

Месторождение Южное: Sn-Ag-Pb-Zn орогенная металлогения Сихотэ-Алиня

Формирование аномально сурьмяно-сереброносных Sn-Pb-Zn руд Южного месторождения сопряжено с поздним альб-сеноманским орогенезом Сихотэ-Алиня. Рудовмещающими являются трещинные, субсогласные с напластованием раннемеловых флишоидных алевролитов и песчаников зоны сдвига-надвигов в борту антиклинальной складки. По данным свинцово-изотопных исследований, источником свинца сеноманской рудно-магматической системы Южного месторождения выступают флишоиды раннемеловой аккреционной призмы Журавлевского террейна – субстрат гранитно-метаморфического слоя новообразованной мезозойской континентальной коры Сихотэ-Алиня. В минералого-геохимическом и структурном отношении месторождение принципиально отлично от скарновых и жильных Pb-Zn месторождений дальнегорского типа, ассоциированных с раннепалеоценовыми магматитами дальнегорской андезит-габбро-гранодиорит-гранитной ассоциации.

Ключевые слова: альб-сеноманский орогенез, Sn-Ag-Pb-Zn руды, S-O-Pb изотопы, Журавлевский террейн, Южное, Краснореченск, Сихотэ-Алинь.

ГУСАРОВА ВАЛЕРИЯ ВЯЧЕСЛАВОВНА, инженер-исследователь¹, val99999@list.ru

РАТКИН ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник¹, ratkin@yandex.ru

ЧУГАЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник², vassachav@mail.ru

ТИХОМИРОВ ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ, инженер-исследователь¹, tihomirov.dmitriy@bk.ru

ЕЛИСЕЕВА ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник¹, okaras@yandex.ru

¹ ФГБУН Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВГИ ДВО РАН), г. Владивосток

² ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва

The Yuzhnoe ore deposit: Sn-Ag-Pb-Zn orogenic metallogeny of Sikhote-Alin

V. V. GUSAROVA¹, V. V. RATKIN¹, A. V. CHUGAEV², D. V. TIKHOMIROV¹, O. A. ELISEEVA¹

¹ Far East Geological Institute, Far Eastern Division of the Russian Academy of Sciences (FEGI FEB RAS), Vladivostok

² Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow

Formation of anomalously antimony-silver bearing Sn-Pb-Zn ores of the Yuzhnoye deposit is related to the late Albian-Cenomanian orogeny of Sikhote-Alin. The ore-bearing structures are represented by fractured zones of strike-slip and thrust faults, subconformable to the bedding of Lower Cretaceous flyschoid siltstones and sandstones in the flank of an anticline. Based on the lead-isotope investigation, the source of lead in the Cenomanian ore-magmatic system of the Yuzhnoye deposit was represented by flyschoids of the Early Cretaceous accretionary prism of the Zhuravlevka terrane, the substrate of the granite-metamorphic layer of the newly formed Mesozoic continental crust of Sikhote-Alin. In terms of the mineralogical-geochemical and structural features, the deposit is fundamentally different from the skarn and vein Pb-Zn deposits of the Dalnegorsk type, associated with Early Paleocene magmatites of the Dalnegorsk andesite-gabbro-granodiorite-granite suite.

Key words: Albian-Cenomanian orogeny, Sn-Ag-Pb-Zn ores, S-O-Pb isotopes, Zhuravlevka terrane, Yuzhnoye, Krasnorechensk, Sikhote-Alin.

Введение. Южное месторождение было обнаружено в 1956 г. в сорока километрах западнее Дальнегорска, в центре Краснореченского рудного района, в южной части Сихотэ-Алинского хребта на высоте около 1200 м над уровнем моря. Оно непрерывно отрабатывается начиная с 1968 г. уже 55 лет.

В принятой классификации месторождение типизировано как касситерит-сульфидное. По данным государственного реестра участков недр, предоставленных для добычи полезных ископаемых, и лицензий на пользование недрами по территории Приморского края, средние содержания свинца, цинка и серебра в рудах Южного месторождения соответствуют 8,48 %, 8,8 % и 465 г/т. До конца 1980-х гг. описываемое месторождение эксплуатировалось на близповерхностных горизонтах как оловорудное. В текущее время извлекаемые с глубины 400–500 м руды содержат (при доминировании станнина) олова в среднем лишь 0,06 %. Месторождение отрабатывается ГК «Дальполиметалл» как серебро-свинцово-цинковое.

Многолетнее изучение месторождения проводилось фрагментарно, по мере вовлечения в разработку всё более глубоких горизонтов. Внимание акцентировалось на исследованиях минерального состава руд [1, 10, 14, 16]. Вопросы формирования рудовмещающего Журавлевского террейна и процессы орогенеза в непосредственной связи с рудообразованием не обсуждались. По сути, не решалась задача геолого-генетического металлогенического моделирования.

Из указанного следует, что в настоящее время актуальна задача системно суммировать выполненные в последние десятилетия региональные и локальные исследования геологии Журавлевского террейна, Краснореченского района и собственно месторождения, дополнив их результатами изотопно-геохимического изучения рудовмещающих пород и руд.

Журавлевский террейн: региональная позиция, геодинамика и позднемеловой магматизм. В работах последних лет [4, 12, 22] показано, что Сихотэ-Алинь – участок новообразованной континентальной литосферы, сформированный как коллаж юрско-раннемеловых эпиокеанических террейнов. Южное месторождение находится в юго-восточной части Журавлевского террейна (рис. 1).

Журавлевский террейн занимает центральную часть южного Сихотэ-Алиня. В составе террейна

доминируют толщи раннемеловых флишоидов (турбидитов). По данным [4], журавлевские флишоиды накапливались, перекрывая океаническое базальтовое основание, в морском субмеридиональном протяжённом турбидитовом пулл-апарт бассейне вдоль границы континентальной и океанических плит, непосредственно к востоку от материка. Как результат лавинной седиментации, с берриаса по ранний альб включительно, была сформирована толща флишоидных пород мощностью более 13 км. По данным государственной геологической съёмки [11], раннемеловая толща обогащена свинцом (> 45 г/т), цинком (> 125 г/т) и бором (37–196 г/т). Содержание олова из-за присутствия в песчаниках среди аксессуаров касситерита и оловоносного биотита [3, 8, 18] варьирует от 2 до 30 г/т. Источником рудной нагрузки осадочных пород выступал поток кварц-полевошпатового кластического материала из континентальной области питания бассейна, выраженной как сочетание территории древнего Сино-Корейского щита и раннепалеозойского Ханкайского супертеррейна [4]. По данным микроскопии и детритовой цирконометрии [13, 29], в составе псаммитовой составляющей песчаников преобладают K-Na полевые шпаты эродированных пермо-триасовых гранитоидов (230 ± 39 млн лет).

При проскальзывании океанической плиты толща турбидитов транслируется вдоль края материка на север, испытывая складчатость волочения. В позднем альбе–раннем сеномане проявляется пик синсдвиговой орогенной складчатости. При тангенциальном сжатии с азимутальной ориентировкой 340° образуется система тесно сжатых складок и надвигов северо-восточного простирания.

В раннем сеномане финально оформляется террейновый коллаж Сихотэ-Алиня. Журавлевский террейн занимает современное положение в виде призмы с океаническими базальтами в основании. Вертикальная мощность призмы составляла около 30 км [4]. На глубине (в нижней части призмы) в результате гранитно-метаморфических преобразований осадочных пород формируются гигантские батолиты [4, 15]. На поверхности в границах Журавлевского террейна орогенный магматизм выражен как внедрение синорогенных интрузий монцодиоритов и гранитов с датировками, близкими 100 ± 3 млн лет [22].

В позднесеноман-маастрихтское время на современной широте Сихотэ-Алиня проявляется

субдукция океанической плиты. Возникает окраинно-континентальный Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс. Складчатые флишoidы Журавлевского террейна с резким угловым несогласием перекрываются слабодислоцированным чехлом известково-щелочных вулканических пород. Плутонические образования субдукционного этапа проявлены в виде интрузий лейкогранитов возрастом от 75 до 65 млн лет [5, 24].

На рубеже позднего мела–палеоцена субдукционное взаимодействие плит сменяется трансформным режимом. При абсолютном доминировании левосторонних сдвигов в период с 61 до 55 млн лет формируются гигантские палеокальдеры, перекрывающие складчатое основание Журавлевского террейна [25]. Кальдеры выполнены толщей субщелочных кислых вулканитов с интрузиями гранитоидов.

Восточнее Журавлевского террейна, на площади соседнего Таухинского террейна, переход субдукции к режиму трансформного взаимодействия плит фиксируется в узком интервале 60 ± 2 млн лет [25]. В это время возникает дальнегорская вулкано-плутоническая ассоциация при доминировании андезитов и интрузий габбро-гранодиорит-гранитного состава [20].

Южное месторождение: структура и магматические комплексы. Южное месторождение локализуется в толще раннемеловых флишoidов и располагается в центральной части Краснореченского рудного района, в зоне влияния Восточной сдвигово-надвиговой зоны на границе Журавлевского и Таухинского террейнов (см. рис. 1). Единственное

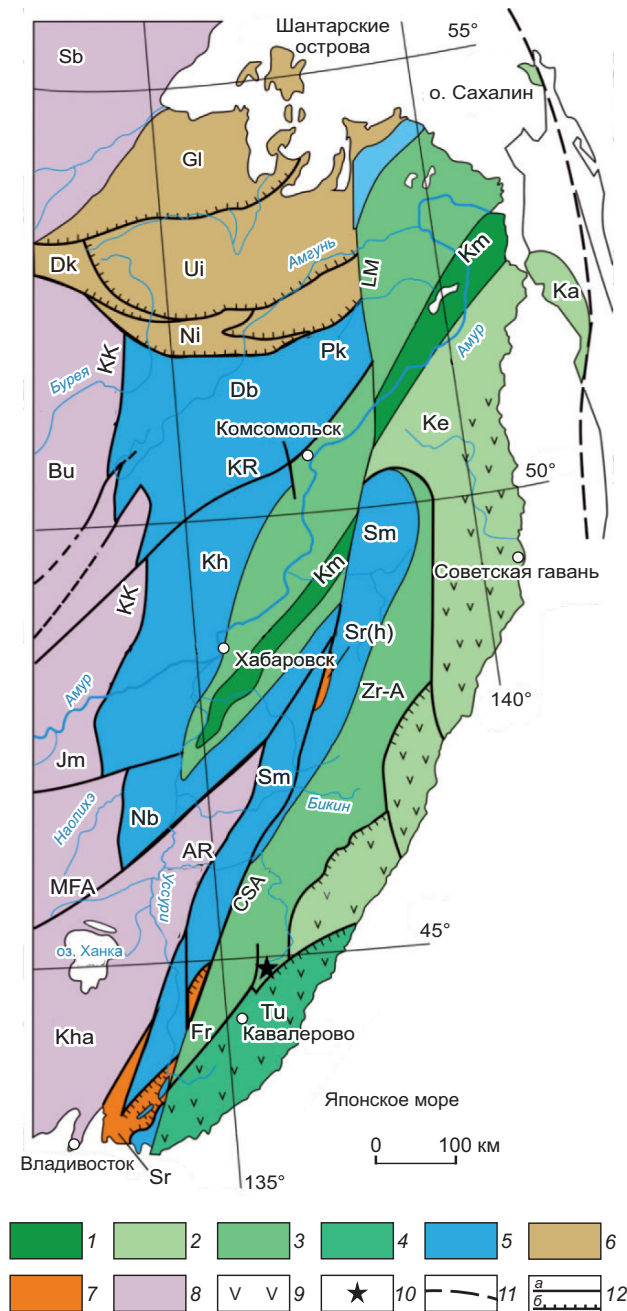


Рис. 1. Положение Южного месторождения в структуре террейнов Сихотэ-Алиния [22]. С дополнениями:

1–7 – террейны: 1 – готерив-альбской аккреционной призмы (Em – Киселевско-Маноминский), 2 – готерив-альбской островодужной системы (Ke – Кемский, Ka – Камышовский, Sch – Шмидта), 3 – раннемелового синдвигового турбидитового бассейна (Zr-A – Журавлевско-Амурский), 4 – раннемеловой (неокомской) аккреционной призмы (Tu – Таухинский), 5 – юрской аккреционной призмы (Bd – Баджалский, Kh – Хабаровский, Nb – Наданьхада-Бикинский, Sm – Самаркинский), 6 – Монголо-Охотского орогенного пояса (Dk – Джагино-Кербинский, Ni – Ниланский, Ul – Ульбанский), 7 – палеозойской континентальной окраины, перекрывающий юрскую аккреционную призму (Sr – Сергеевский, Sr(h) – Хорский); 8 – до-мезозойские континенты: Буряя (Bu), Дзямусы (Jm), Ханкайский (Kha) супертеррейн и Сибирский кратон (Sb); 9 – постааккреционный Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс; 10 – Южное месторождение; 11 – восточная граница Сихотэ-Алинского орогенного пояса; 12 – разломы: а – сдвиги, сбросы, б – надвиги

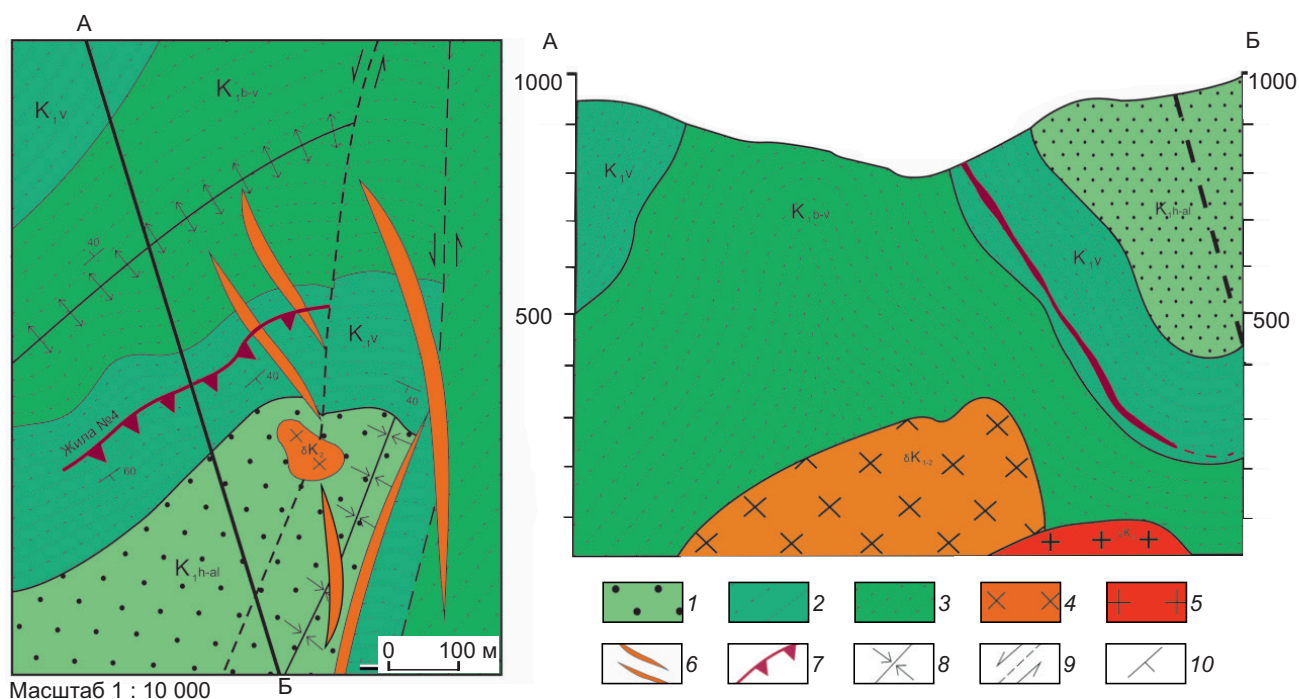


Рис. 2. Генерализованная схема геологического строения Южного месторождения и разрез по линии А–Б. По данным АО ГМК «Дальполиметалл» и [21], с изменениями и дополнениями:

1 – готерив-альбские песчаники; 2 – валанжинские песчаники и алевролиты; 3 – берриас-валанжинские алевролиты; 4 – кварцевые монцодиориты сеноманского возраста; 5 – лейкограниты маастрихтского возраста; 6 – ороговикованные дорудные дайки кварцевых монцодиоритов; 7 – рудная зона (жила № 4) в сдвиге-надвиге; 8 – оси складок; 9 – левые сдвиги зоны Восточного разлома; 10 – элементы залегания

промышленно значимое рудное тело представлено жилой № 4. При протяженности около 800 м на современной поверхности и варьирующей мощности от 0,2 до 1,0 м жила прослежена до глубины 1 км (рис. 2).

В структурном плане складчато-трещинная структура Южного месторождения, вмещающая рудное тело № 4, проявляется как элемент поздней альб-раннесеноманской складчатости в виде субсогласного с напластованием осадочных пород сдвига-надвига на юго-восточном крыле антиклинальной складки северо-восточного простирания. Чередование участков сжатия и растяжения в рудовмещающей надвиговой зоне выражено в ритмичных изменениях мощности жилы с формированием субгоризонтальных рудных столбов.

В региональной структуре восточной окраины Журавлевского террейна Краснояреченский рудный район проявлен как интрузивно-купольная структура. В ядерной части купола, где располагается Южное месторождение, складчатые ран-

немеловые осадочные породы интенсивно ороговикованы и прорваны мелкими интрузиями монцодиоритов – апофизами располагающейся на глубине крупной интрузии монцодиоритов. Присутствующие на месторождении северо-западные дорудные дайки ранней фазы монцодиоритов, так же как и вмещающие флишоиды, ороговикованы. Возраст монцодиоритов, по данным [6], составляет $95,5 \pm 2,2$ млн лет и отвечает сеноманской фазе орогенного магматизма. По данным [2], при повышенной калиевоности и низких содержаниях кальция и железа для монцодиоритов характерны высокие концентрации халькофильных элементов: Ag – до 0,51 и Sn – до 7 г/т.

На юго-западном фланге месторождения непосредственно ниже рудной зоны скважинами вскрыта интрузия грейзенизированных лейкогранитов маастрихтского, по данным К-Аг датирования слюд, возраста ($65,8 \pm 1,5$ млн лет). В зоне влияния маастрихтской интрузии отчетливо проявлен термальный метаморфизм руд [16].

Табл. 1. Состав арсенопирита ранней кварц-касситерит-арсенопиритовой ассоциации и оценка температуры формирования ассоциации, рассчитанная на основе арсенопиритового геотермометра [27]

Горизонт (м)	Образцы	Элементы, мас. %				Элементы, ат. %			T °C**
		Fe	As	S	Сумма	Fe	As	S	
910	74–270*	35,82	43,24	20,33	99,39	34,6	31,1	34,2	405
	74–292*	36,45	42,24	20,31	99	35,3	30,5	34,2	375
690	1569	34,87	42,27	21,64	98,78	33,5	30,3	36,2	370
		34,8	41,96	21,54	98,3	33,6	30,2	36,2	367
440	411	35,13	42,25	20,84	101,22	33,4	32,1	34,5	451
		35,17	44,46	20,7	100,33	33,7	31,8	34,5	437
403	415	34,51	45,23	19,9	99,64	33,5	32,8	33,7	477
		34,57	45,91	19,88	100,36	33,4	33,1	33,5	490
	418	35,26	45,82	20,17	101,25	33,7	32,7	33,6	475

Примечание. Анализы выполнены на микроанализаторе «JXA-8100» (ДВГИ ДВО РАН, аналитик Г. Б. Молчанова); * – данные из работы [9]; ** – оценка температуры кристаллизации арсенопирита на основе геотермометра [27]; отметка выхода жилы на поверхность – 1100 м.

Минеральный состав, зональность, термометрия. Минеральные ассоциации жильных руд формировались в едином эволюционирующем флюидном процессе. При высокой активности серы были образованы ранняя кварц-касситерит-арсенопиритовая и последующая продуктивная кварц-халькопирит-сфалерит-пирротиновая ассоциации. Завершается рудный процесс кристаллизацией аномально высокосурьмяной сульфосоли-антимонидно-галенитовой ассоциации.

Главные минералы руд, в интегральном выражении, – пирротин, арсенопирит, сфалерит и галенит. В составе жильных минералов доминирует кварц, но близ поверхности, кроме кварца, в жильной массе присутствует и кальцит. По литературным данным [1, 9, 10], на верхних горизонтах месторождения в галените присутствуют микровключения антимонита, разнообразных сульфоантимонитов свинца, включая джемсонит, менегинит, буланжерит, овихиит, диафорит и др. Отмечены аурустибит и сурьмянистое золото. В нижней части рудной зоны при преобладании жильного кварца увеличивается относительное количество халькопирита, арсенопирита и пирротина. В виде разнообразных минеральных включений наиболее распространены самородное серебро, самородная сурьма и их интерметаллиды (дискразит, алларгентум), сурьмяные сульфосоли серебра и свинца.

В значениях содержаний продуктивных макрокомпонентов руд вертикальная зональность рудного тела практически не выражена. Отношение содержаний свинца и цинка в рудах сохраняется в значениях 1:1 от поверхности до глубины 900 м. Сфалерит при локальных вариациях железистости (Fe от 7 до 18 мас. %) также проявляет крайне незначительную изменчивость с глубиной. В интервале глубин 0–600 м [9, 14] содержания железа в сфалерите отвечают 12–17 мас. %, на глубине ниже 600 м, по нашим данным, сфалерит содержит Fe 10–15 мас. %. Галенит не содержит элементов-примесей, но повсеместно сохраняет серебро-сурьмяную специализацию за счёт обильных минеральных включений, в том числе и на глубоких горизонтах.

Отчётливо выражено только изменение состава арсенопирита ранней ассоциации со снижением содержаний As (ат. %) от нижних горизонтов к верхним. В табл. 1 приведён состав арсенопирита и рассчитанная на основе минерального геотермометра [27] оценка температуры его кристаллизации.

В числе минералов-индикаторов температуры рудообразования в рудах на верхних горизонтах месторождения присутствует минегинит [1]. С учётом данных [28], можно утверждать, что формирование продуктивных минеральных ассоциаций, завершающих рудный процесс на Южном

Табл. 2. Изотопный состав серы пирротина и галенита

№ п/п	Образцы, горизонт, м	Минерал	$\delta^{34}\text{S}$, ‰
1	414, гор. 440	Пирротин	-1,6
2	416, гор. 403	Пирротин	-1,3
3	418, гор. 400	Пирротин	-1,0
4	430, гор. 390	Пирротин	-0,9
5	414, гор. 440	Галенит	-1,5
6	412, гор. 440	Галенит	-3,6
7	418, гор. 400	Галенит	-2,4
8	416, гор. 403	Галенит	-2,4
9	430, гор. 390	Галенит	-1,6

Примечание. Исследования выполнены в ЦКП ДВГИ ДВО РАН в лаборатории стабильных изотопов; измерение проведено на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (Thermo Finnigan, Bremen, Germany); погрешность определения $\delta^{34}\text{S}$ (1 σ) составляет 0,2 ‰, n = 5.

месторождении, происходило на верхних горизонтах при температуре не ниже 300 °С.

Локально изучены газово-жидкие включения в кварце, ассоциированном с халькопирит-сфалерит-пирротинным агрегатом на горизонте +440 м (в 600 м от поверхности). Зафиксированная температура гомогенизации включений близка 325 °С. По данным криометрии, в составе газовой фазы включений доминирует CO₂.

Результаты изотопно-геохимических исследований пород и руд. Выполнены исследования изотопных составов серы сульфидов, кислорода жильного кварца и свинца галенита руд. Кроме этого, изучен изотопный состав свинца в валовых пробах песчаников и алевропесчаников раннемеловых флишоидов.

Изотопный состав серы определялся в монофракциях пирротина доминирующей ранней кварц-халькопирит-сфалерит-пирротиновой ассоциации и монофракциях галенита поздней сульфосольно-антимонидно-галенитовой ассоциации. Результаты приведены в табл. 2.

Изотопный состав кислорода кварца изучен в шести пробах стволовой части жильного выполнения, где пространственно совмещён кварц ранней высокотемпературной кварц-касситерит-арсенопиритовой и кварц последующей средне-температурной продуктивной кварц-халькопирит-сфалерит-пирротиновой ассоциации. Измеренные

значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{кварц}}$ отвечающие интервалу от +9,8 до +15,5 ‰, приведены в табл. 3.

Анализ изотопного состава свинца галенита сульфосольно-антимонидно-галенитовой ассоциации руд Южного месторождения выполнен в объёме 8 проб, характеризующих рудное тело № 4 в интервале горизонтов 850–550 м, включая фланги и центральную часть рудного тела (табл. 4).

Изотопный состав свинца раннемеловых флишоидных пород изучен в восьми валовых пробах песчаников, характеризующих полный разрез раннемелового Журавлевского турбидитового бассейна от берриаса-валанжина до позднего альба включительно. С учётом содержаний U, Th и Pb в изученных пробах выполнен пересчёт значений свинцово-изотопных отношений на 100 млн лет. Результаты анализа и пересчёта приведены в табл. 5.

Табл. 3. Изотопный состав кислорода кварца из стволовой части жильной зоны № 4 горизонтов 350–477 м

№ п/п	Образцы	Горизонт, м	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$, ‰
1	410	477	+15,5
2	413	440	+14,2
3	417	400	+14,7
4	417а	400	+11,9
5	430	395	+15,3
6	55	350	+9,8

Примечание. Исследования выполнены в ЦКП ДВГИ ДВО РАН, в лаборатории стабильных изотопов. Измерения проводились на изотопном масс-спектрометре MAT 253 (Thermo Scientific Germany), в режиме постоянного потока гелия.

Обсуждение результатов. Пространственная сопряжённость Южного месторождения с ранне-сеноманскими интрузиями монцодиоритов и локализация Ag-Sb-Sn-Pb-Zn жильных руд в трещинной структуре надвига, формирование которого связывается с процессами орогенной складчатости рудовмещающих раннемеловых флишоидов [4, 21], выступают достаточным основанием для вывода о сопряжённости рудообразования с орогенными событиями на рубеже раннего и позднего мела. Рудоконтролирующая Южное месторождение монцодиоритовая интрузивно-купольная

Табл. 4. Изотопный состав свинца в монофракциях галенита из руд Южного месторождения (жила № 4)

№ п/п	Образцы	Привязка образца	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Tm (Ma)	μ ₂	ω ₂	Th/U
1	213–2001	Горизонт 850 м	18,3288	15,6219	38,6624	268	9,79	39,6	4,05
2	238–2001	Горизонт 760 м	18,3294	15,6238	38,6687	272	9,80	39,7	4,05
3	235–2001	Горизонт 550 м	18,3265	15,6214	38,6603	269	9,79	39,6	4,05
4	U-2	Горизонт 550 м, восточный фланг	18,3231	15,6231	38,6627	275	9,80	39,7	4,05
5	U-3	Горизонт 550 м, восточный фланг	18,3223	15,6222	38,6593	274	9,80	39,7	4,05
6	U-4	Горизонт 550 м, западный фланг	18,3234	15,6237	38,6644	276	9,80	39,7	4,05
7	U-10	Горизонт 550 м, западный фланг	18,3228	15,624	38,6650	277	9,81	39,7	4,05
8	U-11	Горизонт 550 м, западный фланг	18,3209	15,6224	38,6656	275	9,80	39,7	4,05

Примечание. Измерения выполнены в ИГЕМ РАН (г. Москва) на многоколлекторном масс-спектрометре NEPTUNE (Thermo Finnigan, Германия) из растворов с применением в качестве трасера таллия с известным изотопным отношением ²⁰⁵Tl/²⁰³Tl для коррекции результатов измерений на приборную масс-дискриминацию; аналитическая ошибка измеренных отношений ±0,02 % (2SD).

структура проявлена как восточная часть Березовского-Аракатского габбро-монцодиоритового ареала интрузий, сформированного, по данным U-Pb датирования [12], на пике орогенного магматизма (101 ± 1,0 млн лет). Интрузивный маг-

матизм является, по данным геологических и детальных петрологических построений [2, 4, 6, 12], отражением процессов флюидно-магматической переработки раннемеловых флишоидов в основании Журавлевской аккреционной призмы.

Табл. 5. Изотопный состав свинца в валовых пробах раннемеловых песчаников с пересчётом изотопных отношений на 100 млн лет

№ п/п	Образцы	Pb, г/г	Th, г/г	U, г/г	Th/U	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Пересчёт свинцо-изотопных отношений на 100 млн лет		
									²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb
1	Zh-11	11,8	8,35	1,88	4,4	18,5115	15,5971	38,5422	18,352	15,589	38,311
2	Zh-25	5,59	17,51	2,99	5,8	18,8588	15,6464	39,3088	18,314	15,62	38,271
3	Zh-44	14,7	17,7	3,3	5,3	18,6803	15,6553	39,1458	18,453	15,644	38,749
4	Zh-48	26	16	2,9	5,5	18,4753	15,6280	38,8145	18,363	15,623	38,613
5	Zh-70	17,2	15,8	3,1	5,1	18,7464	15,6474	39,1703	18,564	15,639	38,867
6	Zh-71	16,6	14,9	2,8	5,3	18,5024	15,6219	38,8370	18,333	15,614	38,543
7	Zh-87	15,1	13,8	2,7	5,1	18,5241	15,6307	38,9394	18,344	15,622	38,639
8	Zh-88	19,1	15,3	2,8	5,5	18,5297	15,6301	38,9511	18,382	15,623	38,688

Примечание. Измерения выполнены в ИГЕМ РАН (г. Москва) на многоколлекторном масс-спектрометре NEPTUNE (Thermo Finnigan, Германия) из растворов с применением в качестве трасера таллия с известным изотопным отношением ²⁰⁵Tl/²⁰³Tl для коррекции результатов измерений на приборную масс-дискриминацию; аналитическая ошибка измеренных отношений ± 0,03 % (2SD). Содержания Pb, Th, U определены методом ICP-MS в ИГЕМ РАН (г. Москва); ошибка аналитических определений содержаний элементов ± 3 % (2SD). Возраст песчаников: обр. Zh-11, Zh-25 – берриас-валанжин; обр. Zh-44, Zh-48 – валанжин; обр. Zh-70, Zh-71 – ранний-средний альб; обр. Zh-87, Zh-88 – средний-поздний альб.

Оценка температуры и природы минералообразующих растворов, выполненная на основе данных изучения состава арсенопирита (см. табл. 1), достаточно предметна в отношении ранней стадии минералообразования (кварц-касситерит-арсенопиритовой ассоциации). На глубине 700 м температура близка 500 °С, а близ поверхности температура восходящего флюида снижалась до 400 °С. Ориентируясь на присутствие в составе поздней сульфосольно-антимонидно-галенитовой продуктивной ассоциации в верхней части рудного тела минегинита, устойчивого при температуре выше 300 °С [28], можно предположить, что интенсивный (высокодебитный) флюидный режим сохранялся при снижении температуры не более, чем на 100 °С, включая позднюю продуктивную стадию. Следовательно, в завершении рудообразования процесс реализовался по мере продвижения флюида с глубины 700–800 м к поверхности в интервале от 400 до 300 °С. Результаты локальных исследований газово-жидких включений в кварце продуктивной кварц-халькопирит-сфалерит-пирротиновой ассоциации согласуются с указанной оценкой. Температура гомогенизации газово-жидких включений в образцах кварца, отобранного на глубине 600 м (горизонт 440 м), составила 325 °С.

Выполненный анализ изотопного состава кислорода кварца позволяет оценить, ориентируясь на известные равновесия [19], изотопный состав кислорода во флюиде. Следует подчеркнуть, что определения $\delta^{18}\text{O}_{\text{кварц}}$ проводились в шести пробах жильного кварца из стволовой части жилы № 4 горизонтов 350–477 м (см. табл. 3). Измеренные значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{кварц}}$ отвечают интервалу от +9,8 до +15,5‰. Оценка-пересчёт изотопного состава водного флюида выполнена с учётом данных температурной зональности и особенно дифференциации изотопов кислорода в системе кварц- H_2O [5]. По нашим наблюдениям, в стволовой части жилы пространственно совмещён кварц ранней высокотемпературной кварц-касситерит-арсенопиритовой и кварц последующей среднетемпературной продуктивной кварц-халькопирит-сфалерит-пирротиновой ассоциации. Для пересчёта принята температура кварца в среднетемпературном продуктивном интервале 325–400 °С. Это обеспечивает модельные построения, где расчётная оценка не превышает реальные значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ флюидной системы. Полученные расчётные значения в $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ в интервале

+5,8 ÷ +10,5‰ вполне однозначно указывают на преобладание в составе флюида растворов магматического происхождения. Участие метеорной составляющей не проявлено.

Результаты анализа изотопного состава серы главных рудных минералов руд Южного месторождения (пирротин, галенит) демонстрируют её изотопную гомогенность (см. табл. 2). При очевидном отсутствии серы, включая сульфатную, в составе рудовмещающих флишоидов близкие к метеоритному стандарту значения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов определённо указывают на преобладание ювенильной серы магматогенного происхождения. Проявленное изотопное облегчение серы относительно нулевого стандарта вполне согласуется с доминированием в составе рудно-магматической системы Краснореченского района гранитоидов ильменитовой серии [17]. Из таблицы 2 видно, что проявлена тенденция снижения значений $\delta^{34}\text{S}$ и пирротина, и галенита в воздымающемся флюидном потоке. По нашим представлениям, эти изменения отражают увеличение восстановленности магматогенного флюида по мере его продвижения к поверхности в результате дегазации: снижения содержаний доминирующего в системе CO_2 .

Следует подчеркнуть, что фиксируемые элементы изменчивости эволюционирующего флюидного потока практически не выражены в продуктивной минералого-геохимической зональности руд. В объёме чрезвычайно протяжённой жильной зоны сохраняется аномально высокая сереброносность руд и на флангах, и на глубине около одного километра. Практически неизменно продуктивное отношение Pb/Zn в рудах, близкое к значениям 1:1. Это характеризует флюидную систему как плутоногенную с экстремально высокой дебитной характеристикой, обеспечивающей равномерный режим минералообразования. Прямым выражением указанных особенностей является фиксированный низкий температурный градиент, не превышающий 10 °С на 100 метров.

Предметная информация о природе рудно-магматической системы Южного месторождения получена при изучении свинцо-изотопного состава руд и вмещающих флишоидов.

Выполненные определения изотопного состава галенита руд Южного месторождения демонстрируют абсолютную изотопную однородность: при средних значениях (из восьми проб галенита) изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$,

$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ на уровне 18,325, 15,623 и 38,664 соответственно индивидуальные модельные точки отклоняются от средних не более, чем на 0,02%. Это прямо указывает на высокую гомогенность и грандиозный масштаб однородного магматического источника рудного свинца, соизмеримого с батолитом. Расчёты, выполненные на основе модели Стейси-Краммера [29], показывают, что этот источник имеет близкую к среднекоровой характеристику с отношением $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ около 9,80 и высоким отношением $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ – 39,7. На диаграмме в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ экспериментальные точки рудного галенита лежат вблизи среднекоровой эволюционной кривой Стейси-Краммера, между кривыми «ороген» и «верхняя кора» (см. рис. 3).

Отчётливо видно, что характеристика свинцово-изотопной рудной системы и «орогенная» характеристика осадочных пород Журавлевского террейна (в пересчёте на 100 млн лет) по сути идентичны.

По совокупности изотопно-геохимических и геологических данных можно утверждать, что источником рудного свинца выступал раннемеловой аномально обогащённый рудными элементами флишоидный свинцово-изотопный резервуар Журавлевского террейна. Формирование рудоносных гранитоидов связано с процессами орогенных гранитно-метаморфических преобразований флишоидов на ювенильном уровне. Указанная преэминентность отчётливо проявлена в соответствии с расчётными отношениями Th/U в модельном источнике рудного свинца и аналитически измеренных Th/U отношений в флишоидах (см. табл. 5).

Принципиально важный аспект в характеристике природы рудно-магматических систем (РМС) – участие мантии в рудообразовании. В отношении РМС Южного месторождения этот вопрос имеет решение в свете изотопно-геохимических особенностей руд и рудоносных магматических комплексов. Принимая отношение $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ как индекс мантийности [23], подчеркнём совпадение его значений для рудной и флишоидной систем на уровне ~2,10–2,11. То есть можно говорить об отсутствии мантийной компоненты и абсолютном доминировании свинца журавлевского свинцово-изотопного резервуара в формировании РМС Южного месторождения. Не менее выразительным является соответствие виртуального свинцово-изотопного модельного возраста руд (268–

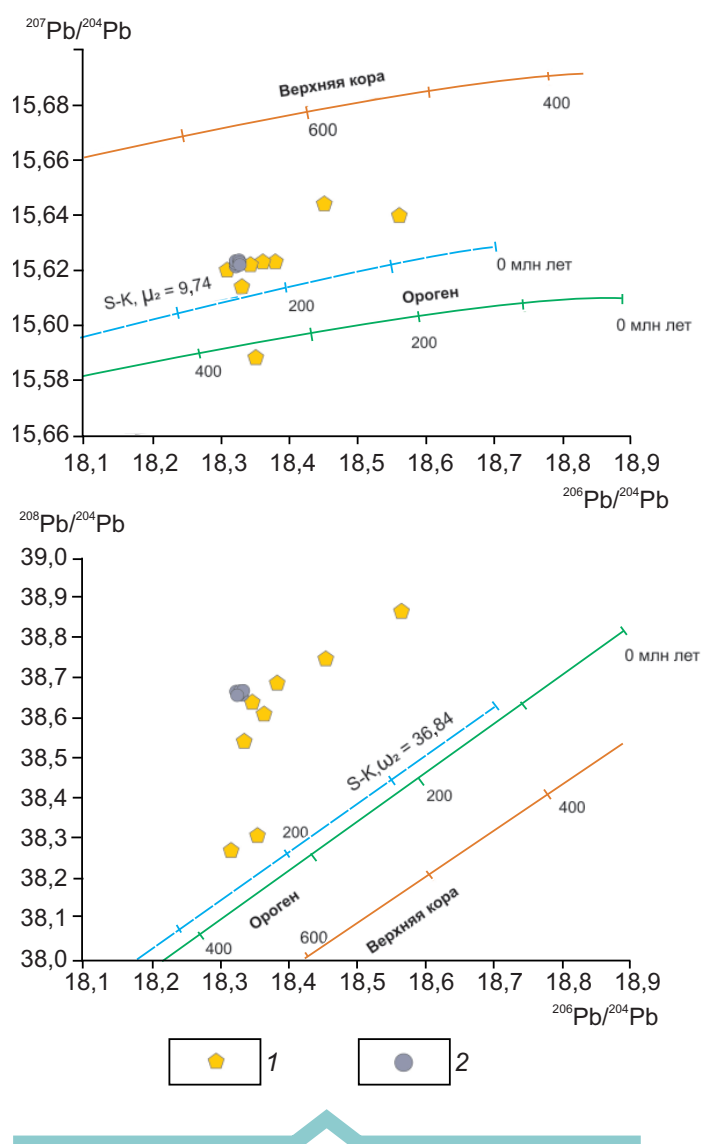


Рис. 3. Положение модельных точек изотопного состава свинца галенита из руд Южного месторождения (8 проб) и свинца раннемеловых флишоидных пород (8 валовых проб осадочных пород, в пересчёте на 100 млн лет):

1 – осадочные породы; 2 – галенит

277 млн лет, см. табл. 4) пермо-триасовому возрасту кварц-полевошпатовой псаммитовой гранитогенной составляющей субстрата – раннемеловых песчаников (230 ± 39 млн лет) [13, 30], переработанных в условиях орогенной складчатости и магматизма.

Указанные построения в пользу вывода о верхнекоровой природе РМС Южного месторождения

можно дополнить стронциевой изотопной характеристикой раннесеноманских монцодиоритов, для которых, по данным [2], характерны отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ на уровне 0,709.

Масштабность процессов орогенного магматизма проявляется в высокодебитовом режиме малоградиентной магматогенной гидротермальной системы, при отсутствии метеорной составляющей. Вполне очевидно, что источником рудного вещества в силу геохимической обогащённости рудными элементами новообразованной континентальной коры, могут выступать, как это проявлено в геохимии свинца, складчатые толщи флишоидов. Исключение составляет ювенильная сера. Представляется, что формирование верхнекорковых рудоносных магматических очагов реализовалось на орогенном этапе при участии подкорковых флюидных потоков с ювенильной серой. По мере развития рудного процесса происходит снижение активности серы. Эта тенденция находит выражение в массовой кристаллизации самородной сурьмы и её сплавов с серебром в финале рудообразования в виде включений в минералах поздней продуктивной ассоциации.

В суммированном виде особенности орогенного рудообразования на Южном месторождении свидетельствуют о его специфике. Наиболее ярко это проявлено в сопоставлении с жильными и скарновыми Pb-Zn месторождениями соседнего Дальнегорского района. В отличие от Южного, дальнегорские месторождения возникают в геодинамическом режиме трансформной континентальной окраины. Центры рудообразования связаны с ареалами палеоценового андезит-габбро-гранодорит-гранитного магматизма [7] и контролируются постскладчатыми разломами северо-западного простирания в виде оперения северо-восточных региональных сдвиговых зон. Отчётливо проявлена вертикальная минералогеохимическая зональность дальнегорских месторождений с серебро-сурьмяными рудами в головной части и серебро-висмутовыми корнями. Формирование руд происходит в близповерхностных условиях в потоке магматогенных флюидов при варьирующем участии метеорной составляющей.

Специфика изученного плутоногенного Южного месторождения должна учитываться при организации прогнозно-поисковых работ, ориен-

тированных на выявление новых аномально сереброносных полиметаллических месторождений на юге Сихотэ-Алиня.

Выводы. По результатам выполненных региональных обобщений и детального изучения аномально сурьмяно-сереброносных Sn-Pb-Zn руд Южного месторождения можно утверждать, что в роли геохимического резервуара рудного свинца Южного месторождения выступали флишоиды Журавлевского террейна, сформированные в раннемеловом турбидитовом бассейне при доминирующем участии пермо-триасовой гранитогенной кластики эродированного Сино-Корейского щита.

Рудосносный магматизм сопряжён с процессами позднего альб-раннесеноманского орогенного гранитно-метаморфического преобразования флишоидов на ювенильных глубинах, в основании Журавлевской аккреционной призмы.

Весьма своеобразные серебро-сурьмяные полиметаллические руды Южного месторождения формировались при участии магматогенного относительно высокотемпературного (500–300 °С) высокодебитного флюидного потока с участием ювенильной серы подкоркового происхождения.

В рудах, образованных в температурно низкоградиентных условиях, в интервале 0–1000 м практически не выражена Ag-Pb-Zn продуктивная макрокомпонентная вертикальная зональность.

Выполненная типизация в полной мере соответствует высказанному ранее прогнозу [22], что в эпоху альб-раннесеноманского орогенеза, кроме известных вольфрамовых, золоторудных и меднопорфириновых, формировались и иные, включая оловянные и полиметаллические, месторождения Сихотэ-Алиня. Высокая сереброносность полиметаллических орогенных месторождений обеспечивает их высокую востребованность в расширении современной ресурсной базы серебра южного Сихотэ-Алиня.

Благодарности. Изучение руд глубоких горизонтов Южного месторождения проводится в виде мониторинга по инициативе геологической службы ГМК «Дальполиметалл». Текущие исследования выполнены при непосредственном участии главного геолога рудника «Южный» В. И. Шишкиной, которая организовала сопровождение работ, включая отбор каменного материала и документацию подземных горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бортников Н. С., Бородаев Ю. С., Вяльсов Л. Н.* [и др.] Редкие минералы сурьмы и их парагенезисы в рудах месторождения Южного (Тетюхинский район, Южное Приморье) // Новые данные о минералах СССР. – Вып. 34. – М. : Наука, 1975. – С. 3–13.
2. *Валуй Г. А.* Петрология гранитоидов и дифференциация расплавов в малоглубинных условиях (Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс). – Владивосток : Дальнаука, 2014. – 245 с.
3. *Василенко В. П.* Актуальные проблемы изучения оловорудных месторождений Приморья // Генезис эндогенной минерализации Дальнего Востока. – Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1978. – С. 5–14.
4. *Голозубов В. В.* Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – 239 с.
5. *Гоневчук В. Г.* Оловоносные системы Дальнего Востока: магматизм и рудообразование. – Владивосток : Дальнаука, 2002. – 297 с.
6. *Гоневчук В. Г., Гоневчук Г. А., Лебедев В. А., Орехов А. А.* Монцитонитовая ассоциация Кавалеровского рудного района (Приморье): геохронология и некоторые вопросы генезиса // Тихоокеанская геология. – 2011. – Т. 30, № 3. – С. 20–31.
7. *Елисеева О. А., Тихомиров Д. В., Раткин В. В.* Рудноносные эксплозивные брекчии финальной фазы раннепалеоценового (дальнегорского) импульса магматизма: данные термобарогеохимического изучения включений в кварце // Вестник ДВО РАН. – 2023. – С. 92–107.
8. *Инатова В. Ф., Маркевич П. В.* О возрасте эндогенного оруднения в некоторых районах Восточного Приморья // Основные проблемы металлогении Тихоокеанского рудного пояса. – Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1971. – С. 334–335.
9. *Казаченко В. Т.* Марганцовистые и железистые метасоматиты Южного Приморья. – М. : Наука, 1979. – 160 с.
10. *Казаченко В. Т.* Южное свинцово-цинковое месторождение // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – С. 673–676.
11. *Костин А. Я., Королев В. Н., Пеженина Л. А., Лосив В. Н., Голозубов В. В.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Изд. 2-е. Серия Южно-Сихотэ-Алинская. Лист L-53-XXXIV, XXXV (Дальнегорск). Объяснительная записка. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2006. – 206 с.
12. *Крук Н. Н., Гвоздев В. И., Орехов А. А.* [и др.] Раннемеловые гранитоиды и монцитонитовиды южной части Журавлевского террейна (Сихотэ-Алинь): геохимические особенности и источники расплава // Тихоокеанская геология. – 2019. – Т. 38, № 3. – С. 30–49.
13. *Малиновский А. И., Голозубов В. В.* Литология и обстановки формирования терригенных отложений вдоль трансформных границ плит на примере раннемелового Журавлевского террейна (Южный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. – 2011. – Т. 30, № 5. – С. 35–52.
14. *Осипова Г. А.* Элементы-примеси и минеральные микровключения в касситеритах и сульфидах оловополиметаллических месторождений. – Владивосток : Дальнаука, 1993. – 147 с.
15. *Петрищевский А. М.* Статистические гравитационные модели литосферы Дальнего Востока. – Владивосток : Изд-во Дальневост. ун-та, 1988. – 168 с.
16. *Раткин В. В., Симаненко Л. Ф., Елисеева О. А., Гоневчук В. Г.* Пиротин-нисбит-брейтгауптит-сульфоантимонидная микроминеральная ассоциация: продукт высокотемпературной перекристаллизации руд жильного олово-серебро-полиметаллического месторождения Южное (Сихотэ-Алинь, Россия) // Записки Российского минералогического общества. – 2020. – Т. СХLIX, № 3. – С. 54–77.
17. *Раткин В. В., Томсон И. Н., Рязанцева М. Д., Сокарев А. Н., Полякова О. П.* Соотношение рудной изотопно-геохимической и петрофизической зональности Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса // Доклады АН СССР. – 1997. – Т. 356, № 3. – С. 990–994.
18. *Ростовский Ф. И., Хетчиков Л. Н.* Рифтогенез и регенерация рудных компонентов в процессе формирования сульфидно-касситеритового оруденения Сихотэ-Алиня // Рудные месторождения континентальных окраин. – Владивосток : Дальнаука, 2000. – Вып. 1. – С. 113–123.
19. *Тейлор Х. П.* Применение изотопии кислорода и водорода к проблемам гидротермального изменения вмещающих пород и рудообразования // Стабильные изотопы и проблемы рудообразования. – М. : Мир, 1977. – С. 213–298.
20. *Тихомиров Д. В., Елисеева О. А., Раткин В. В.* Структурно-петрологические особенности рудно-магматической системы Николаевского скарново-полиметаллического месторождения (Дальнегорский рудный район, Сихотэ-Алинь) // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – С. 105–107.
21. *Уткин В. П.* Сдвиговые дислокации, магматизм и рудообразование. – М. : Наука, 1989. – 165 с.
22. *Ханчук А. И., Гребенников А. В., Иванов В. В.* Альбеноманские окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // Тихоокеанская геология. – 2019. – Т. 38, № 3. – С. 4–37.

23. *Cousens B., Weis D., Constantin M., Scott S.* Radiogenic isotopes in enriched mid-ocean ridge basalts from Explorer Ridge, northeast Pacific Ocean // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2017. – V. 213. – P. 63–90. – DOI: org/10.1016/j.gca.2017.06.032.
24. *Grebennikov A. V., Khanchuk A. I., Gonevchuk V. G., Kovalenko S. V.* Cretaceous and Paleogene granitoid suites of the Sikhote-Alin area (Far East Russia) : Geochemistry and tectonic implications // *Lithos.* – 2016. – V. 261. – P. 250–261.
25. *Kasatkin S. A., Grebennikov A. V.* The early Paleogene strike-slip tectonic setting along the northeastern Asian margin: structural control on magmatism // *International Geology Review.* – 2022. – V. 65(14). – P. 2288–2314.
26. *Khanchuk A. I., Kemkin I. V., Kruk N. N.* The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data // *J. Asian Earth Sci.* – 2016. – V. 120. – P. 117–138.
27. *Kretschmar U., Scott S. D.* Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application // *Canadian Mineralogist.* – 1976. – V. 14, № 3. – P. 364–386.
28. *Pruseth K. L., Mishra B., Bernhardt H. J.* Phase relations in the Cu₂S–PbS–Sb₂S₃ system: an experimental appraisal and application to natural polymetallic sulfide ores // *Economic Geology.* – 1997. – 92. – P. 720–732.
29. *Stacey J. S., Kramers I. D.* Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1975. – V. 26, № 2. – P. 207–221.
30. *Tsutsume Y., Yokoyama K., Kasatkin S. A., Golozubov V. V.* Provenance study of accretionary complexes in Primory, Far East Russia, using ages and compositions of detrital minerals // *Memoirs of the National Museum of Nature and Science.* – 2016. – № 51. – P. 79–87.
31. *Zhang L. G., Liu J. X., Zhou H. B., Chen Z. S.* Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system // *Economic Geology.* – 1989. – V. 89. – P. 1643–1650.

REFERENCES

1. *Bortnikov N. S., Borodayev YU. S., Vyal'sov L. N.* [et al.] Redkiye mineraly sur'my i ikh paragenезisy v rudakh mestorozhdeniya Yuzhnogo (Tetyukhinskiy rayon, Yuzhnoye Primor'ye) [Rare antimony minerals and their parageneses in ores of the Yuzhnoye deposit (Tetyukhinsky district, Southern Primorye)], *Novyye dannyye o mineralakh SSSR, Is. 34, Moscow, Nauka publ., 1975, pp. 3–13. (In Russ.)*
2. *Valuy G. A.* Petrologiya granitoidov i differentsiatsiya rasplavov v maloglubinnnykh usloviyakh (Vostochno-Sikhote-Alinskiy vulkanicheskiy poyas) [Petrology of granitoids and differentiation of melts in shallow conditions (East Sikhote-Alin volcanic belt)], *Vladivostok, Dal'nauka publ., 2014, 245 p. (In Russ.)*
3. *Vasilenko V. P.* Aktual'nyye problemy izucheniya olovorudnykh mestorozhdeniy Primor'ya [Actual problems of studying tin ore deposits of Primorye], *Genezis endogennoy mineralizatsii Dal'nego Vostoka, Vladivostok, DVNTS AN SSSR publ., 1978, pp. 5–14. (In Russ.)*
4. *Golozubov V. V.* Tektonika yurskikh i nizhnemelovykh kompleksov severo-zapadnogo obramleniya Tikhogo okeana [Tectonics of Jurassic and Lower Cretaceous complexes of the northwestern framing of the Pacific Ocean], *Vladivostok, Dal'nauka publ., 2006, 239 p. (In Russ.)*
5. *Gonevchuk V. G.* Olovonosnyye sistemy Dal'nego Vostoka: magmatizm i rudoobrazovaniye [Tin-bearing systems of the Far East: magmatism and ore formation], *Vladivostok, Dal'nauka publ., 2002, 297 p. (In Russ.)*
6. *Gonevchuk V. G., Gonevchuk G. A., Lebedev V. A., Orekhov A. A.* Montsonitoidnaya assotsiatsiya Kavalerovskogo rudnogo rayona (Primor'ye): geokhronologiya i nekotoryye voprosy genezisa [Monzonitoid association of the Kavalerovsky ore region (Primorye): geochronology and some questions of genesis], *Tikhookeanskaya geologiya, 2011, V. 30, No. 3, pp. 20–31. (In Russ.)*
7. *Yeliseyeva O. A., Tikhomirov D. V., Ratkin V. V.* Rudonosnyye eksplozivnyye brekchii final'noy fazy ranne-paleotsenovogo (dal'negorskogo) impul'sa magmatizma: dannyye termobarogeokhimicheskogo izucheniya vkl'yucheniya v kvartse [Ore-bearing explosive breccias of the final phase of the early Paleocene (Dalnegorsk) magmatic pulse: data from a thermobarogeochemical study of inclusions in quartz], *Vestnik DVO RAN, 2023, pp. 92–107. (In Russ.)*
8. *Ignatova V. F., Markevich P. V.* O vozraste endogenno orudeneniya v nekotorykh rayonakh Vostochnogo Primor'ya [On the age of endogenous mineralization in some areas of Eastern Primorye], *Osnovnyye problemy metallogenii tikhookeanskogo rudnogo poyasa, Vladivostok, DVNTS AN SSSR publ., 1971, pp. 334–335. (In Russ.)*
9. *Kazachenko V. T.* Margantsovistyye i zhelezistyye metasomatity Yuzhnogo Primor'ya [Manganese and ferruginous metasomatites of Southern Primorye], *Moscow, Nauka publ., 1979, 160 p. (In Russ.)*
10. *Kazachenko V. T.* Yuzhnoye svintsovo-tsinkovoye mestorozhdeniye [Geodynamics, magmatism and

- metallogeny of the East of Russia], *Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii, Vladivostok, Dal'nauka publ.*, 2006, pp. 673–676. (In Russ.)
11. *Kostin A. YA., Korolev V. N., Pezhenina L. A., Losiv V. N., Golozubov V. V.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1, 200 000. Izd. 2-ye. Seriya Yuzhno-Sikhote-Alinskaya. List L-53-XXXIV, XXXV (Dal'negorsk). Obyasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation, Scale 1, 200,000. 2nd Edition. South Sikhote-Alin Series. Sheet L-53-XXXIV, XXXV (Dalnegorsk). Explanatory Note], St. Petersburg, VSEGEI publ., 2006, 206 p. (In Russ.)
 12. *Kruk N. N., Gvozdev V. I., Orekhov A. A.* [et al.] Rannemelovyye granitoidy i montsonitoidy yuzhnoy chasti Zhuravlevskogo terreyina (Sikhote-Alin'): geokhimicheskiye osobennosti i istochniki rasplava [Early Cretaceous granitoids and monzonitoids of the southern part of the Zhuravlevka terrane (Sikhote-Alin): geochemical features and melt sources], *Tikhookeanskaya geologiya*, 2019, V. 38, No. 3, pp. 30–49. (In Russ.)
 13. *Malinovskiy A. I., Golozubov V. V.* Litologiya i obstanovki formirovaniya terrigennykh otlozheniy vdol' transformnykh granits plit na primere rannemelovogo Zhuravlevskogo terreyina (Yuzhnyy Sikhote-Alin') [Lithology and formation settings of terrigenous deposits along transform plate boundaries using the Early Cretaceous Zhuravlevka Terrane (Southern Sikhote-Alin) as an example], *Tikhookeanskaya geologiya*, 2011, V. 30, No. 5, pp. 35–52. (In Russ.)
 14. *Osipova G. A.* Elementy-primesi i mineral'nyye mikrovklyucheniya v kassiteritakh i sul'fidakh olovo-polimetallicheskih mestorozhdeniy [Trace elements and mineral microinclusions in cassiterites and sulfides of tin-polymetallic deposits], *Vladivostok, Dal'nauka publ.*, 1993, 147 p. (In Russ.)
 15. *Petrishchevskiy A. M.* Statisticheskiye gravitatsionnyye modeli litosfery Dal'nego Vostoka [Statistical gravity models of the lithosphere of the Far East], *Vladivostok, Izd-vo Dal'nevost. un-ta publ.*, 1988, 168 p. (In Russ.)
 16. *Ratkin V. V., Simanenko L. F., Yeliseyeva O. A., Gonevchuk V. G.* Pirotin-nisbit-brejtgaupit-sul'foantimonidnaya mikromineral'naya assotsiatsiya: produkt vysokotemperaturnoy perekristallizatsii rud zhil'nogo olovo-srebro-polimetallicheskogo mestorozhdeniya Yuzhnoye (Sikhote-Alin', Rossiya) [Pyrotine-nisbite-breithauptite-sulfoantimonide micromineral association: a product of high-temperature recrystallization of ores from the Yuzhnoye vein tin-silver-polymetallic deposit (Sikhote-Alin, Russia)], *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*, 2020, V. CXLIX, No. 3, pp. 54–77. (In Russ.)
 17. *Ratkin V. V., Thomson I. N., Ryazantseva M. D., Sokarev A. N., Polyakova O. P.* Sootnosheniye rudnoy izotopno-geokhimicheskoy i petrofizicheskoy zonal'nosti Vostochno-Sikhote-Alinskogo vulkano-plutonicheskogo poyasa [The relationship between the ore isotope-geochemical and petrophysical zoning of the East Sikhote-Alin volcano-plutonic belt], *Doklady AN SSSR*, 1997, V. 356, No. 3, pp. 990–994. (In Russ.)
 18. *Rostovskiy F. I., Khetchikov L. N.* Riftogenez i regeneratsiya rudnykh komponentov v protsesse formirovaniya sul'fidno-kassiteritovogo orudneniya Sikhote-Alinya [iftogenesis and regeneration of ore components during the formation of sulfide-cassiterite mineralization of Sikhote-Alin], *Rudnyye mestorozhdeniya kontinental'nykh okrain, Vladivostok, Dal'nauka publ.*, 2000, Is. 1, pp. 113–123. (In Russ.)
 19. *Taylor KH. P.* Primeneniye izotopii kisloroda i vodoroda k problemam gidrotermal'nogo izmeneniya vmeshchayushchikh porod i rudoobrazovaniya [Application of Oxygen and Hydrogen Isotopes to Problems of Hydrothermal Alteration of Host Rocks and Ore Formation], *Stabil'nyye izotopy i problemy rudoobrazovaniya, Moscow, Mir publ.*, 1977, pp. 213–298. (In Russ.)
 20. *Tikhomirov D. V., Yeliseyeva O. A., Ratkin V. V.* Strukturno-petrologicheskiye osobennosti rudno-magmaticheskoy sistemy Nikolayevskogo skarnovo-polimetallicheskogo mestorozhdeniya (Dal'negorskiy rudnyy rayon, Sikhote-Alin') [Structural and petrological features of the ore-magmatic system of the Nikolaevskoye skarn-polymetallic deposit (Dalnegorsk ore region, Sikhote-Alin)], *Problemy geologii i osvoyeniya nedr, trudy XXV Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova, Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2021, pp. 105–107. (In Russ.)
 21. *Utkin V. P.* Sdvigovyye dislokatsii, magmatizm i rudoobrazovaniye [Shear dislocations, magmatism and ore formation], *Moscow, Nauka publ.*, 1989, 165 p. (In Russ.)
 22. *Khanchuk A. I., Grebennikov A. V., Ivanov V. V.* Al'benomanskiye okrainno-kontinental'nyy orogennyy poyas i magmaticheskaya provintsiya tikhookeanskoy Azii [Alb-Cenomanian continental margin orogenic belt and igneous province of Pacific Asia], *Tikhookeanskaya geologiya*, 2019, V. 38, No. 3, pp. 4–37. (In Russ.)
 23. *Cousens B., Weis D., Constantin M., Scott S.* Radiogenic isotopes in enriched mid-ocean ridge basalts from Explorer Ridge, northeast Pacific Ocean, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2017, V. 213, pp. 63–90, DOI: [org/10.1016/j.gca.2017.06.032](https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.06.032).
 24. *Grebennikov A. V., Khanchuk A. I., Gonevchuk V. G., Kovalenko S. V.* Cretaceous and Paleogene granitoid suites of the Sikhote-Alin area (Far East Russia), *Geochemistry and tectonic implications, Lithos*, 2016, V. 261, pp. 250–261.
 25. *Kasatkin S. A., Grebennikov A. V.* The early Paleogene strike-slip tectonic setting along the northeastern

- Asian margin: structural control on magmatism, *International Geology Review*, 2022, V. 65(14), pp. 2288–2314.
26. *Khanchuk A. I., Kemkin I. V., Kruk N. N.* The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data, *J. Asian Earth Sci.*, 2016, V. 120, pp. 117–138.
 27. *Kretschmar U., Scott S. D.* Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application, *Canadian Mineralogist*, 1976, V. 14, No. 3, pp. 364–386.
 28. *Pruseth K. L., Mishra B., Bernhardt H. J.* Phase relations in the $\text{Cu}_2\text{S-PbS-Sb}_2\text{S}_3$ system: an experimental appraisal and application to natural polymetallic sulfide ores, *Economic Geology*, 1997, 92, pp. 720–732.
 29. *Stacey J. S., Kramers I. D.* Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1975, V. 26, No. 2, pp. 207–221.
 30. *Tsutsume Y., Yokoyama K., Kasatkin S. A., Golozubov V. V.* Provenance study of accretionary complexes in Primory, Far East Russia, using ages and compositions of detrital minerals, *Memoirs of the National Museum of Nature and Science*, 2016, No. 51, pp. 79–87.
 31. *Zhang L. G., Liu J. X., Zhou H. B., Chen Z. S.* Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system, *Economic Geology*, 1989, V. 89, pp. 1643–1650.

Статья поступила в редакцию 26.07.24; одобрена после рецензирования 09.09.24; принята к публикации 09.09.24.
The article was submitted 26.07.24; approved after reviewing 09.09.24; accepted for publication 09.09.24.

По всем вопросам, связанными со статьями, следует обращаться в редакцию
по тел. +7 (495)315-43-65 доб. 227
E-mail: ogeo@tsnigri.ru

Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1