

УДК 553.411(100)(091)

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

© 2019 г. Н. А. Горячев\*

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило  
ДВО РАН

Россия, 68500, Магадан, ул. Портовая, д. 16  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
Россия, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а  
\*E-mail: goryachev@neisri.ru

Поступила в редакцию 20.12.2017 г.

После доработки 19.06.2018 г.

Принята к публикации 27.02.2019 г.

Рассмотрено распределение основных месторождений золота в истории Земли. Показана первичная неоднородность архейской коры по золотоносности. Охарактеризованы основные золоторудные металлогенические эпохи. Показаны преобладающие связи золотых орогенных месторождений с колчеданными и медно-никелевыми в ранние периоды Земли (архей–протерозой), и с месторождениями вольфрама, молибдена, меди, сурьмы, ртути и олова в фанерозое. Анализ распространения минералого-геохимических типов собственно золотой минерализации также показал существенное разнообразие их для фанерозоя по сравнению с докембрием. Эти данные отражают мантийно-коровое происхождение золотой минерализации в целом и свидетельствуют об увеличении вклада вещества коры в баланс золотой минерализации с возрастом Земли. Обсужден известный перерыв в формировании месторождений золота (1.7–0.8 млрд лет), который обусловлен стабильным кратонным режимом длительно существовавшего суперконтинента Колумбия (Нуна) – Родиния.

**Ключевые слова:** орогенные золоторудные месторождения, металлогения золота, металлогеническая эволюция Земли.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0016-77706163-18>

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема металлогенической эволюции Земли и места в ней золотой минерализации привлекала и привлекает в последние 40 лет внимание многих исследователей (Саттран, 1984; Green, 1984; Hutchison, 1987; Nesbitt, 1988; Kulish, Komov, 1990; Рундквист, 1995, 1997; Сафонов, 1997, 2003; Хаин, 2000; Rundquist, Kravchenko, 2001; Goldfarb *et al.*, 2001; 2005, 2010; Groves *et al.*, 2005; Leahy *et al.*, 2005; Sawood, Hawkesworth, 2015; Кузьмин, Горячев, 2017; Кузьмин и др., 2018). В их работах показана разная продуктивность геохронов на золото и обращено внимание на дискретность проявления золоторудной минерализации, а также выявлен протяженный, около 1 млрд лет, средне-позднепротерозойский промежуток с отсутствием значимых концентраций этого металла (Саттран, 1984; Groves *et al.*, 2005; Sawood, Hawkesworth, 2015). Были предложены разные варианты объяснения существования такого промежутка (Groves *et al.*, 2005; Sawood, Hawkesworth, 2015). Частично также было обращено внимание на увеличение количества промышленных типов собственно золоторудных месторождений в фанерозое (орогенные, эпитеральные, порфиновые,

колчеданные) против орогенных и колчеданных в раннем докембрие (Goldfarb *et al.*, 2001, 2010; Groves *et al.*, 2005). Однако изменения состава золотого оруденения (минералого-геохимическая дифференциация состава руд во времени и вариации связей Au с минеральными формами триады полуметаллов As–Sb–Bi в рудах) на фоне данной эволюции выпали из сферы внимания исследователей. Это нашло отражение в типовом составе орогенных руд золота, где, в частности, показаны турмалин и теллуриды как типичные их минералы (Goldfarb *et al.*, 2001; Groves *et al.*, 2005; Sawood, Hawkesworth, 2015), на основании широкого распространения этих минералов в раннедокембрийских рудах. Еще один аспект, связанный с проблемой эволюции золотого оруденения в истории Земли, – это существующая неоднородность древних кратонов по степени их золотоносности (Горячев и др., 2005). С минеральной эволюцией руд тесно связана и характеристика металлогенических ассоциаций золоторудных месторождений (золото и платиноиды, золото и медно-никелевые руды, золото и вольфрам, золото и молибден, золото и уран), меняющаяся во времени, как это показано в работах Р. Гольдфарба (Goldfarb *et al.*, 2001, 2005, 2010).

В предлагаемой статье делается попытка рассмотреть общие тренды эволюции золотого оруденения, определить возможные причины всплесков продуктивности и перерывов и оценить их связь с процессами дифференциации мантии и ростом коры в истории Земли. Это важно еще и потому, что некоторые авторы полагают, что рассмотрение “золотых эпох” не способствует пониманию процессов, которые приводят к образованию месторождений золота, поскольку является примером эмпирического наблюдения, а не научной мысли (Leahy *et al.*, 2005).

Основной метод работы – анализ литературных источников в комплексе с наблюдениями и данными автора по ряду месторождений Балтийского щита, Западной и Восточной Австралии, Аляски, Канадских Кордильер и Калифорнии, Востока Азии и Сибири. Акцент в таком методическом подходе делается на оценке и обсуждении, в основном, промышленных месторождений, как крупных аномалий золота в земной коре, поскольку принципиально золотоносными являются все геохроны. При этом основное внимание обращено на собственно орогенные месторождения золота, из-за их наибольшей распространенности и промышленной монометалльности.

#### ГЛАВНЫЕ ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ИХ ДОЛЯ В БАЛАНСЕ ЗОЛОТА

В настоящее время общепринятым является разделение золоторудных месторождений на следующие промышленные типы: орогенные, эпитеpmальные, интрузион-релейтеды (связанные с интрузивами преимущественно гранитоидного состава), палеороссыпи, порфиоровые золотосодержащие, колчеданные золотосодержащие, IOGC–комплексные железо-оксидные (Kerrich *et al.*, 2000; Сафонов, 2003; Frimmel *et al.*, 2005; Groves *et al.*, 2005; Goldfarb *et al.*, 2010). Оценка их вклада в мировую добычу золота была сделана Х. Фриммелем с соавторами (Frimmel *et al.*, 2005) (табл. 1). Как видно из табл. 1, доля собственно золотых месторождений весьма высокая. А если считать Витватерсранд рудным гидротермальным месторождением сложного генезиса (Frimmel *et al.*, 2005; Law, Phillips, 2005; Сафонов, Прокофьев, 2006; Phillips, Powell, 2011), то в балансе золота собственно гидротермальное золотое оруденение будет иметь абсолютное преобладание, даже если включить в подсчет материалы по золотоносным колчеданным месторождениям (Сафонов, Прокофьев, 2006).

При рассмотрении баланса золотого оруденения следует также отметить вклад геодинамических обстановок формирования его месторождений. Такую оценку провели К. Лиихи с соавторами (Leahy *et al.*, 2005). Они выделили два типа орогенных

поясов – открытые (или неконсолидированные – unconsolidated) и закрытые (или консолидированные – consolidated) орогенные пояса. Первый тип объединяет орогенные пояса островодужных обстановок и обстановок активных континентальных окраин (Северо-Американские и Южно-Американские Кордильеры), второй – коллизионные обстановки закрытия океанических бассейнов разного размера: крупных (Алтаиды, Йилгарн, Африка), средних (Аппалачи, Гималаи) и маленьких (Альпы). Иными словами, эти исследователи четко выделяют чисто субдукционные обстановки формирования месторождений и коллизионные, с оговоркой, что для них также характерны субдукционные обстановки на доорогенной стадии, и с трактовкой

**Таблица 1.** Доля разных генетических типов месторождений золота (более 100 тонн добычи) в мировой продукции золота (Frimmel *et al.*, 2005)

Тип оруденения	Доля в добыче в % (всего 102 575 т)
Витватерсранд	39
Орогенные	29
Эпитеpmальные высокосульфидированные	3
Эпитеpmальные низкосульфидированные	6
Порфиоровые	16
Локализованные в осадках (россыпи)	5
Прочие	2

**Таблица 2.** Распределение крупнейших золотых месторождений в орогенных поясах разных типов геодинамических обстановок (Leahy *et al.*, 2005) с изменениями автора

Тип обстановок		% мирового тоннажа золота	% мирового количества месторож- дений
Коллизион- ные	Закрытия круп- ных океанов	57.4	46.4
	Закрытия сред- них океанов	2.1	3.3
	Закрытия ма- лых океанов	0.4	1.1
Субдук- ционные (Аккрецион- ные)	Активных кон- тинентальных окраин	28.7	31.5
	Обширных аккрецион- ных комплек- сов окраин континентов	6.1	10.5
	Островных дуг	5.3	7.2
Неорогенные		нет	нет

формирования Витватерсранда в форландовом бассейне закрытого крупного Калахари-океана. Этими исследователями был оценен вклад каждой из выделенных обстановок в интенсивность и экстенсивность золотого оруденения (табл. 2) на примере 181 крупнейшего месторождения общим тоннажем в 73 286 тонн добытого золота. Правда, трудно согласиться с выводами этих авторов о такой простой парадигме золотого оруденения, что чем более долговечны процессы субдукции, тем больший потенциал возникновения гигантских месторождений золота (Leahy *et al.*, 2005). На мой взгляд, их построения, наоборот, подчеркивают важность вклада собственно коллизионного процесса в формирование орогенных поясов и связанных с этим событием крупнейших орогенных (в широком понимании – Kerrich, Feng, 1992; Горячев, 2006; Goryachev, Pirajno, 2014) месторождений золота. В целом же, устоявшуюся геолого-генетическую промышленную классификацию орогенных месторождений золота (см. табл. 1) следует дополнить более подробной систематикой (Горячев, 2006;

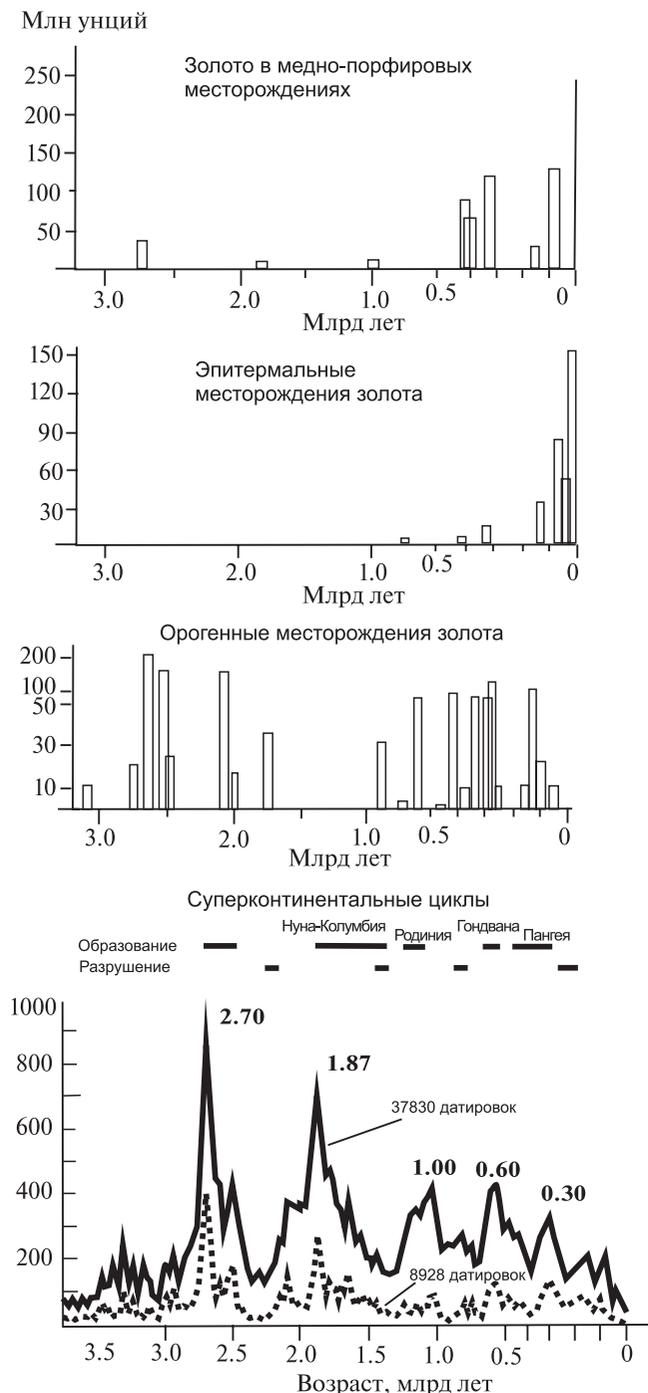
Goryachev, Pirajno, 2014), фиксирующей минералого-геохимическое разнообразие орогенного золотого оруденения фанерозоя, с выделением типов, отражающих эту специфику оруденения: (1) золото-мышьяк-сульфидного (Au-As-S-Fe-Cu-Ni-Co) с выделением собственно золото-мышьяк-сульфидного и золото-сульфидного подтипов вкрапленных руд; (2) золото-кварцевого, с колымским (Au-As-Sb-S-Pb-W-Fe) и кордильерским или калифорнийским (Au-As-S-Te-Ni-W-Cu-Fe) подтипами жильных руд; (3) золото-висмутового (Au-As-Bi-S-Te-Se-Sb-Ni-Co-W-Mo-Cu-Fe) – жильный, грейзеновый, скарновый, порфировый (аналог интрузион-релейтед типа, связанного с интрузивами гранитоидов); (4) золото-серебро-кварцевого (Au-Ag-Sb-S-Pb) типа жильных руд.

Поскольку орогенные месторождения золота составляют основу его баланса в истории земли, то здесь будет уместна краткая их характеристика, составленная по работам Р. Гольдфарба, Д. Гровса и Р. Керрича (табл. 3). Из этой таблицы можно сделать важный вывод о присутствии турмалина

**Таблица 3.** Общая характеристика Au-рудных месторождений орогенного типа (Kerrich *et al.*, 2000)

Признаки	Классические провинции и месторождения				
	Мезоархейский	Неоархейский	Протерозойский	Палеозойский	Мезозойско-кайнозойский
Примеры месторождений	Барбертон (Шеба, Файрвью)	Абитибити (Тимминс), Дхарвар (Колар), Квадрилатеро, Бразилия (Морелья), Слэйв (Кон), Танзания (Булуянхулу), Йилгарн (Калгурли), Зимбабве (Кам, Мотор)	Зап. Африка (Ашанти), Транс-Гудзон (Хоумстейк), Тапайос, Гайана (ЛасКристина), Сев. Территории Австралия (Граниты)	Лакланский складчатый пояс (Бендиго, Балларэт), Байкальский складчатый пояс (Сухой Лог), Южный Тянь-Шань (Мурунтау, Кумтор), Богемский массив (Каспреские Горы)	Отаго (Макраес), Томбстоун пояс (Форт Нокс, Пого, Шеелит Доум), Джуно золоторудный пояс (Аляска-Джуно, Тредуэлл), Подножие Сьерры-Невады (Джеймстаун), Яно-Колымский пояс (Наталка), Полуостров Джаодонг (Джаодонг, Линглонг)
Структурная позиция	Мягкие и хрупко-мягкие деформации, сдвиги или антиклинальные купола				
Морфологический тип руд	Жилы, брекчиевые и вкрапленные тела				
Вмещающие породы	Мафические и ультрамафические вулканические породы, интрузивные породы, BIF-кремни, граувакки				
Ассоциации металлов	Au, Ag ± As, Sb, Te, W, Bi; Au/Ag в среднем 5				
Пробность золота	800–950				
Основные минералы окорудных пород	Мусковит, Са-Fe-Mg карбонаты, хлорит, альбит, пирит, турмалин				
PT-условия	220–500 °C, 0.5–4 кб				
Рудные флюиды	Малосоленые, водно-карбонатные ±H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , ±N <sub>2</sub>				
Изотопный состав гидротермальной воды	δD = -20‰, -80‰; δ <sup>18</sup> O = 6‰, 10‰				
Источники тепла	Астеносфера, кора				
Другие признаки	Увеличивающаяся соленость связана со смешением с флюидами осадочных бассейнов. Радиогенные изотопы индицируют взаимодействие древней и ювенильной коры с флюидами, спорадически обогащенными бором. Реактивация древних месторождений генерирует некоторые вторичные изотопные и флюидные метки				

как одного из основных минералов околорудных метасоматитов, в ней также дана геохимическая комплексная характеристика руд, показывающая широкое разнообразие сопутствующих золоту элементов (Au, Ag ± As, Sb, Te, W, Bi).



**Фиг. 1.** Продуктивность важнейших золоторудных эпох, по данным Р. Гольдфарба с соавторами (Goldfarb *et al.*, 2001, 2005, 2010), с упрощениями, и суперконтинентальные циклы в истории Земли с датировками аллювиальных, детритных и гранитных цирконов (жирная линия) и собственно цирконов орогенных гранитоидов (пунктир) по данным К. Конди и Р. Астера (Condie, Aster, 2010) с упрощениями.

## ПРОЯВЛЕНИЕ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ

Согласно современным данным, в распределении промышленных месторождений золота наблюдается определенная дискретность (фиг. 1), начиная с 3.3 млрд лет (DeRonde *et al.*, 1992; Goldfarb *et al.*, 2001, 2005, 2010; Groves *et al.*, 2005). По многочисленным накопленным датировкам этими исследователями выделено несколько эпох промышленной золотоносности: мезоархейская, позднеархейская, раннепротерозойская, неопротерозойская, палеозойская и мезозойская. Рассмотрим коротко эти эпохи, отметив, что они проявились только через полтора миллиарда лет после рождения нашей планеты (Кузьмин и др., 2018; Кузьмин, Горячев, 2017).

Золото является одним из немногочисленных элементов, образующих промышленные концентрации практически во все периоды геологической истории Земли. История накопления золота начинается с образования так называемых золотоносных джеспилитов (Ручкин, Дерюгин, 1988), железистых кварцитов и зон сульфидизации стратиформного типа в древнейших отложениях зеленокаменных поясов архея. Золотоносные образования данного типа охарактеризованы практически для всех участков докембрийских пород, известных на поверхности Земли (Конди, 1983; Казанский, 1988; Синицын, 1990). Они приурочены к нижним частям разрезов зеленокаменных поясов и образуют генетически единую серию с базальтоидными (коматиитовыми) вулканитами, что отражает определяющую роль мантийного вещества в их происхождении. Содержания золота в железистых кварцитах составляют десятки-сотни мг/т с увеличением до промышленных — в местах скопления сульфидов. С ними ассоциируют пояса поздних золото-кварцевых жил (Boyle, 1979; Hutchison, 1987; и др.). Причем по времени формирования они различаются для разных континентов — так, в ЮАР находятся самые древние золото-кварцевые пояса провинции Барбертон (месторождения Шеба и пр.) и руды Витватерсранда, которые датированы интервалом 3.0–2.8 млрд лет (Kirk *et al.*, 2002). В пределах Канадского щита, Западной Австралии и в Индии отмечается максимум позднеархейской золотоносности (2.7–2.6 млрд лет) с формированием знаменитых золото-кварцевых месторождений района Абитибби (Канада), Колар (Индия) и других. Относительно механизма формирования этих жил единодушного мнения нет. Большинство склоняется к мысли об их метаморфической природе и связи с процессами зеленокаменного изменения и гранитизации (Groves *et al.*, 1987), а некоторые не исключают и ведущей роли поздних натровых гранитов (Corfu, Andrews, 1987; Huttori, 1987; Mole *et al.*, 2015).

Если добавить Витватерсранд (3.0–2.8 млрд лет), то позднеархейская эпоха по продуктивности превысит 60% мировой продуктивности, что было отмечено еще Ю.А. Билибиным (Билибин, 1955).

Вторая эпоха формирования золоторудных месторождений отвечает раннему протерозою (2.1–1.8 млрд лет) и представлена орогенными месторождениями золота, широко известными в пределах докембрия Бразилии (Hartman, Delgado, 2001), а также в Транс-Хадсон орогене, Свекофенском орогене, на севере Австралии, в Центральной Африке (Goldfarb *et al.*, 2005). Завершает древний цикл накопления золота образование так называемых “палеороссыпных” месторождений (Viljoen *et al.*, 1970; Hutchison, 1987).

Следующий интервал (или цикл) накопления золота (0.8–0.55 млрд лет) соответствует уже неопротерозою (рифей–венд) и связывается с байкальским тектоногенезом. Причины длительного перерыва (около 1 млрд лет) считаются неизвестными (Саттран, 1984), но, по всей видимости, они обусловлены спецификой развития земной коры в этот период, общей ее кратонизацией и началом коренной перестройки процессов тектогенеза, связанной, возможно, с новым этапом развития Земли (Ларин, 1980; Гораи, 1984). Более подробно об этом перерыве будет сказано в разделе “Обсуждение”. Факт заключается в том, что, несмотря на значительно возросший за последние 30 лет массив информации, этот перерыв так и остается не объясненным до конца. Этапы неопротерозойского тектогенеза, вследствие их ограниченного распространения (Сибирь, Австралия), внесли незначительный вклад в золотой баланс Земли. В настоящее время можно говорить только о месторождениях, обрамляющих с юга Сибирский кратон, где отмечается последовательность циклов накопления золота, показанная Д.В. Рундквистом (1990) на примере Байкало-Патомского региона. В частности, в наиболее золотоносной его части – Бодайбинской – зоне первичное накопление золота происходило в черносланцевых толщах низов неопротерозоя (1050–700 млн лет), а формирование поздних золото-кварцевых и золото-сульфидных руд в раннепалеозойский период связано с проявлением еще и самого молодого золото-кварцевого оруденения в среднем палеозое (Лаверов и др., 2007). Наиболее древние неопротерозойские крупные месторождения известны в пределах Енисейского кряжа (Советское, Олимпиада и др.), они датированы 780–650 млн лет (Ножкин и др., 2011). Незначительная золотоносность связана с поздним неопротерозойским – начала раннего палеозоя Аделаидским орогенным поясом байкалид Южной Австралии (Шер, 1972).

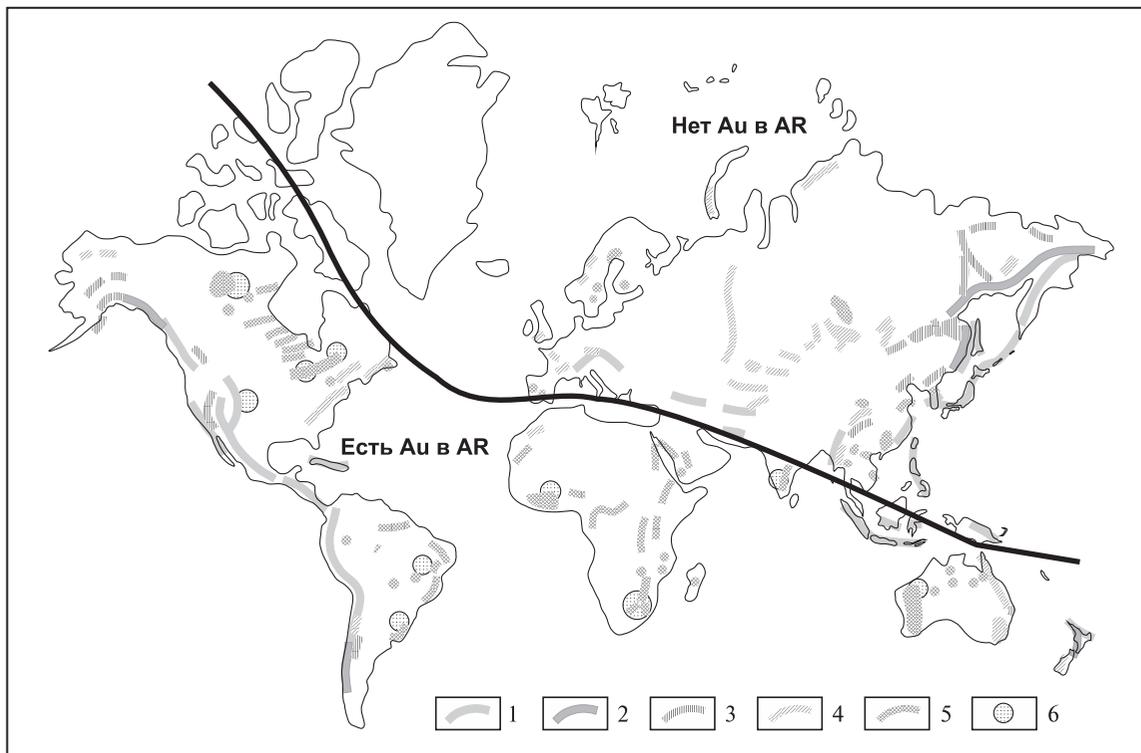
Разделение палеозойского золотого оруденения на две эпохи – каледонскую и герцинскую – во многом условно, благодаря появившемуся огром-

ному массиву данных по разным провинциям (например, Phillips *et al.*, 2003; Bierlein, Crowe, 2000). Однако как эпохи орогенного тектогенеза, сопровождающиеся своей металлогенией, они вполне закономерны и дискретны. С каледонским тектоногенезом связаны золото-кварцевые и, в меньшей степени, золото-сульфидные месторождения Аппалачского региона, Алтае-Саянской и Северо-Казахстанской провинции (Шер, 1972; 1974; Спиридонов, 1991; Goldfarb *et al.*, 2014), а также месторождения Байкало-Патомского нагорья (Лаверов и др., 2007; Goldfarb *et al.*, 2014). Для Сухого Лога, например, установлено два этапа формирования руд – 447 и 321 млн лет (Лаверов и др., 2007). Золоторудные месторождения этой эпохи имеют отчетливо выраженную связь с гранитоидным магматизмом, как, например, провинция Северного Казахстана (Спиридонов, 1991), и представлены преимущественно золото-сульфидным, золото-мышьяк-сульфидным, золото-кварцевым (кордильерский подтип) и золото-висмутовым минералого-геохимическими типами.

В эпоху герцинского тектогенеза, наряду с золото-кварцевыми жилами преимущественно колымского подтипа, большое значение имеют зоны вкрапленных руд золото-мышьяк-сульфидного типа (Бакырчик-Калбинский пояс Восточного Казахстана). В этот период сформировались руды месторождения Мурунтау, крупнейшего месторождения фанерозоя (Goldfarb *et al.*, 2014), и появляются промышленные золото-серебряные эпитеpmальные месторождения, характерные для Центрального Казахстана (Джунгаро-Балхашская зона) и Северо-Востока России (Омолонский массив, месторождения Кубака, Ольча), (Goldfarb *et al.*, 2014; Goryachev, Pirajno, 2014; Горячев и др., 2017).

Мощной вспышкой золото-кварцевого оруденения характеризуется этап мезозойского (ларамийского и невадийского) тектогенеза, образовавшего крупные пояса орогенных золото-кварцевых жил как кордильерского, так и колымского подтипов в мафических и салических провинциях Тихоокеанского обрамления (Goldfarb, 1997; Goldfarb *et al.*, 1997, 1998; Горячев, 1998, 2003; Тектоника..., 2001; Геодинамика..., 2006; Nelson, Colpron, 2007). В ассоциации с ними отмечаются зоны и залежи сульфидно-вкрапленного с золотом оруденения: Big Canyon (Калифорния), Дегдекан (Северо-Восток Азии) и др. И практически во всех случаях золотое оруденение тесно ассоциирует с раннеорогенным гранитоидным магматизмом (Горячев, 1998, 2003; Гамянин и др., 2003).

В следующую эпоху мезо-кайнозойского вулканизма золотое оруденение тесно связано с процессами становления тихоокеанского вулканического кольца. В это время сформировались эпитеpmальные месторождения позднемелового



**Фиг. 2.** Золоторудные пояса и ареалы разного возраста (Горячев и др., 2005): 1 – кайнозойские, 2 – мезо-кайнозойские, 3 – мезозойские, 4 – палеозойские, 5 – докембрийские, 6 – районы проявления крупных палеороссыпных месторождений. Черной кривой линией показана условная граница металлогенической (по золоту) неоднородности докембрийских кратонов.

окраинно-континентального Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП), детально охарактеризованные А.А. Сидоровым (1978), Р.Б. Умитбаевым (1986) и другими исследователями. Тогда же были сформированы основные орогенные мезотермальные месторождения золота Аляски (Newberry *et al.*, 1995; Goldfarb, 1997; Goldfarb *et al.*, 1997; Nokleberg *et al.*, 2005) и Британской Колумбии (Nesbitt, 1988; Dawson *et al.*, 1991; Nelson, Colpron, 2007), включая такие, как Джуно-Тредуэлл, Брелорн-Пайонир и другие, а также ранние месторождения Сихотэ-Алиня (Геодинамика..., 2006), Индонезии (Hutchison, Taylor, 1978) и Новой Зеландии (Hedenquist *et al.*, 2000).

Еще более молодые эпи- и мезотермальные жилы Румынии, Малого Кавказа, Камчатки, Тихоокеанских островных дуг и Мексики связаны с процессами наиболее поздней тектонической и вулканической активности и образуют кайнозойскую эпоху накопления золота. Для нее характерно исключительное многообразие золотого оруденения от золото-сульфидных колчеданных залежей типа Куроко и эпитеpmальных жил до мезотермального оруденения жильного типа – Зодское месторождение (Малый Кавказ) и современных зон минералоотложения из горячих источников типа Вайракей (Нов.Зеландия) и Солтон-Си (Калифорния, США).

Таким образом, формирование месторождений золота в истории Земли было дискретным. Эта дискретность выражается в следующих металлогенических по золоту эпохах: 3.0–2.6; 2.1–1.8; 0.8–0.55; 0.45–0.40; 0.33–0.25, 0.18–0.12 и 0.10–0.0 млрд лет. Основная масса золота образовалась в архейское и раннепротерозойское время, спустя 1.5 млрд лет после возникновения Земли (Кузьмин и др., 2018). Существует длительный (1.8–0.8 млрд лет) средне-позднепротерозойский период отсутствия крупных рудных накоплений золота (за исключением комплексного месторождения Олимпик Дам).

#### НЕОДНОРОДНОСТЬ ДОКЕМБРИЯ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Если рассматривать территориальное распределение продуктов золотого оруденения разных эпох, то можно отметить существование трех глобальных областей: докембрийские щиты и платформы с древним оруденением; Северо-Американо-Евразийский пояс палеозойско-мезозойского оруденения в окаймлении древних платформ и Тихоокеанская область длительного (PZ–KZ) развития с полициклическим золотым оруденением. Данные три крупные области расчленяются на

серии провинций фемического или сиалического профиля, составляющие части складчатых поясов разного возраста. При этом в распределении крупных ареалов золотой минерализации в докембрии наблюдается отчетливая металлогеническая (по золоту) неоднородность докембрийских кратонов (фиг. 2) (Горячев и др., 2005). Самые насыщенные месторождениями золота – Северо-Американский (Канадский) и Западно-Австралийский кратоны, к ним примыкают Южно-Американский и Африканский кратоны (Гондвана), в то время как Восточно-Европейский (Балтийский) кратон слабо золотоносен в архее и более золотоносен в протерозое, а Сибирский и Китайский кратоны вообще почти не содержат докембрийского рудного золота (Poulsen *et al.*, 1990; Zhou *et al.*, 2002; Pirajno, 2014), несмотря на наличие зеленокаменных поясов. Такая неоднородность отражает явную диспропорцию между (условно) “северным” и “южным” континентальными секторами Земли и указывает на первичную геохимическую неоднородность ранней коры нашей планеты. А незначительная продуктивность на золото древнейших комплексов, в свою очередь, обуславливает и слабую золотопродуктивность более молодых эпох ряда регионов этого сектора (например, каледонид и варисцид Европы).

#### МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ АССОЦИАЦИИ ЗОЛОТА ВО ВРЕМЕНИ И ЭВОЛЮЦИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Для архея отчетливо просматривается связь золота с медно-никелевыми коматиитовыми рудами (Западная Австралия, Южная Африка, Балтия), либо с колчеданными (Канада), либо с железистыми кварцитами (Бразилия) (Mole *et al.*, 2015; Goldfarb *et al.*, 2005). Также отмечается сонахождение и с молибденовой минерализацией. Для раннего протерозоя ситуация похожая, например, свекофенские месторождения Балтии. В этот период истории Земли золото четко демонстрирует свои мантийные связи в орогенной металлогении (ассоциация с месторождениями Ni, Cu, Pt и пр.), но в мезопротерозое добавляется ассоциация с урановыми месторождениями (Олимпик Дам), а для фанерозоя спектр сопутствующих руд значительно расширяется – Mo, Cu, Sb, Hg, W (Тихоокеанское рудное кольцо, Центрально-Азиатский орогенный пояс), Ag и даже Sn (Яно-Колымский орогенный пояс, Охотско-Чукотская окраинно-континентальная дуга). Это явно демонстрирует увеличение доли коровых связей золота в его металлогении. При этом следует отметить сохранение пространственных ассоциаций орогенных месторождений золота (кордильерский подтип) с ранними колчеданными или медно-никелевыми месторождениями для фемических металлогенических провинций фанерозоя (например, Урал, Восточный Саян, Калифорния), что подчеркивает важную роль мантии в металлогении золота и в этот период истории Земли.

Таким образом, налицо, разная ассоциация месторождений золота с рудными месторождениями для докембрия и фанерозоя. Данные различия возникли на рубеже среднего протерозоя и неопротерозоя и они, на мой взгляд, указывают на связь разнообразия минеральных типов месторождений золота во времени с ростом коровой составляющей в его металлогении.

Обширный массив литературных данных позволяет говорить о том, что архейские и раннепротерозойские месторождения характеризуются относительно простым, но разнообразным минеральным составом руд: кварц, полевые шпаты, серицит-мусковит, хлорит, турмалин, пирит, арсенипирит, галенит, разнообразные минералы As, Sb и Bi. Для них характерно проявление минералов всей золото-сопровождающей триады полуметаллов As-Sb-Bi и аналогов серы Te-Se (табл. 4) (Горячев, 2014). К сожалению, в современных работах по исследованию крупных золоторудных месторождений архея Канадского щита и Западной Австралии минералогические наблюдения занимают относительно небольшое место, тем не менее, в сводных работах (например, Girdwood *et al.*, 1983; Paghham, 1986) четко говорится о присутствии в типично орогенных золотых рудах турмалина, молибденита, минералов висмута. В то же время, анализ существующих вещественных систематик золотого оруденения, показывает (как указано выше) появление большого разнообразия типов золотой минерализации в фанерозое (Goldfarb *et al.*, 2005, 2010; Goldfarb *et al.*, 2014; Goryachev, Pirajno, 2014). Именно в фанерозое в разных орогенных поясах появляются и индивидуальные месторождения золото-висмутового типа (Средняя Азия, Северный Казахстан, Урал, Яно-Колымский пояс, Аляска и пр.). В аккреционных системах активных континентальных окраин, начиная с палеозоя (максимально в мезо-кайнозое), широкое распространение получают золото-серебряные эпитеpmальные месторождения high-sulfidation и low-sulfidation типов, максимально проявившиеся в мезо-кайнозое (Goldfarb *et al.*, 2001, 2005, 2014; Groves *et al.*, 2005). В составе фанерозойских месторождений золота (особенно для позднего мезозоя и кайнозоя) наблюдается отчетливая минеральная дифференциация на As-Sb-минерализацию, ассоциирующую с самородным золотом в его орогенных и эпитеpmальных рудах (в последних нередки минералы меди), и As-Bi-минерализацию в золото-висмутовых (золото-редкометалльных, золото-скарновых) рудах, генетически связанных с гранитоидным магматизмом коллизионных и субдукционных обстановок (интрузион-релейтед тип).

Таблица 4. Минералого-геохимическая специфика разновозрастных орогенных месторождений золота

Время формирования	Металлогенический стиль	Металлы-индикаторы	Рудные минералы	Жильные минералы	Примеры месторождений	Источники
Архей	Мафический	Au/Ag > 5 As, W, ± Te, В, Мо, Sb, Hg, Мо, V, Ва	Пирит, арсенопирит, галенит, пирротин, сфалерит, халькопирит, тетраэдрит-теннантит, сульфосоли, антимонит, Au, Ag, Pb и Bi теллуриды и сульфотеллуриды и др. (PGE, ...)	Кварц, карбонаты, серицит, альбит, хлориты, турмалин	Абитибид (Канада), Калгурли (Зап. Австралия), Пампалу Финляндия), Витватерсранд (ЮАР), Колар (Индия)	Hagemann & Cassidi, 2000 Phillips & Law, 2000; Groves <i>et al.</i> , 2001; Francois, 2004; Tomkins <i>et al.</i> , 2004; Helt <i>et al.</i> , 2014; Hazarika <i>et al.</i> , 2015; Molnar <i>et al.</i> , 2016; Rezeau <i>et al.</i> , 2017
Протерозой	Мафический и сиалический	Au/Ag > 5 As, W	Пирит, арсенопирит, галенит, пирротин, сфалерит, халькопирит, тетраэдрит-теннантит, сульфосоли, антимонит, Au, Ag, Pb и Bi теллуриды и сульфотеллуриды и др.	Кварц, карбонаты, серицит, альбит, хлориты, турмалин	Западная Африка, Канада	Beziat <i>et al.</i> , 1999; Voicu <i>et al.</i> , 1999; Partinton & Williams, 2000; Ansdell & Kyser, 2002; Fougetrouse <i>et al.</i> , 2017; Masurel <i>et al.</i> , 2017;
Палеозой	Мафический	Au > Ag As, Pb, Sb, W ± Te	Пирит, пирротин, арсенопирит, галенит, сфалерит, халькопирит, тетраэдрит-теннантит, Sb-As сульфосоли, Au, Ag, Pb теллуриды	Кварц, карбонаты, серицит, альбит, хлориты	Далрадианский пояс (Ирландия), Саяны, Урал (Россия)	Parnell <i>et al.</i> , 2000 Sazonov <i>et al.</i> , 2001 Zhmodik <i>et al.</i> , 1995 Горячев и др., 2012
Мезозой	Мафический	Au > Ag As, Pb, Sb, W	Пирит, пирротин, арсенопирит, галенит, сфалерит, халькопирит, тетраэдрит, Sb-сульфосоли, антимонит	Кварц, карбонаты, серицит, альбит, хлориты	Бендиго (Австралия) Отаго (Новая Зеландия) Бодайбо (Россия)	Phillips & Hughes, 1996, 1998; Ramsay <i>et al.</i> , 1998; Hughes & Phillips, 2015 Bierlein & Crowe, 1998; Jia <i>et al.</i> , 2000; Pirajno & Bentley, 1985; Lew & Corner, 1988; Koons & Craw, 1991; Paterson, 1985
Мезозой	Мафический	Au > Ag As, Pb, Sb, ± Te	Пирит, арсенопирит, галенит, пирротин, сфалерит, халькопирит, тетраэдрит-теннантит, Sb-As-сульфосоли, Au, Ag, Pb теллуриды	Кварц, карбонаты, серицит, альбит, хлориты	Мозер Лоулд, Джюно (США) Лядунь (КНР)	Taylor <i>et al.</i> , 2015 Golgarb <i>et al.</i> , 1997 Qui <i>et al.</i> , 2002; Goldfarb and Santosh, 2014; Li <i>et al.</i> , 2016
Мезозой	Сиалический	Au > Ag As, Pb, Sb, W	Пирит, арсенопирит, галенит, пирротин, сфалерит, халькопирит, тетраэдрит, Sb-сульфосоли, антимонит	Кварц, карбонаты, серицит, альбит, хлориты	Яно-Кольмский пояс (Россия), Центральная Аляска (США)	Горячев, 1998, 2003; Goldfarb <i>et al.</i> , 1997

Наиболее контрастно это наблюдается по северному обрамлению Тихого океана, в Северо-Американских Кордильерах (например, месторождения Пого, Форт Нокс, Даблин Галч, с одной стороны, и Карибу, Джуно – с другой), на Северо-Востоке Азии (Чистое, Малыш, Тэутэджак и Наталка, Нежданинское) (Горячев, 2003). Это результат определенной вещественной эволюции золотого оруденения, при постоянном присутствии в рудах значительного количества кварца.

## ОБСУЖДЕНИЕ

### *Этапность формирования*

Как уже отмечено выше, анализ проявления орогенной золоторудной минерализации на фоне эволюции земной коры показал ее дискретность и существование большого перерыва в среднем–позднем протерозое (Саттран, 1984; Goldfarb *et al.*, 2005; Groves *et al.*, 2005). В целом наблюдается тесная корреляция значимости пиков золотонности с пиками роста земной коры и орогенными событиями (Groves *et al.*, 2005), которые отвечают известным суперконтинентальным циклам (см. фиг. 1) (Goldfarb *et al.*, 2010; Sawood, Hawkesworth, 2015). Судя по многочисленным датировкам золоторудных месторождений разных этапов, они все формировались в процессе орогенных циклов, сопровождавших конструктивный тектогенез формирования континентов и суперконтинентов. Причем это происходило на финальных стадиях орогенного тектогенеза, практически синхронно, или чуть позже, с орогенным гранитоидным магматизмом, как для архея (Pagham, 1986; Robert *et al.*, 2005; Percival, 2007; Mole *et al.*, 2015), так и для фанерозоя (Горячев, 2003; Nelson, Colpron, 2007; Van Staal, 2007; Goldfarb *et al.*, 2014; Goryachev, Pirajno, 2014). Например, изотопные исследования формирования кратона Йилгарн (Западная Австралия) показали, что золотая минерализация является продуктом формирования его коры и самым последним событием в его архейской истории (Mole *et al.*, 2015). Золоторудные системы здесь проявлены либо внутри, либо по окраинам ювенильных блоков, однако проявление золоторудных полей внутри переработанной коры, по мнению этих исследователей, демонстрирует, что добавление ювенильного материала, которое насыщает золотом кору, не проявляется синхронно с самой золоторудной минерализацией. Важную роль при этом играли низкокальциевые граниты, сформировавшие масштабные гидротермальные системы, связанные с крупными тектоническими нарушениями. Они отражают взаимосвязь между мантийными и коровыми процессами и являются источником золота, демонстрирующим важность ювенильной коры для формирования крупных золоторудных докембрийских провинций (Mole *et al.*, 2015).

Протерозойскому перерыву в образовании крупных скоплений орогенного золота отвечает время существования суперконтинентов Колумбия (или Нуна) и Родиния. В цитированных выше работах (Groves *et al.*, 2005, Goldfarb *et al.*, 2001, 2005, 2010; и др.) времени формирования и существования этих суперконтинентов отводятся достаточно узкие интервалы. Согласно (Sawood, Hawkesworth, 2015), периоду отсутствия орогенных месторождений золота отвечает время формирования суперконтинента Родиния с отсутствием пассивных окраин вокруг, но причины отсутствия месторождений золота неизвестны. Однако, на мой взгляд, как раз отсутствие пассивных окраин, для которых характерно формирование обогащенных золотом черносланцевых толщ, косвенно и свидетельствует о связи золота с коровыми процессами, как подготовительными для концентрирования его в процессах орогенеза. Предположение Д. Гровса с соавторами (Groves *et al.*, 2005) о том, что лагуна в 1.7–0.7 млрд лет связана с эродированностью золоторудных месторождений из-за высокой в то время плавучести субконтинентальной литосферы, весьма неоднозначно, поскольку тогда бы в пассивных окраинах Колумбии, Родинии и тех континентальных блоков, которые были от них отколоты, существовали бы горизонты, обогащенные кластогенным золотом. К близкому выводу пришли П. Кавуд и К. Хавкесворз (Sawood, Hawkesworth, 2015), отметившие отсутствие характерных коррелятивных отложений, соответствующих сильной эрозии мезопротерозойских орогенных поясов. Эти исследователи предположили, что в суперконтинентальные циклы существовала эрозия только в активных окраинах, но в самом суперконтиненте она не была настолько велика, как представлялось Д. Гровсу с соавторами (Groves *et al.*, 2005). Кстати, и все известные крупные палеороссыпи по возрасту древнее 1.6 млрд лет (в основном не моложе 2.0) и сформировались в период 2.5–2.0 млрд лет (Viljoen *et al.*, 1970). Если же обратиться к Байкало-Патомскому бассейну южной окраины Сибирского кратона, то здесь имеются два горизонта, обогащенные благородными металлами и месторождениями золота (раннепротерозойский – кевактинский и неопротерозойский – дальнетайгинский), но они сформировались в процессах осадконакопления в обстановках пассивной континентальной окраины и более позднего задугового бассейна, вне связи с орогенными событиями мезопротерозоя (Будяк, Горячев, 2015; Будяк и др., 2016). Более того, здесь не зафиксировано существования мезопротерозойского орогенеза, и тектоническая стабильность была с 1.7 до 0.8 млрд лет (Эволюция..., 2006) и более.

Если рассматривать историю формирования и существования суперконтинентов Колумбия и

Родиния во взаимосвязи, то выясняется, что полного раскола Колумбии не было (Hou *et al.*, 2008; Evans, Mitchell, 2011; Roberts, 2013). Исследования показали, что в период 1.85–1.2 млрд лет Лаврентия, Западная Австралия и Восточная Антарктида все время были стабильным ядром Колумбии (до позднего палеопротерозоя), и только Индия и Северный Китай были отделены (Hou *et al.*, 2008). По данным (Evans, Mitchell, 2011), континент Нуна (Колумбия) существовал стабильно в интервале 1.9–1.3 млрд лет. Суперконтинент Колумбия возник в результате интенсивного коллизионного орогенеза с пиком 1.95–1.85 (чему, кстати, отвечает один из пиков формирования орогенных месторождений золота) в период его амальгамации 2.0–1.7. Детальный разбор точек зрения на историю этих двух суперконтинентов, проведенный Робертсом (Roberts, 2013), показал, что геологические и палеомагнитные данные предполагают его существование в качестве “квази-интегрированного” континента как минимум до 1.3 млрд лет с большим количеством рифтогенных событий, зафиксированных разновозрастными дайковыми роями, свидетелями “безуспешного раскола суперконтинента” (Roberts, 2013). Об отсутствии надежных изотопных данных, фиксирующих распад Колумбии, и существовании большого перерыва между ней и Родинией в суперконтинентальном цикле говорят исследования К. Конди и Р. Астера (Condie, Aster, 2010, 2013). Эти авторы показали, что нет никаких доказательств в Nd-, Hf- или Sr-изотопных записях о быстром распаде суперконтинента Нуна (Колумбия). И что самые надежные интервалы, отвечающие формированию орогенных гранитов для этого периода, отражают кластеры датировок цирконов с пиками 1.87 и 1.0 млрд лет, совпадающие для гранитных и для обломочных цирконов (Condie, Aster, 2010). В дальнейшем этот слабо диспергированный континент был подвержен незначительной модификации, с отделением и разворотом нескольких блоков, в результате чего и был сформирован суперконтинент Родиния (1.1–0.9 млрд лет) (Roberts, 2013). Этому же периоду (1.9–1.0 млрд лет) отвечает длительный период стабильности состава атмосферы и океана, который частично начал нарушаться после 1.3 и совсем сильно варьировать уже после 0.7 млрд лет (Groves *et al.*, 2005; Roberts, 2013). Незначительность в данный период тектонических движений в масштабе Земли нашла отражение именно в слабом проявлении орогенной золотоносности в это время. Важной особенностью Колумбии является своеобразный стиль тектоники в виде длительных процессов образования краевых аккреционных орогенов, способствовавших наращиванию объема континентальной коры (Roberts, 2013). Но удивительно, что мы не имеем свидетельств формирования золотого оруденения эпитеpmаль-

ного и орогенного типов в данный период существования таких активных краевых аккреционных орогенов. Простой эрозией (Groves *et al.*, 2005; Sawood, Hawkesworth, 2015) эту аномалию объяснить трудно, скорее это свидетельствует о слабой активности таких орогенов.

Таким образом, в истории Земли можно предполагать существование длительного периода кратонной стабильности в виде огромного сверхконтинента Колумбия-Родиния в интервале времени 1.8–0.8 млрд лет. Этому отрезку отвечает интервал интенсивной сиализации коры, проявленный максимальным за всю историю Земли всплеском анорогенного внутриплитного гранитного магматизма (Sawood, Hawkesworth, 2015). В этот же период были сформированы основные осадочные месторождения урана, комплексные и весьма специфичные по составу U-Au-Fe-TR руды (IOCG - тип) (Олимпик Дам), магнетит-апатитовые (типа Кируна), полиметаллические (тип - SEDEX), ильменитовые месторождения (Goldfarb *et al.*, 2010). Спецификой данной металлогенической эпохи является ее преобладающий уран-редкоземельный профиль и отсутствие крупных собственно золоторудных объектов. Вероятно, это отражает изменения в глубинах Земли, а именно, прекращение роста ядра и его активной дегазации (Маракушев и д., 1997; Рябчиков, 1997).

Таким образом, остается в силе предположение (Sawood, Hawkesworth, 2015) об уникальности этого периода в силу большой стабильности. В целом же, можно уверенно говорить о корреляции крупнейших эпох золотой минерализации с суперконтинентальными циклами и главными орогенными событиями в их составе.

#### *Эволюция минерального состава месторождений и их металлогенических ассоциаций*

Именно после этого перерыва и распада сверхконтинента произошло четкое разделение золотых месторождений на вещественные типы и расширился спектр металлогенических ассоциаций золотых руд. Начиная с байкальского тектогенеза, в поведении золота проявляется двойственность, обусловленная отчетливым разделением золоторудных поясов тектонических зон мафического (островодужного, субдукционного), фемисиалического (аккреционного) и сиалического (коллизионного) профиля. Еще С.Д. Шером было подмечено разное положение золоторудных месторождений в двух крайних типах таких тектонических структур (Шер, 1974). Для энсиматических островных дуг характерна связь золота с колчеданными рудами (Урал и др.) ранних этапов развития, а для золото-кварцевых жил калифорнийского и других типов – с поздним, орогенным этапом. В сиалических складчатых поясах деформированных пассивных окраин континентов мощная вспышка золотого

оруденения колымского типа была проявлена в позднеорогенный этап. Хотя есть данные о стратифицированных зонах вкрапленных сульфидов, приуроченных к отдельным горизонтам разреза пассивных окраин, образованным, вероятно, в начальные стадии их формирования (Сидоров, 1998). Однако роль их в промышленном балансе золота невелика и важна только как дополнительный источник золота (Горячев, 2003). Из сказанного выше вытекает необходимость, начиная с раннего палеозоя, рассматривать металлогению золота по тектоническим поясам разных типов, исследуя эволюцию золотого оруденения в разновозрастных фемических и сиалических провинциях раздельно. Именно на этом фоне проявляется и разделение (начиная с неопротерозоя) месторождений золота на месторождения с As-Sb и As-Bi геохимическими и минеральными ассоциациями (собственно орогенные и золото-редкометалльные, золото-висмутовые, или интрузион-релейтед). Причем это четко проявляется не только в обычных орогенных рудах золото-кварцевого состава, где кордильерский подтип характерен для фемических поясов, а колымский — для сиалических, но и в золото-сульфидно-вкрапленных и золото-скарновых и прочих рудах (Горячев, 2014). И как отмечено ранее, в среднем палеозое к этим типам добавляется золото-серебряная эпитегрмальная минерализация, максимально проявленная в позднем мезозое—кайнозое.

В фанерозое также турмалин становится нетипичным для золотых орогенных руд и обычным только для золото-висмутовых месторождений, связанных с гранитоидными интрузивами. Правда, здесь следует отметить одно исключение — орогенные месторождения золота центральной части Монголо-Охотского орогенного пояса, издавна выделявшиеся как золото-турмалиновые (Преображенский, 1945). Эти месторождения по своему составу близки раннедокембрийским орогенным месторождениям, сформированным при активном вкладе мантийного вещества. По условиям локализации данные объекты здесь сконцентрированы в зоне крупной тектонической сутуры, которая отражает интенсивные сдвиговые движения, возникшие в обстановке скольжения (трансформных окраин) Сибирского и Северо-Китайского континентов относительно друг друга, что привело к активному влиянию мантии на металлогению этой структуры (Ханчук, Голозубов, 2008; Goryachev, Pirajno, 2014; Кузьмин, Ярмолюк, 2016). В данном случае присутствие турмалина в орогенных рудах золота, имеющих значительную долю мантийного источника, позволяет поддержать точку зрения об индикаторной роли бора как производного из мантии (Лутков и др., 2004). Но это предположение требует проведения специальных исследований.

Весьма симптоматичным является максимальное распространение эпитегрмальной и порфи-



**Фиг. 3.** Сочетание мезотермального кварца орогенных золоторудных жил с поздним кварцем эпитегрмального облика (район Кановна, Западная Австралия). Фото автора.

вой минерализации в фанерозое. Признаки эпитегрмальной минерализации в рудах золота района Калгурли (фиг. 3) скорее отвечают формированию части орогенных руд золота в условиях малых глубин и резкого падения давления при движениях по крупным зонам разломов, с которыми они здесь ассоциируют. Учитывая известную генетическую связь эпитегрмальных месторождений с процессами субдукции (месторождения Купол, Лепанто, Хисикари и пр.) или рифтогенеза (Балей), можно предполагать важное металлогеническое значение этих процессов для золота только в фанерозое. При этом золотопродуцирующая роль магматических поясов субдукционной природы явно растёт от палеозоя к кайнозое. В то же время, орогенное золото проявлялось во все периоды времени, что говорит об однотипности процессов орогенеза в истории Земли. И здесь мы прикасаемся к проблеме существования субдукционных обстановок в раннем докембрии. По крайней мере, такой металлогенический индикатор (Горячев, 2010), как отсутствие эпитегрмальных месторождений и порфириновых месторождений в то время, оставляет вопрос о металлогеническом значении зон субдукции и их проявлении в раннем докембрии открытым. И здесь вряд ли такое отсутствие можно объяснять большим эрозионным срезом, поскольку вулканические комплексы присутствуют во многих структурах разного возраста.

Отмеченную выше (см. табл. 4) пестроту минерального состава орогенных руд золота в раннем докембрии и их металлогенические ассоциации, возможно, следует объяснять плюмовым механизмом мантийной конвекции, продуцирующим молодую ювенильную кору (Кузьмин, 2014; Mole *et al.*, 2015; Кузьмин, Горячев, 2017; Кузьмин и др., 2018). По крайней мере, металлогения горячих полей и плюмов Сибири, Эмейшаня и прочих (Шарапов и др., 2009) показывает ту же пестроту ассоциаций золотых руд с медно-никелевым и сурьмяно-ртутным оруденением.

Таким образом, рассмотрение роли мантийно-корового взаимодействия в металлогении золота в истории Земли показывает элементы двойственности в отношении поведения золота при фор-

мировании его промышленных скоплений. На ранних этапах истории (архей-палеопротерозой) проявляется четкая связь с мантийными процессами опосредованно через мафическую ювенильную кору. На поздней стадии эволюции Земли существенно возрастает коровый вклад в металлогению золота.

В завершение уместно уделить внимание роли метаморфических и магматических процессов в формировании орогенных руд золота. Как следует из данных таблицы 3 и материалов ведущих современных исследователей (Groves *et al.*, 1987, 2005; Goldfarb *et al.*, 1997, 2001, 2005, 2010), орогенное золотое оруденение является типично метаморфогенным. Однако приведенные нами данные о пространственно-временных ассоциациях этих месторождений с орогенным гранитоидным магматизмом в разные временные эпохи, наряду с появлением, начиная с 90-х годов, современных публикаций о важном вкладе магматогенной составляющей в составе рудоносных флюидов крупных орогенных месторождений золота Северо-Востока России, Урала и других регионов (Бортников, 2006; Бортников и др., 1998<sup>1,2</sup>, 2007; Горячев и др., 2008 и др.), не позволяют с этим согласиться. Имеющаяся совокупность современных данных указывает на комплексное сочетание процессов орогенного метаморфизма и магматизма как продуцентов золоторудной минерализации и плутоно-метаморфическое происхождение месторождений золота орогенных складчатых поясов (Горячев, 2003, 2010; Goryachev, 2014).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Баланс золота по временным эпохам предполагает его первично глубинную природу (мантийную — фемическую), но в истории Земли постепенно проявились его коровые свойства, зафиксированные в увеличении разнообразия типов и металлогенических ассоциаций золоторудных месторождений в фанерозое.

Крупный перерыв (1.8–0.8 млрд лет) в формировании золотого оруденения обусловлен длительным существованием стабильного кратонного режима (суперконтиненты Колумбия и Родиния) в жизни Земли, подчеркивая уникальность данного рубежа в истории Земли, вероятно, приведшего к скачкообразной сиализации коры.

В истории Земли отмечается определенная дифференциация минерального вещества орогенных золоторудных месторождений от раннего докембрия до фанерозоя. В архейских и раннепротерозойских орогенных золото-кварцевых жилах турмалин и минералы Вi и Те являются обычными минералами, в то время как в фанерозойских золоторудных месторождениях они концентрируются в самостоятельном золото-вис-

мутовом типе (интрузион-релейтед). А минералы Sb концентрируются в мезотермальном орогенном золото-кварцевом и эпитеермальном типах оруденения. Минералы As равно встречаются во всех типах орогенного оруденения на всех этапах его проявления. Одновременно на протяжении истории Земли происходит увеличение разнообразия собственных типов золотого оруденения. При этом происходит изменение их металлогенических ассоциаций от связей только с месторождениями Fe, Cu-Ni и Cu, к сочетанию с ними и с месторождениями W, Mo-Cu, Sb, Hg, Sn. Это отражает эволюцию состава коры, увеличение ее зрелости и мощности: от новообразованной существенно мафической коры, к сиализической. Гранитный магматизм играет важную роль на протяжении всей истории золотого оруденения.

Таким образом, эволюция золоторудной минерализации в истории Земли является следствием общего направления геохимической дифференциации рудообразующих систем во времени и представляет собой результат проявления рудного разнообразия как функции сиализации коры и мантийно-коровой природы золота.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит академика М.И. Кузьмина за привлечение внимания к обсуждаемым проблемам и полезные дискуссии, академика В.В. Ярмолюка за высказанные замечания и пожелания, позволившие улучшить статью, а также Ф. Пирайно, Р. Ньюберри, Г.Н. Филлипса, М. Хьюгса, Т. Теодора, Б.Б. Котляра за полезные дискуссии и помощь в ознакомлении с месторождениями Австралии, Канады и США.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания (тема № АААА-А17-117022850032-9) и, частично, при поддержке грантов РФФИ 16-05-283, проектов ДВО РАН 15-1-2-073 и 18-2-001 и междисциплинарного проекта СО РАН МП64.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Билибин Ю.А.* Металлогенические эпохи и металлогенические провинции. М.: Госгеолгиздат, 1955. 60 с.
- Бортников Н.С.* Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах // Геология руд. месторождений. 2006. Т. 48. № 1. С. 3–28.
- Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Алпатов В.В., Намумов В.Б., Носик Л.П., Миронова О.Ф.* Минералого-геохимические особенности и условия образования Нежданского месторождения золота (Саха-Якутия, Россия) // Геология руд. месторождений. 1998<sup>1</sup>. № 2. С. 137–156.

- Бортников Н.С., Сазонов В.Н., Викентьева О.В. и др.* Роль магматогенного флюида в формировании Березовского мезотермального месторождения // Докл. РАН. 1998. Т. 363. № 1. С. 82–85.
- Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Бахарев А.Г.* Состав и происхождение флюидов в гидротермальной системе Неждановского золоторудного месторождения (Саха-Якутия, Россия) // Геология руд. месторождений. 2007. Т. 49. № 2. С. 99–145.
- Будяк А.Е., Горячев Н.А.* Условия формирования протерозойских рудоносных горизонтов Байкало-Патомского нагорья // Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования: Матер. Всеросс. конф., посвящ. 85-летию ИГЕМ РАН. Москва, 25–27 ноября 2015 г. М.: ИГЕМ РАН, 2015. С. 275–276.
- Будяк А.Е., Горячев Н.А., Скузоватов С.И.* Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения в южном обрамлении Сибирского кратона в протерозое // ДАН. 2016. 470. № 5. С. 562–565.
- Гамянин Г.Н., Горячев Н.А., Бахарев А.Г., Колесниченко П.П., Зайцев А.П., Диман Е.Н., Бердников Н.В.* Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудно-магматических систем в мезозоидах Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. 196 с.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Дальнего Востока России / Ханчук А.И. и др. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. С. 1–572. Кн. 2. С. 573–981.
- Гораи М.* Эволюция расширяющейся Земли. М.: Недра, 1984. 112 с.
- Горячев Н.А.* Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 210 с.
- Горячев Н.А.* Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Севера Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. 143 с.
- Горячев Н.А.* Золоторудообразующие системы орогенных поясов // Вестник СВНЦ ДВО РАН, 2006. № 1. С. 2–16.
- Горячев Н.А.* Орогенные месторождения золота как металлогенические индикаторы происхождения складчатых поясов // Фундаментальные проблемы геологии месторождений полезных ископаемых и металлогении: XXI Междунар. научн. конф., посвящ. 100-летию академика В.И. Смирнова. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 26–28 января 2010 г. Сборник трудов в 2-х томах (ред. Старостин В.И., Бортников Н.С., Кривцов А.И.). Т. 1. М.: МАКС Пресс, 2010. С. 81–92.
- Горячев Н.А.* благороднометалльный рудогенез и мантийно-коровое взаимодействие // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 2. С. 323–332.
- Горячев Н.А., Гамянин Г.Н., Шпикерман В.И., Бялбжеский С.Г.* Основные принципы металлогенического анализа складчатых поясов (на примере Северо-Востока России). Магадан: Кордис, 2005. 107 с.
- Горячев Н.А., Викентьева О.В., Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Голуб В.Н.* Наталкинское месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (Северо-Восток России) // Геология руд. месторождений. 2008. Т. 50. № 5. С. 414–444.
- Горячев Н.А., Егоров В.Н., Савва Н.Е., Кузнецов В.М., Фомина М.И., Рожков П.Ю.* Геология и металлогения фанерозойских комплексов юга Омолонского массива. Владивосток: Дальнаука, 2017. 336 с.
- Казанский В.И.* Эволюция рудоносных структур докембрия. М.: Недра, 1988. 286 с.
- Конди К.* Архейские зеленокаменные пояса. М.: Мир, 1983.
- Кузьмин М.И.* Докембрийская история зарождения и эволюции Солнечной системы и Земли. Статья 1 // Геодинамика и тектонофизика. 2014. № 5(3). С. 625–640.
- Кузьмин М.И., Горячев Н.А.* Эволюция Земли и процессы, определяющие ее геодинамику, магматизм и металлогению // Геосферные исследования. 2017. № 4. С. 36–50.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.* Тектоника плит и мантийные плюмы – основа эндогенной тектонической активности Земли последние 2 млрд лет // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 1. С. 11–30.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Котов А.Б., Горячев Н.А.* Магматизм и металлогения ранних этапов развития Земли как отражение ее геологической эволюции // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 12. С. 1924–1940.
- Лаверов Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Баирова Е.Д., Гольцман Ю.В., Дистлер В.В., Юдовская М.А.* Этапы формирования широкомасштабной благороднометаллической минерализации в месторождении Сухой Лог, Восточная Сибирь: результаты изотопно-геохронологического изучения // ДАН. 2007. Т. 415. С. 810–814.
- Ларин В.Н.* Гипотеза изначально гидридной Земли. М.: Недра, 1980. 216 с.
- Лутков В.С., Могаровский В.В., Луткова В.Я.* Бор и фтор в литосфере Памира и Тянь-Шаня (Таджикистан): к вопросу о геохимических связях мантии и земной коры // Геохимия. 2004. № 11. С. 1173–1185.
- Маракушев А.А., Русинов В.Л., Зотов И.А., Панеях Н.А., Перцев Н.Н.* Глобальные аспекты эндогенного рудообразования // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 39. № 6. С. 483–501.
- Ножкин А.Д., Борисенко А.С., Неволько П.А.* Этапы позднепротерозойского магматизма и возрастные рубежи золотого оруденения Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 1. С. 158–181.
- Преображенский И.А.* О кварц-турмалиновой золотоносной формации // Изв. АН СССР, серия геологическая. 1945. № 4. С. 92–99.
- Рундквист Д.В.* Особенности геологического развития и металлогении байкалид // Основные проблемы рудообразования и металлогении. М.: Наука, 1990. С. 44–65.
- Рундквист Д.В.* Глобальная металлогения // Смирновский сборник-95. М.: ВИНТИ, 1995. С. 92–123.
- Рундквист Д.В.* Фактор времени при формировании гидротермальных месторождений: периоды, эпохи, этапы и стадии рудообразования // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 39. № 1. С. 11–24.
- Ручкин Г.В., Дерюгин Ю.Н.* Золотоносность раннедокембрийских железитых кварцитов. Обзор ВИЭМС Геология, методы поисков и разведки месторождений металлически полезных ископаемых. М.: ВИЭМС, 1988. 54 с.

- Рябчиков И.Д.* Глобальные потоки рудных металлов в глубинных процессах // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 39. № 5. С. 403–408.
- Саттран В.* Эволюционные тренды в месторождениях золота и олова // Металлогения и рудные месторождения. Доклады 27-й сессии МГК. Т. 12. М.: Наука, 1984. С. 10–19.
- Сафонов Ю.Г.* Гидротермальные золоторудные месторождения: распространенность – геолого-генетические типы – продуктивность рудообразующих систем // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 39. № 1. С. 25–40.
- Сафонов Ю.Г.* Золоторудные и золотосодержащие месторождения мира – генезис и металлогенический потенциал // Геология руд. месторождений. 2003. Т. 45. № 4. С. 305–320.
- Сафонов Ю.Г., Прокофьев В.Ю.* Модель конседиментационного гидротермального образования золотоносных рифов бассейна Витватерсранд // Геология руд. месторождений. 2006. Т. 48. № 6. С. 475–511.
- Сидоров А.А.* Золото-серебряная формация Восточно-Азиатских вулканогенных поясов. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1978. 350 с.
- Сидоров А.А.* Рудные формации и эволюционно-исторический анализ благороднометалльного оруденения. Магадан: СВНЦ ДВО – ИГЕМ РАН, 1998. 246 с.
- Синицын А.В.* Региональная тектоника и металлогения раннего докембрия. Ленинград: Недра, 1990. 491 с.
- Спиридонов Э.М.* Закономерности формирования и размещения плутоногенных месторождений золота в Северной части Центрального Казахстана. Дисс. ... докт. геол.-минерал. наук в форме научн. докл. Москва: МГУ, 1991. 79 с.
- Тектоника, геодинамика и металлогения территории республики Саха (Якутия). Ред. Л.М. Парфенов и др. М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. 571 с.
- Умитбаев Р.Б.* Охотско-Чаунская металлогеническая провинция. М.: Наука, 1986. 287 с.
- Хаин В.Е.* Основные этапы тектонического развития Земли и их отражение в минерагенезе // Геология руд. месторождений. 2000. Т. 42. № 5. С. 403–408.
- Ханчук А.И., Голозубов В.В.* Режим трансформных окраин и орогенез // Тихоокеанский рудный пояс. Материалы новых исследований. К 100-летию Е.А. Радкевич. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 340–345.
- Шарапов В.Н., Борисенко А.С., Мазуров М.П., Перепечко Ю.В., Черепанов А.Н., Бессонова Е.П., Павлова Г.Г., Боровиков А.А., Житова Л.М., Пономарчук В.А., Попов В.Н., Черепанова В.К., Чудненко К.В.* Модельный анализ развития континентальных мантийно-коровых рудообразующих систем. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 409 с.
- Шер С.Д.* Металлогения золота. Сев. Америка, Австралия и Океания. М.: Недра, 1972. 295 с.
- Шер С.Д.* Металлогения золота. Азия, Южн. Америка. М.: Недра, 1974. 256 с.
- Эволюция южной части Сибирского кратона в докембрии (ред. Е.В.Скляров). Серия Интеграционные проекты СО РАН, вып. 11. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 367 с.
- Bierlein, F.P., Crowe, D.E.* Phanerozoic orogenic lode gold deposits / Hageman, S.G., and Brawn, P.E. (Eds). Gold in 2000, SEG Reviews in Economic Geology. 2000, pp. 103–139.
- Boyle R.W.* The geochemistry of gold and its deposits. Geol. Surv. Canada Bull. 1979, no. 280, 584 p.
- Cawood, P.A., Hawkesworth, Ch.J.* Temporal relations between mineral deposits and global tectonic cycles // Jenkin, G.R.T., Lusty, P.A.J., McDonald, I., Smith, M.P., Boyce, A.J., Wilkinson, J.J. (eds). 2015. Ore deposits in Evolving Earth. Geological Society, London, Special Publications, 393, pp. 9–21. First published online October 24, 2013, <http://dx.doi.org/10.1144/SP393.1>
- Condie K.C., Aster R.C.* Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: the supercontinent connection and continental growth // Precambrian Research. 2010. Vol. 180, pp. 227–236.
- Condie K.C., Aster R.C.* Refinement of the supercontinent cycle with Hf, Nd and Sr isotopes // Geoscience Frontiers. 2013. Vol. 4, no. 6, pp. 667–680.
- Condie, K.C., Belousova, E., Griffin, W.L., Sircombe, K.N.* Granitoid events in space and time: Constraints from igneous and detrital zircon age spectra // Gondwana Research. 2009. Vol. 15, no. 3–4, pp. 228–242.
- Corfu F., Andrews A.J.* Geochronological constrains on timing of magmatism, deformation, and gold mineralization in the Red Lake greenstone belt, northwestern Ontario // Can. J. Earth Sci. 1987. Vol. 24, no. 7, pp. 1302–1320.
- Dawson K.M., Panteleyev A., Sutherland Broun A, Woodsworth G.J.* Regional metallogeny Regimes // Geological Survey of Canada, Geology of Canada. 1991, no. 4, pp. 707–768.
- De Ronde, C.E.J., Spooner, E.T.C., De Wit, M.J., Bray, C.J.* Shear zone-related, Au quartz vein deposits in the Barberton greenstone belt, South Africa: Field and petrographic characteristics, fluid properties, and light stable isotope geochemistry // Econ. Geol. 1992. Vol. 87, no. 2, pp. 366–402.
- Evans, D.A.D., Mitchell R.N.* Assembly and breakup of the core of Paleoproterozoic – Mesoproterozoic supercontinent Nuna // Geology. 2011. Vol. 39, no. 5, pp. 443–446.
- Frimmel, H.E., Groves, D.I., Kirk, J., Ruiz, J., Chesley, J., Minter, W.E.L.* The Formation and Preservation of the Witwatersrand Goldfields, the World’s Largest Gold Province // Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume, 2005, pp. 769–797.
- Girdwood, Ch.P., Jones, L.F., Lonn, G.* The Big Dome over Seventy Years of Gold Mining in Canada / Toronto, Canada, Cybergraphics Company Incorporated, 1983, 249 p.
- Goldfarb, R.J.* Metallogenic Evolution of Alaska / Goldfarb, R.J., Miller, L.D., eds, Mineral Deposits of Alaska: Economic Geology Monograph 9, 1997, pp. 4–34.
- Goldfarb, R.J., Miller L.D., Leach, D.B., and Snee, L.W.* Gold deposits in metamorphic rocks of Alaska // Ore deposits of Alaska. Economic Geology. Monograf. 1997. no. 9, pp. 151–190.
- Goldfarb R.J., Phillips G.N., Nokleberg W.J.* Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim // Ore Geol. Rev. 1998. Vol. 13, pp. 185–218.
- Goldfarb, R.J., Groves, D.I., Gardoll, S.* Orogenic gold and geologic time: a global synthesis // Ore Geol. Rev. 2001. Vol. 18, pp. 1–75.
- Goldfarb, R.J., Baker, T., Dube, B., Groves, D.I., Hart, C.J.R., Gosselin, P.* Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes // Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume, 2005, pp. 407–450.

- Goldfarb, R.J., Bradley, D., Leach, D.* Secular Variation in Economic Geology // *Econ. Geol.* 2010. Vol. 105, no. 3, pp. 459–465.
- Goldfarb, R.J., Taylor, R., Collins, G., Goryachev, N.A., Orlandini, O.F.* Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia // *Gondwana Research.* 2014. Vol. 25, no. 1, pp. 49–102.
- Goryachev, N.A., Pirajno, F.* Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // *Ore Geol. Rev.* 2014. Vol. 59, pp. 123–151.
- Green J.* Precious metals in time and place. A geological overview // *Precious Metals: Mining, Extraction, and Process.* Proceeding International Symposium AIME Annual Meeting, Los Angeles, California, February 27–29, 1984 – Precious metals: mining, extraction, and processing подред. V. Kudryk [et al.], Warrendale, Pa: Metallurgical Society of AIME, 1984, pp. 45–62.
- Groves D.I., Phillips N., Ho S.E., Houstoun, S.M., Standing, C.A.* Craton-Scale Distribution of Archean Greenstone Gold Deposits: Predictive Capacity of the Metamorphic Model // *Econ. Geol.* 1987. Vol. 82, no. 8, pp. 2045–2058.
- Groves, D.I., Vielreicher, R.M., Goldfarb, R.J., Condie, K.C.* Controls on the heterogeneous distribution of mineral deposits through time // McDonald, I., Boyce, A.J., Butler, I.B., Herrington, R.J., Polya, D.A. (eds). *Mineral Deposits and Earth Evolution.* Geological Society, London, Special Publications, 2005, 248, pp. 71–101.
- Hartman L.A., Delgado I.M.* Cratons and orogenic belts of the Brazilian Shield and their contained gold deposits // *Miner. Deposita.* 2001. Vol. 36, no. 3–4, pp. 207–217.
- Hedenquist JW, Arribas Jr A, Gonzalez-Urien E.* Exploration for epithermal gold deposits // Hagemann S.G., Brown P.E. (eds) *Gold in 2000* // SEG Short- course, Tahoe, Nevada. 2000, pp. 245–277.
- Hou, G., Santosh, M., Qian, X., Lister, G.S., Li, J.* Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: Insights from radiating mafic dyke swarms // *Gondwana Research.* 2008. Vol. 14, pp. 395–409.
- Hutchison, R.W.* Metallogeny of Precambrian Gold Deposits: Space and Time Relationships // *Econ. Geol.* 1987. Vol. 82, pp. 1993–2007.
- Hutchisson, C.S., Taylor, D.* Metallogenesis in SE Asia // *J. of the Geological Society,* London. 1978. Vol. 135, pp. 407–428.
- Huttori, K.* Magnetic felsic intrusions associated with Canadian Archean gold deposits // *Geology.* 1987. Vol. 15, pp. 1107–1111.
- Kerrick, R., Feng, R.* Archean geodynamics and the Abitibi – Pontiac collision: implications for advection of fluids at transpressive collisional boundaries and the origin of giant quartz vein systems // *Earth-Science Reviews.* 1992. Vol. 32, pp. 33–60.
- Kerrick, R., Goldfarb, R., Groves, D, Garwin, S., Jia Y.* The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces // *Science in China (Series D), Supp.* December 2000. Vol. 43, pp. 1–68.
- Kirk J., Ruiz J., Chesley J., Walshe J., England G.* A Major Archean, Gold- and Crust-Forming Event in the Kaapvaal Craton, South Africa // *Science.* 2002. Vol. 297, pp. 1856–1858.
- Kulish, E.A., Komov, I.L.* Epochs of metamorphogenic gold mineralization // 8<sup>th</sup> IAGOD Symposium in conjunct. with International Conference Mineral Deposit Models, Ottawa, August 12–18, 1990: Program with Abstracts, Ottawa, 1990, p. 76.
- Law, J.D.M., Phillips, G.N.* Hydrothermal Replacement Model for Witwatersrand Gold // *Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume.* 2005, pp. 799–811.
- Leahy, K., Barnicoat, A.C., Foster, R.P., Lawrence, S.R., Napier, R.W.* Geodynamic processes that control the global distribution of giant gold deposits // McDonald, I., Boyce, A.J., Butler, I.B., Herrington, R.J., Polya, D.A. (eds). *Mineral Deposits and Earth Evolution.* Geological Society, London, Special Publications, 2005, 248, pp. 119–132. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.248.01.06>
- Mole, D.R., Fiorentini, M.L., Cassidy, K.F., Kirkland, C.L., Thebaud, N., McCuaig, T.C., Doublier, M.P., Duuring, P., Romano, S.S., Maas, R., Belousova, E.A., Barnes, S.J., Miller, J.* Crustal evolution, intra-cratonic architecture and the metallogeny of an Archean craton // Jenkin, G. R. T., Lusty, P. A. J., McDonald, I., Smith, M.P., Boyce, A. J. & Wilkinson, J.J. (eds). *Ore Deposits in an Evolving Earth.* Geological Society, London, Special Publications, 2015, 393, pp. 23–80. <https://doi.org/10.1144/SP393.8>
- Nelson, J. L., and Colpron, M.* Tectonics and metallogeny of the Canadian and Alaskan Cordillera, 1.8 Ga to present. In: Goodfellow, W.D. (Eds.), *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods.* Mineral Deposit Division, Geological Association of Canada, Special Publication. 2007. Vol. 5, pp. 755–791.
- Nesbitt, B.* Gold deposit continuum: a genetic model for lode Au mineralization in the continental crust // *Geology.* 1988. Vol. 16, pp. 1044–1048.
- Newberry, R.J., McCoy, D.T., Brew, D.A.* Plutonic-Hosted Gold Ores in Alaska: Igneous vs. Metamorphic Origins // *Resource Geology, Special Issue,* 1995, no. 18, pp. 57–100.
- Nokleberg, W.J., Bundtzen, T.K., Eremin, R.A., Ratin, V.V., Dawson, K.M., Shpikerman, V.I., Goryachev, N.A., Byalobzhesky, S.G., Frolov, Yu.F., Khanchuk, A.I., Koch, R.D., Monger, J.W.H., Pozdeev, A.I., Rosenblum, I.S., Rodionov, S.M., Parfenov, L.M., Scotese, C.R., and Sidorov, A.A.* Metallogenesis and tectonics of the Russian Far East, Alaska, and the Canadian Cordillera. USGS Professional Paper 1697, 2005, 429 p.
- Padgham, W.A.* Turbidite-Hosted Gold-Quartz Veins in the Slave Structural Province, NWT // *Turbidite-Hosted Gold Deposits (J.D. Keppie, R.W. Boyle, and S.J. Hayneseds.)* Geological Association of Canada Special Paper 32, 1986, pp. 119–134.
- Phillips, G.N., Powell, R.* Origin of the Witwatersrand gold: devolatilisation-hydrothermal replacement model // *Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B).* 2011. Vol. 120, no. 3, pp. 112–129.
- Phillips, G.N., Hughes, M.J., Arne, D.C., Bierlein, F.P., Carey, S.P., Jackson, T. and Willman, C.E.* Gold: Historical wealth, future potential. In Birch, W.D. (ed.), *Geology of Victoria,* Geological Society of Australia Special Publication 23, Geological Society of Australia (Victoria Division). 2003, pp. 377–433.
- Percival, J.A.* Geology and metallogeny of the Superior Province, Canada // Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of*

Canada: Synthesis of Major Deposit-Types, Districts Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 2007. No. 5, pp. 903–928.

*Pirajno, F.* The Geology and Tectonic Settings of China's Mineral Deposits. Springer, Dordrecht, 2013, pp. 679.

*Poulsen, K.H., Taylor, B.E., Robert, F., and Mortensen, J.K.* Observations on gold deposits in North China Platform // Current Research, Part A, Geol. Surv. of Canada, 1990, Paper 90-1A, pp. 33–44.

*Robert, F., Poulsen, K.H., Cassidy, K.F., Hodson, C.J.* Gold Metallogeny of the Superior and Yilgarn Cratons // Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume. 2005, pp. 1001–1033.

*Roberts, N.M.W.* The boring billion? Lid tectonics, continental growth and environmental change associated with the Columbia supercontinent // Geoscience Frontiers. 2013. Vol. 4, no. 6, pp. 681–691.

*Rundqist, D.V. Kravchenko, S.M.* The role of geologic time in the genesis of giant mineral deposits // Global Tectonics and Metallogeny. 2001. Vol. 7, no. 3–4, pp. 195–201.

*Van Staal, C.R.* Pre-Carboniferous tectonic evolution and metallogeny of the Canadian Appalachias // Goodfellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: Synthesis of Major Deposit-Types, Districts Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication. 2007, no. 5, pp. 793–818.

*Viljoen R. P., Saager R., Viljoen M. J.* Some thoughts on the origin and processes responsible for the concentration of gold in the early precambrian of Southern Africa. Miner. Deposita. 1970. Vol. 5, no. 2, pp. 164–180.

*Zhou, T., Goldfarb, R.J., Phillips, G.N.* Tectonics and distribution of gold deposits in China – an overview // Miner. Deposita. 2002. Vol 37, no. 3–4, pp. 249–282.

## Gold Deposits in the Earth's History

**Nikolay A. Goryachev**

*North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences 16, Portovaya street, Magadan, 685000, Russia*

*Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences PBox 9, 1a, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russia*

The distribution of the main gold deposits in the history of the Earth is considered. Primary heterogeneity of the Archean crust by gold bearing is shown. The main gold ore metallogenic epochs are characterized. Links of gold deposits with VMS and Cu-Ni in the early periods of the Earth (Archaean-Proterozoic) and, in addition, with deposits of W, Mo, Cu, Sb, Hg and Sn in the Phanerozoic are shown. An analysis of the distribution of mineralogical and geochemical types of the actual Au mineralization also showed significant diversity for the Phanerozoic compared with Precambrian. These data reflect the mantle-crustal origin of Au mineralization as a whole and indicates an increase in the contribution of the crust matter to the balance of Au mineralization with the age of the Earth. The well-known interruption in the formation of Au deposits (1.7–0.8 billion years) was discussed, which was caused by the stable craton regime of the long-existing Columbia (Nuna) – Rodinia supercontinent.

**Keywords:** gold deposits, mineralogy specificity of gold ores, history of the Earth, Columbia (Nuna) and Rodinia supercontinents, gold metallogenic evolution of the Earth

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0016-77706163-18>