовались эпигенетически в процессе гидротермального взаимодействия немагматических поверхностных рассолов из вулканогенно-осадочных пород. Циркуляция последних, по-видимому, была вызвана глубоко залегающим плутоническим комплексом – возможным источником тепла. Таким образом, магматизм играет в большей степени роль теплового источника, чем продуцента рудного вещества.

ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВАЯ МОДЕЛЬ МТМ

Некоторые наиболее важные индикаторные признаки МТМ, которые рекомендуется использовать в качестве прогнозно-поисковых критериев новых объектов, сведены в табл. 2. Эта таблица, как и табл. 1, – важные составляющие прогнозно-поисковой модели. Последняя предназначена для применения на прогнозно-поисковой стадии геологоразведочных работ (ГРР) и заключается в последовательном наборе критериев, направленных на выбор наиболее перспективного участка. Алгоритм применения прогнозно-поисковой модели представлен в виде блок-схемы (рис. 6).

Проведение и использование результатов фундаментальных научных исследований позволяет уверенно определять индикаторные признаки МТМ, что значительно повышают надежность выбора перспективных участков, сокращают время проведения ГРР и в конечном итоге уменьшают стоимость прогнозно-поисковых работ.

ПЕРСПЕКТИВЫ ОТКРЫТИЯ МТМ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ И В ДРУГИХ РЕГИОНАХ РОССИИ

В заключение рассмотрим перспективы открытия МТМ на территории России.

Медистые песчаники Приуралья. Выходы Cu песчаников пермского возраста в виде двух полос шириной около 100 км и протяженностью более 1500 км в южной части Предуральского краевого прогиба и прилегающих

Таблица 2. **Отличительные признаки МТМ**
Table 2. **Distinctive features of MTD**

Критерий	МТМ	Cu песчаники Приуралья
Вмещающие породы	Амигдалоидные андезитовые лавы, переслаивающиеся с туфами, алевролитами, песчаниками и конгломератами	Пермские песчаники, гравелиты, известняки, глинистые сланцы, глины и конгломераты, с примесью туфов
Магматические породы	Габбро-диоритовая формация, дайки пестрого состава, субвулканические тела и штоки, брекчии	Отсутствует
Возраст магматических пород	Протерозой – эоцен	Отсутствует
Степень метаморфизма	Субзеленосланцевая (пренит-пумпеллиитовая фация)	Субзеленосланцевая (пренит-пумпеллиитовая фация)
Околорудные изменения	Альбитизация ± биотит и/или K-полевой шпат	Цеолитизация, силицитизация
Площадные изменения	Пропилитизация	Окремнение
Роль углистого вещества	Присутствуют пиробитумы, значение не установлено	Присутствуют пиробитумы, значение не установлено
Текстуры/структуры руд	Вкрапленная, прожилково-вкрапленная, брекчиевая	Вкрапленная, прожилково-вкрапленная, брекчиевая
Основные сульфиды	Халькозин, борнит, самородная Cu, дигенит, джарлеит, халькопирит, ковеллин, самородное **Ag, пирит, как правило, на периферии рудных тел**	Борнит, тенорит, халькозин, пирит, халькопирит, самородная Cu

Второстепенные сульфиды	Арсенопирит, марказит, энаргит, сафлорит, каролит и штромейерит	Марказит, ярроуит-спионкопит
Основные нерудные минералы	Присутствуют в небольшом количестве гематит, магнетит, кальцит, кварц, эпидот, хлорит и цеолит	Присутствуют в небольшом количестве гематит, борнит, анальцим, кальцит, эпидот, хлорит, цеолиты
Выветривание	Хризоколла, атакамит, спорадически малахит и азурит	Хризоколла, куприт, ковеллин, малахит, азурит
As минерализация	Отсутствует	Отсутствует
Sb минерализация	Отсутствует	Отсутствует
Cu минерализация	Широко распространена	Широко распространена
Флюиды	Рассолы + газ и жидкость + газ + соль (NaCl)	Кислые растворы
Геохимическая подпись	Высокие значения Cu и Ag, высокое Cu/Zn отношение и низкое значение Au. Соотношение Sm/Yb_N и La/Sm_N находится в диапазоне 4–4,5 соответственно	Высокие значения Cu и Ag, высокое Cu/Zn отношение и низкое значение Au, повышенные – Ga, It, Re. Соотношение Sm/Yb_N и La/Sm_N находится в диапазоне 4–4,5
Изотопы серы	Широчайший диапазон (от $\delta^{34}S$ = -44,7‰ до $\delta^{34}S$ = +19,0‰)	Широкий диапазон
Температура и давление	150–360°C; до 0,5 кбар	Низкие
Возраст оруденения	Протерозой – эоцен	Юра (?)
Морфология рудных тел	Преобладают пластообразные стратиформные линзы, реже жилы, штокверки	Преобладают пластообразные стратиформные линзы, реже жилы, штокверки
Структурный контроль	Стратифицированные вулканические и вулканогенно-осадочные толщи, иногда региональные зоны разломов	Крылья антиклиналей, региональные зоны разломов
Проницаемость пород	Очень высокая	Очень высокая
Крутопадающие разломы	Обычно взбросы, сдвиги	Обычно взбросы, сдвиги
Пологопадающие разломы	Обычно второстепенные	Обычно второстепенные
Глубина формирования	0,5–3 км	0,5–3 км
Электроразведка	Индукционная поляризация для выделения минерализованных линз и штокверков	Индукционная поляризация для выделения минерализованных линз и штокверков
Гравиметрия	Предполагается надынтрузивная позиция	Приуроченность к соляным куполам, диапирам
Добыча Cu и попутно Ag	Cu ~ 300 тыс. т (в Чили), Ag ~100 т	Не ведется
Содержание	Cu – 0,8–4%, Ag – 6–80 г/т	Cu – 0,8–6%; Ag – 6–30 г/т
Запасы и ресурсы	Запасы руды иногда до 500 млн т, но обычно находятся в пределах 1–10 млн т	Обычно находятся в пределах 1–10 млн т руды и менее

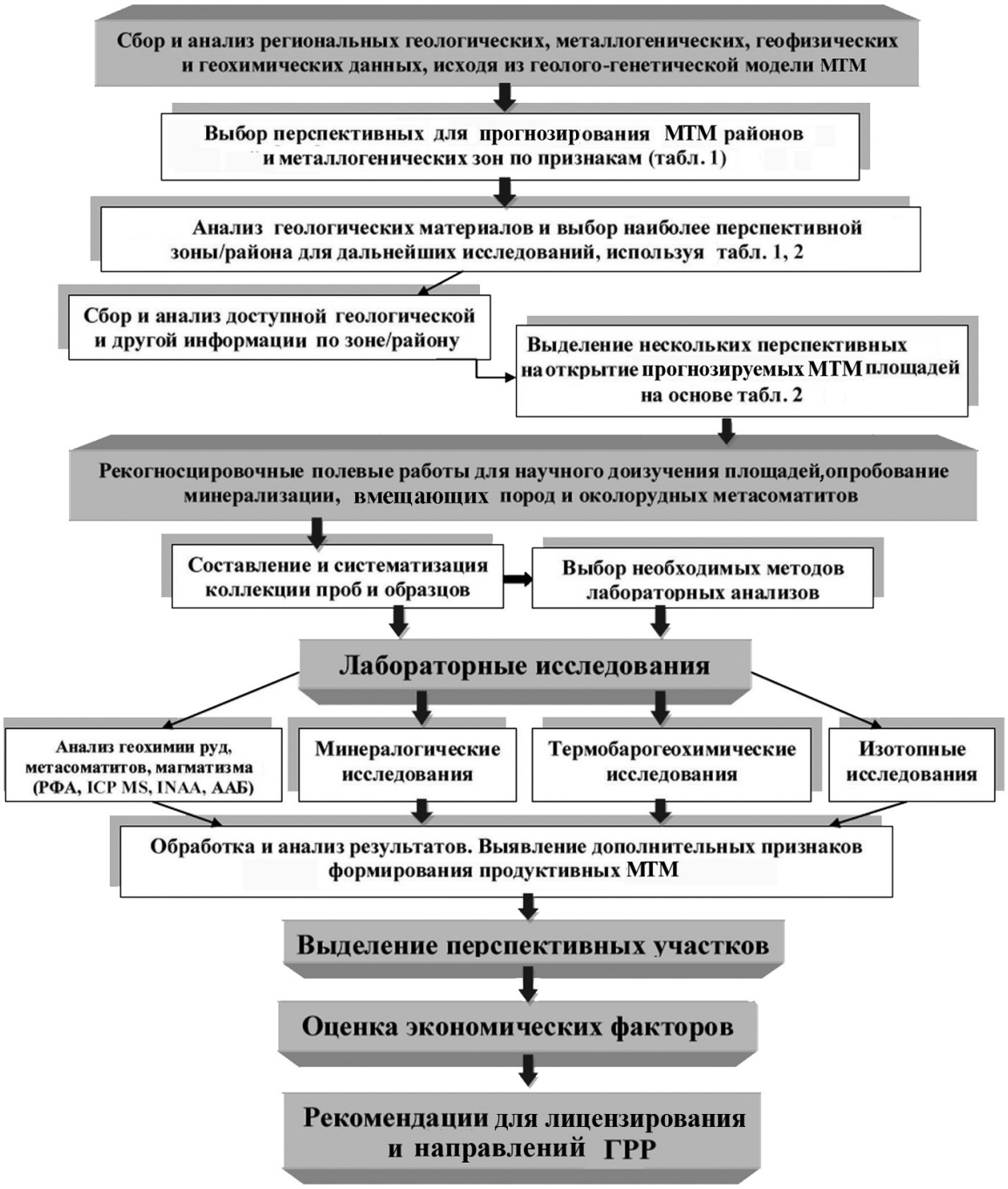

Рис. 6. Алгоритм применения прогнозно-поисковой модели МТМ

Fig. 6. Algorithm of applying the MTD forecast-search model

областей Восточно-Европейской платформы (рис. 7). Известны три группы месторождений: Верхнекамская (Пермская), Вятско-Камская и Уфимско-Оренбургская. Разработка Cu песчаников в Приуралье продолжалась почти 200 лет; в XIX в. действовало около 10 тыс. мелких рудников с ежегодной добычей в среднем 3000 т Cu, большей частью экспортируемой на Европейские рынки (Третьяков, 1928; Разумовский, 1929; Харитонов, 2011). За этот период было добыто, по экспертной оценке, около 500 тыс. т Cu (Разумовский, 1929).

В 2016 г. в ходе полевых работ была собрана коллекция образцов руд и вмещающих пород из нескольких проявлений Cu песчаников татарского яруса перми, расположенных в районе пос. Яровой Оренбургского района (см. рис. 7). Минералого-геохимические исследования этой коллекции и анализ опубликованных данных показали, что Cu песчаники Приуралья отличаются от аналогов в Африканском медном поясе, а также Джесказгана и Удокана не только небольшими параметрами рудных тел, но и отсутствием промышленно значимых содержаний Co.

Вместе с тем месторождения Cu песчаников Приуралья характеризуются большим сходством с месторождениями типа «манто» в Чили и Иране и типа «red-bed» в Канаде, США, а также сланцами Купершифера (Cabral, Beaudoin, 2007; см. табл. 2). Установленное сходство показывает возможность применения эпигенетической модели для объяснения генезиса Cu песчаников Приуралья. В этом случае возраст Cu минерализации в песчаниках может быть существенно моложе пермского и отвечать возрасту регионального метаморфизма. Последний играл роль теплового источника. Эпигенетическая модель указывает также на возможность многоэтажного развития минерализации Cu песчаников Приуралья на глубину, как и на месторождениях типа «манто» в Чили (см. рис. 3). Следовательно, Cu песчаники Приуралья могут рассматриваться как перспективный источник сырья для развития Cu промышленности региона.

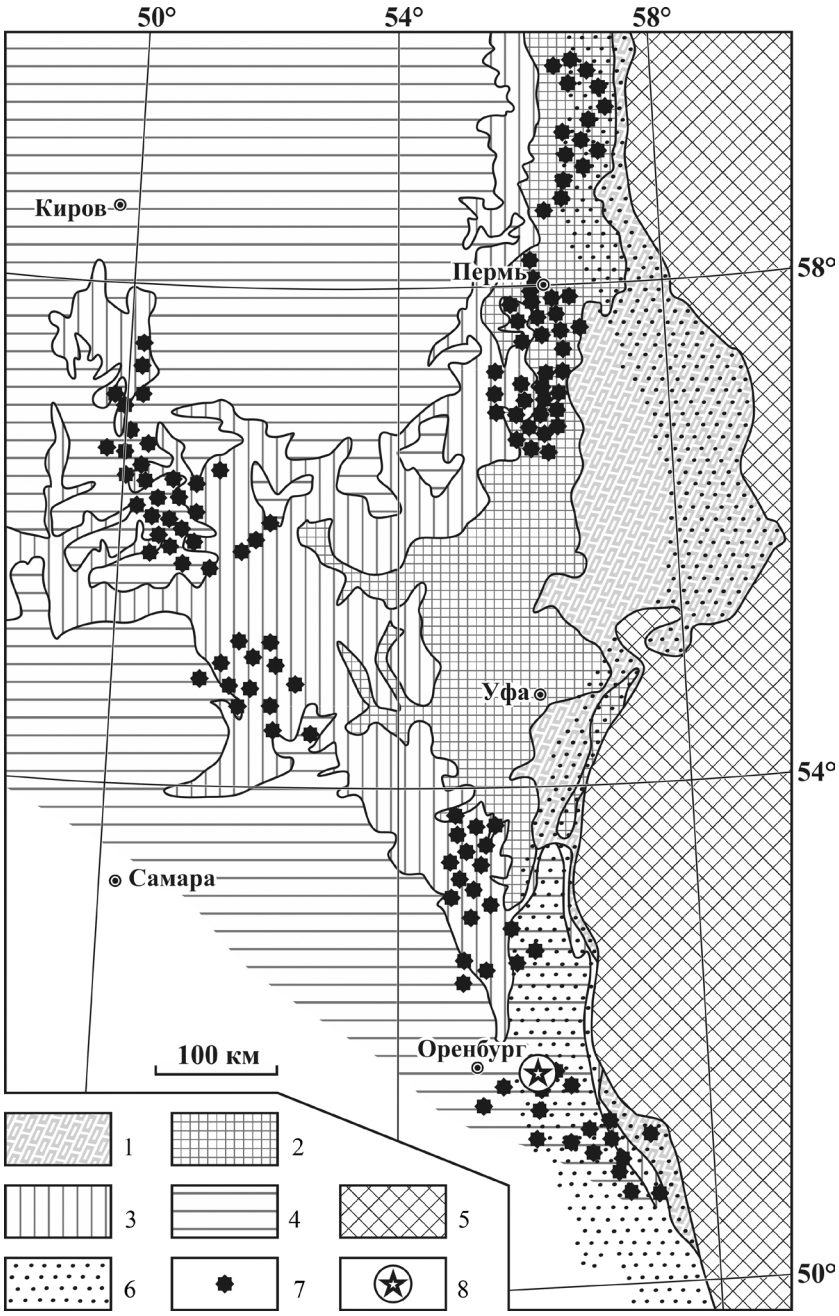

Рис. 7. Распространение рудопроявлений в пермских медистых песчаниках Приуралья по (Харитонов, 2011), с изменениями: 1 – отложения ассельского, сакмарского, артинского и кунгурского ярусов нерасчлененные; 2 – отложения уфимского яруса; 3 – отложения казанского яруса; 4 – отложения татарского яруса; 5,6 – Уральское горно-складчатое сооружение: 5 – Западно-Уральская, Центрально-Уральская и Тагильско-Магнитогорская зоны нерасчлененные; 6 – Приуральский краевой прогиб; 7 – рудопроявления медистых песчаников; 8 – район работ

Fig. 7. Distribution of ore occurrences in Permian copper sandstones in the Cisurals (Харитонов, 2011), with modifications: 1 – deposits of the Hasselskogian, Sakmarian, Artinskian, and Kungurian layer, undifferentiated; 2 – deposits of the Ufa layer; 3 – deposits of the Kazan layer; 4 – deposits of the Tatar layer; 5,6 – Ural mountain-folded structure (5 – West Urals, Central Urals, and Tagil-Magnitogorsk zones, undifferentiated, 6 – Cisurals fore deep); 7 – manifestations of copper sandstones; 8 – works area

Перспективы открытия МТМ на Северо-Востоке России. Этот обширный регион занимает протяженную континентальную окраину, содержащую несколько вулканоплутонических поясов (Волков и др., 2014). Время формирования последних совпало в целом с грандиозными позднемезозойскими и кайнозойскими плитными и террейновыми перемещениями, сопровождавшимися мощным подводным базальтовым вулканизмом в зонах спрединга и в других «горячих точках» Тихого океана. С этого времени обнаруживается нарастание элементов глобальной металлогенической однородности Тихоокеанского рудного пояса (ТРП). Элементы этой однородности связаны, прежде всего, с развитием порфировых, сульфидных (вкрапленных руд) и колчеданных (полиметаллических) рядов рудных формаций, а также с хромитовыми, Cu-Ni и платинометалльными рядами офиолитовых террейнов, океаниче-

ских рифтов и островодужных образований. Эта глобальная металлогеническая однородность ТРП позволяет предположить широкое развитие аналогов южно- и североамериканским МТМ в другой половине ТРП, в том числе и в его северо-западном сегменте – на Северо-Востоке России.

Сопоставление металлогении внутренней и внешней зон в северо-западном сегменте ТРП, прежде всего, показывает исчезновение месторождений Sn в его внутренней зоне. Более «меденосный» характер последней очевиден, что, по всей вероятности связано с островодужными террейнами в ее основании (Сидоров и др., 2011). Во внешней зоне – фундамент, в отличие от внутренней зоны представлен мощными оловоносными толщами верхоянского комплекса. Следовательно, во внутренней зоне северо-западного сегмента ТРП, по аналогии с южно- и североамериканскими его сегментами, весьма реальны перспективы открытия МТМ.

Работа выполнена по теме Госзадания ИГЕМ РАН «Металлогения рудных районов вулкано-плутоногенных и складчатых орогенных поясов Северо-Востока России».

ЛИТЕРАТУРА

Волков А. В., Сидоров А. А., Старостин В. И. Металлогения вулканогенных поясов и зон активизации. – М. : ООО «МАКС-ПРЕСС», 2014. – 355 с.

Сидоров А. А., Волков А. В., Чехов А. Д., Алексеев В. Ю. О металлогении внутренней и внешней зон Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // ДАН. – 2011. – Т. 438, № 4. – С. 500–505.

Разумовский Н. К. Запасы меди в медистых песчаниках и перспективы их использования // Вестник Геол. комитета. – 1929. – Т. 4, № 3. – С. 3–10.

Третьяков Н. А. К вопросу о возрождении медной промышленности в Пермском районе пермских медистых песчаников // Материалы по изучению Камского Приуралья. – 1928. – Вып. 1. С. 3–15.

Харитонов Т. В. Медеплавильные заводы Пермского края. – Пермь, 2011. – 43 с.

Boric R., Holmgren C., Wilson N. S. F., Zentilli M. The geology of the El Soldado manto type Cu (Ag) deposit, Central Chile / ed. T. M. Porter. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective. – Adelaide : PGC Publications, 2002. – Vol. 2. – P. 1–22.

Buchelt M., Tellez C. C. The Jurassic La Negra formation in the area of Antofagasta, northern Chile. In The Southern Central Andes // Lecture Notes in Earth Sciences / Eds. H. Bahlburg, Ch. Breitkreuz, P. Giese. – Heidelberg : Springer-Verlag, 1988. – Vol. 17 – P. 171–182.

Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature // Clay Miner. – 1988. – Vol. 23. – P. 471–485.

Cisternas M. G., Hermosilla J. The role of bitumen in strata-bound copper deposit formation in the Copiapó area, Northern Chile // Mineral. Deposita. – 2006. – Vol. 41. – P. 339–355.

Cabral, A.R., Beaudoin, G. Volcanic red-bed copper mineralisation related to submarine basalt alteration, Mont Alexandre, Quebec Appalachians, Canada // Mineralium Deposita. – 2007. – Vol. 42. – P. 901–912.

Cembrano J., González G., Arancibia G. et al. Fault zone development and strain partitioning in an extensional strike-slip duplex: A case study from Mesozoic Atacama fault system, Northern Chile // Tectonophys. – 2005. – Vol. 400. – P. 105–125.

Figueroa-Cisterna J., Morales-Ruano S., Moreno-Rodriguez V. Geology and preliminary REE and trace elements geochemistry of Boris Ángelo Cu-(Ag) deposit, Central Chile / 11 SGA Biennial Meeting. – Antofagasta, Chile : Springer, 2011. – P. 241–243.

Kramer W., Siebel W., Romer R. L. et al. Geochemical and isotopic characteristics and evolution of the Jurassic volcanic arc between Arica (18°30´S) and Tocopilla (22°S) , North Chilean Coastal Cordillera // Chem. Erde. – 2005. – Vol. 65. – P. 47–78.

Kojima S., Astudillo J., Rojo J. et al. Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the coastal Cordillera of Northern Chile // Mineralium Deposita. – 2003. – Vol. 38. – P. 208–216.

Kojima S., Tristá-Aguilera D., Hayashi K. Genetic aspects of the manto-type copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits // Resour. Geol. – 2009. – Vol. 59. – P. 87–98.

Konari M. B., Rastad E., Kojima S. Volcanic red-bed-type copper mineralization in the Lower Cretaceous volcano-sedimentary sequence of the Keshtmahaki deposit, southern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran // J. Min. Geochem. – 2013. – Vol. 190, No. 2. – P. 107–121.

Liou J. G., Maruyama S., Cho M. Phase equilibria and mineral paragenesis of metabasites in low-grade metamorphism // Mineralogical Magazine. – 1985. – Vol. 49. – P. 321–333.

Macfarlane A. W., Marcet P., LeHuray A. P., Petersen U. Lead isotope provinces of the Central Andes inferred from ores and crustal rocks // Econ. Geol. – 1990. – Vol. 85. – P. 1857–1880.

Maghfour S., Hosseinzadeh M. R., Moayyed M. Geology, mineralization and sulfur isotopes geochemistry of the Mari Cu (Ag) Manto-type deposit, northern Zanjan, Iran // Ore Geology Reviews. – 2017. – Vol. 81. – P. 10–22.

Maksaev V., Zentilli M. Chilean Strata-bound Cu-(Ag) Deposits: An Overview / Ed. T. M. Porter // Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective. – Adelaide : PGC Publishing, 2002. – Vol. 2. – P. 185–205.

Marschik R., Chiaradia M., Fontboté L. Implications of Pb isotope signatures of rocks and iron oxide Cu-Au ores in the Candelaria-Punta del Cobre district, Chile // Mineralium Deposita. – 2003. – Vol. 38. – P. 900–912.

Oliveros V., Tristá-Aguilera D., Féraud G. et al. Time relationships between volcanism-plutonism-alteration-mineralization in Cu-stratabound ore deposits from the Michilla mining district, Northern Chile: a $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronological approach // Mineralium Deposita. – 2008. – Vol. 43. – P. 61–78.

Oyarzun R., Ortega L., Sierra J., Lunar R., Oyarzun J. Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: The Talcuna and Arqueros districts // Ibid. – 1998. – Vol. 33. – P. 547–559.

Palacios C. Metamorfismo regional en rocas volcánicas jurásicas en el norte de Chile // Estudios Geol. – 1977. – Vol. 33. – P. 11–16.

Ramírez L. E., Palacios C., Townley B. et al. The Mantos Blancos copper deposit: An Upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the coastal range of Northern Chile // Mineralium Deposita. – 2006. – Vol. 41. – P. 246–258.

Sato K. Manto type copper deposits in Chile: a review // Bull. Geol. Surv. Jpn. – 1984. – Vol. 35. – P. 565–582.

Shiba M., Kawamura, T., Kojima, S. Petrological study on the low-grade metamorphism of the Jurassic andesitic rocks distributed in the coastal Cordillera, Northern Chile / XI Congreso Geologico Chileno. – 2006. – Vol. 2. – P. 303–306.

Sillitoe R. H. Iron-oxide-copper-gold deposits: An Andean review // Mineralium Deposita. – 2003. – Vol. 38. – P. 787–812.

Scheuber E., Andriessen P. A. M. The kinematic and geodynamic significance of the Atacama Fault Zone, Northern Chile // J. Struct. Geol. – 1990. – Vol. 12. – P. 243–257.

Stacey J. S., Kramers J. D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // Earth Planet Sci. Lett. – 1975. – Vol. 26. – P. 207–221.

Tosdal R. M., Munizaga F. Lead sources in Mesozoic and Cenozoic Andean ore deposits, north-central Chile (30–34°S) // Mineralium Deposita. – 2003. – Vol. 38. – P. 234–250.

Tristá-Aguilera D. Procesos geológicos relacionados con la formación de sulfuros de Cu primarios de los yacimientos estratoligados de Cu: El caso del yacimiento Lince-Estefanía, Distrito Michilla, Segunda Región de Antofagasta, Chile (PhD Thesis). – Antofagasta, Chile Univ Católica del Norte, 2007. – 130 p.

Tristá-Aguilera D., Barra F., Ruiz J. et al. Re-Os isotope systematics for the Lince-Estefanía deposit: Constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of Northern Chile // Ibid. – 2006. – Vol. 41. – P. 99–105.

Urabe T. Kuroko deposit modeling based on magmatic hydrothermal theory // Mining Geol., 1987. – Vol. 37. – P. 159–176.

Veizer J., Ala D., Azmy K. et al. $^{87}Sr/^{86}Sr$, evolution of Phanerozoic seawater // Chem. Geol. – 1999. – Vol. 161. – P. 59–88.

Wilson N. S. F., Zentilli M., Spiro B. A sulfur, carbon, oxygen, and strontium isotope study of the volcanic-hosted El Soldado manto-type copper district, Chile: The essential role of bacteria and petroleum // Econ. Geol. – 2003a. – Vol. 98. – P. 163–174.

Wilson N. S. F., Zentilli M., Reynolds P. H., Boric R. Age of mineralization by basinal fluids at the El Soldado manto-type copper deposit, Chile: $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of K-feldspar // Chem. Geol. – 2003б. – Vol. 197. – P. 161–176.

Поступила в редакцию 05.01.2018 г.

PROSPECTS FOR DISCOVERING ”MANTO”-TYPE COPPER DEPOSITS IN THE NORTH-EAST AND OTHER REGIONS OF RUSSIA

A. V. Volkov

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow

The paper discusses geological-structural and mineralogical-geochemical characteristics of Cu (Ag) Manto-type deposits (MTD),is the term coined after the third main source of Cu in Chile. Ores contain not only Cu but also to first tens g/t Ag. MTD are localized in the Jurassic and Lower Cretaceous volcanogenic and volcanogenic-sedimentary sequences spread along the coastal Cordillera in Northern Chile. Typical MTD are usually represented by layered or stratiform ore deposits but sometimes include lodes, ore breccias, and stockworks. Usually Cu-rich mineralization replaces amygdules in stratiform lava flows. Paragenesis of primary ores is quite simple and is represented by chalcocite, bornite, chalcopyrite, and pyrite. Widely manifested at MTD is the crust of weathering and the secondary enrichment zone (chrysocolla, atacamite), mostly recovered by heap leaching. A remarkable feature of these deposits is almost complete absence of quartz in ore bodies. Wallrock alteration is represented by propilitization. Manto-type mineralization is deposited in the epithermal low-temperature range. The most important MTD characteristics (indicator factors of forming) are considered. Prospects for discovering MTD in Russia are discussed.

***Keywords*: Cordillera, Chile, mine, copper, silver, Manto, volcanic zone, andesitic, lava, genesis, exploration model.**

REFERENCES

Boric, R., Holmgren, C., Wilson, N. S. F., Zentilli, M., 2002, The geology of the El Soldado manto type Cu (Ag) deposit, Central Chile, In Porter T. M. (ed.), Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective. Adelaide, PGC Publications, vol. 2, pp. 1–22.

Buchelt, M., Tellez, C. C., 1988, The Jurassic La Negra Formation in the area of Antofagasta, Northern Chile. In The Southern Central Andes, *Lecture Notes in Earth Sciences*, Eds. H., Bahlburg, Ch. Breitkreuz, P. Giese, Heidelberg, Springer-Verlag, vol. 17, pp. 171–182.

Cabral, A. R., Beaudoin, G., 2007, Volcanic red-bed copper mineralisation related to submarine basalt alteration, Mont Alexandre, Quebec Appalachians, Canada, *Mineralium Deposita*, vol. 42, pp. 901–912.

Cathelineau, M., 1988, Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature, *Clay Miner*., vol. 23, pp. 471–485.

Cembrano, J., González, G., Arancibia, G., Ahumada, I., Olivares, V., Herrera, V., 2005, Fault zone development and strain partitioning in an extensional strike-slip duplex: A case study from Mesozoic Atacama fault system, Northern Chile, *Tectonophys*, vol. 400, pp. 105–125.

Cisternas, M. G., Hermosilla, J., 2006, The role of bitumen in strata-bound copper deposit formation in the Copiapó area, Northern Chile, *Mineralium Deposita*, vol. 41, pp. 339–355.

Figueroa-Cisterna, J., Morales-Ruano, S., Moreno-Rodriguez, V., 2011, Geology and preliminary REE and trace elements geochemistry of Boris Ángelo Cu-(Ag) deposit, Central Chile, 11 SGA Biennial Meeting. Antofagasta, Chile, Springer, pp. 241–243.

Kharitonov, T. V., 2011, Copper-Smelting Plants in Perm' Region, Perm' [In Russian].

Kojima, S., Astudillo, J., Rojo, J., Tristá, D., Hayashi, K., 2003, Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the coastal Cordillera of Northern Chile, *Mineralium Deposita*, vol. 38, pp. 208–216.

Kojima, S., Tristá-Aguilera, D., Hayashi, K., 2009, Genetic aspects of the manto-type copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits, *Resour. Geol*., vol. 59, pp. 87–98.

Konari, M.B., Rastad, E., Kojima, S., 2013, Volcanic red-bed-type copper mineralization in the Lower Cretaceous volcano-sedimentary sequence of the Keshtmahaki deposit, southern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran., *J. Min. Geochem*., vol. 190, no. 2, pp. 107–121.

Kramer, W., Siebel, W., Romer, R.L., Haase, G., Zimmer, M., Ehrlichmann, R., 2005, Geochemical and isotopic characteristics and evolution of the Jurassic volcanic arc between Arica (18°30´S) and Tocopilla (22°S), North Chilean Coastal Cordillera, *Chem. Erde*, vol. 65, pp. 47–78.

Liou, J. G., Maruyama, S., Cho, M., 1985, Phase equilibria and mineral paragenesis of metabasites in low-grade metamorphism, *Mineralogical Magazine*, vol. 49, pp. 321–333.

Macfarlane, A. W., Marcet, P., LeHuray, A. P., Petersen, U., 1990, Lead isotope provinces of the Central Andes inferred from ores and crustal rocks, *Econ. Geol*., vol. 85, pp. 1857–1880.

Maghfour, S., Hosseinzadeh, M. R.,, Moayyed, M., 2017, Geology, mineralization and sulfur isotopes geochemistry of the Mari Cu (Ag) Manto-type deposit, Northern Zanjan, Iran, *Ore Geology Reviews*, vol. 81, pp. 10–22.

Maksaev, V., Zentilli, M., 2002, Chilean Strata-bound Cu-(Ag) Deposits: An Overview, Ed. T. M. Porter, Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective, Adelaide, PGC Publishing, vol. 2, pp. 185–205.

Marschik, R., Chiaradia, M., Fontboté, L., 2003, Implications of Pb isotope signatures of rocks and iron oxide Cu-Au ores in the Candelaria-Punta del Cobre district, Chile, *Mineralium Deposita*, vol. 38, pp. 900–912.

Oliveros, V., Tristá-Aguilera, D., Féraud, G., Morata, D., Aguirre, L., Kojima, S., Ferraris, F., 2008, Time relationships between volcanism-plutonism-alteration-mineralization in Cu-stratabound ore deposits from the Michilla mining district, northern Chile: a $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronological approach, *Mineralium Deposita*, vol. 43, pp. 61–78.

Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R., Oyarzun, J., 1998, Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: The Talcuna and Arqueros districts, Ibid, vol. 33, pp. 547–559.

Palacios, C., 1977, Metamorfismo regional en rocas volcánicas jurásicas en el norte de Chile, *Estudios Geol*., vol. 33, pp. 11–16.

Ramírez, L. E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M. A., Sial, A. N., Fernandez-Turiel, J. L., Gimeno, D., Garcia-Valles, M., Lehmann, B., 2006, The Mantos Blancos copper deposit: An upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the coastal range of Northern Chile, *Mineralium Deposita*, vol. 41, pp. 246–258.

Razumovsky, N. K., 1929, Copper reserves of cupreous sandstone and their production prospects , *Bull. of Geol. Committee*, vol. 4, no. 3, pp. 3–10 [In Russian].

Sato, K., 1984, Manto type copper deposits in Chile: a review, *Bull. Geol. Surv. Jpn*., vol. 35, pp. 565–582.

Scheuber, E., Andriessen, P. A. M., 1990, The kinematic and geodynamic significance of the Atacama Fault Zone, Northern Chile, *J. Struct. Geol*., vol. 12, pp. 243–257.

Shiba, M., Kawamura, T., Kojima, S., 2006, Petrological study on the low-grade metamorphism of the Jurassic andesitic rocks distributed in the coastal Cordillera, Northern Chile, XI Congreso Geologico Chileno, vol. 2, pp. 303–306.

Sidorov, A. A., Volkov, A. V., Chekhov, A. D., Alekseev, V. Uy., 2011, On M etallogeny of Inner and Outer Zones of the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt, *DAN*, vol. 438, no. 4, pp. 500–505 [In Russian].

Sillitoe, R. H., 2003, Iron-oxide-copper-gold deposits: An Andean review, *Mineralium Deposita*, vol. 38, pp. 787–812.

Stacey, J. S., Kramers, J. D., 1975, Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model, *Earth Planet Sci. Lett*., vol. 26, pp. 207–221.

Tosdal, R. M., Munizaga, F., 2003, Lead sources in Mesozoic and Cenozoic Andean ore deposits, North-

Central Chile (30–34°S), *Mineralium Deposita*, vol. 38, pp. 234–250.

Tretyakov, N. A., 1928, On the Issue of Copper-Production Industry Restoration in the Perm' Region of Permian Cupreous Sandstone, *Studying the Kama R. Area in the Urals*, iss. 1, pp. 3–15 [In Russian].

Tristá-Aguilera, D., 2007, Procesos geológicos relacionados con la formación de sulfuros de Cu primarios de los yacimientos estratoligados de Cu: El caso del yacimiento Lince-Estefanía, Distrito Michilla, Segunda Región de Antofagasta, Chile (PhD Thesis), Antofagasta, Chile, Univ Católica del Norte.

Tristá-Aguilera, D., Barra, F., Ruiz, J., Morata, D., Talavera-Mendoza, O., Kojima, S., Ferraris, F., 2006, Re-Os isotope systematics for the Lince-Estefanía deposit: Constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of Northern Chile, *ibid*., vol. 41, pp. 99–105.

Urabe, T., 1987, Kuroko deposit modeling based on magmatic hydrothermal theory, *Mining Geol.*, vol. 37, pp. 159–176.

Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., Bruckschen, P., Buhl, D., Bruhn, F., Carden, G. A. F., Diener, A., Ebneth, S., Godderis, Y., Jasper, T., Korte, C., Pawellek, F., Podlaha, O.G., Strauss, H., 1999, $^{87}Sr/^{86}Sr$, evolution of Phanerozoic seawater, *Chem. Geol*., vol. 161, pp. 59–88.

Volkov, A. V., Sidorov, A. A., Starostin, V. I., 2014, Metallogeny of Volcanic Belts and Activization Zones, Moscow, MAKS-PRESS [In Russian].

Wilson, N. S. F., Zentilli, M., Spiro, B., 2003a, A sulfur, carbon, oxygen, and strontium isotope study of the volcanic-hosted El Soldado manto-type copper district, Chile: The essential role of bacteria and petroleum, *Econ. Geol*., vol. 98, pp. 163–174.

Wilson, N. S. F., Zentilli, M., Reynolds, P. H., Boric, R., 2003б, Age of mineralization by basinal fluids at the El Soldado manto-type copper deposit, Chile: $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of K-feldspar, *Chem. Geol*., vol. 197, pp. 161–176.