

УДК 553.3/4:528.8(571.63)

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ И ГЕОДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ПРИМОРЬЯ)

^{1,2}Шевырёв С.Л.¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, e-mail: shevirev@mail.ru;²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

На обширных территориях Восточной Азии известны многочисленные месторождения благородных металлов: золото-серебряные и месторождения элементов платиновой группы, а также комплексного рудного сырья. Их территориальное размещение и глубина залегания контролируются особенностями как коровой, так и мантийной геодинамики, обусловленной нахождением территории в пределах ареала стагнированного в транзитной зоне мантии океанического слэба, активных плюмовых процессов в зоне крупного мантийного клина (КМК), а также деятельностью долгоживущих разломов различной кинематики и глубины заложения. Изучение особенностей расположения крупнейших месторождений золота (Алдан, Балей, Цзяодун) и платиноносных массивов, с учетом синхронности формирования и геофизических данных, свидетельствуют об их связи с мантийными процессами и проницаемыми зонами периферии стагнированного слэба. Генезис скопления благородных металлов внутри ареала слэба обусловлен наличием меньших разрывных структур нижнекорового и верхнемантийного заложения, при этом их запасы существенно ниже. Выполненная в пределах Сихотэ-Алинской горно-складчатой области реконструкция флюидопроводящих структур, связанных с активностью тектонопар глубинных разломов, служит целям выяснения тектонической позиции обнаженных и скрытых полифазных щелочных массивов, обусловивших размещение золото-серебряных месторождений, а также прогнозу новых объектов. Работами прошлых исследователей установлено, что сформировавшиеся массивы щелочные расплавы по составу соответствуют неконтаминированному мантийному источнику, что говорит о значительной глубине заложения подводящих структур. Небольшой размер таких интрузивных тел, затрудняющий их обнаружение, усиливает прогнозное значение предложенной геодинамической модели, область применения которой в комплексе с обработкой материалов дистанционного зондирования Земли может являться оценка перспектив обнаружения постмагматических золото-серебряных месторождений подвижных поясов Западной окраины Пацифики.

Ключевые слова: геодинамическое районирование, благороднометалльные месторождения, Восточная Азия, линейментный анализ, тектонический парагенезис, субдукция

REMOTE SENSING OF THE EARTH AND GEODYNAMICS OF PRECIOUS DEPOSITS FORMING (ON THE SAMPLE OF PRIMORYE)

^{1,2}Shevirev S.L.¹Far East Geological institute, Vladivostok, e-mail: shevirev@mail.ru;²Far Eastern Federal University, Vladivostok

Areas of East Asia comprise numerous deposits of precious metals (platinum group elements, gold, silver and complex ores). Their locations and depth are controlled by crustal and mantle geodynamics, as well as location on the area of stagnant mantle slab, active plume processes in the large mantle wedge (LMW) as well as the faults activity of different depth and kinematics. Analysis of position and geodynamics of largest gold deposits (Aldan, Baley and Jiaodong) and platinum bearing massifs evidences their relation with mantle plumes and permeable zones of stagnant slab periphery. Genesis of deposits and manifestation of precious metals inside the slab areal depends on small-scale disjunctive structures of lower crust and mantle, whereas their resources are considerably less. Reconstruction of permeable fluid structures evolution with geophysical and remote sensing data of Sikhote-Alin folded belt serves prospectivity of polyphase alkaline massifs, which controls position of deposits. Researches of the predecessors proof that these alkaline melts are arguably related to non-contaminated mantle source, which brings evidences of magmatic sources considerable depth. Small size of such intrusions that bothers detection of the gold-silver deposits, makes offered prospective model critical for postmagmatic gold-silver deposits of Western Pacific mobile belts when combined with remote sensing data.

Keywords: geodynamic regioning, precious metals deposits, East Asia, lineament analysis, tectonic paragenesis, subduction

Регион Восточной Азии, включающий территории России, Китая, Монголии и Кореи, располагает коренными и россыпными месторождениями золота и минералов платиновой группы, образующими рудные районы и узлы [1, 2 и др.]. Рудные объекты ассоциированы с крупным Центрально-Азиатским складчатым мегапоясом (ЦАСМ), ограниченным с севера Сибир-

ским, а с юга – Сино-Корейским кратонами. Территория мега-пояса включает в себя складчатые пояса и супертеррейны, характеризующиеся ранне-, позднепалеозойским и мезозойским возрастами. Образование входящих в их состав террейнов происходило в результате асинхронного закрытия отдельных сегментов ЦАСМ в фанерозое и аккреции вдоль окраины континента [3].

Прогнозные ресурсы крупнейших золоторудных узлов (Алданского, Балейского в России, а также Цзяодун в Китае) превышают 1000 т Au. Также многочисленны малые золоторудные объекты различного генезиса [4; 5]. Анализ региональных геодинамических и металлогенических данных показал наличие влияния глубинных процессов на формирование наиболее крупных рудных объектов [1, 2, 6]. Однако изучение особенностей генезиса отдельных месторождений, а также их прогноз требуют отдельного методологического подхода, принимающего во внимание региональные особенности формирования локальных флюидо- и магмопроводящих структур. Настоящее исследование служит целям выяснения тектонической позиции обнаженных и скрытых полифазных щелочных массивов, обусловивших размещение золото-серебряных месторождений, а также прогнозу новых объектов на основе анализа структурно-вещественных парагенезисов, устанавливаемых на дистанционных изображениях Земли.

Особенности геологического строения территории исследования

Благороднометалльное оруденение тихоокеанского юга Дальнего Востока России тесно связано с формированием в позднем мелу Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутоногенного пояса (ВСАВПП), за счет субдукции западного сегмента палеотихоокеанской плиты. При этом также формировались передовые (Западно-Сахалинский) и тыловые (Санцзян-Среднеамурский, Алчанский, Нижнеамурский и др.) прогибы, заполняемые вулканогенными молассами [1, 3, 7]. Позже, в маастрихт-эоцене (72–33 млн лет) происходило погружение тихоокеанской плиты Изагаги под континент, а затем олигоцен-миоценовое время (33–5 млн лет) время задуговой спрединг привел к обособлению Курильской и Японской островных дуг. Сопровождающий процесс рифтогенез сформировал впадины Японского и Охотского морей. Эпизоды интенсивного кайнозойского магматизма, проявившегося в виде полей базальтов, совпадающих с контуром мантийного слэба и крупными разрывными структурами в его пределах, позволяют предполагать активную роль мантийного плюмогенеза в задуговом спрединге Тихоокеанской окраины Азии [8, 9].

Строение верхней мантии и земной коры отличается существенной дифферен-

циацией, выраженной в размещении рифтогенных впадин. Рудоконтролирующими для крупнейших благороднометалльных объектов и узлов являются мантийные структуры и палеотрансформные разломы, а также границы ареала стагнированного слэба [1]. Создание прогнозных моделей территории возможно анализом мантийных и коровых процессов. Субдукция сегмента Тихоокеанской плиты под окраину Восточной Азии определила высокую сейсмичность Курило-Камчатской островодужной системы. Кроме того, основание слэба подверглось воздействию восходящего «горячего» Северо-Азиатского суперплюма [9, 10].

Месторождения золота и комплексного сырья (\pm Au, Ag) широко представлены в пределах мантийного слэба и связаны с корово-мантийными проводящими структурами. Однако небольшой масштаб и площадь объектов (десятки км²) требует приложения усилий для обоснования участков проведения детальных работ. Необходимость развития методологического аппарата для прогноза малых благороднометалльных структур определяет выбор Сихотэ-Алинского супертеррейна (САС) и Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутоногенного пояса в качестве объектов детального исследования. САС располагает потенциалом коренных золотосеребряных месторождений, постмагматического, скарнового и вулканогенно-гидротермального генезиса. Детальное исследование было проведено в районе, находящемся в пределах Журавлевского террейна и характеризующемся обстановкой формирования «палеомантийного окна», сформировавшего меднопорфировое (Au-Cu) месторождение Лазурное (Соболиный рудный узел), находящееся в пределах Журавлевского террейна, в зоне влияния Центрального Сихотэ-Алинского разлома (рис. 1).

Ортогональные и нормальные разрывные структуры второго порядка связаны в регионе с коровыми интрузиями, а также оловорудными и полиметалльными рудномагматическими системами [11, 12]. Для наращивания благороднометалльного потенциала САС посредством интерпретации космофотоснимков важным является прогнозирование обстановок растяжения, сопровождающих левосдвиговые структуры первого порядка. Структуры второго порядка кинематически могут быть разделены на суб- и параллельные сдвиги, нормальные раздвиги и ортогональные сдвиги-раздвиги.

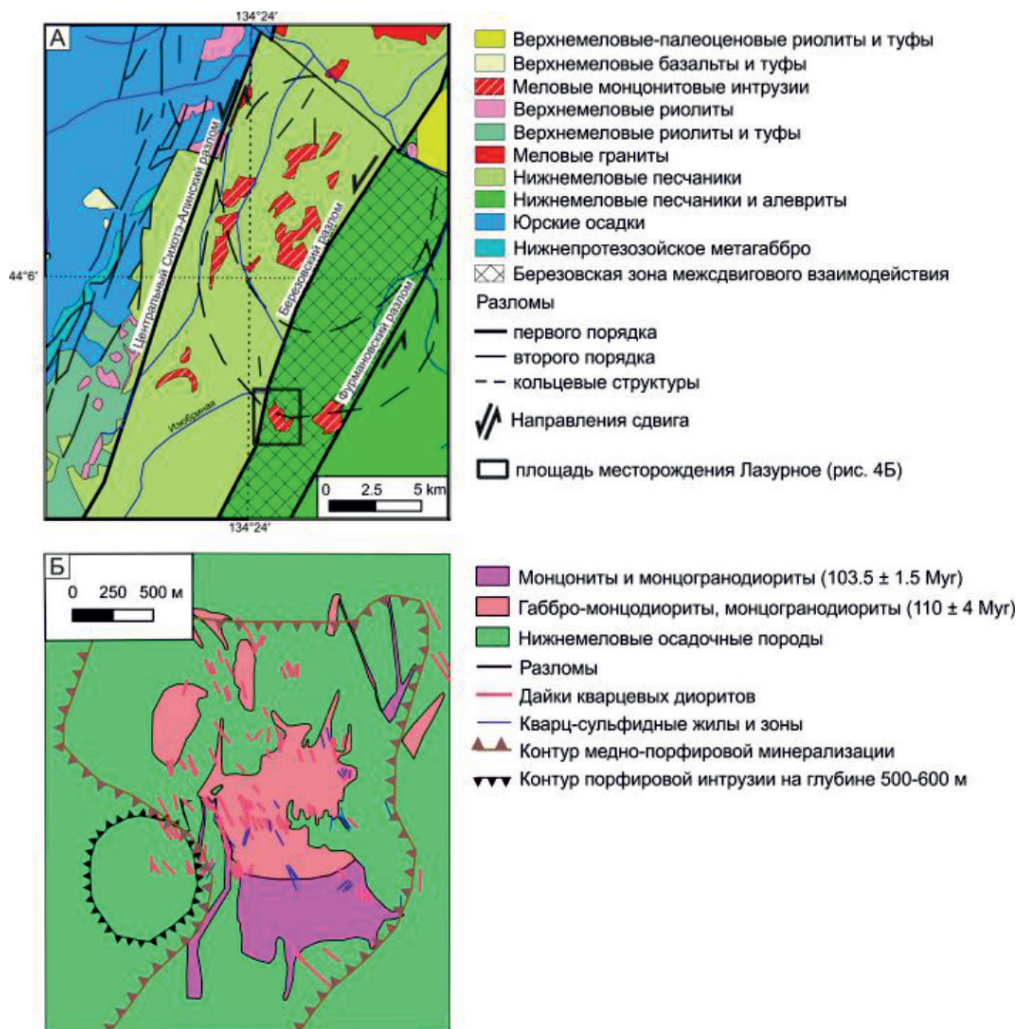


Рис. 1. А. Схематическая геологическая карта зоны взаимодействия Березовского и Фурмановского разломов (по [13] с изменениями и дополнениями автора). Б. Геологическое строение Лазурного штока и прилегающей территории (по [13])

Анализируемая территория приурочена к междвиговой зоне тектонопары Центрального Сихотэ-Алинского и Фурмановского разломов. Центральный Сихотэ-Алинский глубинный разлом, являющийся наиболее крупной дизъюнктивной структурой САС, разделяет Самаркинский (аккреционный бассейн среднеюрского-берриасового возраста) и Журавлевский (турбидитовый бассейн раннего мела) террейны. Флишеподобные породы нижнемелового возраста вмещающего оруденение Журавлевского террейна имеют мощность 5–5,5 км и прорываются магматическими породами различных генераций и возраста, включая крупные меловые интрузии (представлены частично на севере полигона), порфировые монцо-

нитовые интрузии апт-альбского возраста. Сверху они перекрываются вулканами верхнего мела-палеогена основного и кислого составов (рис. 1).

С точки зрения Cu-Au порфировой минерализации интерес представляют двухстадийные монцонитовые интрузии (монцонитовые габбро, габбродиориты и др.), обнажающиеся в пределах Березовской зоны. Меднопорфировое месторождение Лазурное связано с двухфазным Лазурным штоком монцонитов, где выделяются две фазы – первая (Северный шток), представленная габбромонцодиоритами и монцогранодиоритами и вторая (Южный шток), включающая монцониты и монцогранодиориты (рис. 1, Б). Медно-порфировая и молибденовая с золотом рудоносность сосредото-

чена главным образом в Северном штоке. Рудные минералы представлены халькопиритом, борнитом, халькозином, молибдени- том и самородным золотом. Минерализа- ция описана также за пределами интрузии в осадочных породах, при этом общая пло- щадь контура минерализации существенно превышает площадь интрузии. К западу от Лазурного штока по геофизическим дан- ным установлено магматическое тело, зале- гающее на глубине 300–500 м [13].

Абсолютным датированием по циркону (U-Pb) в пределах Лазурного штока опре-

делены возраста стадий внедрения [13]. Для ранней стадии (Северный шток) это 110 ± 4 млн лет и $103,5 \pm 1,5$ млн лет для поздней стадии (Южный шток). Анализ спектров распределения РЗЭ раскрывает особенности генезиса рудно-магмати- ческой системы: изотопные отношения гафния ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$), иттербия и лютеция в цирконах позволили [13] сделать выво- ды о долгоживущей глубинной проникае- мой структуре и присутствии мантийного неконтаминированного источника магм второй стадии.

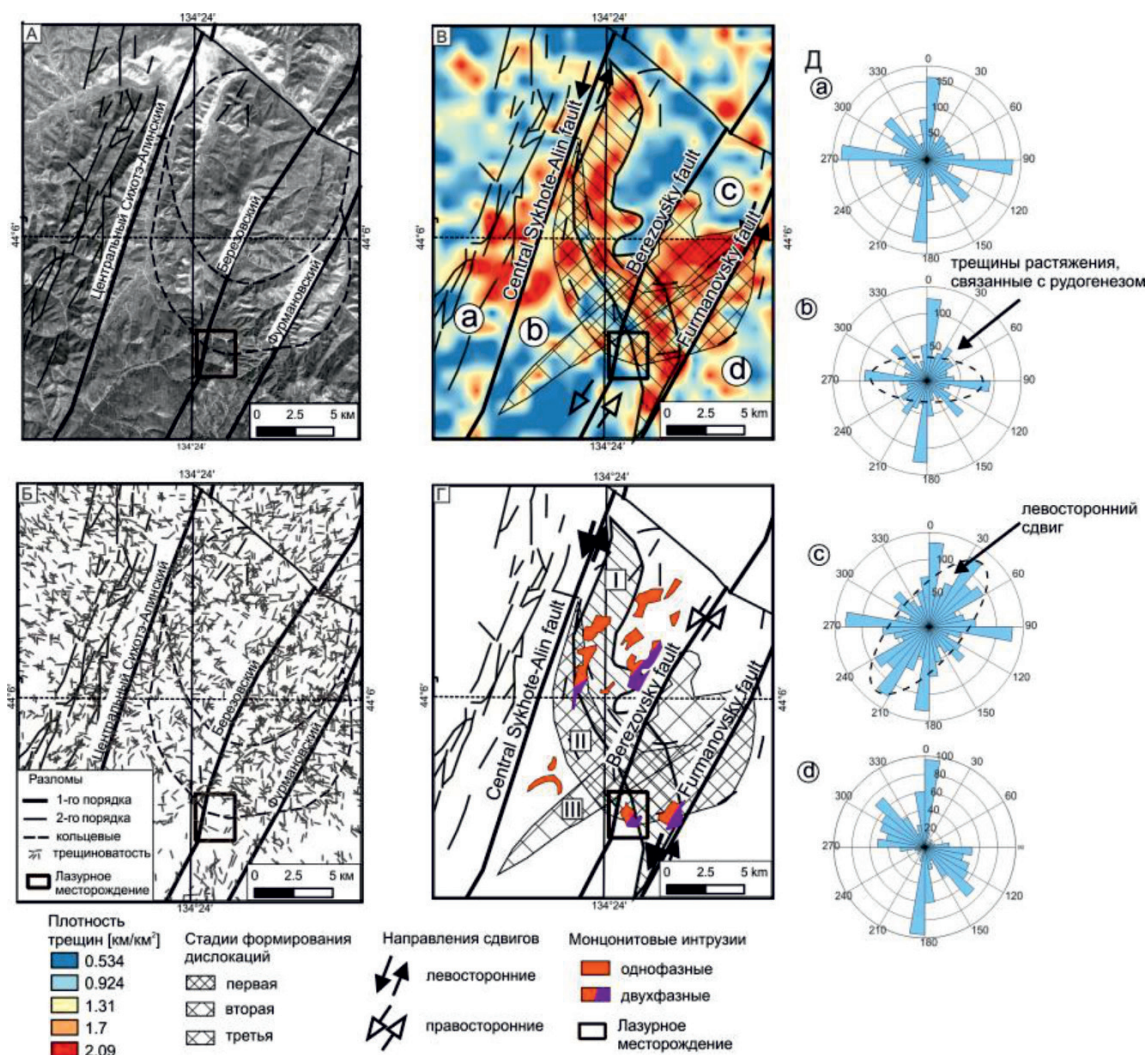


Рис. 2. Дистанционное изображение Landsat 8 территории, прилегающей к рудному полю Лазурное (А); Схема дешифрирования линейных элементов, построенная с помощью программного обеспечения LEFA (Б); Тектонический паттерн территории исследования: В – карта плотности распределения линейных элементов дистанционного изображения (км/км²); Г – схема интерпретации стадийности возникновения дислокаций и связанные с ними группы монцитонитовых интрузий; Д – розы-диаграммы трещиноватости (а – Западная; б – Центральнo-Сихотэ-Алинско-Березовская; с – Березовско-Фурмановская; d – Восточная. Цифры в квадратах отражают стадии межсдвиговых дислокаций)

Материалы и методы исследования

Кинематика формирования и динамика проницаемых структур в зоне влияния тектопары Центральный Сихотэ-Алинский – Фурмановский разломы, может быть объяснена с помощью численного моделирования сдвига и анализом паттерна трещиноватости, полученного с использованием технологий машинного зрения в программе LEFA [14]. На космическом изображении Landsat 8 (дата съемки: 07.11.2017, канал 8) (рис. 2, А) дешифрированы линейные элементы, предположительно соответствующие региональной трещиноватости. На схеме видны неоднородности в их распределении, зоны сгущения и разрежения (рис. 2, Б). Для количественного описания характеристик распределения линейных элементов была построена карта плотности (рис. 2, В), которая позволила предположить скрытую тектоническую зональность, сформированную на различных стадиях геологической истории рассматриваемой системы параллельных разломов и подчеркивающую основными направ-

лениями роз-диаграмм (рис. 2, Д). В пределах территории исследования выделены четыре тектонические зоны (рис. 2 (В) а – d), дифференцированные по основным направлениям линейментов автоматизированного дешифрирования. Выделяются главные направления: широтное и меридиональное, которые присутствуют во всех зонах, кроме Восточной, для направлений которой менее выражен широтный компонент. Северо-восточное направление преобладает в Березовско-Фурмановской зоне и соответствует главному направлению структур региона – сдвигам северо-восточного простирания, отвечающим Восточно-Азиатской мегазоне Тан-Лу. Северо-западное направление соответствует зонам растяжения, ортогональным основному направлению структур. С сопряженными структурами в пределах участка исследования связано внедрение двухфазных порфирировых монцититовых интрузий. Кроме того, в тектонической эволюции территории нами выделяется выраженная стадийность.

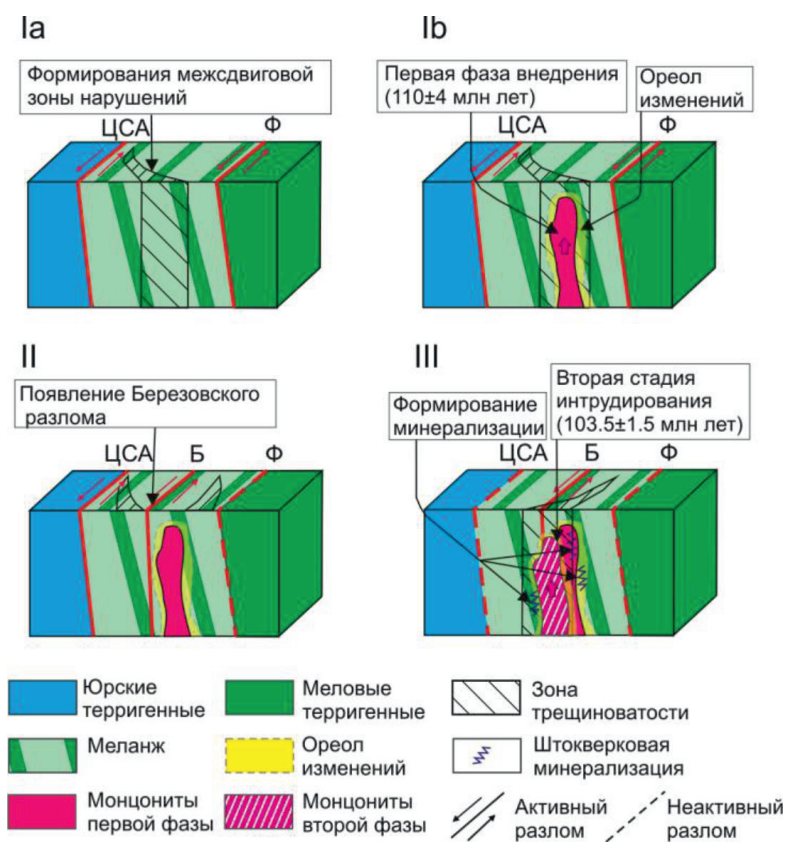


Рис. 3. Графическая схема предлагаемой модели эволюции зоны взаимодействия Центрального Сихотэ-Алинского и Фурмановского разломов

Результаты исследования и их обсуждение

Численная геодинамическая модель, анализ доминирующих и второстепенных направлений паттерна трещин позволили восстановить последовательность эволюции междвиговых зон (рис. 3). В истории тектонических ансамблей территории выделяется три этапа. На первом сформировались дислокации, вызванные параллельным скольжением левых сдвигов Центрального Сихотэ-Алинского и Фурмановского разломов.

Это сформировало S-образную зону дислокаций, осложнённых трещинами скольжения и отрыва (рис. 2, Г, рис. 3 Ia). На этом этапе происходило внедрение пород первой фазы монцонитовых интрузий, датированных 110 ± 4 млн лет (рис. 3 Ib) [13].

Накопление напряжений в междвиговой зоне вызвало активизацию Березовского правосдвигового разлома глубинного заложения (рис. 3 II). Активизация перемещений в его северном сегменте первоначально сформировала зону дислокаций (рис. 2, Г, II). Затем сдвиговая зона сместилась к юго-западу, обусловив формирование плотностной аномалии трещин (см. рис. 2Г, III в квадратике). Оживление Березовского разлома и формирование зоны трещин отрыва (рис. 3 III) обусловило внедрение расплавов второй стадии ($103,5 \pm 1,5$ млн лет), по геохимическим особенностям соответствующих деплетированной мантии [13]. Цепочка вскрытых денудацией двухфазных монцонитовых интрузий (рис. 2, Г) отражает дислокации, вызванные Березовским разломом. Лазурный двухфазный шток монцонитов локализован в зоне суперпозиции дислокаций первой, второй и третьей стадий.

Выводы

Регион юга Дальнего Востока России характеризуется индивидуальными особенностями геологического строения, включающими активную субдукцию океанической коры и ее стагнацию в верхней мантии, приведшую к образованию мантийного слэба, наличие контрастных линейных гравитационных аномалий, соответствующих разломам глубинного заложения, которые обеспечивают блоковую (террейновую) делимость земной коры. Главные месторождения и рудные узлы благородных металлов тяготеют к контуру мантийного слэба, совпадающего с горячим полем мантии, а также крупным разломам внутри этого

поля. Прогноз месторождений благородно-металльного сырья в пределах террейнов возможен выявлением обстановок формирования локальных структур растяжения глубинного (мантийного) заложения и связанной с ними скрытой тектонической зональности. Проведенное исследование тектонических парагенезисов рудного поля Лазурное позволило предложить модель формирования его локальных проницаемых структур.

Список литературы / References

1. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. A geodynamic perspective of world-class gold deposits in East Asia. *Gondwana Research*. 2014. Vol. 26. № 3–4. P. 816–833. DOI: 10.1016/j.gr.2014.05.007.
2. Хомич В.Г., Борискина Н.Г. Особенности размещения платинометаллической минерализации на Юго-Востоке России // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55. № 7. С. 1065–1080.
3. Khomich V.G., Boriskina N.G. Localization of PGE mineralization in southeastern Russia // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. Vol. 55. P. 842–853. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.06.004.
3. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: В 2 кн. / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
4. Geodynamics, magmatism and metalgenius of the East of Russia: in 2 b. / Pod red. A.I. Hanchuka. Vladivostok: Dal'nauka, 2006. B. 1. 572 p. (in Russian).
4. Хомич В.Г., Борискина Н.Г. Благороднометаллические рудно-магматические системы северной краевой части Аргунского супертеррейна // *Доклады Академии наук*. 2007. Т. 414. № 3. С. 372–375.
5. Khomich V.G., Boriskina N.G. Ore-magmatic systems with noble metals in the northern marginal sector of the Argun superterrane // *Doklady Earth Sciences*. 2007. Vol. 414. Issue 1. P. 534–537. DOI: 10.1134/S1028334X07040101.
5. Deng J., Wang C., Bagas L., Carranza E.J.M., Lu Y. Cretaceous–Cenozoic tectonic history of the Jiaojia Fault and gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: constraints from zircon U–Pb, illite K–Ar, and apatite fission track thermochronometry. *Miner Deposita*. 2015. Vol. 50. Issue 1. P. 987–1006. DOI: 10.1007/s00126-015-0584-1.
6. Shevyrev S.L., Khomich V.G., Boriskina N.G. System analysis of results of geological-geophysical, seismotomographic, remote sensing researches methods of the Earth for the prospecting of ore-bearing areas (on the example of East Asia). *Mineral Prospectivity: current approaches and future innovations*. Orléans, France. 2017. P. 80–81. DOI: 10.13140/RG.2.2.12808.72963.
7. Wang H.Z., Mo X.X. An outline of the tectonic evolution of China. *Episodes*. 1995. Vol. 18. P. 6–16.
8. Isozaki Y., Aoki K., Nakama T., Yanai Sh. New insight into a subduction-related orogen: a reappraisal of the geotectonic framework and evolution of the Japanese Islands. *Gondwana Research*. 2010. Vol. 18. P. 82–105. DOI: 10.1016/j.gr.2010.02.015.
9. Kuz'min M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic within-plate magmatism of North Asia: Absolute paleogeographic reconstructions of the African large low-shear-velocity province. *Geotectonics*. 2011. Vol. 45. Issue 6. P. 415–438. DOI: 10.1134/S00168521110600.
10. Shestakov N.V., Hiroaki T., Ohzono M., Prytkov A.S., Bykov V.G., Gerasimenko M.D., Luneva M.N., Gerasimov G.N., Kolomiets A.G., Bormotov V.A., Vasilenko N.F., Baek J., Par P., Serov M., Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations. *Tectonophysics*. 2012. Vol. 524–525. P. 76–86. DOI:10.1016/j.tecto.2011.12.019.

11. Уткин В.П. Строение, геохронология и структурно-динамические условия вертикального развития Восточно-Сихотэ-Алинского магмо-металлогенического пояса // Доклады Академии наук. 2005. Т. 404. № 5. С. 659-663.

Utkin V.P. Structure, geochronology and structural and dynamic conditions of vertical development of the East Sikhote-Alin magmo-metallogenicheskoy belt // Doklady Akademii nauk. 2005. Vol. 404. № 5. P. 659-663 (in Russian).

12. Борискина Н.Г., Шевырев С.Л., Хомич В.Г. Имидж рудоносных площадей юго-восточного Приморья по материалам дистанционного зондирования // Разведка и охрана недр. 2014. № 6. С. 30-35.

Boriskina N.G., Shevyrev S.L., Khomich V.G. Image of Ore-Bearing Areas of South-East of the Primorye from Materials of Remote Sounding // Razvedka i ohrana neдр. 2014. № 6. P. 30-35 (in Russian).

13. Сахно В.Г., Коваленко С.В., Аленичева А.А. Монзонитовый магматизм медно-порфирового месторождения лазурное: геохронология по результатам U-Pb- и K-Ar- датирования и особенности генезиса рудоносных магм по данным изотопно-геохимических исследований (Приморье, Россия) // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438. № 1. С. 82-90.

Sakhno V.G., Kovalenko S.V., Alenicheva A.A. Monzonitoid magmatism of the copper-porphyritic Lazurnoe deposit (South Primorye): U-Pb and K-Ar geochronology and peculiarities of the ore-bearing magma genesis by the data of isotopic-geochemical studies // Doklady Earth Sciences. 2011. Vol. 438(1). P. 569-577. DOI: 10.1134/S1028334X11050072.

14. Shevyrev S.L. LEFA. Lineament extraction and fracture analysis software. Software guide. [Electronic resource]. URL: http://lefa.geologov.net/wp-content/uploads/2018/05/LEFA_1_0_guide.pdf. (date of access: 27.05.2019).