

# КОРОВО-МАНТИЙНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВИНЦА W-Cu-Sn РУД БАДЖАЛ-КОМСОМОЛЬСКОЙ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СИХОТЭ-АЛИНЯ

**В.В. Раткин<sup>1</sup>, А.В. Чугаев<sup>2</sup>, И.А. Александров<sup>1</sup>, Б.И. Семеняк<sup>1</sup>, Д.В. Тихомиров<sup>1</sup>,  
А.Ю. Лебедев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия; e-mail: ratkin@yandex.ru, alexandrov@fegi.ru, sbi@yandex.ru, tihomirov.dmitriy@bk.ru, lcah@mail.ru

<sup>2</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия; e-mail: vassachav@mail.ru

Поступила в редакцию 2 декабря 2024 г.

На основе данных высокоточного анализа изучен изотопный состав свинца W-Cu-Sn руд Фестивального и Правоурмийского месторождений, флишоидных пород Баджальского террейна и рудоносных гранитоидов баджальского и силинского комплексов Баджал-Комсомольской металлогенической зоны Сихотэ-Алиня. В комплексе с Sr-Sm-Nd исследованиями показано, что рудно-магматические системы Баджальского и Комсомольского рудных районов формировались в режиме мантийно-корового взаимодействия в динамике альб-сеноманского орогенеза. В сумме исследований, с учетом аномальной оловоносности флишоидов и рудоносных гранитоидов, в качестве рудно-геохимического резервуара Баджал-Комсомольской металлогенической зоны следует рассматривать гранитно-метаморфический слой молодой континентальной коры, сформированный в процессе орогенеза.

**Ключевые слова:** руды, Pb-Sm-Nd изотопы, Баджальский террейн, ороген, Сихотэ-Алинь.

## ВВЕДЕНИЕ

Месторождения Хинган-Сихотэ-Алинской оловорудной провинции [3] на протяжении десятилетий обеспечивали основной объем добычи рудного олова Российской Федерации. Но к началу 2000-ных годов большая часть запасов отрабатываемых здесь месторождений оказалась выработана. Был практически исчерпан ресурс восполнения запасов руд за счет легко открываемых месторождений. Как итог, возникла актуальная задача – восстановление ресурсной базы олова. В современной экономической парадигме возобновление эффективных поисково-разведочных работ на юге Дальнего Востока связывается с использованием современной геолого-генетической информации. Ключевая роль в прогнозно-поисковых построениях отводится предметной информации об источниках рудного вещества и характере осадочных, вулканогенно-осадочных и магматических геохимических резервуаров, участвующих в рудообразовании. В качестве базы создания прогнозно-поисковых моделей выступают данные комплексного изучения Pb-изотопного состава руд и геохимически специали-

зированных формаций как реальных источников рудного вещества.

Наиболее представительными и самыми значимыми объектами для такого изучения выступают медно-оловянное Фестивальное и вольфрам-медь-оловянное Правоурмийское месторождения в восточной части Хинган-Сихотэ-Алинской металлогенической провинции, в границах Баджал-Комсомольской металлогенической зоны. На этих месторождениях в настоящее время добывается, по данным государственного доклада «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году» (gd2021.data-geo.ru>nfm/sn), около 90 % российских оловянных руд.

Представленная работа – результат изучения изотопного состава рудного свинца Фестивального и Правоурмийского месторождений (в 9 пробах сульфидов), свинца песчаников юрского матрикса рудовмещающей Баджальской аккреционной призм (в 10 валовых пробах) и свинца рудоносных гранитоидов (в 6 монофракциях полевых шпатов). Исследования выполнены в ИГЕМ РАН (г. Москва) на основе высо-

коточного MC–ICP–MS метода анализа. Комплексное Pb-изотопное изучение дополнено Sm–Nd изотопной характеристикой рудоносных гранитов и песчаников рудовмещающих юрских флишоидов и результатами U–Pb датирования рудоносных магматических комплексов.

На основе полученных изотопных данных охарактеризован региональный Pb-изотопный резервуар Баджальского террейна и оценивается уровень мантийно-корового взаимодействия в орогенных процессах формирования оловорудных месторождений.

#### **ГЕОЛОГИЯ БАДЖАЛ-КОМСОМОЛЬСКОЙ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СИХОТЭ-АЛИНЯ: РЕГИОНАЛЬНАЯ ПОЗИЦИЯ, ОРОГЕННЫЙ МАГМАТИЗМ, РУДНЫЕ РАЙОНЫ**

*В современных геодинамических построениях* [6, 12, 25] Сихотэ-Алинь представляется как альб-сенноманский ороген, сформированный в результате аккрецирования и амальгамации складчатых террейнов юрско-раннемеловых аккреционных призм, раннемелового турбидитового бассейна и баррем-альбской Кемской островной дуги. Имеющиеся геологические, геофизические и геохимические данные [16, 32] доказывают, что складчатый комплекс террейнов непосредственно перекрывает океаническое основание. То есть новообразованный сегмент континентальной коры Сихотэ-Алиня нацело сложен Mz аккреционно-складчатыми образованиями.

Выделенная С.М. Родиновым [18] Баджал-Комсомольская металлогеническая зона располагается на северо-западе Сихотэ-Алиня в границах Баджальского террейна юрской аккреционной призмы (рис. 1).

По данным [10], в составе складчатого комплекса Баджальской аккреционной призмы доминируют толщи юрских песчано-алевролитовых флишоидных пород, сформированных на континентальном склоне в процессе рециклинга разрушающихся древних континентальных блоков. В тектоно-стратиграфической последовательности аккреционной призмы флишоиды совмещены с пластинами палеоокеанических триас-раннеюрских кремнистых пород и горизонтами олистостром с глыбами и обломками базальтов, каменноугольно-пермских известняков, пермских и триасово-юрских кремней в алевропсамитовом матриксе. В юго-западной части Баджальского террейна в складчатом комплексе призмы присутствуют аллохтоны, сложенные базальтами, кремнями и известняками карбон-пермского возраста.

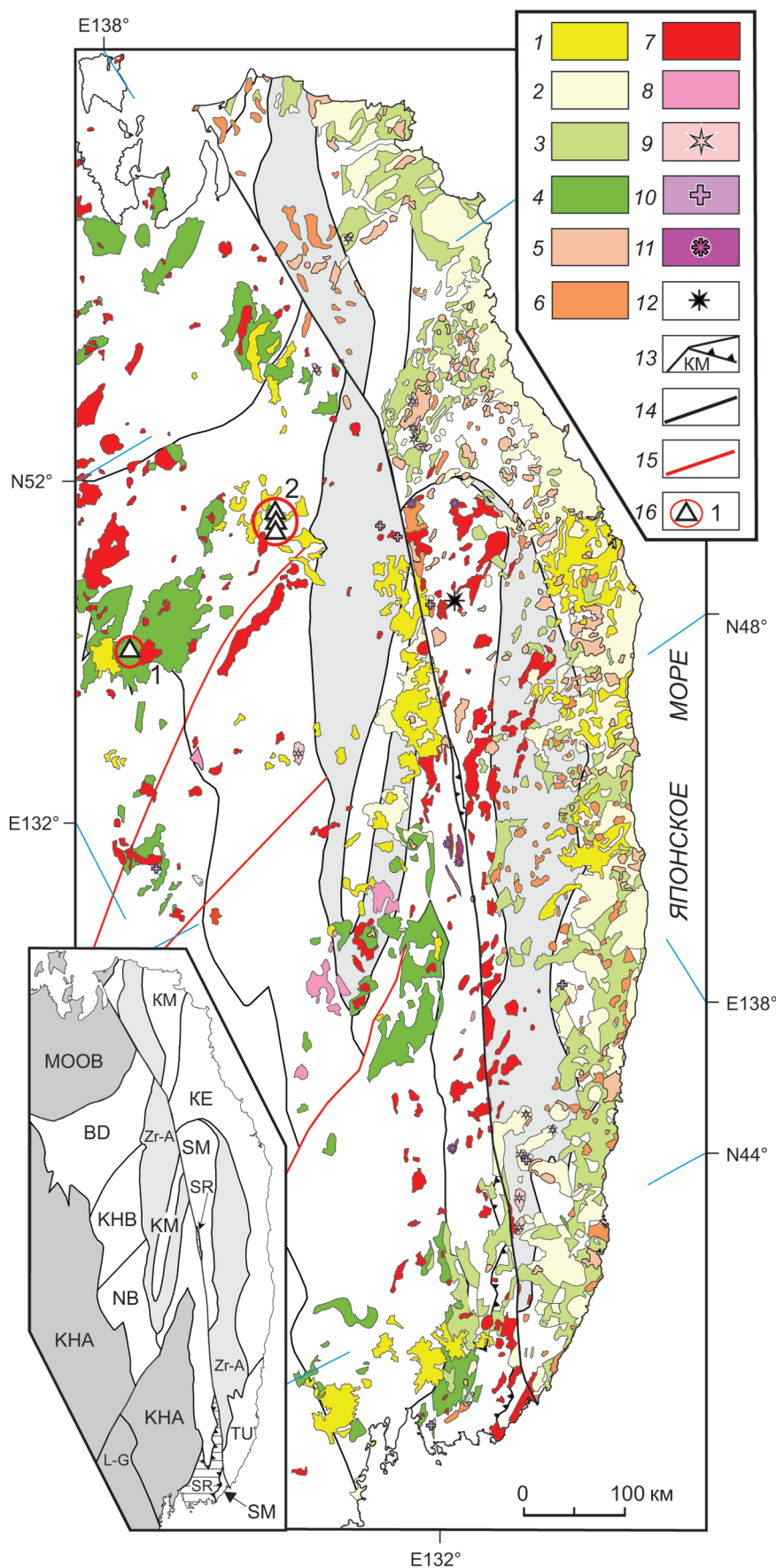
Процессы орогенной складчатости и магматизма Сихотэ-Алиня, реализовавшиеся в обстановке трансформной континентальной окраины, проявились в период финальной альбской аккреции Кемской

островной дуги [24, 25, 32]. В северо-западной части Сихотэ-Алиня, в зоне Баджальского террейна, складчатые структуры формировались на участке клиновидного сопряжения северо-восточных разломов левосдвиговой системы Тан Лу и субмеридиональных левых сдвигов Сихотэ-Алиньской системы [23]. Здесь в процессе орогенеза, при обилии синскладчатых интрузий гранитоидов S, I и A типа, в области затухания сдвиговой системы Тан Лу, в сочетании с субмеридиональными перемещениями по разломами сихотэ-алинского направления, были образованы синорогенные вулканоплутонические ареалы альб-сенноманских магматитов внутриплитного типа с аномально высокой оловоносностью [3, 7, 8] (рис. 1). По данным [28], процессы складкообразования и орогенного магматизма реализовались здесь под влиянием краевой (восточной) части Центрально-Азиатского мантийного плюма. В современной структуре плюма проявлен в глубинной архитектуре зоны Тан Лу в виде линейного валлообразного поднятия мантии [11].

Масштабный вулканоплутонический ареал располагается в краевой юго-западной части Баджальского террейна. Он описывается как Баджальское вулканокупольное поднятие, сложенное вулканитами риолитового ряда баджальского комплекса [8]. Толща вулканитов просекается комагматами – телами биотитовых и лейкократовых гранитов. В значениях  $100 \pm 1$  млн лет U–Pb датирования гранитоидов Верхнеурмийского интрузивного ядра поднятия [1] подтверждаются представления об орогенном позднеальбском возрасте магматитов Баджальского ареала [25, 26].

Баджальскому ареалу соответствует одноименный крупнейший оловорудный район Сихотэ-Алиня [15]. В западной части района расположен самый крупный Верхнеурмийский рудный узел, энергетическим центром которого является Верхнеурмийский массив биотитовых гранитов. Рудная минерализация сосредоточена в эндо-экзоконтактной зоне этого массива и сопряжена с субширотными разрывными структурами системы Тан Лу.

В гранитоидах на контакте с вмещающими вулканитами широко проявлены различные минеральные типы грейзенов с молибденом, вольфрамом и бериллием. В субширотных структурах экзоконтакта развиты кварцевые и мусковит-кварцевые грейзены с касситеритом, вольфрамитом, арсенопиритом, висмутином и сульфидами меди. По мере удаления от контакта они сменяются мощными зонами сидерофиллитовых метасоматитов, вмещающих штокверковые рудные тела кварц-топазового и кварц-сидерофиллит-топазового состава с турмалиновыми жилами и прожилками. В наиболее удаленных от интрузива рудопроявлениях наряду с турмалинитами широко



**Рис. 1.** Меловые и кайнозойские магматические комплексы Сихотэ-Алинского орогенного пояса [26], с изменениями и дополнениями.

1–4 – вулканические образования: 1 – плиоцен: внутриплитные платобазальты, 2 – палеоцен-миоцен: риолиты, бимодальные вулканы, базальты и габбро–граниты трансформной окраины, 3 – верхний мел: андезиты–риолиты надсубдукционной окраины, 4 – альб–нижний сеноман: базальты, андезиты, риолиты трансформной окраины; 5–8 гранитоиды: 5 – палеогеновые, 6 – позднемеловые, 7 – альб-сеноманские, 8 – готерив–барремские; 9–11 – альб-сеноманские интрузивы монцогаббро (9), адакитов (10), щелочных базитов и ультрабазитов (11); 12 – Анзюйский метаморфический купол; 13 – границы и аббревиатура террейнов; 14 – разломы Сихотэ-Алинской системы; 15 – разломы системы Тан Лу; 16 – рудные районы: 1 – Баджалский, 2 – Комсомольский.

BD – Баджалский, NB – Наданьхада-Бикинский, SM – Самаркинский и КНВ – Хабаровский средне-позднеюрской, TU – Таухинский позднеэоцено-валанжинской и KM – Киселевско-Маноминский готерив-раннеальбской аккреционных призм; KE – Кемский готерив-раннеальбской островной дуги; Zr-A – Журавлевско-Амурский раннемелового турбидитового бассейна; SR – Сергеевский террейн тектонических пластин палеозойского орогенного пояса на террейне юрской аккреционной призм. На врезке заштрихованы: KHA – Баджало-Цзямуси-Ханкайский супертеррейн раннепалеозойского орогенного пояса, L-G – Лаоелин-Гродековский террейн триасового и MOOB – Монголо-Охотский коллаж террейнов неокомского орогенного пояса.

развиты хлорит-кварцевые и альбит-кварцевые метасоматиты с сульфидными прожилками.

Ключевое для Баджальского района вольфрам-медь-оловянное Правоурмийское месторождение находится в центре Верхнеурмийского рудного узла.

В 150 км к востоку от Баджальского располагается разновозрастный Мяо-Чанский вулcano-плутонический ареал. Положение ареала здесь так же, как на Баджале, контролируется пересечением субширотных разломов системы Тан Лу и меридиональных сдвигов сихотэ-алинского направления. В нижней части разреза вулканитов доминируют позднеальбские ( $98.7 \pm 1.2$  млн лет по данным U-Pb датирования [13]) риолиты, в верхней – андезиты. В Мяо-Чанском ареале присутствуют гранитоиды нескольких комплексов. В качестве рудоносных традиционно представляются гранитоиды силинского андезит-монцодиорит-гранитного комплекса [7, 18]. Типоморфным признаком рудоносных гранитоидов выступает, по данным [7], аномальная обогащенность оловом: до 16.0 к в сопоставлении с кларком Виноградова. В геохимическом и петрохимическом отношении силинские гранитоиды однотипны альб-сеноманским риолитам.

Современное U-Pb датирование гранитов  $98.8 \pm 1.0$  млн лет, выполненное [13], указывает на синхронное формирование силинских интрузий и разновозрастной толщи вулканитов Мяо-Чанского ареала в период пикового проявления орогенного магматизма Сихотэ-Алиня [26].

Мяо-Чанскому вулcano-плутоническому ареалу соответствует Комсомольский рудный район. Положение доминирующих в районе жильных оловорудных месторождений ограничено геологическим блоком около 100 км в поперечнике, где в составе складчатого фундамента доминируют юрские флишоиды. По данным [7, 19], указанные рудовмещающие флишоиды аномально обогащены оловом (до 8.0 г/т), свинцом (до 60 г/т) и бором (до 100 г/т).

Единая рудоконтролирующая структура района – Комсомольская металлогеническая сдвиговая зона ССВ ( $15-20^\circ$ ) простирается сформировалась, согласно [22], под действием регионального ССЗ ( $340-350^\circ$ ) сжатия в орогенный этап формирования континентальной коры Сихотэ-Алиня. Складчатость ориентирована косо к левым рудоконтролирующим сдвигам и является их парагенезисом. В центре сдвиговой зоны, на участках ее пересечения с субширотными разломами системы Тан Лу, фиксируется кинкбандинг – разворот складок и рудовмещающих разломов влево от исходного северо-восточного до субмеридионального [14, 15].

Оловорудные месторождения Комсомольского района локализованы в протяженных субмеридио-

нальных зонах дробления с турмалиновым ядром в чехле кварцевых и серицит-кварцевых метасоматитов. При переходе по восстанию из терригенных пород в перекрывающие складчатый фундамент вулканиты Мяо-Чанского ареала околосильные изменения сменяются пропилитами.

Жильные зоны сформированы в трещинных зонах в режиме левого сдвига [9, 22]. Пространственно они совмещены с участками, где рудовмещающие флишоиды наиболее интенсивно интродуцированы силинскими гранитоидами. На глубине присутствующие в рудных зонах интрузии силинских гранитоидов локально грейзенизированы и минерализованы. По данным изотопно-геохимических исследований [21], рудообразование непосредственно связано с процессами гранитоидного магматизма.

#### **ПРАВОУРМИЙСКОЕ И ФЕСТИВАЛЬНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ: УСЛОВИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ, СТАДИЙНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД**

Правоурмийское месторождение находится в восточном экзоконтакте Верхнеурмийского массива позднеальбских ( $100.4 \pm 0.5$  млн лет) биотитовых гранитов баджальского вулcano-плутонического комплекса. Рудное тело локализовано в субширотной рудоносной трещинной структуре в риолитах экструживной фации комплекса [20]. Оно сложено сидерофиллит-кварц-топазовыми жилами с линзами кварц-топазовых грейзенов и кварц-турмалиновыми секущими прожилками, которые представляются как стадийные образования. На ранней касситерит-кварц-топазовой стадии отложились касситерит, вольфрамит, топаз, сидерофиллит, флюорит и арсенопирит. В следующую кварц-турмалин-сульфидную стадию в составе прожилков кристаллизовались турмалин, халькопирит, борнит, станнин, станноидит, серебровисмутные минералы и пирротин. Последний является самым поздним и большей частью связан с пострудной эпидот-хлоритовой стадией [20].

На основе изучения петрохимии и термобарогеохимии руд и магматических пород [2] установлен прямой переход от магматической к гидротермальной стадии при кристаллизации гранитоидов Верхнеурмийского оловоносного батолита и формировании грейзеново-жильных образований Правоурмийского месторождения.

Фестивальное месторождение, расположенное в юго-восточной части Комсомольского района, однотипно ранее отработанным месторождениям района, но отличается от Солнечного, Чалбинского, Перевального и Придорожного месторождений заметно более высокой меденосностью руд. В ряду указанных ме-

сторождений Фестивальное месторождение является одним из наиболее крупных объектов. Контролируется оно субмеридиональным Перевальненским левым сдвигом с амплитудой смещения до 130 м [9].

По данным [4, 9], жильные рудные тела Фестивального месторождения сложены преимущественно кварц-турмалиновыми метасоматитами, на долю которых приходится до 50 % общего объема зон. В альбандах жильной зоны вмещающие породы окварцованы и серицитизированы. К кварц-турмалиновому стержню приурочены серии кварцевых жил и прожилков с касситеритом и сульфидами. На нижних горизонтах в жильном кварце преобладают касситерит, вольфрамит, арсенопирит и шеелит, а на верхних горизонтах, начиная с подошвы перекрывающих вулканитов, господствуют сульфидные минералы – халькопирит, пирротин, марказит, сульфоантимониты, станнин и др. При этом кварц-касситеритовая и кварц-сульфидная минерализация практически не выходит за пределы кварц-турмалинового метасоматического ядра.

В настоящее время доступны для наблюдения зоны Ягодная и Водораздельная, в верхней части месторождения. В рудах отчетливо выражена стадийность. Присутствуют три последовательные минеральные ассоциации: (1) кварц-арсенопирит-касситеритовая с вольфрамитом и шеелитом; (2) пирротин-пирит-халькопиритовая с касситеритом и (3) кварц-галенит-сфалеритовая.

Доминирующим минералом *кварц-арсенопирит-касситеритовой ассоциации* является арсенопирит в виде агрегатных скоплений гипидиоморфных кристаллов и зерен в жильной массе кварца. Касситерит образует вкрапленность идиоморфных зерен в метасоматите и скопления разноразмерных кристаллов по периферии арсенопиритовых агрегатов. Вольфрамит и шеелит встречаются в виде неравномерной спорадической вкрапленности в кварце. Часть шеелита разбивается по вольфрамиту.

*Пирротин-пирит-халькопиритовая ассоциация с касситеритом* представлена двумя фацialsными разновидностями. Первая – *существенно пирротиновая* по составу руда. Пирротин подвержен активному замещению вторичным пиритом и марказитом с одновременным выделением в дисульфидах железа мелких зерен магнетита. Вторая фацiальная разновидность: *пирит-халькопиритовая* руда с касситеритом более поздней генерации. Наиболее распространенный минерал этой разновидности – халькопирит. Также распространен новообразованный пирит в виде идиоморфных кубических метакристаллов в матриксе халькопирита. С халькопиритом тесно сопряжены вкрапления мелкого касситерита и станнина.

В матриксе халькопирита станнин нередко образует каймы замещения вокруг мелких кристаллов касситерита.

Главными рудными минералами *кварц-галенит-сфалеритовой ассоциации* являются галенит и сфалерит. Галенит активно замещает пирит более ранней пирит-халькопиритовой ассоциации. Сфалерит в отраженном свете светлый (низкожелезистый), содержит умеренную эмульсиевидную вкрапленность халькопирита и станнина. В подчиненном количестве в составе ассоциации присутствуют самородный висмут, висмутин (?), буланжерит.

#### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА

Pb-изотопный анализ выполнен в ИГЕМ РАН с помощью высокоточного MC-ICP-MS-метода из растворов с применением в качестве трассера таллия с известным изотопным отношением  $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}$  для коррекции результатов измерений на приборную масс-дискриминацию. Проанализированы локально отобранные из руд микропробы сульфидов, а также монофракции полевых шпатов гранитоидов и валовые пробы осадочных пород юрского матрикса Баджальской аккреционной призмы. Измерения выполнены на многоколлекторном масс-спектрометре NEPTUNE (ThermoFinnigan, Германия) согласно методике, подробно изложенной в работе [27]. Итоговая погрешность ( $\pm 2\text{SD}$ ) анализа изотопного состава Pb в галените принималась равной  $\pm 0.02\%$ . Для полевых шпатов и валовых проб пород, проходивших несколько стадий химической подготовки, итоговая погрешность не превышала  $\pm 0.03\%$ .

Для оценки начальных величин изотопных отношений Pb в осадочных породах и полевых шпатах были определены содержания Pb, Th и U в тех же навесках, что и изотопный состав Pb. Измерения проводились на квадрупольном масс-спектрометре X-7 ICP-MS (Thermo Elemental) в растворах проб, трассированных индием. Погрешность элементного анализа, оцененная по результатам систематических измерений стандартных образцов горных пород BHVO-2 и AGV-2, не превышала  $\pm 3\%$  ( $2\text{SD}$ ).

Sm-Nd отношения определялись методом изотопного разбавления со смешанным трассером  $^{149}\text{Sm} + ^{150}\text{Nd}$ . Проанализированы валовые пробы гранитоидных пород и валовые пробы осадочных пород юрского матрикса Баджальской аккреционной призмы. Измерение изотопных отношений проводилось на термоионизационном семиколлекторном масс-спектрометре Micromass Sector 54. Точность и правильность измерений контролировались по результатам анализов внутрилабораторного стандарта Nd-ИГЕМ, прока-

либрованного относительно стандарта Nd LaJolla по значению 0.511852. Итоговая погрешность измерения отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в стандарте в периоды измерительных сессий не превышала 0.0016 % (2 $\sigma$ ). Погрешность определения  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  была не более 0.5 %.

Анализ изотопного U–Pb–Th состава циркона в целях датирования гранитоидов проведен в ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) по стандартной *in situ* методике [30] на приборе Agilent квадрупольный плазменный масс-спектрометр 7500a с индуктивно-связанной плазмой и системой лазерной абляции UP-213 («New Wave Research»). Диаметр абляционной камеры составлял 40 мкм. Предварительно были исследованы катодолюминесцентные изображения циркона, полученные с помощью насадки Gatan MiniCL, установленной на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8100.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты изучения изотопного состава Pb руд, гранитоидов и осадочных пород приведены в таблицах 1–3. В таблице 4 суммированы результаты Sm–Nd анализа валовых проб осадочных пород матрикса Баджальской призмы и валовых проб рудоносных гранитоидов.

##### Изотопный состав рудного свинца Фестивального и Правоурмийского месторождений

Были определены Pb-изотопные отношения в 9 образцах (монофракциях) сульфидов из руд Фестивального и Правоурмийского месторождений (табл. 1).

На Фестивальном месторождении был исследован арсенопирит ранней кварц-арсенопирит-касситеритовой ассоциации (зона Ягодная, гор. 345 м), халькопирит последующей продуктивной пирротин-пирит-халькопиритовой ассоциации (зона Водораздельная, гор. 345 м) и галенит поздней кварц-галенит-сфалеритовой ассоциации (зона Водораздельная, гор. 330 м). В рудах Правоурмийского месторождения изучен арсенопирит ранней касситерит-топазовой стадии (образцы из штольни 1 и 2) и халькопирит кварц-турмалин-сульфидной стадии (штольня 1). Также проанализирован пирротин поздней эпидот-хлоритовой стадии (штольня 5).

При весьма близких значениях свинцово-изотопных отношений сульфиды формируют узкую область изотопных отношений в интервалах отношений  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 18.3403 до 18.4989, для  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 15.5593 до 15.5790 и для  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 38.3599 до

38.6636. При этом положение модельных точек месторождений обособлены. Компактная группа точек Фестивального месторождения отражает абсолютную гомогенность, при отклонении от средних значений не более, чем на 0.04 %. Для Правоурмийского месторождения при частичном совмещении точек с полем Фестивального месторождения характерна относительно большая вариабельность в интервалах изотопных отношений:  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  – 18.3403–18.4989,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  – 15.571–15.5790 и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  – 38.3599–38.6636.

##### Изотопный Pb и Sr–Sm–Nd состав интрузивных и осадочных пород

На Фестивальном месторождении (в объеме Комсомольского рудного района) изучены гранитоиды силинского комплекса. Определения выполнены в 6 монофракциях КППШ и плагиоклаза. Измеренные изотопные отношения в пробах плагиоклаза скорректированы с учетом радиогенной добавки изотопов  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$ , с учетом альб-раннесеноманского возраста гранитоидов при известных содержаниях примесей U и Th (табл. 2).

На Правоурмийском месторождении определения Pb-изотопного состава выполнены в монофракциях КППШ гранитов Урмийского рудоносного массива и гранит-порфиров Правоурмийской дайки, которая непосредственно совмещена с рудной зоной.

Измеренные в полевых шпатах гранитоидов силинского комплекса отношения  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  варьируют в диапазонах: 18.3410–18.3555; 15.5593–15.5685; 38.3624–38.3856, соответственно. Модельные точки гранитоидов совпадают с рудным «концентром» Фестивального месторождения или незначительно отклоняются от него в части ураногенной составляющей свинца.

Рудоносные гранитоиды Правоурмийского месторождения в значениях Pb-изотопных отношений, варьирующих в диапазонах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  – 18.4547–18.4788,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  – 15.5818–15.5842 и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  – 38.4024–38.4110, аналогичны рудам месторождения при крайне незначительно повышенной радиогенности.

Скорректированные с учетом содержаний Th и U и времени орогенеза (100 млн лет) величины изотопных отношений Pb валовых проб песчаников и алевропесчаников флишеидных толщ складчатого комплекса Баджальского террейна можно видеть в таблице 3.

Выражены относительно широкие пределы вариаций отношений: для  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 18.15 до 18.86, для  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 15.46 до 15.74 и для  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от

Таблица 1. Изотопный состав свинца сульфидов в рудах Фестивального и Правоурмийского месторождений.

| №. п/п                       | Номер, место отбора, минеральная ассоциация, минерал                                        | Изотопные отношения                  |                                      |                                      |                | ω <sub>2</sub> | Th/U | Тм<br>млн лет |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------|----------------|------|---------------|
|                              |                                                                                             | <sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | <sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | <sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | μ <sub>2</sub> |                |      |               |
| Фестивальное месторождение   |                                                                                             |                                      |                                      |                                      |                |                |      |               |
| 1                            | Б-22-06, зона Водораздельная, гор.330, южный фланг, галенит                                 | 18.3462                              | 15.5634                              | 38.3738                              | 9.53           | 36.8           | 3.86 | 132           |
| 2                            | Б-22-08, сульфидная минерализации, зона Водораздельная, гор. 330, северный фланг, галенит   | 18.3484                              | 15.5685                              | 38.3856                              | 9.55           | 36.9           | 3.86 | 141           |
| 3                            | Б-22-09, сульфидная минерализации, зона Водораздельная, гор 345, южный фланг, халькопирит   | 18.3550                              | 15.5660                              | 38.3842                              | 9.54           | 36.8           | 3.86 | 131           |
| 4                            | Б-22-10, сульфидная минерализации, зона Ягодная, гор. 345, халькопирит                      | 18.3555                              | 15.5593                              | 38.3624                              | 9.51           | 36.5           | 3.84 | 116           |
| 5                            | Б-22-11, сульфидная минерализации, зона Ягодная, гор 345, рудное тело 4, арсенопирит        | 18.3410                              | 15.5655                              | 38.3807                              | 9.54           | 36.9           | 3.87 | 140           |
| Правоурмийское месторождение |                                                                                             |                                      |                                      |                                      |                |                |      |               |
| 6                            | У-22-91, шт. 5, расс. 568, поздние сульфидные прожилки, пирротин                            | 18.3403                              | 15.5714                              | 38.3599                              | 9.57           | 36.9           | 3.86 | 154           |
| 7                            | У-5-87, шт.1, расс. 102, сидерофиллитовый метасоматит с сульфидами, халькопирит             | 18.4989                              | 15.5729                              | 38.6636                              | 9.54           | 37.3           | 3.91 | 34            |
| 8                            | У-2-84, шт.1, расс.59, кварц-топазовая жила с сульфидами, арсенопирит                       | 18.4349                              | 15.5790                              | 38.3877                              | 9.58           | 36.5           | 3.81 | 97            |
| 9                            | У-97-87, шт.2., расс. 325, кварц-топазовая жила с арсенопиритом и касситеритом, арсенопирит | 18.4553                              | 15.5782                              | 38.3855                              | 9.57           | 36.3           | 3.79 | 80            |

Примечание. Относительные погрешности измерения свинцово-изотопных отношений сульфидов ( $\pm 2\text{SD}$ , %) методом MC-ICP-MS не более  $\pm 0.02\%$ .

Таблица 2. Результаты исследования изотопного состава Pb полевых шпатов рудоносных гранитоидов Фестивального и Правоурмийского месторождений.

| №. тип                       | Номер, порода, минерал                                                                   | Pb, мкг/г | Th, мкг/г | U, мкг/г | Измеренные отношения              |                                   | Скорректированные на возраст отношения    |                                             |                                             |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                              |                                                                                          |           |           |          | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{t=100}$ | $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t=100}$ | $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t=100}$ |
| Фестивальное месторождение   |                                                                                          |           |           |          |                                   |                                   |                                           |                                             |                                             |
| 1                            | КП-2653, гранодиорит, силинский комплекс, 100 млн лет, КПШ + плагиоклаз                  | н/а       | н/а       | н/а      | 18.4017                           | 15.5713                           | 38.4075                                   |                                             |                                             |
| 2                            | КП-2638, гранит, силинский комплекс, КПШ+плагиоклаз                                      | н/а       | н/а       | н/а      | 18.4077                           | 15.5730                           | 38.4059                                   |                                             |                                             |
| 3                            | КП-2990, кварц-полевошпатовая жила на контакте жильной зоны в песчаниках, КПШ+плагиоклаз | н/а       | н/а       | н/а      | 18.3598                           | 15.5639                           | 38.3733                                   |                                             |                                             |
| 4                            | 17/81, гранит, силинский комплекс, плагиоклаз                                            | 7.5       | 0.86      | 0.24     | 18.3394                           | 15.5639                           | 38.4073                                   | 18.307                                      | 15.562                                      |
| 5                            | 17/84, гранит, силинский комплекс, плагиоклаз                                            | 5.54      | 4.13      | 0.83     | 18.4699                           | 15.5708                           | 38.5488                                   | 18.320                                      | 15.564                                      |
| 6                            | 17/85, гранит, силинский комплекс, плагиоклаз                                            | 4.34      | 1.85      | 0.48     | 18.4402                           | 15.5689                           | 38.4667                                   | 18.330                                      | 15.564                                      |
| Правоурмийское месторождение |                                                                                          |           |           |          |                                   |                                   |                                           |                                             |                                             |
| 7                            | БГ -41, гранит-порфир, Правоурмийская дайка, КПШ                                         | н/а       | н/а       | н/а      | 18.4620                           | 15.5831                           | 38.4093                                   |                                             |                                             |
| 8                            | БГ -60, средне-крупнозернистый гранит, западная часть Урмийского массива, КПШ            | н/а       | н/а       | н/а      | 18.4788                           | 15.5842                           | 38.4110                                   |                                             |                                             |
| 9                            | БГ -66, среднезернистый порфировидный гранит, центральная часть Урмийского массива, КПШ  | н/а       | н/а       | н/а      | 18.4547                           | 15.5818                           | 38.4024                                   |                                             |                                             |

Примечание. Относительные погрешности измерения свинцово-изотопных отношений полевых шпатов ( $\pm 2\text{SD}$ , %) методом MC-ICP-MS не более  $\pm 0.03\%$ . Содержания Pb, Th и U определены ICP-MS методом в ИГЕМ РАН. Ошибка определения содержания элементов не превышает 3 % (2SD).

Таблица 3. Результаты исследования изотопного состава Pb осадочных пород Баджалской аккреционной призм.

| №. тип | Номер, характеристика образца / Место отбора                         | Pb, мкг/г | Th, мкг/г | U, мкг/г | Измеренные отношения              |                                   |                                   | Скорректированные на возраст отношения      |                                             |                                             |
|--------|----------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
|        |                                                                      |           |           |          | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t=100}$ | $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t=100}$ | $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t=100}$ |
| 1      | *8493, песчаник, силлинская свита, J <sub>3</sub> , вал. проба       | 24.4      | 17.1      | 3.3      | 18.2867                           | 15.5524                           | 38.5081                           | 18.152                                      | 15.546                                      | 38.280                                      |
| 2      | *8536, песчаник, силлинская свита, J <sub>3</sub> , вал. проба       | 18.5      | 10.0      | 1.9      | 18.2061                           | 15.5440                           | 38.5171                           | 18.104                                      | 15.539                                      | 38.342                                      |
| 3      | *8537, алевропесчаник, ульбинская толща, J <sub>2</sub> , вал. проба | 13.6      | 10.3      | 2.3      | 18.3462                           | 15.5591                           | 38.5598                           | 18.177                                      | 15.551                                      | 38.313                                      |
| 4      | X 17-66, песчаник, денкуканская толща, J <sub>1</sub> , вал. проба   | 16.1      | 11.7      | 2.9      | 18.8635                           | 15.6204                           | 38.8072                           | 18.681                                      | 15.612                                      | 38.568                                      |
| 5      | X 17-67, песчаник, денкуканская толща, J <sub>1</sub> , вал. проба   | 15.3      | 8.35      | 1.9      | 18.7423                           | 15.6145                           | 38.6740                           | 18.617                                      | 15.609                                      | 38.495                                      |
| 6      | X 17-72, песчаник, ульбинская свита, J <sub>2</sub> , вал. проба     | 22.0      | 10.0      | 2.6      | 18.7902                           | 15.6421                           | 38.6108                           | 18.671                                      | 15.636                                      | 38.462                                      |
| 7      | X 17-75, песчаник, крестовая толща, J <sub>2-3</sub> , вал. проба    | 11.3      | 7.8       | 2.1      | 18.8408                           | 15.6209                           | 38.7678                           | 18.653                                      | 15.612                                      | 38.541                                      |
| 8      | X 17-76, песчаник, ольгацкая толща, J <sub>2</sub> , вал. проба      | 19.2      | 9.4       | 1.9      | 18.7908                           | 15.6370                           | 38.7461                           | 18.691                                      | 15.632                                      | 38.585                                      |
| 9      | X 17-78, песчаник, падалинская свита, J <sub>3</sub> , вал. проба    | 16.8      | 8.6       | 1.4      | 18.6745                           | 15.6035                           | 38.6389                           | 18.591                                      | 15.599                                      | 38.471                                      |
| 10     | X 17-80, песчаник, силлинская свита, J <sub>3</sub> , вал. проба     | 15.7      | 7.4       | 1.9      | 18.2056                           | 15.5410                           | 38.4526                           | 18.085                                      | 15.535                                      | 38.300                                      |

Примечание. Относительные погрешности измерения свинцово-изотопных отношений полевых шпатов ( $\pm 2$  SD, %) методом MC-ICP-MS не более  $\pm 0.03$  %. Содержания Pb, Th и U определены ICP-MS методом в ИГЕМ РАН. Ошибка определения содержания элементов не превышает 3% (2SD).

Таблица 4. Sm-Nd изотопная характеристика осадочных пород матрикса Баджальской аккреционной призмы и магматических пород силинского и баджальского комплексов.

| №                                                                                                 | Образец   | Характеристика                                                                   | Sm<br>(ppm) | Nd<br>(ppm) | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$<br>( $\pm 2\text{SE}$ ) | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$<br>( $\pm 2\text{SE}$ ) | $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ | $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Осадочные породы (юрские флишсоиды матрикса Баджальской аккреционной призмы). Комсомольский район |           |                                                                                  |             |             |                                                           |                                                           |                           |                                     |
| 1                                                                                                 | 8508      | Песчаник, силинская толща, J <sub>3</sub>                                        | 6.30        | 32.0        | 0.117 5 $\pm$ 1                                           | 0.51223 1 $\pm$ 7                                         | -7.9                      | 0.7090                              |
| 2                                                                                                 | 8537      | Алевропесчаник, ульбинская толща, J <sub>2</sub>                                 | 5.1         | 27.7        | 0.1112 $\pm$ 1                                            | 0.512219 $\pm$ 5                                          | -8.2                      | 0.7093                              |
| Гранитоидные и вулканические породы силинского комплекса. Комсомольский район                     |           |                                                                                  |             |             |                                                           |                                                           |                           |                                     |
| 3                                                                                                 | ВГ-807/1* | Диорит                                                                           | 3.9         | 16.2        | 0.1464 $\pm$ 1                                            | 0.512399 $\pm$ 5                                          | -4.0                      | 0.7078                              |
| 4                                                                                                 | ВГ-735*   | Гранодиорит                                                                      | 3.3         | 16.0        | 0.1239 $\pm$ 1                                            | 0.512382 $\pm$ 5                                          | -4.1                      | 0.7075                              |
| 5                                                                                                 | ЧГ- 332*  | Гранит                                                                           | 4.2         | 23.0        | 0.1112 $\pm$ 1                                            | 0.51240 9 $\pm$ 12                                        | -3.5                      | 0.7058                              |
| 6                                                                                                 | ВГ-7790*  | Риодацит                                                                         | 4.0         | 20.0        | 0.1247 $\pm$ 1                                            | 0.512383 $\pm$ 6                                          | -4.1                      | 0.7073                              |
| 7                                                                                                 | ВГ-7804*  | Андезит                                                                          | 3.7         | 18.0        | 0.1227 $\pm$ 1                                            | 0.512353 $\pm$ 16                                         | -4.6                      | 0.7074                              |
| 8                                                                                                 | Х-17-84   | Гранит                                                                           | 2.9         | 13.9        | 0.1277 $\pm$ 1                                            | 0.512381 $\pm$ 5                                          | -4.2                      |                                     |
| Гранитоиды баджальского комплекса. Правоурмийское месторождение                                   |           |                                                                                  |             |             |                                                           |                                                           |                           |                                     |
| 9                                                                                                 | Бг-25     | Порфировидный гранит<br>среднезернистый, северный<br>контакт Урмийского массива  | 5.10        | 25.0        | 0.1230 $\pm$ 1                                            | 0.512482 $\pm$ 7                                          | -2.1                      | 0.7076                              |
| 10                                                                                                | Бг-66     | Порфировидный гранит<br>среднезернистый, центральная<br>часть Урмийского массива | 3.30        | 14.0        | 0.1386 $\pm$ 1                                            | 0.512480 $\pm$ 9                                          | -2.4                      | 0.7066                              |
| 11                                                                                                | Бг-75/1   | Среднезернистый гранит,<br>западный контакт Урмийского<br>массива                | 5.9         | 27.0        | 0.1307 $\pm$ 1                                            | 0.512457 $\pm$ 7                                          | -2.7                      | 0.7083                              |
| 12                                                                                                | Бг-83/1   | Средне-крупнозернистый<br>гранит, главная фаза<br>Урмийского массива             | 4.5         | 22.0        | 0.1242 $\pm$ 1                                            | 0.512460 $\pm$ 7                                          | -2.6                      | 0.7074                              |
| 13                                                                                                | Бг-10     | Гранит-порфир,<br>Правоурмийская дайка,<br>рудная зона месторождения             | 5.11        | 25.0        | 0.1250 $\pm$ 1                                            | 0.512475 $\pm$ 9                                          | - 2.3                     | 0.7073                              |
| 14                                                                                                | Бг-39     | Гранит-порфир,<br>Правоурмийская дайка, фланг<br>месторождения, р. Омот          | 6.60        | 32.0        | 0.12556 $\pm$ 7                                           | 0.512464 $\pm$ 7                                          | -2.5                      | 0.7083                              |

Примечание. \* – петрохимически охарактеризованные образцы из коллекции В.Г. Гоневчука. Значения  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  рассчитаны из параметров хондритового резервуара (CHUR):  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Sm} = 0.1967$ ,  $^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Sm} = 0.512638$  [31] ( $t = 100$  млн лет).

38.29 до 39.04. Модельные точки осадочных пород формируют на диаграмме  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  узкий протяженный линейный тренд (рис. 2), где наименьшие отношения фиксированы для позднеюрских алевропесчаников и песчаников, а относительно более ураногенные составы характерны для ранне-среднеюрских песчаников. Концентр с точками рудного свинца привязан к тому же линейному тренду и занимает центральное (среднее) положение.

В таблице 4 приведены результаты Sr-Sm-Nd изотопного анализа осадочных пород новообразованной континентальной коры Сихотэ-Алиня – матрикса Баджальской аккреционной призмы, и магматических пород силинского и баджальского комплексов.

Sr-Sm-Nd изотопный состав песчаников и алевропесчаников юрских флишсоидов (обр. № 8508, 8537)

выступает как характеристика новообразованной континентальной коры в части Баджальского террейна. Расчитанные величины параметра  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  осадков изменяются от -7.9 до -8.2, отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7090$ – $0.7093$ .

В значениях Sr-Sm-Nd отношений изученные в 4 валовых пробах силинские гранитоиды Комсомольского района и синхронные им риодациты и андезиты альб-сеноманского возраста однотипны. Вариации  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  ограничены интервалом от -3.5 до -4.6, при отчетливом доминировании гранитоидов со значениями  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  около -4.1.

Гранитоиды баджальского комплекса, проанализированные в 6 валовых пробах, проявляют высокую гомогенность при вариациях  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  в узком интервале от -2.1 до -2.7.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ярко проявленная геолого-геодинамическая родственность орогенных рудно-магматических систем Комсомольского и Баджалского рудных районов не менее отчетливо выражена в однотипности свинцово-изотопной характеристики их руд. Располагаясь рядом с кривой «ороген» на диаграмме  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  двухстадийной модели Стейси-Краммера [34] концентры модельных точек месторождений практически совмещены (рис. 2).

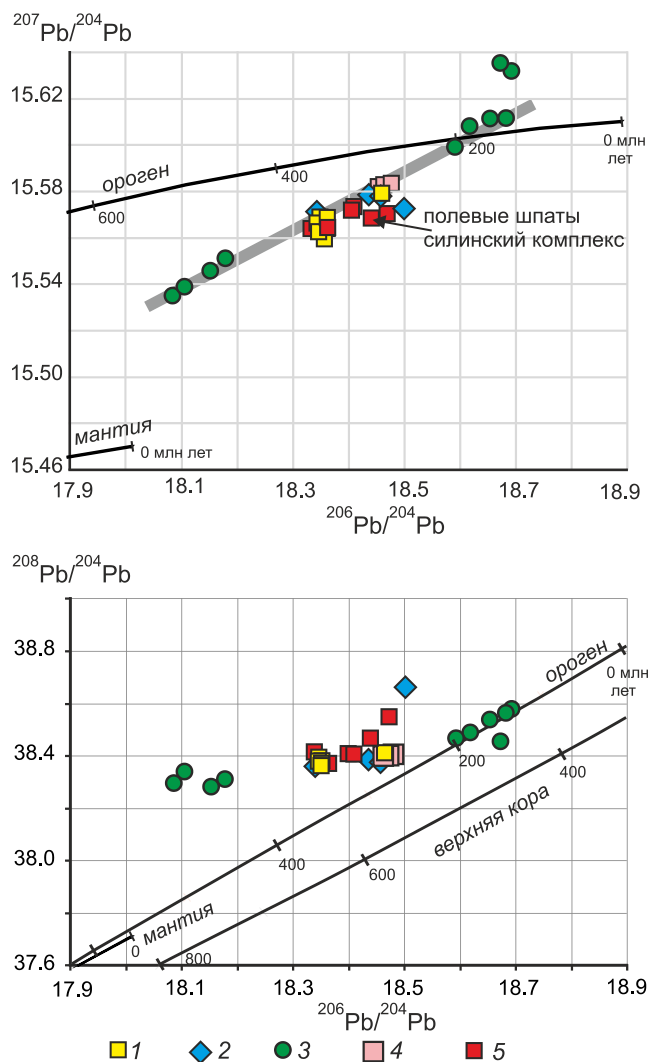
Только в мелких деталях, абсолютно гомогенный свинец Фестивального месторождения отличается от более вариабельного свинца Правоурмийского месторождения меньшей радиогенностью. По существу, не проявлены хоть сколько-нибудь заметные вариации, связанные с этапностью формирования и условиями локализации месторождений. Это свидетельствует о наличии единого (униформного) регионального источника (геохимического резервуара) свинца.

Интервалы рассчитанных значений эволюционных параметров ( $\mu_2 = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} = 9.51\text{--}9.58$ ;  $\omega_2 = ^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb} = 36.5\text{--}36.9$ ;  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 3.81\text{--}3.91$ ) источника рудного свинца изученных месторождений, при близком к среднекоровому значению  $\mu_2$ , в совокупности геохимической характеристики рудного свинца соответствуют U-Th-Pb изотопной системе глобального геохимического резервуара корового типа. Повышенные величины отношений  $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$  и Th/U свидетельствуют о том, что источником являлось вещество континентальной коры, прошедшее этап рециклинга. Преобразования сопровождалось изменением эволюционных параметров в U-Th-Pb системе источника: повышением Th/Pb и Th/U и понижением U/Pb отношений.

Представления [2, 7] о генетической и парагенетической связи рудообразования Правоурмийского и Фестивального месторождений с гранитоидами баджалского риолит-гранитного и силинского андезит-монцодиорит-гранитного комплексов находят свое выражение в соответствии изотопных отношений рудоносных магматитов и руд (табл. 2, рис. 2).

При постулированной в рамках модели формирования орогенных рудоносных магматитов в результате регионально проявленной переработки складчатых комплексов в основании аккреционных призм [25] прямой интерес представляет сопоставление Pb-Sm-Nd изотопно-геохимической характеристики доминирующих в составе Баджалской призмы юрских флишвидов, рудоносных гранитов и руд.

В модельном линейном тренде изменчивости свинцово-изотопного состава флишвидов поле рудно-



**Рис. 2.** Pb-Pb изотопная диаграмма сопоставления модельных точек состава свинца галенита из руд Правоурмийского и Фестивального месторождений, свинца юрских флишвидов Баджалского террейна (в пересчете на 100 млн лет) и свинца полевых шпатов рудоносных гранитоидов. Эволюционные кривые «ороген» и «верхняя кора» из [34].

Сульфиды из месторождений: 1 – Фестивальное, 2 – Правоурмийское; породы: 3 – песчаники; полевые шпаты из гранитоидов: 4 – Урмийский массив, 5 – силинский комплекс.

го свинца и свинца рудоносных гранитоидов занимает центральное положение (рис. 2). То есть рудно-магматические образования имеют усредненный (средне-медианный) свинцово-изотопный состав флишвидов. Представляется, что усреднение происходит как результат вовлечения пород аккреционной призмы в масштабный региональный процесс формирования гранитно-метаморфического слоя новообразованной континентальной литосферы Сихотэ-Алиня. Локаль-

ное продвижение магматических колонн в верхние горизонты новообразованной коры проявляется в форме рудно-магматических центров с унаследованной от переработанных флишоидов рудной и изотопно-геохимической специализацией. В Баджальском террейне положение таких рудоносных центров определяется их сопряженностью с разломами системы Тан Лу, где проявляется участие возмущенной подлитосферной мантии. Значительно выраженная доля мантийной составляющей отчетливо выражена как в петрохимии гранитоидов [7], так и в особенностях их Sm-Nd изотопного состава (табл. 4).

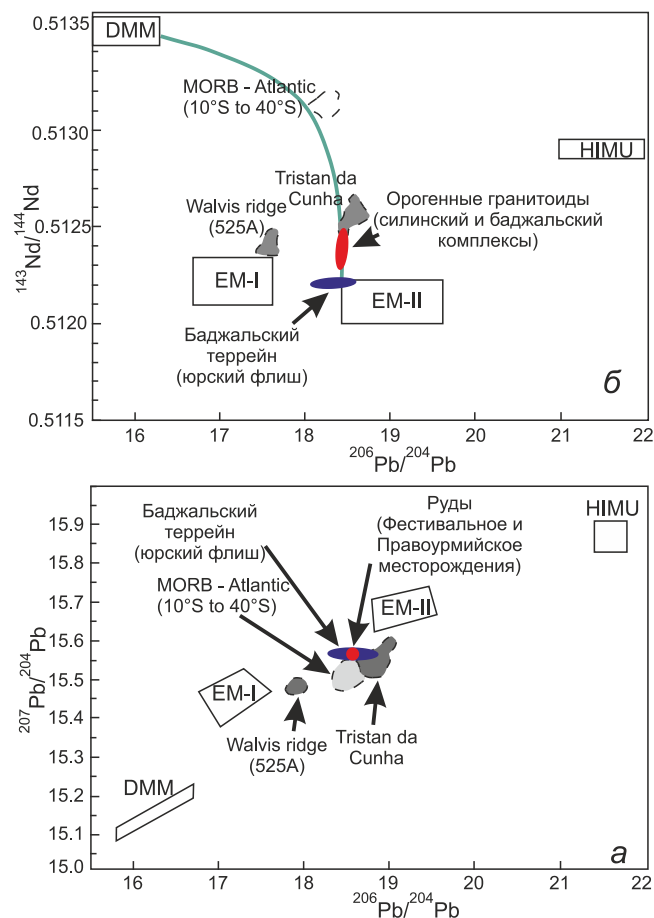
Оценка доли мантийной составляющей в рудоносных гранитоидах силинского комплекса проведена по формуле  $Nd_c \times (\epsilon^c - \epsilon^r) / [\epsilon^r \times (Nd_m - Nd_c) - (\epsilon^m \times Nd_m - \epsilon^c \times Nd_c)] \times 100$  [29], где  $\epsilon^c$ ,  $\epsilon^r$ ,  $\epsilon^m$  – изотопный состав Nd верхней коры (флишоидов Баджальского террейна – минус 8.0), силинских гранитоидов (-4.1) и нормированной мантии (+8.0).  $Nd_c$  и  $Nd_m$  отвечает содержаниям Nd верхней коры (30 г/т) и нормированной мантии (15 г/т). В расчетных значениях мантийная компонента в расплавах составляет около 30 %.

Правомочность утверждения о доминировании в составе рудоносных гранитоидов верхнекоревой составляющей наглядно демонстрируется в графическом виде на диаграмме, приведенной на рис. 3, б.

Оценка доли мантийной компоненты в расплавах подтверждается в значениях отношения Th/U. Имея среднее значение Th/U в проанализированных песчаниках юрских флишоидов – 4.59 и принимая Th/U в мантийной составляющей на уровне 2.2 [35], можно количественно оценить, используя формулу [29], отношение Th/U в рудоносном гранитном очаге, при 30 % участии мантии, значением 3.86. Налицо соответствие модельной свинцово-изотопной характеристики источника рудного свинца (3.79–3.91) и полученного расчетного значения.

Доминирующая роль коровой составляющей отчетливо проявлена в  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  характеристике рудоносных гранитоидов (0.7066–0.7083), при значениях  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  флишоидных песчаников, характеризующих новообразованную континентальную кору Баджальского террейна, на уровне 0.7090–0.7093 (рис. 4, табл. 4).

Ориентируясь на фактическое совпадение средних значений свинцово-изотопных отношений, обогащенных оловом, свинцом и бором флишоидов Баджальского террейна и средних значений изотопных отношений руд изученных месторождений, можно говорить об абсолютном доминировании свинца баджальского свинцово-изотопного резервуара в форми-

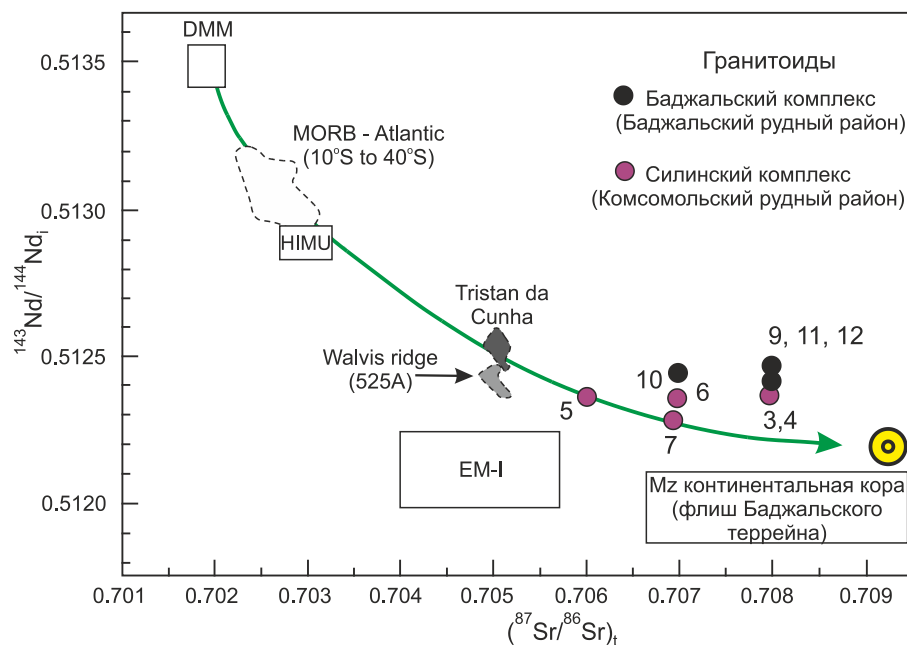


**Рис. 3.** Изотопный состав новообразованной континентальной коры (флиш Баджальского террейна), руд Фестивального и Правоурмийского месторождений и коллизионных рудоносных гранитоидов баджальского и силинского комплексов на диаграммах  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (а) и  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (б).

Диаграммы с полями характерных значений мантии и ее производных заимствованы из работы [33].

ровании РМС Фестивального и Правоурмийского месторождений.

Но налицо проявлен парадокс. В свинцово-изотопной характеристике руд отсутствует выраженное влияние участвующей в рудно-магматическом процессе мантийной составляющей. Нельзя однако не видеть, что это связано с эффектом масс: абсолютным массовым доминированием корового свинца, при содержании Pb в составе главной коровой компоненты (в песчаниках) – 18 г/т, относительно мантийных образований, содержащих, по данным [35], менее 1 г/т свинца. Используя формулу [29], принимая значения  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в песчаниках – 18.4 и 16.0 – в мантии, можно оценить значение указанного отношения в смеси. Исходя из 30 % участия мантийной составля-



**Рис. 4.** Гипербола смешения пород новообразованной Мз-континентальной коры Баджалского террейна и мантии на диаграмме  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_i$ – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_t$  с точками гранитоидов баджалского и силинского комплексов.

Номера точек соответствуют анализам в табл. 4. Диаграмма с полями характерных значений мантии и ее производных заимствована из работы [33].

ющей, искомое отношение рассчитывается на уровне 18.34. То есть влияние мантийной составляющей, при указанных концентрациях свинца, полностью нивелируется вариациями индивидуальных определений изотопного состава в песчаниках.

Известно, что формирование месторождений связано с расплавами со значительными концентрациями летучих Cl, F и серы [2]. Анионы непосредственно регулируют рудоносность флюидного потока РМС. Отсутствие возможных источников анионов в коровых образованиях Баджалского террейна определенно указывает на их связь с подлитосферной мантией, участие которой в процессах орогенеза отчетливо фиксировано [25].

Учитывая результаты изотопно-геохимических исследований и сведения об аномальной оловоносности флишоидов Баджалского террейна и рудоносных орогенных гранитоидов, в качестве рудно-геохимического резервуара Баджал-Комсомольской металлогенической зоны следует рассматривать гранитно-метаморфический слой молодой континентальной коры, сформированный в процессе орогенеза. Не менее предметно утверждение о сопряженной ключевой роли участия подлитосферной мантии в процессах формирования рудоносных магматических очагов. Металлогения Баджал-Комсомольской металлогенической зоны представляется как двухфакторная мо-

дель узлового мантийно-корового взаимодействия, реализовавшегося в период альб-сеноманского орогенеза Сихотэ-Алиня.

Определяя Баджал-Комсомольскую металлогеническую зону в границах Баджалского террейна, мы исходим из ранее постулированных представлений [5, 17] об определяющей роли террейнов (металлотектов) в виде базовых, геохимически специализированных формаций, отражающихся на геологической карте, как реальных источников рудного вещества.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят руководство и сотрудников АО «Оловянная рудная компания» за всестороннее содействие в посещении месторождения Фестивального. Отдельное спасибо зам. главного геолога АО «ОРК» В. Качкан за высокопрофессиональную экскурсию в руднике и консультации по особенностям оруденения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-17-00198, <https://rscf.ru/project/22-17-00198/>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров И.А., Лебедев А.Ю., Ивин В.В., Семьян Б.А., Раткин В.В., Будницкий С.Ю. Возраст и геодинамический режим формирования меловых магматических пород западной границы Баджалского террейна (Сихотэ-

- Алинский орогенный пояс) // Геодинамика и тектонофизика (в печати).
2. Бортников Н.С., Аранович Л.Я., Кряжев С.Г., Смирнов С.З., Гоневчук В.Г., Семеняк Б.И., Дубинина Е.О., Гореликова Н.Г., Соколова Е.Н. Баджалская оловоносная магматогенно-флюидная система (Дальний Восток, Россия): переход от кристаллизации гранитов к гидротермальному отложению руд // Геология руд. месторождений. 2019. Т. 61, № 3. С. 3–30.
  3. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / Ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, 2006. 981 с.
  4. Геология, геохимия и минералогия Комсомольского района. М.: Наука, 1971. 336 с.
  5. Геология и полезные ископаемые Приморского края. Владивосток: Дальнаука, 1995. 68 с.
  6. Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.
  7. Гоневчук В.Г. Оловоносные системы Дальнего Востока: магматизм и рудообразование. Владивосток: Дальнаука, 2002. 297 с.
  8. Забродин В.Ю. Структура и эволюция баджалского вулканоплутонического ареала // Региональная геология. 2018. № 75. С. 49–59.
  9. Касаткин С.А. Геодинамика формирования рудоконтролирующих структур Фестивального месторождения (Комсомольский рудный район): Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Владивосток: ДВГИ ДВО АН СССР, 2011. 28 с.
  10. Кемкин И.В. Геодинамическая эволюция Сихотэ-Алиня и Япономорского региона. М.: Наука, 2006. 258 с.
  11. Кириллова Г.Л. Сравнительная характеристика внутриконтинентальных рифтовых бассейнов Восточной Азии: Сунляо и Амуро-Зейский // Тихоокеан. геология. 1994. Т. 13, № 6. С. 33–54.
  12. Крук Н.Н., Гвоздев В.И., Орехов А.А. и др. Раннемеловые гранитоиды и монзонитоиды южной части Журавлевского террейна (Сихотэ-Алинь): геохимические особенности и источники расплава // Тихоокеан. геология. 2019. Т. 38, № 3. С. 30–49.
  13. Лебедев А.Ю., Александров И.А., Ивин В.В. Новые данные U/Pb датирования 304 меловых магматических пород Комсомольского рудного района (Среднее 305 Приамурье) // Докл. АН. Науки о Земле. 2024. Т. 515, № 306.2. С. 188–195.
  14. Митрохин А.Н., Неволлин П.Л. Место левосдвигового кинкбанд в истории формирования Комсомольского рудного района // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2024: Материалы LV Тектонического совещания. М., 2024. С. 32–35.
  15. Огнянов Н.В. Геология оловорудных районов и месторождений Хингано-Охотской оловоносной области // Геология оловорудных месторождений СССР. М.: Недра, 1986. Т. 2. Кн. 1. С. 340–399.
  16. Петрищевский А.М. Гравитационный метод оценки реологических свойств земной коры. М.: Наука, 2013. 191 с.
  17. Пинский Э.М., Шатков Г.А., Шокальский С.П. Геохимически специализированные формации как обязательный компонент формирования разнотипного эндогенного оруденения Восточного Забайкалья // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы науч. совещ. по программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН. 17–20 октября 2012 г. Т. 2. г. Иркутск. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. С. 42–44.
  18. Родионов С.М. Металлогения олова Востока России. М.: Наука, 2005. 327 с.
  19. Семеняк Б.И., Митрохин А.Н., Сорокин Б.К. и др. Геохимия Комсомольского рудного района: терригенные и магматические породы // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука. 2000. С. 181–201.
  20. Семеняк Б.И., Родионов С.М., Гоневчук В.Г., Коростелев П.Г., Кокорин А.М. Правоурмийское месторождение // Геология, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. Владивосток: Дальнаука. 2006. С. 611–618.
  21. Сушевская Т.М., Девириц А.А., Лагутина Е.П., Кирюхина В.А. Изотопный состав водорода воды флюидных включений в кварце в связи с изучением генезиса оловянного оруденения (месторождение Солнечное, Хабаровский край) // Геохимия. 1991. № 5. С. 737–742.
  22. Уткин В.П. Сдвиговые дислокации. магматизм и удоообразование. 1989. М.: Наука, 166 с.
  23. Уткин В.П. Сдвиговый структурный паргенезис и его роль в континентальном рифтогенезе восточной окраины Азии // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 3. С. 21–43.
  24. Ханчук А.И., Крук Н.Н., Голозубов В.В. и др. Природа континентальной коры Сихотэ-Алиня (по данным изотопного состава Nd в породах Южного Приморья) // Докл. АН. 2013. Т. 451, № 4. С. 441–445.
  25. Ханчук А.И., Гребенников А.В., Иванов В.В. Альб-сеноманские окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция тихоокеанской Азии // Тихоокеан. геология. 2019. Т. 38, № 3. С. 4–37.
  26. Ханчук А.И., Иванов В.В., Игнатьев Е.К., Коваленко С.В., Семенова Д.В. Альб-сеноманский гранитоидный магматизм и медный рудогенез Сихотэ-Алиня // Докл. АН. 2019. Т. 488, № 3. С. 298–302.
  27. Чернышев И.В., Чугаев А.В., Шатагин К.Н. Высокоточный изотопный анализ Pb методом многоколлекторной ICP-масс-спектрометрии с нормированием по  $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}$ : оптимизация и калибровка метода для изучения вариаций изотопного состава Pb // Геохимия. 2007. № 11. С. 1155–1168.
  28. Ярмлюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника. 2000. № 5. С. 343–366.
  29. DePaolo D.J. Neodymium Isotope Geochemistry. Springer-Verlag, 1988. 187 p.
  30. Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., and E.A. Belousova E.A. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology // Chem. Geol. 2004. V. 211, N 1–2. P. 47–69.
  31. Jacobsen S.B., Wasserburg G.J. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites // Earth Planet. Sci. Lett. 1984. V. 67. P. 137–150.
  32. 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.
  33. Marques L.S., Carvas K., Rocha-Júnior E., Babinski M. Lead

- isotope constraints on the mantle sources involved in the genesis of Mesozoic high-Ti tholeiite dykes (Urubici type) from the São Francisco Craton (Southern Espinhaço, Brazil) // Brazilian J. Geology. 2016. V. 46, N 1. P. 105–122.  
DOI: 10.1590/2317-4889201620150010
34. Stacey J.S., Kramers I.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // Earth Planet. Sci. Lett. 1975. V. 26, N 2. P. 207–221.
35. Workman R.K., Hart S.R. Major and trace element composition of the depleted mantle (DMM) // Earth and Planetary Lett. 2005. V. 231. P. 53–72.
- Рекомендована к печати А.И. Ханчуком  
после доработки 19.12.2024 г.  
принята к печати 29.12.2024 г.*

## CRUSTAL AND MANTLE SOURCES OF LEAD IN W-CU-SN ORES OF THE BADZHAL-KOMSOMOLSK METALLOGENIC ZONE OF THE SIKHOTE-ALIN

***V.V. Ratkin<sup>a</sup>, A.V. Chugaev<sup>b</sup>, I.A. Alexandrov<sup>a</sup>, B.I. Semenyak<sup>a</sup>, D.V. Tikhomirov<sup>a</sup>, A.Yu. Lebedev<sup>a</sup>***

*<sup>a</sup>Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;*

*e-mail: ratkin@yandex.ru, alexandrov@fegi.ru, sbi@yandex.ru, tikhomirov.dmitriy@bk.ru, leah@mail.ru*

*<sup>b</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: vassachav@mail.ru*

The Pb isotope composition of W-Cu-Sn ores of the Festivalnoe and Pravourmiyskoe deposits, flyschoid rocks of the Badzhal terrane and ore-bearing granitoids from the Badzhal and Silinka complexes of the Badzhal-Komsomolsk metallogenic zone of the Sikhote-Alin was studied based on the high precision analysis data. These data and the Sr-Sm-Nd analysis results suggest that the ore-magmatic systems of the Badzhal and Komsomolsk ore districts formed as the result of the mantle-crust interaction during the Albion-Cenomanian orogenesis. Based on all the research results and taking into account the abnormal Sn content of the flyschoid rocks and ore-bearing granitoids, the authors assume that a granite-metamorphic layer of the young continental crust, resulting from orogenesis, should be regarded as the ore-geochemical reservoir of the Badzhal-Komsomolsk metallogenic zone.

***Key words:* ores, Pb-Sm-Nd isotopes, Badzhal terrane, orogen, Sikhote-Alin.**