

## ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ОТКРЫТИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА КАРЛИНСКОГО ТИПА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

А. В. Волков, А. Л. Галямов

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии  
и геохимии РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2019 г.

*Выполнен сравнительный металлогенический анализ геодинамических обстановок формирования месторождений золота карлинского типа (МЗКТ) на основе современных геофизических моделей литосферы Верхоянской, Невадийской и Южно-Китайской металлогенических провинций. Юго-восточный тренд МЗКТ Сакынджинского рудного района арктической зоны Якутии Верхоянской провинции коррелирует с простиранием средних значений плотности и температуры верхней мантии. Сходное направление отмечается также в структуре поверхности Мохо. Невадийские и сакынджинские МЗКТ и месторождения района Гуйчжоу Южного Китая пространственно приурочены к областям со средней мощностью земной коры (на мантийных поднятиях или их склонах). Невадийские и сакынджинские месторождения приурочены к участкам коры с наименьшей толщиной слабометаморфизованного осадочного слоя, при этом такая закономерность в размещении южнокитайских МЗКТ не отмечается. Невадийские и сакынджинские месторождения пространственно контролируются относительно менее плотными и более нагретыми участками верхней мантии. Южнокитайские МЗКТ локализованы на границе «прогретой» и «остывшей» областей верхней мантии. Выявлено сходство геодинамических обстановок формирования невадийских и сакынджинских МЗКТ, что подтверждает высокие перспективы открытия крупных месторождений в этом арктическом районе Якутии. Новые рудные районы с МЗКТ прогнозируются на всем протяжении Черско-Полоусненского покровно-складчатого пояса (Колымской петли).*

**Ключевые слова:** арктическая зона, Республика Саха (Якутия), Сакынджинский рудный район, месторождения золота карлинского типа, металлогенический прогноз.

### Введение

Месторождения золота карлинского типа (МЗКТ) представляют собой крупные метасоматические тела джаспериоидов в карбонатных вмещающих породах, которые содержат субмикроскопическое тонкодисперсное золото во вкрапленном пирите или марказите. Месторождения встречаются в рудных узлах (кластерах), сосредоточенных вдоль достаточно протяженных трендов (разломов). Для МЗКТ характерны сходные гидротермальные изменения

и рудные парагенезисы: растворение и окремнение карбоната, сульфидизация железа во вмещающих породах, формирование Au содержащего мышьяковистого пирита и марказита происходили в закрытой системе, а позднее, в открытой системе — отложение аурипигмента, реальгара и антимонита, минералов таллия.

МЗКТ впервые были установлены как самостоятельный класс месторождений в 1961 г., хотя несколько месторождений разрабатывались еще в начале 1900-х годов. В настоящее время насчитывается 88 месторождений в Неваде (США) и 30 в Южном

Китае [1]. Рекордным стал 2000 г., когда из МЗКТ Невады было добыто 275 т золота. К 2015 г. производство золота из карлинских руд сократилось почти вдвое — до 150 т [2].

За пределами Невады вкрапленные месторождения Au в осадочных породах сосредоточены на юге Китая и встречаются локально по всему миру, в частности на Балканах. Хотя тектонические обстановки формирования этих месторождений отличаются от невадских, вкрапленные месторождения Au в осадочных породах Западно-Циньлинского пояса и области Диан-Цянь-Гуй южного Китая и месторождение Алшар в Козуфском районе Македонии наиболее близки к МЗКТ [1; 3]. В последнем отчете Геологической службы США карлинский и китайский подтипы месторождений объединяются в рамках одной популяции (класса) — месторождений золота в осадочных толщах («sediment-hosted gold deposits»), которые характеризуются вкрапленным микронным невидимым золотом [3].

По многим объектам в мире высказываются противоположные версии относительно того, карлинского типа это месторождение или только похоже на него, либо оно относится к другому типу месторождений золота в осадочных породах. Так, к карлинскому типу в России отнесены некоторые месторождения Урала (Воронцовское и Светлинское), Верхнего Приамурья (Чагоянский рудный узел), Южной Якутии (Тас-Юрях) [5]. Сходство перечисленных месторождений с месторождением Карлин обосновывалось преимущественно на минералого-геохимических характеристиках руд.

Детальные структурно-формационные, стратиграфические, литологические и минералого-геохимические исследования в 1996—1998 гг. на Селеняхском хребте показали, что группа золоторудных проявлений Сакынджинского рудного района (Арбат, Гал-Хая и др.) сформировалась в такой же геодинамической обстановке, что и группа месторождений Карлинского тренда [6].

Для объяснения закономерностей размещения и условий формирования МЗКТ в статье проанализированы современные геофизические исследования литосферы: поверхности Мохо, плотности и термального режима верхней мантии [6; 7]. Новая модель CRUST1.0 основана на базе данных о толщине земной коры по результатам сейсмических исследований. Модель земной коры унаследована из модели CRUST2.0 [8]. Типы коры определялись в зависимости от возраста фундамента или тектонических условий [9], и для каждой ячейки сети даны глубина границы Мохо, скорость сжатия и скорость сдвига, а также дана плотность для восьми слоев: воды, льда, трехслойного осадочного чехла и верхней, средней и нижней кристаллической коры. Данные осадочных слоев в основном соответствуют модели [4].

В ходе работы над статьей был подготовлен ГИС-проект, включающий картографический материал

и базу данных отечественных и зарубежных МЗКТ. При проведении ГИС-анализа применялись известные методические приемы, заложенные в аналитический аппарат ARCMAP, MAPINFO и других картографических математико-аналитических систем. Наиболее эффективны устоявшиеся методы выявления и оценки пространственных связей (растровой алгебры, нечеткой логики, вероятностного анализа и др.). Пространственно размещение рассматриваемых в статье рудных районов с МЗКТ показано на рис. 1. Геологическое и геофизическое строение металлогенических провинций иллюстрируется на рис. 2—4.

### Закономерности размещения МЗКТ

МЗКТ распространены в области, подстилающей архейской корой или смешенной палеопротерозойской и архейской переходной корой, залегающей между краем рифтовой континентальной окраины и в значительной степени нетронутыми породами кристаллического фундамента. Кроме того, область МЗКТ подстилается мощной неопротерозойской докембрийской толщей терригенных пород, связанных с рифтами, которые поставляли металлы и серу в месторождения, что вытекает из интерпретации Rb изотопных данных для сульфидных минералов рудной стадии [10].

Распространение МЗКТ в Неваде (см. рис. 2а и 2б) приурочено к сети основных разломов фундамента, которые заложены еще во время неопротерозойского рифтогенеза [10]. Проникающая в фундамент система разломов имела решающее значение для формирования МЗКТ вследствие влияния на последующие сбросы, надвиги, тектонические деформации, магматизм и гидротермальную деятельность и играла роль каналов, собирающих и подводящих глубинные флюиды.

Миогеосинклинальная — образовавшаяся на шельфовом склоне толща содержит большую массу тонкослоистых, сульфидизированных и углеродистых доломитовых илистых известняков и мергелей — первичных вмещающих пород большинства МЗКТ, включая и все известные гиганты. Растворение карбонатов во время рудообразования привело к потере объемов и увеличению проницаемости пород; окварцевание и частичное выщелачивание доломитовых зерен создало проницаемую зернистую, джаспероидную структуру в породе, доступную для золотоносных флюидов и весьма благоприятную для образования карлинских руд [11].

Палеозойские синседиментационные разломы, вызванные резким ограничением и изменением мощностей осадочных фаций, благоприятны для локализации сингенетических Au и баритовых месторождений, а также рифтовых базальтов [12]. Эта система параллельных разломов, вероятно, унаследовала сеть основных разломов фундамента. Разломы реактивировались во время осадкообразования или в ходе тектонического растяже-

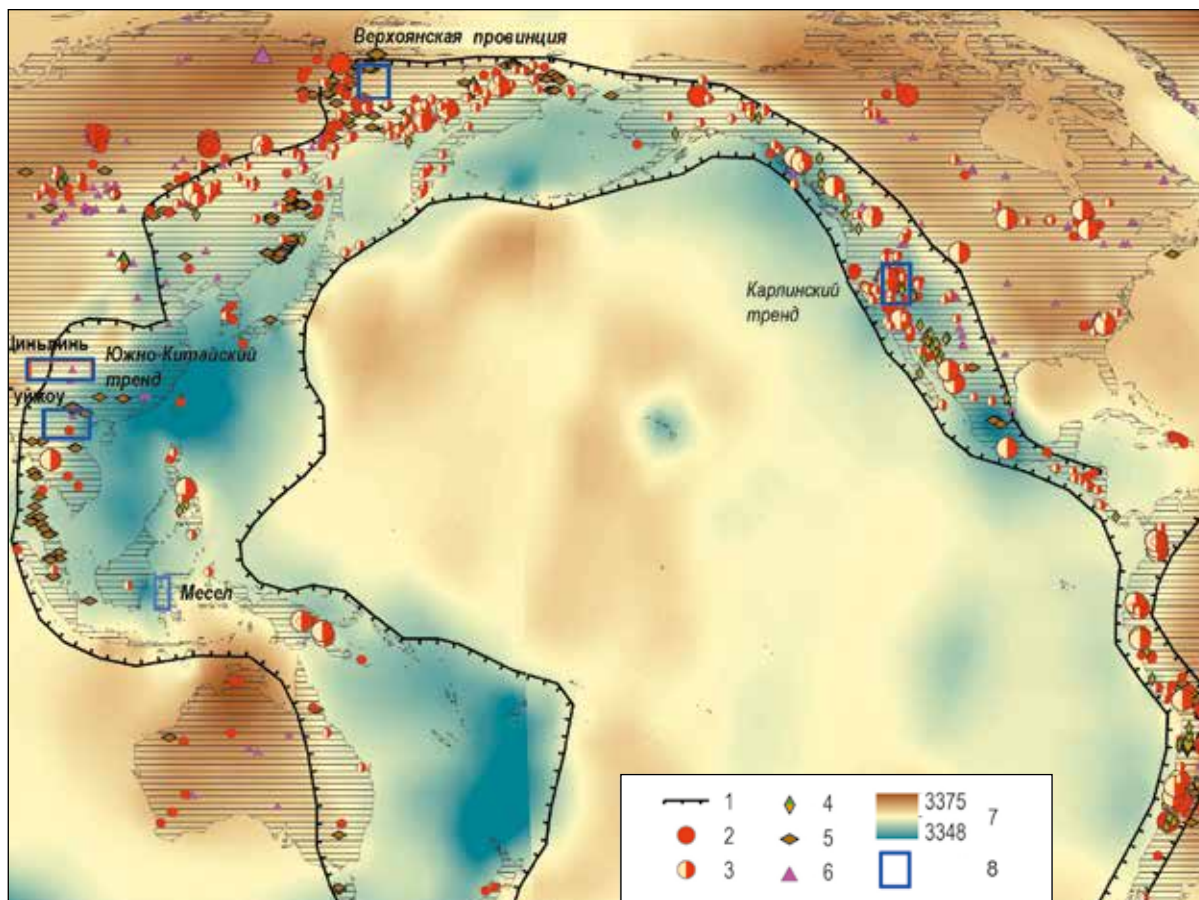


Рис. 1. Пространственное размещение районов МЗКТ в Тихоокеанском рудном поясе по данным ГИС-анализа на карте плотности верхней мантии, проект CRUST 2.0 [4]: 1 – границы Тихоокеанского рудного пояса; 2–6 – месторождения: 2 – Au в терригенных толщах, 3 – Au-Ag эпитермальные, 4 – Cu-Mo-Au-порфировые, 5 – Sn, 6 – редкометалльные; 7 – плотность верхней мантии (г/см<sup>3</sup>); 8 – рудные районы с МЗКТ

Fig. 1. The spatial distribution of the Carlin type Ore Deposits (CTOD) areas in the Pacific ore belt, according to the GIS analysis on the map of the upper mantle density, Project CRUST 2.0 [4]: 1 – borders of the Pacific ore belt; 2–6 – ore deposits: 2 – Au in terrigenous strata, 3 – Au-Ag epithermal, 4 – Cu-Mo-Au-porphyry, 5 – Sn, 6 – rare metals; 7 – the upper mantle density (g/cm<sup>3</sup>); 8 – CTOD ore areas

ния. Деформации мягких осадков и оползневые склоновые брекчии привели к повышению проницаемости и первичной пористости вдоль зон этих разломов, что способствовало притоку флюидов в известковые породы лежачего бока и образованию первичной диагенетической вкрапленной сульфидной минерализации [13].

Главный вмещающий МЗКТ блок — нижняя плита надвига «Roberts Mountain», заложившегося во время антлеровского орогена. Большинство гигантских МЗКТ залегает в пределах 100 м от надвига или его проекции. Мелкие месторождения, наоборот, встречаются к востоку от аллохтона «Roberts Mountain», где региональные палеозойские надвиги отсутствуют. Надвиги служили экранами любым восходящим флюидам. Непроницаемые мелкозернистые терригенные толщи были надвинуты на проницаемые карбонатные пласты. Создавшиеся таким образом структурные ловушки распределяли восходящие рудообразующие флюиды по латерали [17].

Палеозойское сжатие привело стратифицированные толщи к имбрикации в изоклинальные складки и надвиговые пояса северо-западного простирания [18]. В результате этого процесса образовались также погруженные антиклинали и купольные структуры, некоторые из которых впоследствии выступали в качестве участков осаднения для золотосодержащих растворов. После эксгумации последние представляют собой эрозионные окна в терригенных толщах аллохтона Антлер, а окно Лин в Карлинском тренде — наиболее известный пример [11].

Три крупнейших района МЗКТ (Северный Карлинский тренд, Гетчел и Пайплайн-Кортес) пространственно связаны с юрскими и/или меловыми дорудными плутонами (см. рис. 26). Небольшие штоки и многочисленные дайки также присутствуют. Эти тела локализовались вдоль существующих систем разломов в каждом районе, которые впоследствии контролировали рудообразующие флюиды [11].

Геолого-геофизические данные позволили предложить следующий оригинальный геодинамический

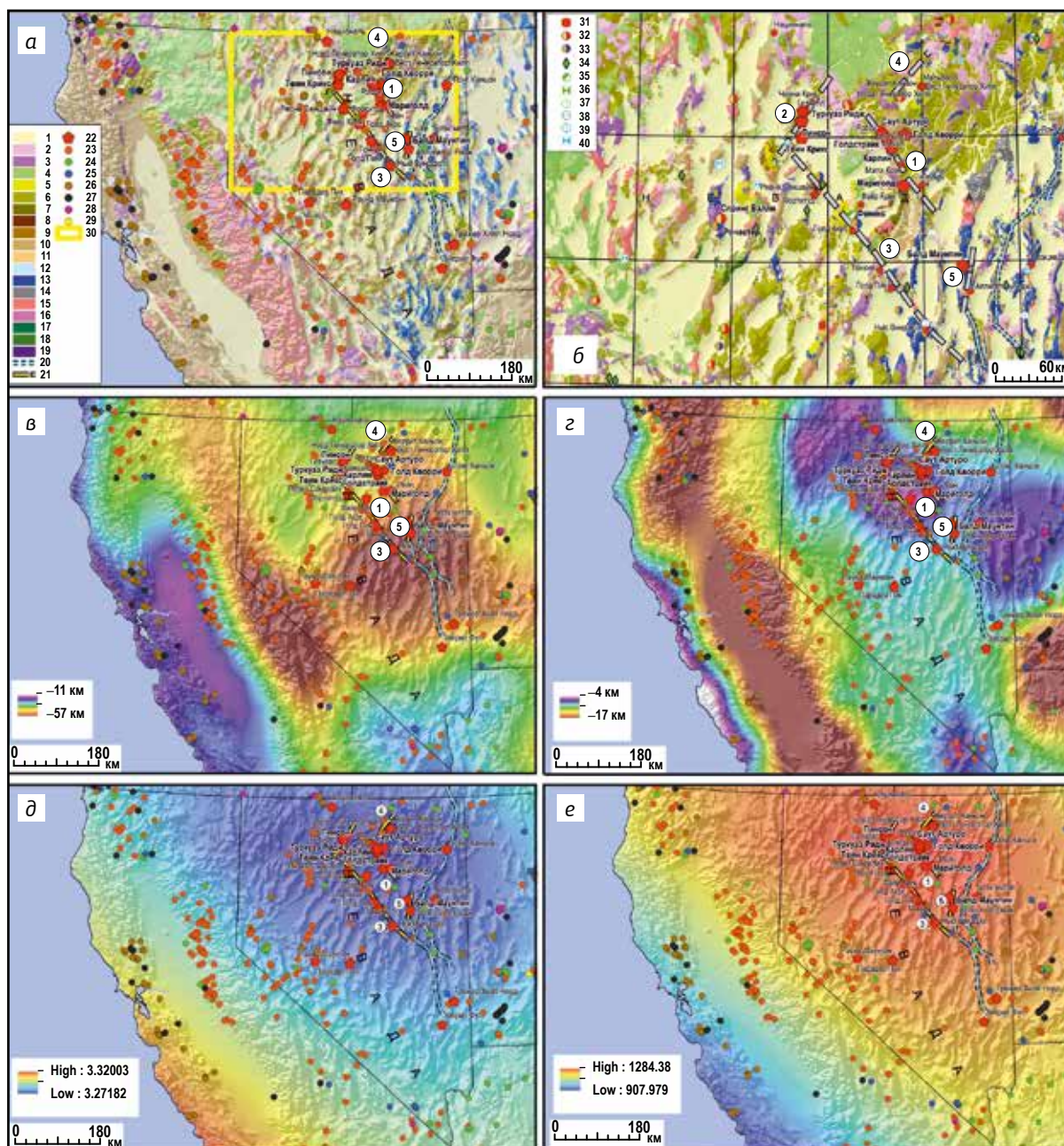
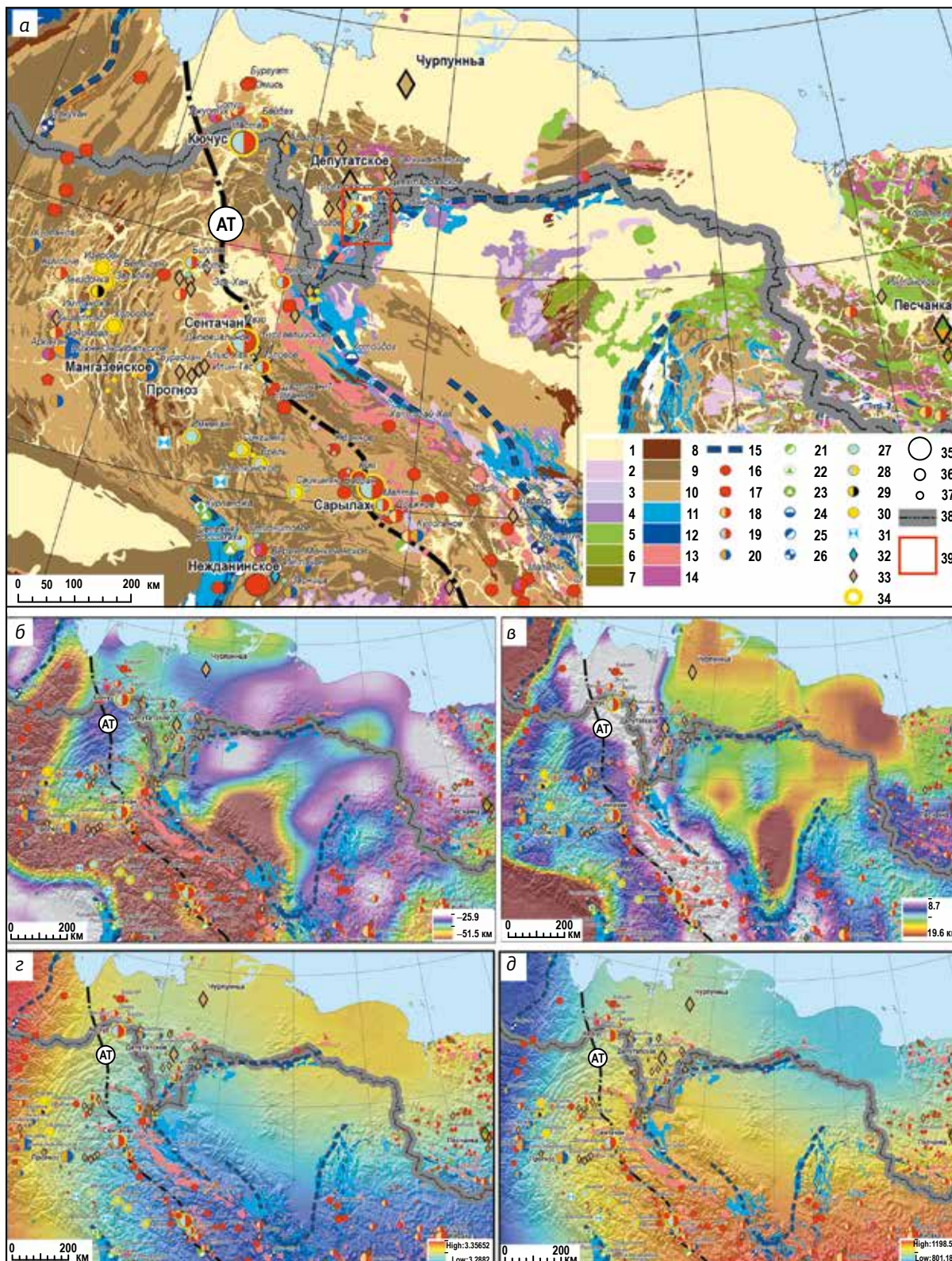


Рис. 2. Геологическое строение Невадской металлогенической провинции (а), формации и фации на шельфе и континентальном склоне в каменноугольное и пермское время (б) Карлинского рудного района (по [14]), поверхность Мохо (с) и мощность осадочного слоя (д) литосферы (по [7; 15]), плотность (д) и температура (е) верхней мантии (по [7; 16]) и позиция месторождений различных рудноформационных типов: 1–19 – формации: 1–14 – стратифицированные: 1 – комплексы чехла, 2 – риолиты, 3 – андезиты, 4 – базальты, 5 – туфолоавы и лавобрекчии, 6 – туфы, в том числе андезитового состава (7), 8 – конгломераты и гравелиты, 9 – песчаники, 10 – глинистые сланцы, 11 – карбонатно-терригенная, 12 – терригенно-карбонатная, 13 – карбонатная, 14 – метаморфические комплексы; 15–19 – магматические: 15 – граниты, 16 – диориты, 17 – габбро-диориты, 18 – габбро, 19 – ультрабазиты; 20 – ось рифовых построек; 21 – тренды месторождений; 22 – МЗКТ; 23–29 – другие месторождения: 23 – благородных металлов, 24 – Cu, 25 – Pb и Zn, 26 – других цветных металлов (Mo, W и др.), 27 – черных, 28 – редких, 29 – радиоактивных металлов; 30 – границы (рис. 26). Рудно-формационные типы месторождений (на рис. 36): 31 – МЗКТ, 32 – Au-Ag эпитеpмальная, 33 – Au-Sb, 34 – Cu-Mo-порфиpовая, 35 – Cu-колчеданная, 36 – Cu-скарновая, 37 – Cu жильная, в том числе с Au (30), 38 – Pb жильная, 39 – W-Mo скарновая, 40 – Hg

Fig. 2. The geological structure of the Nevada metallogenic province (a), formations and facies on the shelf and continental slope in the Carboniferous and Permian times (b) of the Carlin ore area (according to [14]), the Moho surface (c) and the thickness of the sedimentary layer (d) of the lithosphere (according to [7; 15]), density (d) and temperature (e) of the upper mantle (according to [7; 16]) and the position of various ore-forming types: 1–19 – Formations: 1–14 – stratified: 1 – mantle complexes, 2 – rhyolites, 3 – andesites, 4 – basalts, 5 – tuffolavas and lava-breccias, 6 – tuffs, incl. andesitic composition (7), 8 – conglomerates and gravelites, 9 – sandstones, 10 – shale, 11 – carbonate-terrigeneous, 12 – terrigeno-carbonate, 13 – carbonate, 14 – metamorphic complexes; 15–19 – igneous: 15 – granites, 16 – diorites, 17 – gabbro-diorites, 18 – gabbro, 19 – ultrabasites; 20 – axis of reef buildings; 21 – trends of deposits; 22 – CTOD; 23–29 – other deposits: 23 – noble metals, 24 – Cu, 25 – Pb and Zn, 26 – other non-ferrous metals (Mo, W, etc.), 27 – rare metals, 28 – rare metals, 29 – radioactive metals; 30 – borders of fig. 26. The ore-formation types of deposits in Fig. 36: 31 – CTOD, 32 – Au-Ag epithermal, 33 – Au-Sb, 34 – Cu-Mo-porphury, 35 – Cu-pyrite, 36 – Cu-skarn, 37 – Cu-vein, including with Au (30), 38 – Pb-vein, 39 – W-Mo skarn, 40 – Hg



сценарий формирования МЗКТ в северной Неваде [19; 20]. Приблизительно 55 млн лет назад край континента достиг Йеллоустоунской горячей точки (плюма) и с этого момента дрейфует над ней. В период 60—43 млн лет назад влияние горячей точки

на континент экранировалось субдуцируемой океанической плитой Фараллон. Полого субдуцируемый под западную окраину Северной Америки слэб плиты Фараллон препятствовал проникновению флюидов и/или магм в кору и способствовал их аккумуля-

Рис. 3. Геологическое строение Верхоянской металлогенической провинции (а), поверхность Мохо (б) и мощность осадочного слоя (в) литосферы (по [7; 15]), плотность (з) и температура (д) верхней мантии (по [7; 16]) и позиция месторождений различных рудноформационных типов: 1–14 – формации: 1–12 – стратифицированные: 1 – комплексы чехла, 2 – риолиты, 3 – дациты, 4 – андезиты, 5 – базальты, 6 – туфы, в том числе риолитового состава (7), 8 – конгломераты и гравелиты, 9 – песчаники, 10 – глинистые сланцы, 11 – терригенно-карбонатная, 12 – карбонатная, 13–14 – магматические: 13 – граниты, 14 – диориты; 15 – ось рифовых построек; 16 – ареалы распространения конгломератов; 17–35 – рудные формации: 17 – Au-кварцевая жильная, 18 – Au-сульфидно-кварцевая, 19 – Au-Ag эпитеpмальная, 20 – Au-Sb, 21 – Ag-полиметаллическая, 22–23 – Cu-колчеданная в вулканогенных (22) и осадочных (23) породах, 24 – Cu песчаников, 25 – колчеданно-полиметаллическая в терригенных породах, 26 – Pb-Zn стратиформная в карбонатных породах, 27 – кварц-антимонитовая, 28 – Sb-Hg эпитеpмальная, 29 – кварц-диккитовая эпитеpмальная, 30 – Hg аргиллизитовая, 31 – W-Mo скарновая, 32 – W-Mo грейзеновая, 33 – касситерит-силикатная, 34 – МЗКТ; 35–37 – масштабность месторождений: 35 – крупные, 36 – средние и мелкие, 37 – рудопроявления; 38 – граница арктической зоны; 39 – Сакынджинский рудный район

Fig. 3. Geological structure of the Verkhoyansk metallogenic province (a), the Moho surface (б) and thickness of the sedimentary layer (в) (according to [7; 15]), density (з) and temperature (д) of the upper mantle (according to [7; 16]) and the position of deposits of various ore-formation types: 1–14 – Formations: 1–12 – stratified: 1 – mantle complexes, 2 – rhyolites, 3 – dacites, 4 – andesites, 5 – basalts, 6 – tuffs, incl. rhyolite composition (7), 8 – conglomerates and gravelites, 9 – sandstones, 10 – clay shales, 11 – terrigenous-carbonate, 12 – carbonate, 13–14 – igneous: 13 – granites, 14 – diorites; 15 – axis of carbonate reefs; 16 – areas of conglomerates' distribution; 17–35 – ore formations: 17 – Au-quartz vein, 18 – Au-sulfide-quartz, 19 – Au-Ag epithermal, 20 – Au-Sb, 21 – Ag-polymetallic, 22–23 – Cu-pyrite in volcanogenic (22) and sedimentary (23) rocks, 24 – Cu-sandstones, 25 – pyrite-polymetallic in terrigenous rocks, 26 – Pb-Zn stratiform in carbonate rocks, 27 – quartz-antimonite, 28 – Sb-Hg epithermal, 29 – quartz-dickitic epithermal, 30 – Hg mudstone, 31 – W-Mo skarn, 32 – W-Mo greisen, 33 – cassiterite-silicates, 34 – CTOD; 35–37 – scale of deposits: 35 – large, 36 – medium and small, 37 – occurrences; 38 – the border of the Arctic zone; 39 – the Sakindzhi ore district

ляции и накоплению под слэбом. В момент разрушения этого слэба (приблизительно 42 млн лет назад) «экранирование» прекратилось, и скопившиеся магмы и флюиды получили возможность проникать в континентальную кору.

На окраине Северо-Американского континента установился преобладающий тектонический режим растяжения, обусловивший формирование металлогенической провинции Бассейнов и Хребтов. В интервале времени 46,1–40,4 млн лет назад в районе расположения будущих месторождений происходило формирование водонасыщенных осадочных бассейнов, вода их которых впоследствии циркулировала в геотермальных системах. Процессы растяжения сопровождалась формированием сквозных разломов на разных уровнях коры. Наряду с образованием новых разломов реактивировались старые, в частности надвиг «Roberts Mountain» и сеть древних разломов фундамента Северной Невады [11]. Повышенная проницаемость коры, множественные горячие интрузии в коре и огромные запасы воды в осадочных бассейнах — все это способствовало образованию гигантских по размеру гидротермальных систем.

Тектоническая обстановка МЗКТ в северо-восточной Якутии (см. рис. 3а) имеет большое сходство с таковой в Неваде (см. рис. 2а и 2б). Верхоянский хребет и Северо-Американские Кордильеры с начала палеозоя входили в континентальное обрамление северной части Тихого океана (см. рис. 1), имели сходные истории тектонического развития. Накопление типичных шельфовых и склоновых формаций в геодинамических условиях пассивной континентальной окраины, широкое развитие позднепалеозойских надвигов [5], позднеюрско-раннемеловая тектоническая активизация [5], внедрение гранитов Северного батолитового пояса — эти этапы развития Селенныха практически синхронны и идентич-

ны тектонической эволюции Северо-Американских Кордильер. Отличие состоит в том, что в Кордильерах главные (ранний мел) и более поздние (эоцен-олигоцен) сдвиги параллельны визейским надвигам [11], тогда как на Селенныхском хребте они пересекают покровную структуру [5].

МЗКТ Сакынджинского района (см. рис. 3а) сосредоточены на полосе длиной около 15 км и шириной 4–5 км вдоль зоны позднепалеозойского надвига, вдоль которого в начале мела сформировалась серия правосторонних сдвигов и сдвиго-взбросов [5]. Раннемеловой гранитоидный магматизм и гидротермальная активность использовали сформированную структуру для подъема и концентрации рудных компонентов. Рудные тела рассматриваемого района локализованы и в нижней, и в верхней пластинах [5]. В нижней пластине оруденение локализовано в лудловских джаспероидах — метасоматически измененных калькаренитах и известняках — вблизи зон надвига или сдвигов. В верхней пластине рудные тела приурочены к зонам дробления и оперяющих трещин вдоль крупнейших дислокаций в толще флишоидных калькаренитов (джаспероидов) и серицит-кварц-карбонатных сланцев низов среднего ордовика.

Тектоническая обстановка в Китае имеет некоторое сходство с таковой в Неваде. Карта и разрез (см. рис. 4а и 4б) показывают, что МЗКТ присутствуют в двух областях на южной и северной сторонах кратона Янцзы. В позднепротерозойское и силурийское время кратон был покрыт маломощной толщей кремнистых и платформенных карбонатных пород. В девоне юго-западная и северо-западная окраины кратона подверглись экстенсиональному растяжению и отложению мощной толщи девонских и триасовых карбонатных и кремнистых пород.

В раннем триасе кратон Янцзы столкнулся с Северным Китаем вдоль Циньлинского орогенного по-

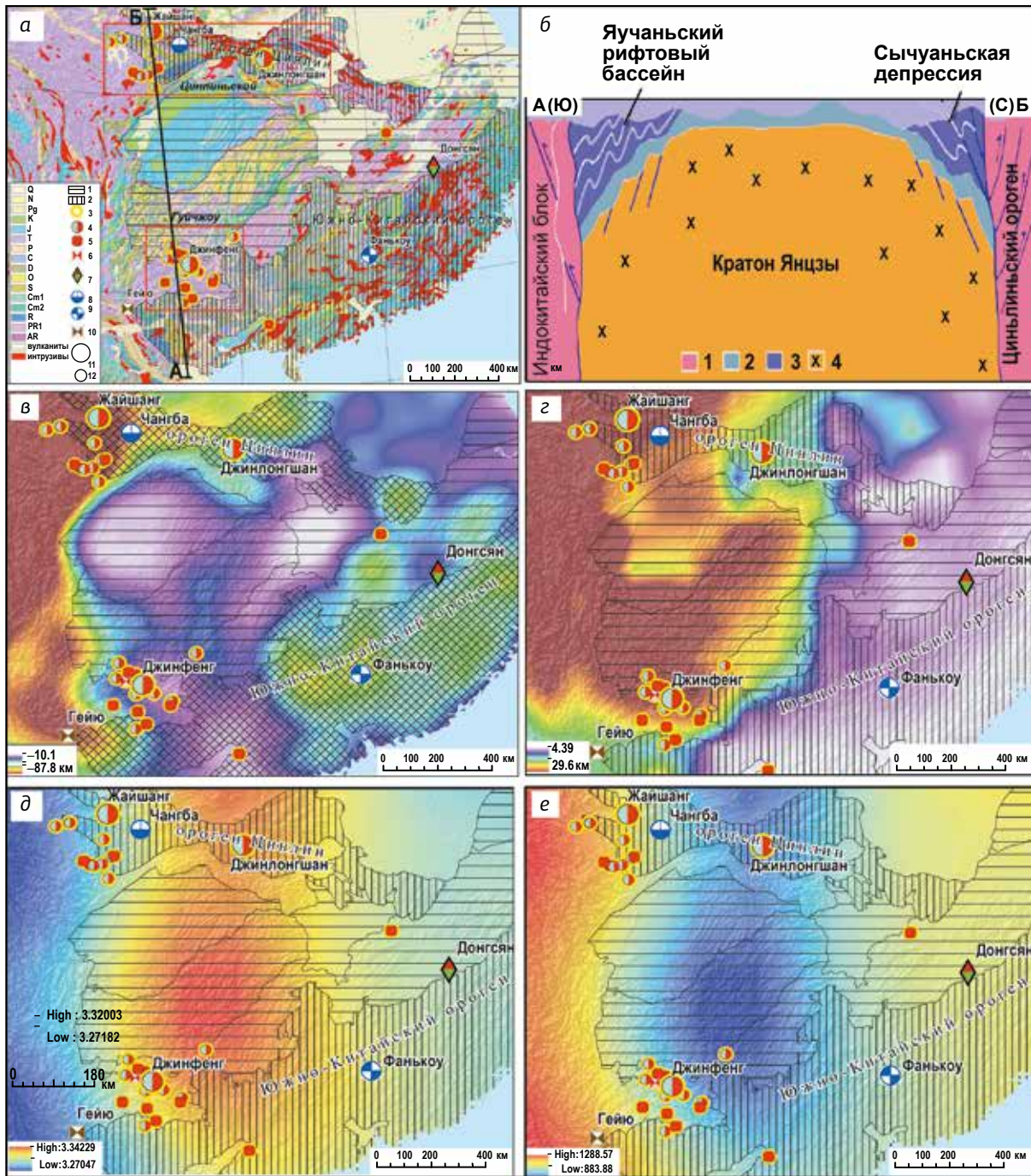


Рис. 4. Геологическая карта (а) Южно-Китайской металлогенической провинции и разрез (б) через кратон Янцзы (по [21]), поверхность Мохо (в) и мощность осадочного слоя (z) литосферы (по [7; 15]), плотность (д) и температура (е) верхней мантии (по [7; 16]) и позиция месторождений различных рудноформационных типов:

а: геологический возраст показан согласно международной шкале возрастов: 1 – кратон Янцзы; 2 – орогенные пояса; 3–10 – рудные формации: 3 – МЗКТ, 4 – Au-Sb, 5 – Au-сульфидно-кварцевая, 6 – Au-скарновая, 7 – Cu-Mo-порфировая, 8 – колчеданно-полиметаллическая (SEDEX), 9 – Pb-Zn-стратиформная (миссисиппийский тип), 10 – Sn-скарновая; масштаб проявлений: 11 – крупные, 12 – средние и мелкие;

б: 1 – структурный меланж, 2 – кембрийско-силурийские толщи чехла, 3 – девонско-триасовые толщи чехла, 4 – протерозойский кратон

Fig. 4. Geological map of the South China metallogenic province (a) and section through the Yangtze craton (b) (according to [21]), the Moho surface (v) and the sedimentary layer thickness (z) of the lithosphere (according to [7; 15]), density (d) and temperature (e) of the upper mantle (according to [7; 16]) and the position of deposits of various ore-formation types:

on the map a: geological age is shown according to the international age scale: 1 – the Yangtze craton; 2 – orogenic belts; 3–10 – ore formations: 3 – CTOD, 4 – Au-Sb, 5 – Au-sulfide-quartz, 6 – Au-skarn, 7 – Cu-Mo-porphyry, 8 – pyrite-polymetallic (SEDEX), 9 – Pb-Zn-stratiform (Mississippian type), 10 – Sn-skarn; the scale of deposits: 11 – large, 12 – medium and small;

on the section b: 1 – structural mélange, 2 – Cambrian-Silurian of the mantle strata, 3 – Devonian-Triassic of the mantle strata, 4 – Proterozoic craton

яса. Затем, в позднем триасе, последовала аккреция Индокитайского блока вдоль погружающейся юго-западной субдукционной зоны. Контракционная деформация в обеих областях продолжалась и в юрском периоде. В поясе Циньлин постколлизийный магматизм триасового и юрского возраста затронул весь ороген, тогда как в южном районе субдукционный магматизм был ограничен Индокитайским блоком (см. рис. 4б).

Основная часть МЗКТ в обеих областях Китая размещена в осадочных породах триаса, но эти вмещающие породы перекрывают нижележащие девонские и кембрийские осадочные образования [21]. В каждом районе, если МЗКТ образовались во время одного металлогенического события, они должны быть моложе своих триасовых вмещающих пород. Поскольку МЗКТ приурочены к разломам в складчатых породах, они, как правило, считаются юрскими или более молодыми по возрасту. МЗКТ в районе Гуйчжоу считаются меловыми по возрасту, потому что одно из месторождений моложе диабазовой дайки возрастом 140 млн лет [21]. В этом районе нет никаких доказательств магматической дуги. Возникает вопрос: откуда берется тепловая энергия для гидротермальных систем? В противном случае геология этого района очень похожа на геологию Невады [21].

Геологическая обстановка пояса Циньлин сильно отличается от района Гуйчжоу (см. рис. 4а и 4б). Au в этом районе помимо МЗКТ добывается из орогенных, скарновых и россыпных месторождений [21]. Орогенные золоторудные месторождения находятся в сильно деформированных зеленосланцевых породах между сутурными зонами разломов Шангдан и Мианлу. МЗКТ расположены в замках складок и надвиговом поясе к югу от сутуры Мианлу в слабо метаморфизованных породах.

Орогенные и карлинского типа месторождения в этом поясе сформировались, по-видимому, примерно в одно время вслед за пиком деформаций, метаморфизмом и магматизмом [21]. Два месторождения в этом районе моложе юрских дацитовых даек. Поэтому вполне возможно, что они образованы циркуляцией метеорных флюидов во время подъема и становления материнского для даек плутона.

Таким образом, МЗКТ формируются в разных тектонических условиях из разных флюидов. Южнокитайские месторождения размещены в более кремнистых породах, тогда как руды в Неваде и Верхоянье — в более известковистых породах. Невада, Циньлин и Сахындинский район — в магматических дугах, где было много тепловой энергии для функционирования гидротермальных систем. В Гуйчжоу источник тепла неясен. Возможно, тепло было обеспечено скрытыми магматическими камерами, связанными с меловыми диабазовыми дайками [21].

В Неваде, по изотопным данным, были предложены две модели [21]: модель глубинного флюида

для тренда Гетчел и модель метеорной циркуляции флюидов для других районов. Если глубинные флюиды и присутствуют в других районах, то они маскируются подавляющим количеством метеорных вод. В Китае, хотя глубинные флюиды возможны в поясе Циньлин, МЗКТ обеих областей, вероятно, образованы циркуляцией метеорных вод во время становления соответствующих орогенных поясов [21].

Выполненные ранее исследования показали общее сходство минерального состава проявлений Сахындинского района с МЗКТ Невады [5]. Отличия в изотопных составах серы, углерода и кислорода свидетельствуют о более активном влиянии на формирование сахындинских рудных залежей флюидов, связанных с гранитоидными магматическими очагами.

В пределах Селенныхского и Полоусного хребтов имеются все структурно-геологические предпосылки для дальнейшего поиска МЗКТ. Однако здесь они могут оказаться сосредоточенными в группе отдельных изолированных рудных узлов (в зависимости от масштаба рудоподводящих сдвигов), а не формируют систему МЗКТ вдоль Северо-Американских Кордильер, как в Неваде [5].

### **Геофизическая модель литосферы и геодинамические обстановки МЗКТ**

Изучение земной коры Невады геофизическими методами указывает здесь на глубину пологой поверхности Мохо от 30 до 34 км (см. рис. 2в) [22]. Согласно другим оценкам [9] мощность коры больше — 37—50 км. Основные направления трендов (Карлин, Баттл Маунтин-Эврика) дискордантны направлению склона поверхности раздела М и располагаются в области поднятого блока верхней мантии (см. рис. 2в).

В структуре земной коры Верхоянья по глубине поверхности Мохо выделяются три области (см. рис. 3б). Наиболее мощный прогиб земной коры (более 49 км) отмечается вдоль границы Сибирского кратона, протягивающейся от северного побережья до Южного Верхоянья. Вторая область примерно с такими же глубинами охватывает срединную часть Колымской петли, повторяя очертания мощной положительной Колымской магнитной аномалии. Остальные области — Куларский район, Алазейское поднятие, Омолонский блок — характеризуются сравнительно неглубоким залеганием поверхности Мохо в 30—35 км. МЗКТ Сахындинского района локализованы в области среднего глубинного уровня поверхности Мохо (33—36 км) (см. рис. 3б). По другим данным, в центральной части Верхоянской складчатой зоны поверхность Мохо залегает соответственно на глубине 35 км.

В Южно-Китайской провинции мощность земной коры повторяет контуры геотектонических блоков, причем отчетливо видна приуроченность МЗКТ к восточному склону мощного прогиба земной коры (см. рис. 4в). МЗКТ Циньлинского района находятся



в более глубокой области склона (40—50 км), чем МЗКТ в районе Гуйчжоу (15—25 км).

Структура осадочного слоя в отличие от кристаллической (консолидированной) коры более указывает на связь с геологическим строением и тектоникой. Под осадочным слоем (чехлом) традиционно понимают осадочные недислоцированные и неметаморфизованные отложения пологого залегания в верхней части земной коры [15]. В осадочный слой нередко включают также слабометаморфизованные и в различной степени дислоцированные осадочные комплексы [4]. На сейсмических разрезах такой осадочный чехол определяется по значениям скоростей упругих волн, а на сейсмических разрезах подошва осадочного чехла обычно фиксируется резким изменением текстуры отражателей.

В невадийской провинции осадочная кора Большого бассейна (Great Basin) отличается пониженными мощностями по сравнению с соседними Кордильерами и Монтаной (см. рис. 2г). Изучение глубокой структуры фанерозойских осадочных образований показало, что их мощность была существенно редуцирована при воздымании кристаллического фундамента [11; 23].

Тренды Карлин, Баттл и Маунтин-Эврика играли роль рудовмещающей зоны во время эоценового тектонического блокового расширения коры [11], охватившего регион Большого Бассейна. Этот процесс, сопровождаемый магматизмом, отнесен к олигоцену и раннему миоцену. Пластичное течение средней коры, проявившееся в развитии выступов метаморфических комплексов, проявилось в осадочном слое коры в виде пологих и крутых разрывных зон [11]. Формирование этих зон сопровождалось бимодальным вулканизмом и образованием эпитепимальных месторождений Au, Ag и Hg.

Строение осадочного слоя земной коры в Верхоянье в целом повторяет геологическое строение Сибирского кратона (см. рис. 3в). На карте мощности осадочной коры по максимальным значениям отчетливо выделяются восточная граница Сибирской платформы и Колымский блок с прилегающей с севера областью Алазейского поднятия. При этом также четко выделяется зона пониженной мощности, к которой приурочены МЗКТ Сакинджинского района (см. рис. 3в). Западная граница в целом сопряжена с Адыча-Тарынской зоной, вдоль которой сочленяется с запада на восток Верхоянский складчатонадвиговой пояс и Кулар-Нерский сланцевый пояс. Адыча-Тарынская зона определяла размещение продуктов юрского контрастного базальт-риолитового магматизма и миграцию флюидов, возможно, обогащавших золотом терригенные отложения [24]. Согласно реконструкциям Адыча-Тарынская троговая зона интерпретируется как континентальная рифтовая впадина [25].

В западных районах Южно-Китайского (Янцзы) кратона (см. рис. 4г) мощности осадков значительно больше, чем в восточной прибрежной области.

Мощность осадочного слоя в орогенных зонах также уменьшена. В Циньлинском районе в отличие от северной Невады (см. рис. 2г) отчетливо проявлена приуроченность МЗКТ к областям повышенной мощности осадочного слоя коры (см. рис. 4г).

Верхняя мантия в районе распространений месторождений в Неваде (см. рис. 2д) согласно данным геофизических исследований [7] имеет волновую скорость и плотность примерно на 3% меньше нормальных. Ее кровля отмечена на глубине до 50 км [26]. Аномальные свойства верхней мантии обусловлены изменениями в плотности и термальном режиме в связи с кайнозойским воздыманием большей части региона. Плотность верхней мантии меньше и составляет 63% среднего значения [27]. Это отличие в плотности нельзя объяснить только тепловыми эффектами. На 50% оно обусловлено отличиями химического (минералогического) состава. Широкий минимум аномалий остаточной гравитации обусловлен низкой плотностью верхней мантии и может частично отражать относительно низкоплотные базальтовые слэбы в верхней мантии, что по данным моделирования [28] связано с гравитационной нестабильностью, вызванной аномалией плотности всего 1% и локальным повышением температуры на 10%.

Приуроченность МЗКТ в Неваде к участкам локального повышения температуры менее плотной верхней мантии (см. рис. 2е) может указывать на опосредованную связь с мантийным источником тепла и вещества преобразуемых в условиях мантии коровых слэбов (метаморфогенная модель).

Структура состояния плотности и температуры верхней мантии в Верхоянье согласно глобальной модели [7] также в целом отвечает общей геотектонической структуре региона (см. рис. 3г и 3д). На западе региона отмечается область повышенной плотности вещества и пониженной температуры верхней мантии, соответствующая Сибирскому кратону. Участки верхней мантии в южном Верхоянье наиболее нагретые и менее плотные, там развиты комплексы мезозойских вулканоплутонических поясов. Северные территории, в том числе относящиеся к Арктической зоне, характеризуются менее напряженным, хотя и сравнительно повышенным по сравнению с Сибирским кратоном термальным режимом верхней мантии.

В Южно-Китайском регионе наиболее плотные и менее нагретые области верхней мантии отвечают ядерной части кратона Янцзы (см. рис. 4д и 4е). Под расположенными западнее и восточнее орогенными поясами верхняя мантия несколько менее плотная и более нагретая. Вместе с тем приуроченность МЗКТ к нагретым областям мантии здесь неотчетлива.

Выполненный выше анализ геофизических моделей и геодинамических обстановок позволяет прогнозировать новые рудные районы с МЗКТ в Черско-Полоусненском покровно-складчатом поясе (Колымской петле) (рис. 5). Здесь силурийские и девонские рифовые системы закартированы в составе

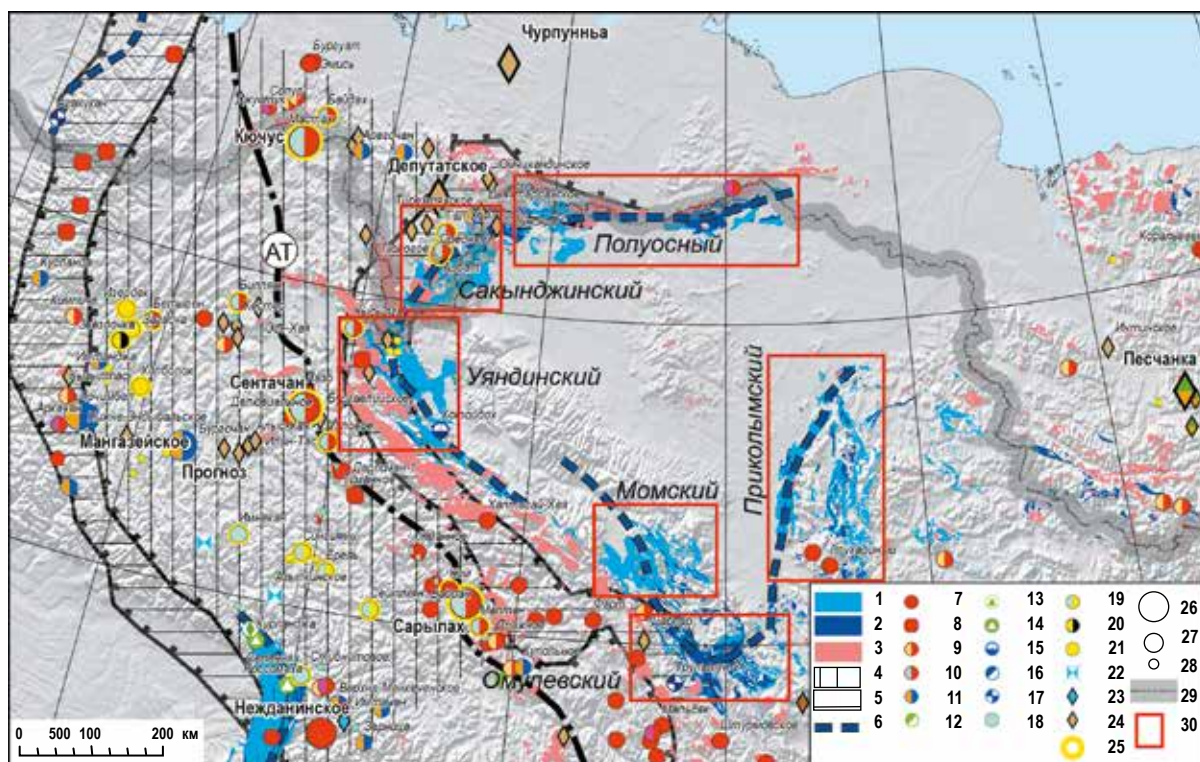


Рис. 5. Карбонатные формации, рифовые постройки, гранитоидные и диоритовые интрузивные образования Верхоянской провинции и позиция месторождений различных рудноформационных типов (с использованием материалов [29–31]): 1–3 – формации: 1 – терригенно-карбонатная, 2 – карбонатная, 3 – гранитоиды; 4 – внешний шельф, 5 – внутренний шельф; 6 – ось рифовых построек; 7–25 – рудные формации: 7 – Au-кварцевая жильная, 8 – Au-сульфидно-кварцевая, 9 – Au-Ag эпитермальная, 10 – Au-Sb, 11 – Ag-полиметаллическая, 12–13 – Cu-колчеданная в вулканогенных (12) и осадочных (13) породах, 14 – Cu песчаников, 15 – колчеданно-полиметаллическая в терригенных породах, 16 – Pb-Zn в вулканогенных породах, 17 – Pb-Zn стратиформная в карбонатных породах, 18 – кварц-антимонитовая, 19 – Sb-Hg эпитермальная, 20 – кварц-диккитовая эпитермальная, 21 – Hg аргиллизитовая, 22 – W-Mo скарновая, 23 – W-Mo грейзеновая, 24 – касситерит-силикатная, 25 – МЗКТ; масштабность месторождений: 26 – крупные, 27 – средние и мелкие; 28 – рудопроявления; 29 – Арктическая зона России; 30 – перспективные на открытие МЗКТ рудные районы

Fig. 5. Carbonate formations, reef structures, granitoid and diorite intrusives in the Verkhoyansk province and the position of deposits of various ore-formation types (using materials from [29–31]): 1–3 – geological formations: 1 – terrigenous-carbonate, 2 – carbonate, 3 – granitoids; 4 – external shelf, 5 – internal shelf; 6 – axis of reef buildings; 7–25 – ore formations: 7 – Au-quartz vein, 8 – Au-sulphide-quartz, 9 – Au-Ag epithermal, 10 – Au-Sb, 11 – Ag-polymetallic, 12–13 – Cu-pyrite in volcanogenic (12) and sedimentary (13) rocks, 14 – Cu sandstones, 15 – pyrite-polymetallic in terrigenous rocks, 16 – Pb-Zn in volcanic rocks, 17 – Pb-Zn stratiform in carbonate rocks, 18 – quartz-antimonite, 19 – Sb-Hg epithermal, 20 – quartz-dickit epithermal, 21 – Hg mudstone, 22 – skarn W-Mo, 23 – greisen W-Mo, 24 – cassiterite-silicate, 25 – CTOD; scale of deposits: 26 – large, 27 – medium and small; 28 – occurrences; 29 – the Arctic zone of the Russian Federation; 30 – ore areas promising for the discovery of CTOD

отложений карбонатных платформ [29]. Нами вслед за [29] выделяются Яно-Индибирский, Момский, Омулевский, Приколымский и Нижне-Колымский сегменты (потенциальные рудные районы) Верхоянской провинции. Яно-Индибирский сегмент Черско-Полуосненского пояса включает Сакынджинский рудный район (см. рис. 3а и 5). Перечисленные выше потенциальные рудные районы за исключением Момского по геофизическим и геологическим данным обладают большим сходством с Сакынджинским районом (см. рис. 3).

### Заключение

Выполнен сравнительный металлогенический анализ геодинамических обстановок формирования МЗКТ на основе современных геофизических моде-

лей литосферы Верхоянской, Невадийской и Южно-Китайской металлогенических провинций.

Тренд распространения МЗКТ северо-восточной Якутии в юго-восточном направлении коррелирует с простираем средних значений плотности и температуры верхней мантии. Сходное направление отмечается также в структуре поверхности Мохо.

Невадийские и сакынджинские МЗКТ и месторождения района Гуйчжоу пространственно приурочены к областям со средней мощностью земной коры (мантийным поднятиям или их склонам).

Невадийские и сакынджинские месторождения локализованы в блоках земной коры, отличающихся наименьшей толщиной слабометаморфизованного осадочного слоя, в отличие от южнокитайских МЗКТ.

Невадийские и сакынджинские месторождения пространственно контролируются относительно менее плотными и более нагретыми участками верхней мантии, а южнокитайские МЗКТ локализованы на границе «прогретой» и «остывшей» областей верхней мантии.

В результате анализа геофизических моделей земной коры выявлено сходство геодинамических обстановок формирования невадийских и сакынджинских МЗКТ, что подтверждает хорошие перспективы открытия крупных месторождений в этом арктическом районе Якутии. Новые рудные районы с МЗКТ прогнозируются на всем протяжении Черско-Полосуенского покровно-складчатого пояса (Колымской петли).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-70001) «Изучение геологических и геодинамических обстановок формирования крупных месторождений стратегических металлов Арктической зоны России: выводы для прогнозирования и поисков новых месторождений».

#### Литература/References

1. Волков А. В. Сидоров А. А. Геолого-генетическая модель месторождений золота карлинского типа // Литосфера. — 2016. — № 6. — С. 145—165.
2. Mineral commodity summaries 2019. U.S. Geological Survey. [S. I.], 2019, 196 p.
3. Berger V. I., Mosier D. L., Bliss J. D., Moring B. C. Sediment-Hosted Gold Deposits of the World-Database and Grade and Tonnage Models. Open-File Report 2014-1074, June 2014, Virginia, Reston, U.S. Geological Survey, 2014, 46 p.
4. Laske G., Masters G., Reif C. A New Global Crustal Model at 2×2 Degrees (CRUST2.0). Available at: <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.dir/crust/crust2.html>.
5. Поспелов И. И., Буянкин А. Г., Краснов А. Н. Геодинамические условия формирования и перспективы поисков золоторудных месторождений типа Карлин в Северо-Восточной Якутии // Вестн. Госкомгеологии РС(Я). — 2002. — № 2. — С. 14—18.
6. Pospelov I. I., Buyankin A. G., Krasnov A. N. Geodinamicheskiye usloviya formirovaniya i perspektivy poiskov zolotorudnykh mestorozhdeniy tipa Karlin v Severo-Vostochnoy Yakutii. [Geodynamic conditions of formation and prospects of prospecting for gold deposits of the Karlin type in northeastern Yakutia]. Vestn. Goskomgeologii RS(YA), 2002, no. 2, pp. 14—18. (In Russian).
7. Cammarano F., Guerri M. Global thermal models of the lithosphere. *Geophys. J. Int.* 2017, vol. 210, pp. 56—72.
8. Bassin C., Laske G., Masters G. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America. *EOS Trans AGU*, 81, F897, 2000.
9. Bouman J., Ebbin J., Meekes S. et al. GOCE gravity gradient data for lithospheric modeling. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.*, 2015, vol. 35, pp. 16—30.
10. Tosdal R. M., Wooden J. L., Kistler R. W. Inheritance of Nevadan mineral belts from Neoproterozoic continental breakup. *Geology and Ore Deposits 2000: The Great Basin and Beyond. Geological Society of Nevada Symposium Proc. Reno, 2000*, pp. 451—466.
11. Cline J. S., Hofstra A. H., Muntean J. L., Tosdal R. M., Hickey K. A. Carlin-Type Gold Deposits in Nevada: Critical Geologic Characteristics and Viable Models. *Econ. Geol. 100th Anniversary Volume. Ed. by J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, J. P. Richards. [S. I.], Society of Economic Geologists, 2005*, pp. 451—484.
12. Emsbo P., Hofstra A. H., Launa E. A. Origin of high-grade gold ore, source of ore fluid component, and genesis of the Meikle, and Neighboring Carlin-type deposits, Northern Carlin trend, Nevada. *Econ. Geol.* 2003, vol. 98, pp. 1069—1105.
13. Bloomstein E. I., Massingill G.L., Parratt R. L., Peltonen D. R. Discovery, geology, mineralization of the Rabbit Creek gold deposit, Humboldt County, Nevada. *Geology and ore deposits of the Great Basin. Reno: Geological Society of Nevada, 1991*, pp. 821—843.
14. Morrow J. R., Sandberg C. A. Evolution of Devonian carbonate-shelf margin, Nevada. *Geosphere*, 2008, no. 4, pp. 445—458.
15. Кашубин С. Н., Петров О. В., Мильштейн Е. Д. и др. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии // Регион. геология и металлогения. — 2018. — № 76. — С. 9—21.
16. Kashubin S. N., Petrov O. V., Mil'shteyn Ye. D., Kudryavtsev I. V., Androsov Ye. A., Vinokurov I. Yu., Tarasova O. A., Erinchek Yu. M. Glubinnoye stroyeniye zemnoy kory i verkhney mantii Severo-Vostochnoy Yevrazii. [The deep structure of the earth's crust and upper mantle of North-East Eurasia]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 2018, no. 76, pp. 9—21. (In Russian).
17. Tenzer R., Bagherbandi M., Gladkikh V. Signature of the upper mantle density structure in the refined gravity data. *Comput. Geosci.*, 2012, no. 16, pp. 975—986.
18. Nutt C. J., Hofstra A. H. Alligator Ridge: A shallow Carlin-type gold district. *Econ. Geol.*, 2003, vol. 98, pp. 1225—1241.
19. Murphy J. B., Oppliger G. L., Brimhall Jr. G. H., Hynes A. Plume-modified orogeny: An example from the western United States. *Geology*, 1998, vol. 26., pp. 731—734.

20. *Oppliger G. L., Murphy J. B., Brimhall Jr. G. H.* Is the ancestral Yellowstone hotspot responsible for the Tertiary "Carlin" mineralization in the Great Basin of Nevada? *Geology*, 1997, vol. 25., pp. 627—630.
21. *Hofstra A. H., Christensen O. D.* Comparison of Carlin-type Au deposits in the United States, China, and Indonesia — Implications for genetic models and exploration: U.S. Geological Survey Open-File Report 2002-0131. Ch. 2. [S. I.], 2002, 94 p.
22. *Litherland M. M., Klemperer S. L.* Crustal structure of the Ruby Mountains metamorphic core complex, Nevada, from passive seismic imaging. *Geosphere*, 2017, vol. 13, pp. 1506—1523.
23. *Wannamaker P. E., Doerner W. M.* Crustal structure of the Ruby Mountains and southern Carlin Trend region, Nevada, from magnetotelluric data. *Ore Geol. Rev.*, 2002, vol. 21, pp. 185—210.
24. *Аристов В. В., Кряжев С. Г., Рыжов О. Б. и др.* Источники флюидов и рудного вещества золотой и сурьмяной минерализации Адычанского рудного района (Восточная Якутия, Россия) // Докл. Акад. наук. — 2017. — Т. 2. — С. 174—180.
- Aristov V. V., Kryazhev S. G., Ryzhov O. B., Wolfson A. A., Prokofiev V. Yu., Sidorova N. V., Sidorov A. A.* Istochniki flyuidov i rudnogo veshchestva zolotoy i sur'myanoy mineralizatsii Adychanskogo rudnogo rayona (Vostochnaya Yakutiya, Rossiya). [Fluid Sources for Gold and Antimony Mineralization. Adychansky Ore District (Eastern Yakutia, Russia)]. *Dokl. Akad. nauk*, 2017, vol. 476, pp. 986—991. (In Russian).
25. *Бергер В. И., Мамонов С. В.* Региональный зональный метаморфизм терригенного комплекса Верхояно-Колымской складчатой системы // Проблемы регион. и удар. метаморфизма: Тр. ВСЕГЕИ. — 1972. — Т. 238. — С. 76—85.
- Berger V. I., Mamonov S. V.* Regional'nyy zonal'nyy metamorfizm terrigenogo kompleksa Verkhoyano-Kolymskoy skladchatoy sistemy Problemy regional'nogo i udarnogo metamorfizma. [Regional zonal metamorphism of the terrigenous complex of the Verkhoyansk-Kolyma folded system]. *Problems of regional and impact metamorphism. Tr. VSEGEI*, 1972, vol. 238, pp. 76—85. (In Russian).
26. *Thompson G. A., Talwani M.* Crustal structure from Pacific Basin to Central Nevada. *J. Geophys. Res.*, 1964, vol. 69, pp. 4813—4837.
27. *Kaban M. K., Mooney W.* Density structure of the lithosphere in the southwestern United States and its tectonic significance. *J. Geophys. Res.*, 2001, vol. 106., pp. 721—740.
28. *West J. D., Fouch M. J., Roth J. B., Elkins-Tanton L. T.* Vertical mantle flow associated with a lithospheric drip beneath the Great Basin. *Nature Geoscience*, 2009. DOI: 10.1038/ngeo526.
29. *Баранов В. В.* Рифовые системы в силуре и раннем девоне Северо-Востока Азии // Отечественная геология. — 2007. — № 5. — С. 43—50.
- Baranov V. V.* Rifovyie sistemy v silure i rannem devone Severo-Vostoka Azii. [Reef systems in the Silurian and Early Devonian of Northeast Asia]. *Otechestv. geologiya*, 2007, no. 5, pp. 43—50. (In Russian).
30. *Константиновский А. А.* Осадочные формации Верхоянского пояса и обстановки их накопления // Литология и полез. ископаемые. — 2009. — № 1. — С. 65—86.
- Konstantinovskiy A. A.* Osadochnyye formatsii Verkhoyanskogo poyasa i obstanovki ikh nakopleniya. [Sedimentary formations of the Verkhoyansk belt and the conditions of their accumulation]. *Litologiya i polez. iskopayemye*, 2009, no. 1, pp. 65—86. (In Russian).
31. *Кутыгин Р. В.* Основные черты стратиграфии и палеогеографии нижнедугалахского регионального подъяруса пермской системы Якутии // Природ. ресурсы Арктики и субарктики. — 2018. — Т. 25, № 3. — С. 5—21. — DOI: 10.31242/2618-9712-2018-25-3-5-21.
- Kutygin R. V.* Osnovnyye cherty stratigrafii i paleogeografii nizhnedulgalakhskogo regional'nogo pod'yarsa permskoy sistemy Yakutii. [The main features of stratigraphy and paleogeography of the Lower Dugal regional sub-stage of the Permian system of Yakutia]. *Prirodn. resursy Arktiki i subarkтики*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 5—21. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-25-3-5-21. (In Russian).

### Информация об авторах

**Волков Александр Владимирович**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: tma2105@mail.ru.

**Галямов Андрей Львович**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: alg@igem.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

**Волков А. В., Галямов А. Л.** Геофизическая модель земной коры, геодинамические обстановки и перспективы открытия месторождений золота карлинского типа в арктической зоне Республики Саха (Якутия) // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 1 (37). — С. 82—94. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-82-94.

## GEOPHYSICAL MODEL OF THE EARTH'S CRUST, GEODYNAMIC CONDITIONS AND PROSPECTS FOR DISCOVERING CARLIN-TYPE ORE DEPOSITS IN THE ARCTIC ZONE OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

Volkov A. V., Galyamov A. L.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (Moscow, Russian Federation)

The article was received on November 15, 2019

### Abstract

A comparative metallogenic analysis of the geodynamic conditions for the formation of Carlin Type Ore Deposits (CTOD) is performed on the basis of modern geophysical models of the lithosphere of the Verkhoyansk, Nevada and South China metallogenic provinces. The southeastern trend of the CTOD of the Sakindzhi ore area in the Yakutia Arctic zone of the Verkhoyansk province corresponds to the trend of the average density and temperature of the upper mantle. A similar direction is also noted in the structure of the Moho surface. The Nevada and Sakindzhi CTOD and deposits of the Guizhou region (South China) are spatially confined to areas with an average thickness of the earth's crust (on mantle uplifts or their slopes). The Nevada and Sakyndzhi gold ore deposits are confined to the crustal areas with the smallest thickness of a weakly metamorphosed sedimentary layer, while the pattern is not observed in the location of the South Chinese CTOD. The Nevada and Sakyndzhi deposits are spatially controlled by relatively less dense and warmer sections of the upper mantle. The South Chinese CTOD are localized on the border of the "warmed" and "cooled" region of the upper mantle. The similarity of the geodynamic conditions in the formation of the Nevada and Sakyndzhi CTOD is revealed that confirms high prospects for the discovery of large deposits in this Arctic region of Yakutia. New ore areas with CTOD are forecasted throughout the Chersko-Polousnensky folded belt (Kolyma loop).

**Keywords:** *Arctic zone, Republic of Sakha (Yakutia), Sakindzhi ore region, Carlin-type ore deposits, metallogenic forecast.*

This research is financially supported by the RFFI — Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-05-70001) "Studying the geological and geodynamic conditions for the formation of large strategic metal deposits in the Russian Arctic zone: conclusions for forecasting and searching of new deposits".

### Information about the authors

**Volkov Alexander Vladimirovich**, Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher, Head of Laboratory, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: tma2105@mail.ru.

**Galyamov Andrey Lvovich**, PhD of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: alg@igem.ru.

### Bibliographic description

**Volkov A. V., Galyamov A. L.** Geophysical model of the Earth's crust, geodynamic conditions and prospects for discovering Carlin-type ore deposits in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 1 (37), pp. 82—94. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-82-94. (In Russian).

© Volkov A. V., Galyamov A. L., 2020