

Научная статья

УДК [553.078+551.243]+(546.59)

DOI: 10.37102/0869-7698_2023_231_05_2

EDN: MNYUO

Геодинамические факторы формирования крупных металлогенических провинций с золотоджаспероидными месторождениями типа Карлин

Н.Г. Борискина

Наталья Георгиевна Борискина

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
boriskina2000@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7561-6772>

Аннотация. К геодинамическим факторам формирования крупных металлогенических провинций Северной Пацифики с джаспероидными месторождениями золота причисляются разломные зоны трансформного типа, отчетливо фиксирующиеся в транзитной мантии в виде границ слэбов. Показано, что у таких границ возникают тороидальные течения, поставляющие флюиды и тепловые потоки от подслэбовых астеносфер и недеплетированной мантии на вышерасположенные уровни мантии и литосферы. Миграция флюидно-тепловых потоков через мантийный клин к надслэбовой астеносфере приводит к формированию рудно-магматических порфирировых систем и локализации золотоджаспероидного оруденения.

Ключевые слова: металлогенические провинции, глубинная геодинамика, месторождения карлинского типа, разломные зоны трансформного типа

Для цитирования: Борискина Н.Г. Геодинамические факторы формирования крупных металлогенических провинций с золотоджаспероидными месторождениями типа Карлин // Вестн. ДВО РАН. 2023. № 5. С. 16–30. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_231_05_2.

Благодарности. Статья написана в память о руководителе, коллеге, соавторе, докторе геолого-минералогических наук, профессоре Вадиме Георгиевиче Хомиче, о долгих годах совместного плодотворного сотрудничества с этим замечательным ученым, предложившим, в частности, идею проведения настоящего исследования.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ДВГИ ДВО РАН (Рег. № НИОКТР 122040800199-8, шифр науч. темы FWMF-2022-0003).

Geodynamic factors of the formation of large metallogenic provinces with gold-jasperoid Carlin type deposits

N.G. Boriskina

Natalia G. Boriskina

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

boriskina2000@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7561-6772>

Abstract. Transform fault zones that are clearly registered in the mantle transition zone in the form of slab boundaries are one of geodynamic factors of formation of large metallogenic provinces in the North Pacific containing jasperoid deposits of gold. It is shown that toroidal currents transporting fluids and heat flows from subslab asthenosphere and undepleted mantle to the upper levels of the mantle and lithosphere occur near slab boundaries. Migration of fluid and heat flows through the mantle wedge to the subslab asthenosphere leads to the formation of ore-magmatic porphyry systems and localization of gold-jasperoid mineralization.

Keywords: metallogenic provinces, deep-seated geodynamics, Carlin-type deposits, transform fault zones

For citation: Boriskina N.G. Geodynamic factors of the formation of large metallogenic provinces with gold-jasperoid Carlin type deposits. *Vestnik of the FEB RAS*. 2023;(5):16-30. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_231_05_2.

Acknowledgments. The article was written in memory of the leader, colleague, co-author, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor Vadim Georgievich Khomich. The author expresses his sincere gratitude for the long years of joint fruitful cooperation and, in particular, for the scientific idea of this study.

Funding. The work was carried out within the framework of the state task of the FEGI FEB RAS (Reg. № NIOKTR 122040800199-8, Scientific theme code FWMF-2022-0003).

Введение

Продолжительная высокорентабельная эксплуатация большеобъемных месторождений золота карлинского (невадийского) типа, размещенных преимущественно среди протерозой-фанерозойских терригенно-карбонатных толщ, обусловила сохранение до настоящего времени повышенного интереса исследователей к этому типу благороднометалльного оруденения. Пристальное внимание специалистов разного профиля уделяется оценке возможностей золотоносных регионов по дальнейшей реализации потенциала минерально-сырьевой базы. Геологи продолжают детальное изучение минерально-геохимического состава и физико-химических характеристик оруденения, особенностей его размещения в гипогенно-гипергенно преобразованных породах, морфологии золотоносных залежей, их соотношений с магматическими до-, син- и пострудными образованиями,

иными формационно-минеральными типами месторождений в рудных узлах, районах и провинциях, участвуют в создании альтернативных геолого-генетических, прогнозно-поисковых моделей.

Среди металлогенических провинций Северной Пацифики, где известны джаспероидные месторождения золота карлинского типа, наиболее крупными являются Невадийская (США), Юньнань-Гуйчжоу-Гуанси (Yunnan-Guizhou-Guangxi) (КНР) и Южно-Якутская (РФ). Они различаются масштабностью извлеченного из недр Au. Однако в каждой из них джаспероидные месторождения представлены большеобъемными пластовыми, субпластовыми, реже жилообразными, гидротермокарсто- и штокверкоподобными залежами с тонковкрапленной гипергенно преобразованной сульфидной минерализацией. Она преимущественно сосредоточена среди терригенно-карбонатных толщ повышенной углеродистости, подвергшихся кремнеению, кальцитизации и аргиллизации.

В каждой из вышеназванных золотоносных провинций Северной Пацифики основное внимание уделялось изучению влияния литологических, стратиграфических, структурно-тектонических факторов на локализацию оруденения, определению физико-химических, изотопно-геохимических показателей, объясняющих условия формирования разнотипных месторождений Au, общей направленности развития рудообразующих процессов. На периферии интереса исследователей находились палеогеодинамические данные о событиях, обеспечивших формирование региональных элементов архитектуры провинций, где были выявлены месторождения карлинского, куранахского, иных геолого-промышленных типов [1]. Речь идет о проявленности в регионах производных палеорифтогенеза, способствовавших накоплению мелководно-морских протерозойско-фанерозойских известняковых отложений на пассивных окраинах кратонов, последующего развития орогенеза с возникновением складчато-надвиговых форм, масштабного проявления проксимального и дистального магматизма на активных окраинах, развития субдукционных процессов, разломообразования и многоэтапных тектономагматических активизаций, о роли гипергенных процессов в концентрировании Au. Новая информация, опирающаяся на данные современных геофизических и сейсмотомографических методов, применительно к познанию геодинамических обстановок возникновения рассматриваемых золотоносных провинций, районов и узлов, определению возможных источников вещества, а значит, и созданию модифицированных геолого-генетических, прогнозно-поисковых моделей для невадийского (карлинского), куранахского и других типов оруденения стала частично учитываться лишь в работах последнего десятилетия [1–4].

Целью настоящей публикации является изложение результатов анализа геологических условий размещения вышеназванных провинций мирового класса и последующего синтеза материалов, раскрывающих основные геодинамические факторы формирования таких провинций на основе опубликованных результатов тектонических, геофизических и сейсмотомографических исследований активных окраин Северной Пацифики.

Некоторые признаки локализации джаспероидного золотого оруденения невадийского типа

В последние десятилетия много внимания уделяется решению дискуссионных проблем возникновения месторождений золота невадийского типа,

получивших обобщающее название карлинских (по наиболее изученному месторождению этого типа в американском штате Невада). Они касаются литологических, стратиграфических, структурно-тектонических и геодинамических факторов, повлиявших на формирование оруденения, а также определения источников вещества [1, 4, 5]. Вместе с тем практически всеми исследователями признается, что первостепенно важным их прогнозно-поисковым и оценочным критерием является присутствие на изучаемых площадях мощных апокарбонатных кор выветривания и зон окисления.

Типоморфным минералогическим признаком джаспероидных месторождений Au карлинского типа считается присутствие в рудах мышьяковистого пирита, арсенопирита, антимонита, киновари, марказита, дисперсно-ионного золота, реальгара, аурипигмента, самородных серы и мышьяка, иногда блеклых руд, висмутина, барита и флюорита. Перечисленными особенностями обусловлено наличие в геохимических ореолах минерализованных площадей Au и соединений Ag, Hg, Sb, Tl, Bi, других элементов, высокое отношение Au/Ag. Залежи руд обычно распространены среди джаспероидов, метасоматических ореолов окремнения, кальцитизации и аргиллизации в виде пластовых, субпластовых, реже жилеобразных гидротермокарсто- и штокверкоподобных тел.

В разрезах апокарбонатных вмещающих пород весьма часто рудоносными являются контактовые участки известковистых алевролитов и песчано-алевритисто-карбонатных углеродистых пород доломитового состава, а также терригенно-кремнисто-вулканитовых отложений, характерных для карбонатно-плитного комплекса краевых частей и перикратонных прогибов древних платформ, подвергшихся тектономагматической активизации [6]. Среди таких отложений встречаются и бескорневые покровы вулканитов основного состава. Считается, что линейное размещение месторождений типа Карлин в основном предопределено разломами, первоначально сосредоточенными в породах архейского фундамента, возникшими под влиянием неопротерозойского рифтогенеза [2, 7]. В последующие периоды эти разломы были многократно реактивированы под влиянием тектономагматических процессов.

Длительный период интенсивного изучения месторождений карлинского рудно-формационного и геолого-промышленного типа привел исследователей, после острых диспутов, к относительно единообразной трактовке их догипергенного происхождения в качестве важного завершающего звена порфирировых (магматогенно-гидротермальных) золотоносных систем, подвергшихся преобразованиям в зонах окисления [8, 9]. Вместе с согласованной единообразной трактовкой генеза рассматриваемых месторождений в последние десятилетия получили развитие и представления о их геологическом разнообразии в отношении возраста и ассоциируемости с определенными магматическими образованиями, заметными различиями физико-химических параметров формирования, глубиной размещения, а следовательно, и формационной принадлежностью [7, 9–11].

Особенно ярко отклонения от типоморфных характеристик месторождений невадийского типа зафиксированы на объектах Юго-Западного Китая, где находится так называемый Золотой треугольник Дянь-Цянь-Гуй (Dian-Qian-Gui), провинция Юньнань-Гуйчжоу-Гуанси, занимающий второе место в мире после провинции Карлин по насыщенности проявлениями не только Au, но и Sb, Hg, U, Pb, Zn. Масштабы добытого здесь золота пока на порядок меньше [12], чем в штате Невада, где из недр извлечено около 8000 т золота.

На Азиатском континенте есть еще одна крупная золотоносная провинция, где давно известны россыпные и коренные месторождения Au разного типа, в том числе золотоджаспероидные, подобные невадийским. Она расположена на территории РФ в южной и юго-восточной Якутии [8, 10, 13]. Наиболее изученным на ее площади является Центрально-Алданский рудно-россыпной район. Здесь еще в конце 40-х – начале 50-х годов XX в. в долине р. Б. Куранах (правый приток р. Алдан) были выявлены большеобъемные залежи гипергенно преобразованной золотосодержащей сульфидной минерализации, получившие местное название Куранахских. Геологические исследования золоторудных месторождений разных рудно-формационных и геолого-промышленных типов, выявленных в пределах Центрально-Алданского и прилегающих рудных районов, продолжаются до настоящего времени.

Геодинамическая позиция джаспероидных месторождений золота карлинского типа

Многими исследователями, занимающимися изучением геодинамической позиции месторождений Au карлинского типа, подчеркивается возможность познания особенностей возникновения линейных зон размещенности таких месторождений, называемых трендами, во взаимосвязи с тектонической эволюцией региона. Геологи, занимавшиеся решением этой задачи, констатировали краткость периода возникновения месторождений типа Карлин (42–36 Ma) [7] и связывали их размещенность с глубинными долгоживущими структурами земной коры, унаследованными от архей-протерозойской струйчатой эрозии [6] и последующего рифтинга, сопровождавшегося осадконакоплением на пассивной окраине [1, 7], а также неоднократными эпизодами смены полей напряженности при возникновении складчато-надвиговых поясов. Многие исследователи соотносили время заложения рудоконтролирующих разломов именно с неопротерозойским континентальным рифтогенезом. Разломам как каналам вероятного сосредоточения минералообразующих флюидов, рассеянных в метаморфической или частично расплавленной матрице глубинных магматических очагов, отводилась решающая роль в последующей локализации оруденения. Некоторые исследователи придавали такую роль направленным движениям полого наклоненного океанского слэба [2].

Воздействие геодинамических факторов на формирование золотоносных трендов **Невадийской провинции** подтверждается почти идеальным расположением проекции основного ССЗ звена палеоспрединового центра между трендами карлин и ВМЕ (Battle Mountain Eureka), карлин и Аллигатор Ридж, а также тренда Гетчелл – относительно проекции трансформного разлома (ТЗ) Мендосино (рис. 1). Можно констатировать, что совокупность трендов месторождений Au типа Карлин расположена над сочленением погребенных частей трансформного разлома Мендосино и палеоспрединового центра плиты Фараллон, остатки которой уверенно выделяются сейсмотомографическими методами.

Положение центра аномалий скоростей Р-волн Грейт Бэйсин совмещается с осевой линией «горячей зоны мантии», рассматриваемой в качестве проекции палеоспрединового центра плиты Фараллон. На вертикальном разрезе Р-волн центр аномалии проецируется на границу, отделяющую слэб от подслэбовой астеносферы [14], обладающей возможностью «поставки» энергии и флюидов на верхние уровни переходной мантии по разломной зоне, где находился

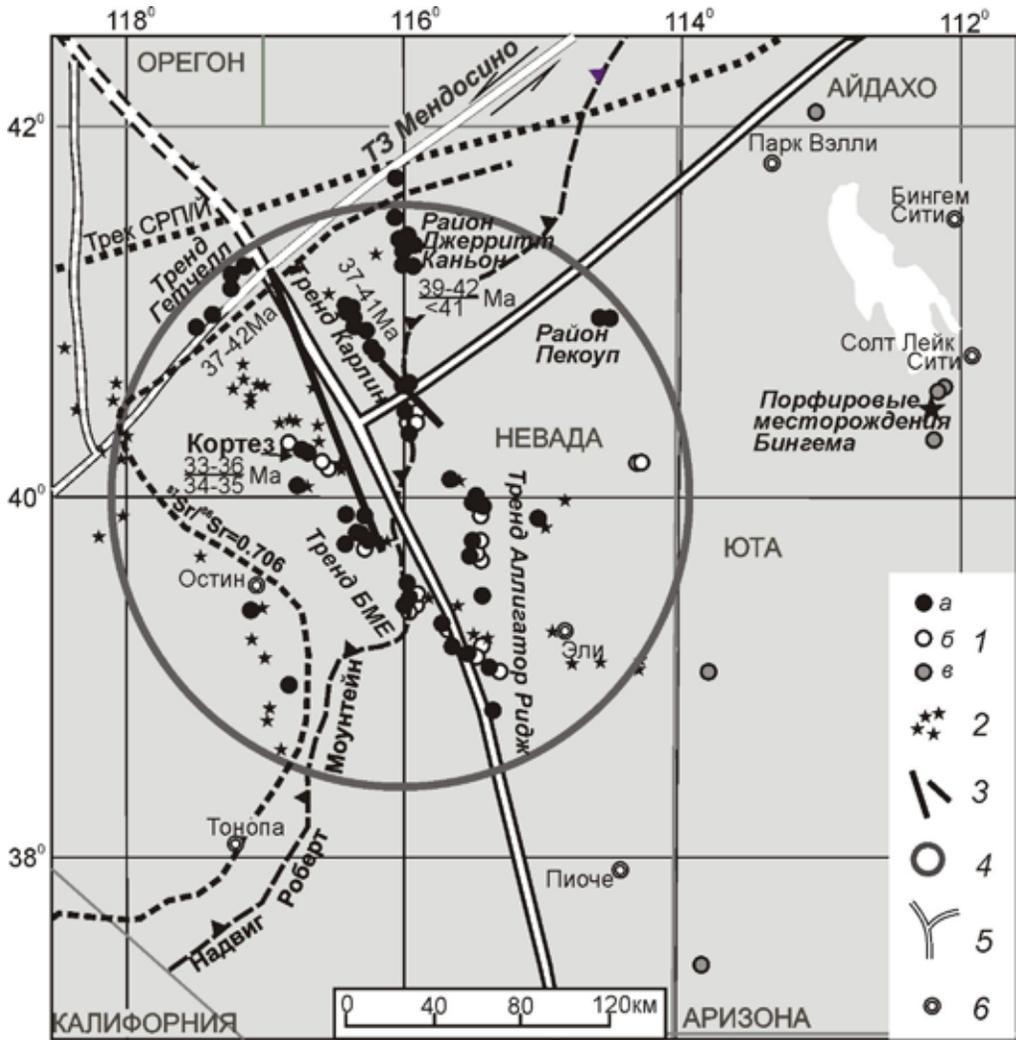


Рис. 1. Положение основных трендов и рудных районов месторождений Au карлинского типа относительно установленных геофизических аномалий и геодинамических границ на территории штата Невада (США). Использованы данные [8, 9]. 1 – карлинский тип месторождений (а), рудопроявлений (б), месторождений Au в осадочных породах (в), 2 – месторождения и рудопроявления Au, Ag, Pb, Zn, Cu и др., 3 – положительные магнитные аномалии, 4 – зона аномалий скоростей Р-волн Грейт Бэйсин (по [14]), 5 – палеоспрединговый центр, 6 – населенные пункты

палеоспрединговый центр. При этом не исключается возможность подновления ранее возникших (при неопротерозойском рифтогенезе) разрывных нарушений, влиянию которых на размещение оруденения отводилась решающая роль нашими предшественниками.

Таким образом, в формировании месторождений Au мирового класса типа Карлин участвовало два астеносферных источника: подслэбовый, являющийся основным возбудителем метасоматической рефертилизации надслэбовой литосферной мантии, и результирующий подкоровый, обеспечивший горячий мантийный апвеллинг. Этот факт открывает возможности более четкой формулировки геодинамической позиции металлогенических провинций при определении важнейших факторов образования уникальных трендов из месторождений Au

карлинского типа, подчеркивая влияние на магма- и рудообразующие процессы двух астеносфер.

Площадь **Южно-Якутской провинции** совмещается с субширотной глобальной Байкало-Элькон-Улканской гравитационной ступенью первого порядка, отделяющей Алданский щит от Восточно-Сибирского (Ленского) мегаблока [3]. Крупные положительные магнитные аномалии контролируются здесь глубинными разломами и соответствуют скрытым линейным телам основного и ультраосновного состава [15]. Здесь же в провинции имеется несколько гравитационных ступеней второго порядка субширотного (Южно-Алданская) и субмеридионального (Олекминская, Селигдар-Верхнетимптонская) простирания. Для Селигдар-Верхнетимптонской ступени долготной ориентации (рис. 2) характерна сокращенная

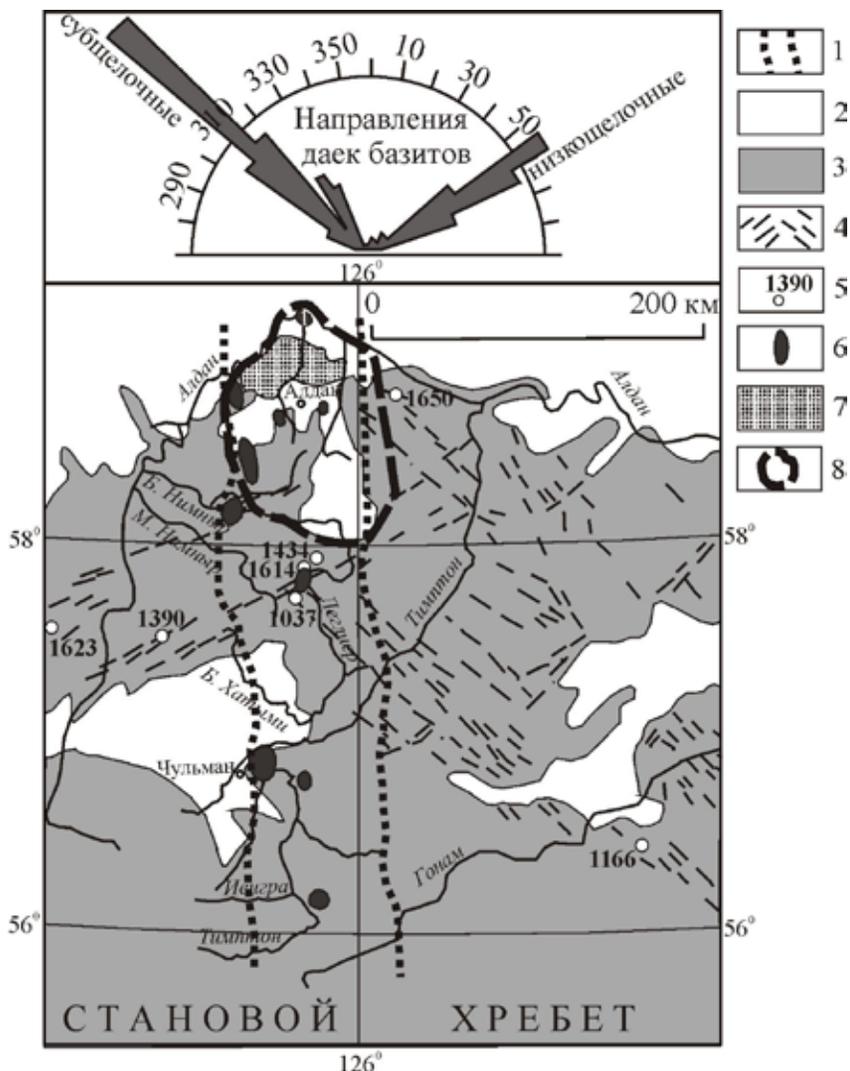


Рис. 2. Селигдар-Верхнетимптонская градиентная зона поля силы тяжести (Алданский щит) (цит. по: [3] с незначительными изменениями). 1 – границы Селигдар-Верхнетимптонской градиентной зоны, 2 – платформенный чехол, нерасчлененный, 3 – метаморфические комплексы архей-протерозойского фундамента, 4 – пояса разноориентированных даек рифейских базитов, 5 – К-Аг возраст даек, млн лет, 6 – апатитовые поля, 7 – триасовые кимберлиты, 8 – Центрально-Алданский супертеррейн

мощность (до 36–38 км) земной коры пониженной плотности, обилие апатитоносных щелочно-ультраосновных массивов, наличие ареала кимберлитов триаса и крупных линейных (Селигдарской и Якокутской) грабен-долин, пространственно совмещенных с глубинными магмоконтролирующими разломами.

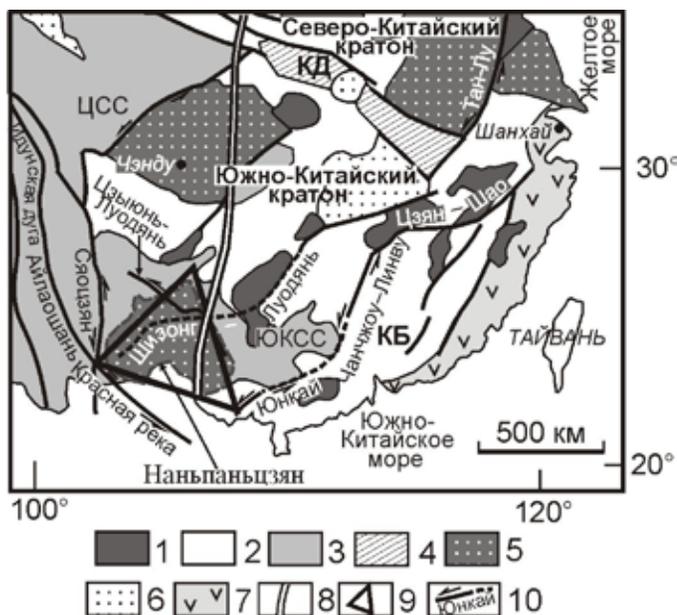
В Центральном-Алданском районе установлена повышенная концентрация геофизических аномалий разного порядка в виде линейных коровых и коромантийных зон разуплотнения, интерпретируемых в качестве тектонических, рифтовых зон, палеочагов, вскрытых и невскрытых интрузивов. На глубинах 32–10 км обнаружены изометричные и овальные гравитационные минимумы, оцениваемые в качестве магматических очагов первого порядка [16].

В переходной (транзитной) зоне мантии под юго-восточной и северной частями Алданского щита на глубинах 410–670 км документируются следы палеотрансформного разлома северо-западной ориентации, ограничивающего с северо-востока стагнированный океанический слэб [5]. Юго-восточное продолжение такого палеотрансформного разлома установлено и под Охотским морем [17], и на дне Тихого океана у юго-восточной окраины Курильской островной дуги [18]. Провинция **Юньнань-Гуйчжоу-Гуанси**, известная также как район Дянь-Цянь-Гуй, расположена на юго-востоке КНР в пределах окраинного прогиба Юцзян (Youjiang) в северной орогенной складчатой зоне Наньпаньцзян (Nanpanjiang) на стыке Тетис-Гималайской и Тихоокеанской плит [19–21].

Юго-Восточный Китай имеет непростое геологическое строение. Здесь распространены метаморфические, осадочные, вулканические и интрузивные комплексы разного возраста (рис. 3).

Тектонические и металлогенические особенности Южного Китая контролируются двумя крупным протерозойскими кратонами – Северо-Китайским и Южно-Китайским (Yangtze) [20] и характеризуются процессами многостадийных коллизий с аккреционными островными дугами, активными окраинами,

Рис. 3. Основные элементы тектонического строения Юго-Восточного Китая (цит. по: [20, 22, 23], с изменениями и дополнениями). 1 – AR-PR фундамент; 2–4 – складчатые пояса: 2 – протерозойские, 3 – позднепалеозойские, 4 – мезозойские; 5–6 – осадочные бассейны: 5 – мезозойские, 6 – кайнозойские; 7 – Юго-Восточный вулканический пояс; 8 – структуры растяжения земной коры, по [22]; 9 – «Золотой треугольник» Дянь-Цянь-Гуй; 10 – разломы. ЮКСС – Южно-Китайская складчатая система, ЦСС – Цилянская (Qilian) складчатая система, КБ – Катхайский (Cathaysia) блок, КД – коллизионный пояс Кунлинь-Даби (Qinling-Dabie)



разновозрастной и разнонаправленной субдукцией, зонами растяжений, формированием складчатых и гранитоидных поясов на стыках литосферных образований разного порядка [22]. Несколько структур первого порядка, таких как разломы Шизонг-Луодянь (Shizong-Luodian), Цзыюнь-Луодянь (Ziyun-Luodian), определяли погружение осадочного бассейна Наньпаньцзян во время растяжения земной коры и начала рифтогенеза в раннем девоне. Месторождения золота здесь сформировались в позднем триасе в постколлизиионном транспрессионном режиме [21]. Они содержат эпигенетическое микровкрапленное золото, залегающее в толщах девонских углистых аргиллитов вдоль зон тектонических брекчий на контакте между триасовыми габбро для месторождения Башишан (Bashishan) и девонскими аргиллитами для месторождения Кужубао (Kuzhubao). Минерализация обычно происходила в зонах сильных деформаций, особенно там, где более поздние сдвиговые и сбросовые разломы пересекают более ранние пологие надвиги [20].

Обсуждение

Таким образом, исходя из вышесказанного можно говорить о существовании в рассматриваемых благороднометалльных провинциях мирового класса определенного числа признаков сходства и различия. С геолого-тектонической точки зрения для Северной Пацифики характерна размещенность сравниваемых площадей в относительно мобильных краевых частях платформ – Северо-Американской, Сибирской, Южно-Китайской, обрамляемых складчатыми поясами. Для рудовмещающих расслоенных разрезов чехла провинций наибольшая насыщенность проявлениями свойственна участкам смены карбонатных отложений терригенно-кремнисто-вулканогенными, со следами многократного воздействия разнонаправленных контрастных деформаций и, как следствие, с обилием послонных разрывов, надвигов в зонах влияния глубинных долгоживущих разломов, проникавших не только в верхнюю, но и транзитную (переходную) мантию. Заложение таких разломов одни исследователи связывают с явлениями неопротерозойского орогенеза, другие – с существованием в архейском фундаменте кратонов древних авлакогенов [2, 7]. В обоих случаях отмечается, что глубинные разломы были многократно реактивированы под воздействием последующих орогенических, субдукционных процессов и тектономагматических активаций. Долгоживучесть разломов подтверждается проявленностью около их швов и над ними разновозрастных (триас–юра–мел–эоцен) вулcano-плутонических образований, а глубинность проникновения – присутствием кимберлитовых трубок взрыва, кольцевых (с дунитовым ядром) платиноносных щелочно-ультраосновных массивов, а также результатами комплексных геофизических исследований, фиксирующих существование в Невадийской и Южно-Якутской провинциях ортогональных сочетаний градиентных зон поля силы тяжести разных порядков. Например, в Южно-Якутской провинции это сочетание субширотной Байкал-Элькон-Улканской (I порядок) и субмеридиональной Селигдар-Верхнетимптонской (II порядок) градиентных зон; в Неваде – совмещение крупной положительной гравитационной аномалии рифт Северной Невады (Northern Nevada Rift) с градиентными зонами более высокого порядка; в Южном Китае – существование зон растяжений – рифтогенных структур, одна из которых протягивается в субмеридиональном направлении на западе региона и контролирует расположение осадочного бассейна

Наньпаньцзян, другая картируется на юге параллельно орогену Кунлинь–Даби, обе эти зоны связывают с протяженными линейными минимумами плотностной контрастности в нижней коре [22]. В ареале упомянутых гравитационных аномалий находятся и линейные аномалии магнитного поля. В связи с этим особого внимания заслуживают данные о существовании в Невадийской провинции на глубинах от 3 до 10 км крупного плутона с центром под лакколитом Голдстрайк, который служил основным источником тепла, управляющим гидротермальными системами трендов Карлин, Кортес и БМЕ. Подобный невадийскому выявлен плутон и в Центрально-Алданском районе Южно-Якутской провинции, производные которого контролируют размещение Au-джаспероидных месторождений Куранахского узла [16].

Сравнительный анализ результатов сейсмотомографических исследований показал существование в сопоставляемых провинциях разломных зон трансформного типа. Под северной границей Невадийской провинции на уровне стагнированных слэбов находится субширотная трансформная зона Мендосино. Она контролирует размещение месторождений трендов Гетчелл и Джерритт Каньон. Южнее этой трансформной зоны предполагается продолжение палеоспрединового центра Хуан де Фука северо-западной ориентации, повлиявшего на возникновение вышеотмеченного магматического очага, послужившего источником флюидов и тепла, обеспечивших возникновение месторождений трендов Карлин, Кортес и БМЕ, а возможно, и месторождений района Пекоуп. В Южно-Якутской провинции установлено влияние трансформного разлома на формирование благороднометалльного оруденения в Центрально-Алданском районе и в других звеньях Инагли-Кондер-Феклистовского магмометаллогенического пояса [5, 24]. Следы палеотрансформного разлома северо-западной ориентации прослеживаются в переходной зоне мантии под юго-восточной и северной частями Алданского щита, далее в юго-восточном направлении до Курильской островной дуги [18]. В провинции Юньнань-Гуйчжоу-Гуанси картируются разломные зоны Айлаошань и Красная Река, протянувшиеся до северного побережья Вьетнама [20, 23].

Краткое обсуждение геолого-геофизических материалов, раскрывающих закономерности размещения месторождений золота карлинского типа в крупных металлогенических провинциях Северной Пацифики позволяет сделать вывод об основополагающей роли геодинамических факторов в возникновении и развитии рудно-магматических систем, создавших Au-джаспероидное оруденение. Существенные различия в масштабах выявленного золотого оруденения рассматриваемых провинций объясняются существованием под Северо-Американским и востоком Азиатского континента не только трансформных зон, но и спрединговых центров, а в Южно-Якутской провинции – север Азии – одного лишь Инагли-Кондер-Феклистовского магмометаллогенического пояса.

Заключение

Геодинамическими факторами формирования крупных металлогенических провинций Северной Пацифики с джаспероидными месторождениями золота следует считать существование в каждой из рассмотренных провинций разломных зон трансформного типа, отчетливо фиксирующихся методами сейсмотомографии в транзитной мантии на глубине 410–670 км в виде границ слэбов, разделяющих фрагменты субдуцированных в мантию океанических плит [25].

У таких границ возникают тороидальные течения, поставляющие флюиды и тепловые потоки от подслэбовых астеносфер и недеплетированной мантии на расположенные выше уровни мантии и литосферы (рис. 4). Мигрируя по восстанию,

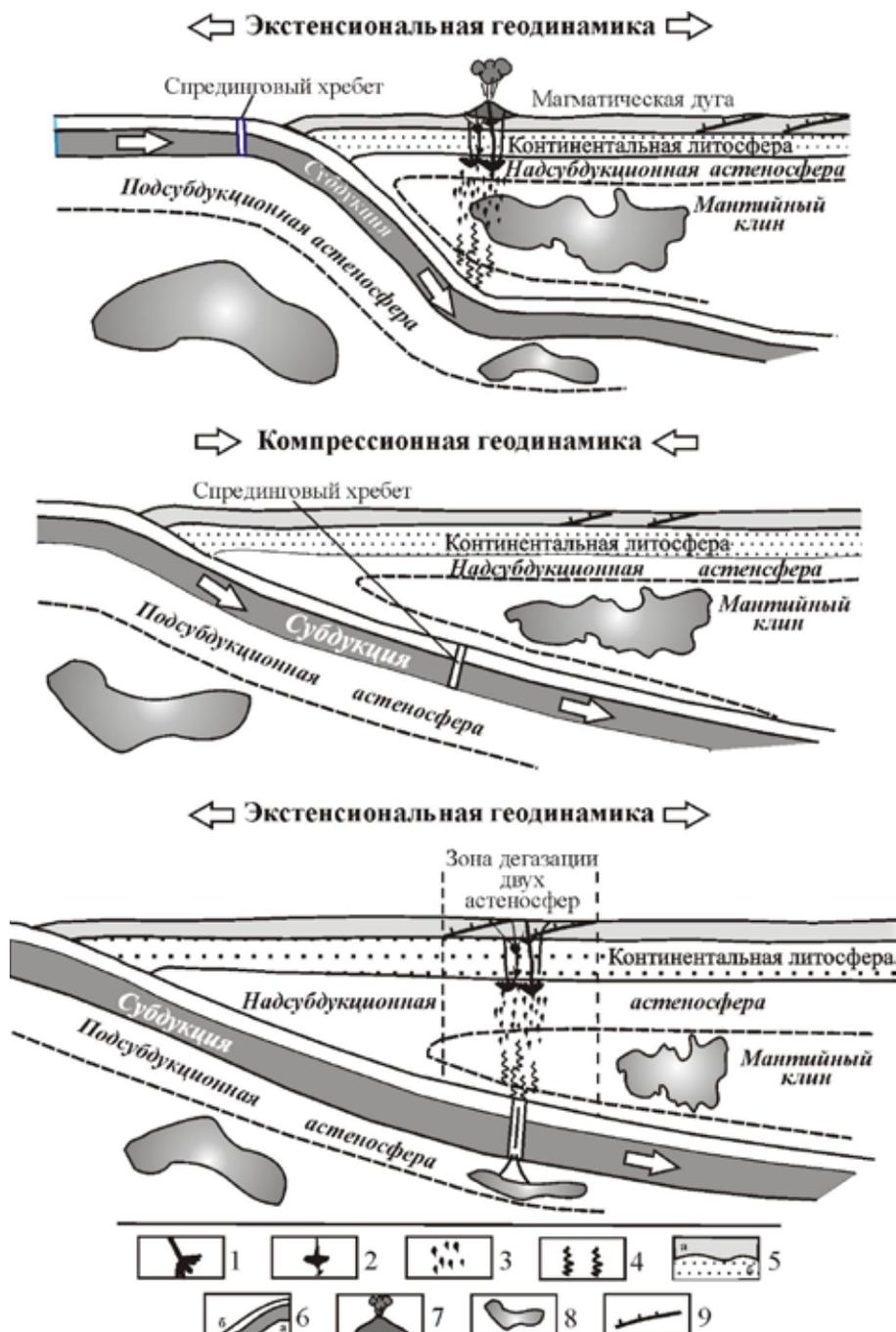


Рис. 4. Модель формирования трендов золоторудных месторождений мирового класса карлинского типа. 1 – флюидные каналы, 2 – магматические очаги, 3 – зоны частичного плавления, 4 – флюидные потоки, 5 – континентальные кора (a) и литосфера (б), 6 – океанические литосфера (a) и кора (б), 7 – вулканы, 8 – скоростные аномалии магнитного поля, 9 – надвиги

через мантийный клин к надслэбовой астеносфере, такие флюидно-тепловые потоки способствовали развитию мантийного метасоматоза и возникновению в низах литосферы первичных магматических очагов. Последующая миграция потоков приводила к формированию рудно-магматических порфировых систем и локализации в благоприятных литолого-стратиграфических и структурных условиях золотоджаспероидного оруденения. Существование разломных зон трансформного типа в транзитной зоне мантии установлено сейсмоотографическими методами у западного (калифорнийского) побережья Северной Америки (Мендосино, Мюррей и др.), у восточного (Охотского) побережья Азии (Инагли-Кондер-Феклистовская зона), у северного побережья Вьетнама (разломные зоны Айлаошань и Красной реки). В каждой из перечисленных разломных зон трансформного типа тороидальные потоки у границ слэбов обеспечивали последующие условия размещения соответствующих месторождений в земной коре. Это подтверждается существованием таких трендов (линейных зон однотипных месторождений), как Гетчелл и Джерритт Каньон (Невада, США), Куранах (Южная Якутия, РФ), а также «Золотого треугольника» на юго-западе КНР.

Особенностью геодинамической позиции джаспероидных месторождений золота карлинского типа можно считать вероятность ярусного расположения месторождений среди рудовмещающих толщ, возможность их значительной фациальной изменчивости и размещенность над палеотрансформными разломами и сопряженными с ними мантийными плюмами.

Приведенные данные указывают на необходимость особого внимания специалистов к анализу глубинной геодинамики при выборе площадей для прогнозно-поисковых работ, а также дальнейшему углубленному изучению причин сходства и различия потенциально золотоносных районов для обнаружения новых или переоценки уже известных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Arehart G.B., Ressel M., Carne R., Muntean J.L. A Comparison of Carlin-type Deposits in Nevada and Yukon // Society of Economic Geologists. Inc. Spec. Publ. N 17. 2013. P. 389–401. URL: <https://www.segweb.org/Store/detail.aspx?id=EDOCSP17CH13> (дата обращения: 14.04.2023).
2. Hronsky J.M.A., Groves D.I., Loucks R.R., Begg G.C. A unified model for gold mineralisation in accretionary orogens and implications for regional-scale exploration targeting methods // Mineralium Deposita. 2012. Vol. 47. P. 339–358. <https://doi.org/10.1007/s00126-012-0402-y>.
3. Хомич В.Г., Борискина Н.Г. Крупные золоторудные районы Юго-Востока России: особенности позиции и строения // Литосфера. 2013. № 1. С. 128–135.
4. Jiang Zhu, Zhaochong Zhang, Santosh M., Ziliang Jin. Carlin-style gold province linked to the extinct Emeishan plume // Earth and Planetary Science Letters. 2020. Vol. 530. 115940. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115940>.
5. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. A geodynamic perspective of world-class gold deposits in East Asia // Gondwana Research. 2014. Vol. 26, iss. 3–4. P. 816–833. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.05.007>.
6. Hofstra A.H., Cline J.S. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits // Reviews in Economic Geology. 2000. Vol. 13. P. 163–220. URL: <https://www.segweb.org/Store/detail.aspx?id=EDOCREV13CH05> (дата обращения: 14.04.2023).
7. 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 // Economic Geology. 2005. Vol. 100. P. 451–484. <https://doi.org/10.5382/AV100.15>.
8. Бакулин Ю.И., Буряк В.А., Пересторонин А.Е. Карлинский тип золотого оруденения (закономерности размещения, генезис, геологические основы прогнозирования и оценки). Хабаровск: ДВИМС, 2001. 159 с.

9. Muntean J.L., Cline J.S., Simon A.C., Longo A.A. Magmatic–hydrothermal origin of Nevada’s Carlin-type gold deposits // *Nature Geoscience*. 2011. Vol. 4. P. 122–127. URL: <https://www.nature.com/articles/ngeo1064> (дата обращения: 14.04.2023).
10. Ветлужских В.Г., Казанский В.И., Кочетков А.Я., Яновский В.М. Золоторудные месторождения Центрального Алдана // *Геология рудных месторождений*. 2002. Т. 44, № 6. С. 467–499.
11. Xie Z., Xia Y., Cline J.S., Koenig A., Wei D., Tan Q., Wang Z. Are there Carlin-type gold deposits in China? A comparison of the Guizhou, China, deposits with Nevada, USA, Deposits // *Reviews in Economic Geology*. 2018. Vol. 20. P. 187–233. <https://doi.org/10.5382/rev.20.06>.
12. Wenchao Su, Wendou Dong, Xingchun Zhang, Nengping Shen, Ruizhong Hu, Hofstra A.H., Lianzheng Cheng, Yong Xia, Keyou Yang. Carlin-Type Gold Deposits in the Dian-Qian-Gui “Golden Triangle” of Southwest China // *Reviews in Economic Geology*. 2018. Vol. 20. P. 157–185. <https://doi.org/10.5382/rev.20.05>.
13. Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В., Петров О.В., Кукушкин К.А., Козлов Д.С., Шатова Н.В. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции // *Региональная геология и металлогения*. 2017. № 71. С. 93–111.
14. Van der Meer D.G., van Hinsbergen D.J.J., Spakmana W. Atlas of the underworld: Slab remnants in the mantle, their sinking history, and a new outlook on lower mantle viscosity // *Tectonophysics*. 2018. Vol. 723. P. 309–448. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.004>.
15. Глебовицкий В.А., Хильтова В.Я., Козаков И.К. Тектоническое строение Сибирского кратона: интерпретация геолого-геофизических, геохронологических и изотопно-геохимических данных // *Геотектоника*. 2008. № 1. С. 12–26.
16. Абрамов В.А. Глубинное строение Центрально-Алданского района. Владивосток: Дальнаука, 1995. 180 с.
17. Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52, № 6. С. 830–851.
18. Khomich V.G., Boriskina N.G., Kasatkin S.A. Geology, magmatism, metallogeny, and geodynamics of the South Kuril Islands // *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 105. P. 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.015>.
19. Cromie P.W., Khin Zaw. Geological setting, nature of ore fluids and sulphur isotope geochemistry of the Fu Ning Carlin-type gold deposits, Yunnan Province, China // *Geofluids*. 2003. Vol. 3, iss. 2. P. 133–143. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1046/j.1468-8123.2003.00054.x> (дата обращения: 14.04.2023).
20. Khin Zaw, Peters S.G., Cromie P.W., Burrett C., Zengqian Hou. Nature, diversity of deposit types and metallogenic relations of South China // *Ore Geology Reviews*. 2007. Vol. 31, iss. 1–4. P. 3–47. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.10.006>.
21. Jun Deng, Qingfei Wang, Gongjian Li. Tectonic evolution, superimposed orogeny, and composite metallogenic system in China // *Gondwana Research*. 2017. Vol. 50. P. 216–266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2017.02.005>.
22. Петрищевский А.М. Новые данные о строении земной коры и верхней мантии Юго-Восточного Китая, полученные в результате статистической обработки гравитационных аномалий // *Тихоокеан. геология*. 2020. Т. 39, № 2. С. 29–45. DOI: 10.30911/0207-4028-2020-39-2-29-45.
23. Liang Duan, Qing-Ren Meng, Guo-Li Wu, Zhao Yang, Jianqiang Wang, Rongruo Zhan. Nanpanjiang basin: A window on the tectonic development of south China during Triassic assembly of the southeastern and eastern Asia // *Gondwana Research*. 2020. Vol. 78. P. 189–209. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.08.009>.
24. Хомич В.Г., Борискина Н.Г. Геодинамические обстановки формирования крупных месторождений благородных и радиоактивных элементов Инагли-Кондер-Феклистовского пояса и его флангов // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2014. № S3-1. С. 37–40. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22294592> (дата обращения: 14.04.2023).
25. Жао Д., Пирайно Ф., Лиу Л. Структура и динамика мантии под Восточной Россией и прилегающими регионами // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51, № 9. С. 1188–1203.

REFERENCES

1. Arehart G.B., Ressel M., Carne R., Muntean J.L. A Comparison of Carlin-type Deposits in Nevada and Yukon. *Society of Economic Geologists*. Inc. Special Publication. 2013;17:389-401. URL: <https://www.segweb.org/Store/detail.aspx?id=EDOCSP17CH13> [cited 14.04.2023].
2. Hronsky J.M.A., Groves D.I., Loucks R.R., Begg G.C. A unified model for gold mineralisation in accretionary orogens and implications for regional-scale exploration targeting methods. *Mineralium Deposita*. 2012;47:339-358. <https://doi.org/10.1007/s00126-012-0402-y>.
3. Khomich V.G., Boriskina N.G. Krupnye zolotorudnye raiony Yugo-Vostoka Rossii: osobennosti pozitsii i stroeniya = [Large gold-ore districts of Southeast Russia: features of position and structure]. *Lithosphere (Russia)*. 2013;(1):128-135. (In Russ.).
4. Jiang Zhu, Zhaochong Zhang, Santosh M., Ziliang Jin. Carlin-style gold province linked to the extinct Emeishan plume. *Earth and Planetary Science Letters*. 2020;530:115940. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115940>.
5. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. A geodynamic perspective of world-class gold deposits in East Asia. *Gondwana Research*. 2014;26(3-4):816-833. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.05.007>.
6. Hofstra A.H., Cline J.S. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits. *Reviews in Economic Geology*. 2000;13:163-220. URL: <https://www.segweb.org/Store/detail.aspx?id=EDOCREV13CH05> [cited 14.04.2023].
7. 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. *Economic Geology*. 2005;100:451-484. <https://doi.org/10.5382/AV100.15>.
8. Bakulin Yu.I., Buryak A.E., Perestoronin A.E. Karlinskii tip zolotogo orudneniya (zakonomernosti razmeshcheniya, genezis, geologicheskie osnovy prognozirovaniya i otsenki) = [Carlin type gold mineralization (location pattern, genesis, geological basis of forecasting and estimation)]. Khabarovsk: Dal'nevostochnyi institut mineral'nogo syr'ya; 2001. 159 p. (In Russ.).
9. Muntean J.L., Cline J.S., Simon A.C., Longo A.A. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits. *Nature Geoscience*. 2011;4:122-127. URL: <https://www.nature.com/articles/ngeo1064> [cited 14.04.2023].
10. Vetluzhskikh V.G., Kazansky V.I., Kochetkov A.Ya., Janovsky V.M. Central Aldan gold deposits. *Geology of Ore Deposits*. 2002;44:405-434. URL: <https://www.pleiades.online/cgi-perl/search.pl?type=abstract&name=geolore&number=6&year=2&page=405> [cited 14.04.2023].
11. Xie Z., Xia Y., Cline J.S., Koenig A., Wei D., Tan Q., Wang Z. Are there Carlin-type gold deposits in China? A comparison of the Guizhou, China, deposits with Nevada, USA, Deposits. *Reviews in Economic Geology*. 2018;20:187-233. <https://doi.org/10.5382/rev.20.06>.
12. Wenchao Su, Wendou Dong, Xingchun Zhang, Nengping Shen, Ruizhong Hu, Hofstra A.H., Lianzheng Cheng, Yong Xia, Keyou Yang. Carlin-Type Gold Deposits in the Dian-Qian-Gui "Golden Triangle" of Southwest China. *Reviews in Economic Geology*. 2018;20:157-185. <https://doi.org/10.5382/rev.20.05>.
13. Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., Petrov O.V., Kukushkin K.A., Kozlov D.S., Shatova N.V. Zolotorudnye raiony i uzly Aldano-Stanovoi metallogenicheskoi provintsii = [Gold ore districts and ore clusters of the Adanian metallogenic province]. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*. 2017;(71):93-111. (In Russ.).
14. Van der Meer D.G., van Hinsbergen D.J.J., Spakmana W. Atlas of the underworld: Slab remnants in the mantle, their sinking history, and a new outlook on lower mantle viscosity. *Tectonophysics*. 2018;723:309-448. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.004>.
15. Glebovitsky V.A., Khil'tova V.Ya., Kozakov I.K. Tectonics of the siberian craton: interpretation of geological, geophysical, geochronological, and isotopic geochemical data. *Geotectonics*. 2008;42:8-20. <https://doi.org/10.1134/S0016852108010020>.
16. Abramov V.A. Glubinnoe stroenie Tsentral'no-Aldanskogo raiona = [Deep structure of the Central Aldan region]. Vladivostok: Dalnauka; 1995. 180 s. (In Russ.).
17. Koulakov I.Yu., Dobretsov N.L., Bushenkova N.A., Yakovlev A.V. Slab shape in subduction zones beneath the Kurile-Kamchatka and Aleutian arcs based on regional tomography results. *Russian geology and geophysics*. 2011;52:650-667. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.05.008>.
18. Khomich V.G., Boriskina N.G., Kasatkin S.A. Geology, magmatism, metallogeny, and geodynamics of the South Kuril Islands. *Ore Geology Reviews*. 2019;(105):151-162. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.015>.

19. Cromie P.W., Khin Zaw. Geological setting, nature of ore fluids and sulphur isotope geochemistry of the Fu Ning Carlin-type gold deposits, Yunnan Province, China. *Geofluids*. 2003;3(2):133-143. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1046/j.1468-8123.2003.00054.x> [cited 14.04.2023].
20. Khin Zaw, Peters S.G., Cromie P.W., Burrett C., Zengqian Hou. Nature, diversity of deposit types and metallogenic relations of South China. *Ore Geology Reviews*. 2007;31(1-4):3-47. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.10.006>.
21. Jun Deng, Qingfei Wang, Gongjian Li. Tectonic evolution, superimposed orogeny, and composite metallogenic system in China. *Gondwana Research*. 2017;50:216-266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2017.02.005>.
22. Petrishchevsky A.M. New Data on the Crust and Upper Mantle Structure of the Southeast China Obtained from Statistical Processing Results of Gravity Anomalies. *Russ. J. of Pac. Geol.* 2020;(14):121-136. <https://doi.org/10.1134/S1819714020020062>.
23. Liang Duan, Qing-Ren Meng, Guo-Li Wu, Zhao Yang, Jianqiang Wang, Rongruo Zhan. Nanpanjiang basin: A window on the tectonic development of south China during Triassic assembly of the south-eastern and eastern Asia. *Gondwana Research*. 2020;78:189-209. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.08.009>.
24. Khomich V.G., Boriskina N.G. Geodinamicheskie obstanovki formirovaniya krupnykh mestorozhdenii blagorodnykh i radioaktivnykh elementov Inagli-Konder-Feklistovskogo poyasa i ego flangov. *Geology and mineral resources of Siberia*. 2014;(S3-1):37-40. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22294592> [cited: 14.04.2023].
25. Zhao D., Pirajno F., Dobretsov N.L., Liu L. Mantle structure and dynamics under East Russia and adjacent regions. *Russian Geology and Geophysics*. 2010;51:925-938. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.003>.

