

## **Pb–Pb ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА ОРОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА БАЙКАЛО-ПАТОМСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ, РОССИЯ) И ОЦЕНКА РОЛИ НЕОПРОТЕРОЗОЙСКОЙ КОРЫ В ИХ ФОРМИРОВАНИИ**

© 2017 г. А. В. Чугаев\*, И. В. Чернышев

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН  
119017, Москва, Ж-17, Старомонетный пер., 35*

*\*e-mail: chug@igem.ru*

Поступила в редакцию 21.03.2017 г.

Принята к печати 23.05.2017 г.

В статье приведены результаты свинцово-изотопного изучения ряда золоторудных объектов крупнейшей в России металлогенической провинции Северного Забайкалья. На основе новых, а также ранее опубликованных Pb–Pb данных по 9 разномасштабным месторождениям и рудопроявлениям рассматриваются потенциальные источники рудного вещества. Сопоставление Pb–Pb изотопно-геохимических характеристик руд, палеозойских гранитоидов, а также метаморфогенного пирита из безрудных метаосадочных толщ показывает, что ведущая роль в поступлении свинца и, вероятно, других компонентов в минералообразующие системы месторождений принадлежала неопротерозойским терригенно-карбонатным породам Байкало-Патомского складчатого пояса (БПП). Значительные вариации изотопных отношений Pb, характерные в целом для рассмотренных рудных объектов БПП, отражают первичную свинцово-изотопную неоднородность источника Pb. Эта неоднородность обусловлена смешением при осадконакоплении вещества двух геохимических типов континентальной коры – древней (раннедокембрийской) коры Сибирского кратона, прошедшей длительную геохимическую эволюцию, и новообразованной позднедокембрийской коры. Pb–Pb данные свидетельствуют в пользу гидротермально-метаморфогенной гипотезы формирования золоторудных объектов БПП.

**Ключевые слова:** изотопный состав Pb, золоторудные месторождения, источники вещества, генезис, Байкало-Патомский пояс

**DOI:** 10.7868/S0016752517110048

### **ВВЕДЕНИЕ**

Генезис золоторудных месторождений орогенного типа, которые пространственно локализованы в метаморфических складчатых поясах различного геологического возраста, относится к одной из актуальных проблем современной геологии (Groves et al., 1998; Goldfarb et al., 2014; Goldfarb, Groves, 2015). Проводимые на протяжении многих десятилетий исследования по этому направлению привели к созданию нескольких альтернативных генетических моделей, среди которых наиболее широкое признание получили магматогенная и метаморфогенно-гидротермальная (Буряк, 1982; Kerrich, Cassidy, 1994; Groves et al., 2003; Frei et al., 2009 и др.).

Одним из регионов, на примере изучения рудных объектов которого разрабатывается данная проблема, является Байкало-Патомский пояс (БПП), расположенный на севере Забайкальской складчатой области (Россия). Этот регион отно-

сится к одной из крупнейших золоторудных провинций мира, в пределах которой расположено более десятка различных по масштабу коренных месторождений, включая месторождение-гигант Сухой Лог (Буряк, Бакулин, 1998; Золоторудные..., 2010 и др.). К настоящему времени среди исследователей месторождений БПП также распространены, главным образом, две точки зрения на их формирование. Согласно магматогенной гипотезе золоторудная минерализация генетически связана с развитием в регионе палеозойского магматизма (Рунквист и др., 1992; Лаверов и др., 2000; Distler et al., 2004 и др.). В противоположность ей в рамках метаморфогенно-гидротермальной генетической модели ведущая роль в развитии рудообразующих процессов отводится региональному метаморфизму (Буряк, Бакулин, 1998; Large et al., 2007; Velogub et al., 2014 и др.).

Настоящая статья посвящена одному из ключевых аспектов рассматриваемой проблематики,

а именно вопросу источников вещества орогенных золоторудных месторождений БПП. В последние годы при решении этого вопроса особое внимание уделяется изотопно-геохимическим исследованиям (Неймарк и др., 1993; Русинов и др., 2008; Кряжев и др., 2009; Иконникова и др., 2009; Дубинина и др., 2010; 2014 и др.). Среди них важное значение имеют результаты изучения изотопного состава Pb. Однако число таких работ весьма ограничено и, как правило, они посвящены детальному изучению лишь отдельных месторождений, например, Сухой Лог (Чернышев и др., 2009) и Вернинское (Чугаев и др., 2014). Исключением является работа Л.А. Неймарка с соавторами (Неймарк и др., 1993), в которой приведен большой массив Pb–Pb данных (24 анализа) для различных месторождений “сухоложского” типа. Согласно полученным результатам рудные объекты БПП характеризуются значительной неоднородностью изотопного состава Pb, что может указывать на участие в их генезисе нескольких источников вещества. Однако авторами не была приведена геологическая привязка образцов, что затрудняет использование полученных ими данных для решения вопроса об источнике вещества и оценки достоверности разрабатываемых генетических моделей.

В связи с этим, целью настоящей работы являлось получение новых и обобщение ранее опубликованных результатов свинцово-изотопного изучения месторождений БПП, различающихся по масштабу оруденения и своей геологической позиции, для идентификации источников рудного свинца.

#### КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАЙКАЛО-ПАТОМСКОГО ПОЯСА

Байкало-Патомский складчато-надвиговый пояс является одним из крупнейших элементов Байкало-Витимского террейна, образующего наряду с Алдано-Становым и Монголо-Охотским террейнами Забайкальскую складчатую область (Гусев, Хаин, 1995). Внутреннее строение БПП определяется наличием дугообразной цепочки блоков раннепротерозойской коры (Чуйское, Тонодское и Нечерское поднятия), сложенной преимущественно гнейсами и кристаллическими сланцами, которые прорваны гранитоидами чуйско-кодарского комплекса с возрастом 1.85–1.87 млрд лет (Ларин, 2011). Чуйско-Тонодско-Нечерская цепочка поднятий разделяет Байкало-Патомский пояс на северную его часть, включающую Приленскую и Патомскую моноклиналильные зоны, и на южную — Мамско-Бодайбинскую (Бодайбинскую) складчатую зону. Наибольшее площадное распространение в этих зонах имеют терригенно-карбонатные породы неопротерозойского воз-

раста, формирование которых происходило в обстановке глубоководного шельфа пассивной окраины Сибирского кратона (Гусев, Хаин, 1995; Кузьмин и др., 2006; Чумаков и др., 2007; Немецов и др., 2010).

Осадочные толщи БПП претерпели полифазный региональный метаморфизм. При этом наблюдается закономерное расположение фациальных зон внутри пояса. Породы, метаморфизованные в условиях эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций, приурочены к периферийным частям раннепротерозойских выступов Чуйско-Тонодско-Нечерской зоны и к контактам выходов палеозойских гранитоидов, тогда как в центральных частях Приленской, Патомской и Мамско-Бодайбинской зон развиты породы, преобразование которых происходило в условиях низкотемпературной зеленосланцевой фации (Кориковский и Федоровский, 1980). Согласно опубликованным геохронологическим данным (Виноградов и др., 1996; Scott et al., 2007) метаморфическое преобразование осадочных толщ происходило около 520 млн лет назад и, как показано рядом исследователей (Буряк, 1982; Large et al., 2007; Лаверов и др., 2007), сопровождалось интенсивными складчатыми деформациями, что, определило сложное внутреннее строение БПП.

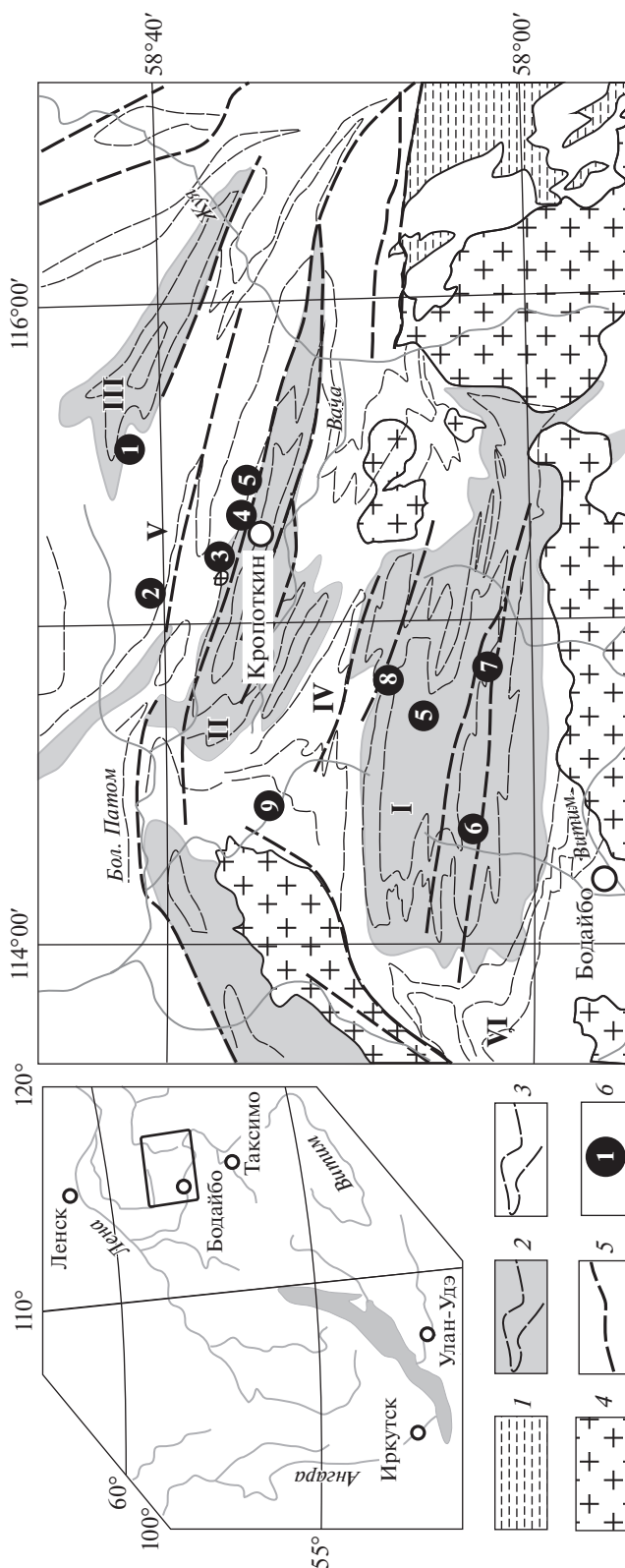
Важным этапом в развитии БПП стало формирование крупных гранитоидных массивов палеозойского возраста. По своему объему они значительно превосходят раннепротерозойские магматические образования, выходы которых известны в пределах выступов нижнепротерозойской коры Чуйско-Тонодско-Нечерской зоны. Палеозойские интрузии образуют непрерывные по протяженности и значительные по площади поля, которые с запада и юга полукольцом окружают Мамско-Бодайбинскую зону. В их строении принимают участие гранито-гнейсы, граниты, пегматиты, а также их переходные разновидности. Среди палеозойских магматических образований принято выделять несколько комплексов. К наиболее ранним относят граниты мамско-оронского комплекса с возрастом  $421 \pm 15$  млн лет (Зорин и др., 2008). Наиболее широкое распространение в регионе имеют высококальциевые известково-щелочные граниты конкудеро-мамаканского комплекса. По данным U-Pb датирования входящие в его состав граниты сформировались около 300 млн лет назад (Неймарк и др., 1993; Цыганков и др., 2010). Породы конкудеро-мамаканского комплекса являются неотъемлемой частью многофазного Ангаро-Витимского батолита, занимающего огромную (более 200 тыс. км<sup>2</sup>) площадь в пределах Забайкальской складчатой области. Становление батолита происходило на протяжении длительного периода времени (от 330 до 275 млн лет назад) в условиях смены режима магматизма с постколлизийного на внутримитный (Цыган-

**Рис. 1.** Схема геологического строения Мамско-Бодайбинской зоны Байкало-Патомского пояса и размещения золоторудных месторождений по ("Золоторудные ..., 2010). 1 – палеопротерозойские метасадочные породы нечерской и кевактинской серий (без расчленения); 2–3 – неопротерозойские терригенно-карбонатные породы патомского комплекса и бодайбинской серии, образующие структуры второго порядка: 2 – синклинальные прогибы (I – Бодайбинский, II – Маракано-Тунгусский, III – Хомолхино-Илигирский); 3 – антиклинальные поднятия (IV – Кропоткинское, V – Кадаликанское, VI – Тамаракское); 4 – палеозойские гранитоидные интрузивы; 5 – региональные тектонические нарушения; 6 – золоторудные месторождения и рудопроявления: 1 – Голец Высочайший; 2 – Верхне-Угаханское; 3 – Сухой Лог; 4 – Вернинское, 5 – Невское, 5 – Догалдынская жила, 6 – Кавказ, 7 – Копыловское, 8 – Красное, 9 – Ожерелье.

ков и др., 2010). С завершением герцинского (285–275 млн лет назад) магматического цикла в пределах БПП связывают внедрение малых интрузивных тел, главным образом, основного (кадали-бутуинский комплекс) и кислого (аглан-янский комплекс) составов.

Большинство известных месторождений коренного и россыпного золота БПП приурочены к центральной части Мамско-Бодайбинской зоны, которая при региональном металлогеническом районировании выделяется как Бодайбинский золоторудный район (БЗР) (рис. 1). В структурном отношении он расположен в пределах крупной региональной синформы, известной как Бодайбинский синклиниорий. Он сложен мощной (более 14 км) толщей терригенно-карбонатных пород неопротерозойского возраста и рассматривается как наиболее глубокая часть Бодайбинского осадочного палеобассейна (Кузьмин и др., 2006; Чумаков и др., 2007). Внутреннее строение синклинория осложнено чередованием синклинальных прогибов и антиклинальных поднятий, разделенных глубинными тектоническими зонами надвигов и сбросов субширотного простирания с падением поверхностей смещения на север (рис. 1). Слагающие Бодайбинский синклиниорий породы претерпели интенсивные пластические деформации, что привело к образованию изоклинальных складчатых структур различного порядка, вытянутых в субширотном направлении.

Бодайбинский золоторудный район, помимо уникального месторождения Сухой Лог, включает также несколько различающихся по масштабу месторождений: Чертово Корыто, Голец Высочайший, Вернинское, Невское, Кавказ, Копыловское, Ожерелье, Догалдынская жила, а также ряд рудопроявлений (например, Красное, Верхне-Угаханское и др.). Золоторудная минерализация на всех этих объектах локализована в метасадочных высокоуглеродистых породах и представлена двумя типами – золото-кварц-сульфидным и золото-кварцевым. Для большей части известных объек-



тов эти типы золоторудной минерализации часто пространственно совмещены. Особенности геологического строения конкретных объектов рас-

смотрены в ряде публикаций (Буряк, Бакулин, 1998; Distler et al., 2002; Русинов и др., 2008; Золоторудные ..., 2010; Паленова и др., 2015 и др.). Формирование золото-кварц-сульфидного прожилково-вкрапленного и золото-кварцевого жильного оруденения, как это следует из данных Rb–Sr геохронологического изучения рудной минерализации месторождения Сухой Лог, было разделено во времени и происходило  $447 \pm 5$  и  $321 \pm 14$  млн лет назад соответственно (Лаверов и др., 2007). Обоснованность выделения позднепалеозойского этапа рудообразования в БЗР подтверждается также результатами  $^{39}\text{Ar}$ – $^{40}\text{Ar}$  датирования, которое было выполнено нами для месторождения Ожерелье. Согласно полученным данным по мусковиту из околорудных метасоматитов образование золотоносных кварцевых жил на этом объекте происходило  $321 \pm 2$  млн лет назад.

### ВЫСОКОТОЧНЫЙ ИЗОТОПНЫЙ АНАЛИЗ Pb МЕТОДОМ MC-ICP-MS

Изучение изотопного состава Pb в сульфидах и в калиевых полевых шпатах проведено в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН на основе применения метода многоколлекторной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (MC-ICP-MS).

Химическая подготовка галенита сводилась к растворению отобранного микрозерна (0.3–0.5 мг) этого минерала в 70%  $\text{HNO}_3$  и приготовлению рабочего раствора с необходимой концентрацией Pb с использованием 3%  $\text{HNO}_3$ . В случае других сульфидов, а также полевых шпатов химическая процедура включала стадию ионообменной хроматографии, на которой осуществлялось отделение свинца от сопутствующих минералообразующих и примесных элементов. Навески проб сульфидов и полевых шпатов составляли 10–20 мг и 50–100 мг соответственно. Химическое разложение сульфидов проводилось в смеси  $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$  (1 : 3) в PFA-сосудах при температуре около  $100^\circ\text{C}$ . Для растворения полевых шпатов использовалась смесь концентрированных кислот  $\text{HF} + \text{HNO}_3$  (3 : 1), в которой проба выдерживалась при атмосферном давлении и температуре около  $130^\circ\text{C}$ . Хроматографическое отделение Pb от элементов матрицы осуществляли в одну стадию в среде  $\text{Hbг}$  на PFA-микростолонках, заполненных анионообменной смолой Bio-Rad AG-1X8 (0.1  $\text{cm}^3$ ). Общий процедурный “холостой” не превышал уровень 0.1 нг Pb.

Методика анализа изотопного состава Pb подробно описана нами в работе (Чернышев и др., 2007). Масс-спектрометрические измерения проводились в трассированных Tl растворах образцов на 9-коллекторном масс-спектрометре NEPTUNE (ThermoFinnigan). Корректирование эффекта при-

борной масс-дискриминации изотопов свинца осуществлялось по результатам измерения опорного отношения  $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}$ , которое принималось равным  $2.3889 \pm 1$ . Погрешность ( $\pm 2\text{SD}$ ) измерения изотопных отношений Pb в галените, оцененная по долговременной воспроизводимости стандартного образца свинца SRM 981, не превышала  $\pm 0.02\%$  (Чернышев и др., 2007). В случае использования при химической подготовке проб ионообменной хроматографии точность анализа составляла  $\pm 0.03\%$  (Чугаев и др., 2013). Она контролировалась по данным измерения международных стандартных образцов горных пород AGV-1 и BCR-1.

Определение содержаний Pb, Th и U в минералах было выполнено в тех же навесках проб, что и изотопный состав Pb. Измерения проводились на квадрупольном масс-спектрометре X-7 ICP-MS (Thermo Elemental, США) в растворах проб, трассированных индием. Погрешность определения содержания Pb, Th и U в пробах минералов, оцененная по результатам систематических анализов международных стандартов горных пород BHVO-2 и AGV-2, не превышала  $\pm 3\%$ . Полученные данные о концентрации Pb, U и Th в изученных минералах использовались для вычисления начальных величин изотопных отношений Pb.

### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ИЗОТОПНОГО СОСТАВА Pb

Pb–Pb данные получены по 18 образцам сульфидов (пирит и галенит), характеризующих как прожилково-вкрапленную, так и жильную минерализацию 7 золоторудных объектов, расположенных в пределах трех рудных полей БЗР – Хомолхинского, Артемовского и Мараканского (табл. 1). Наиболее полно (12 образцов) в настоящей работе были представлены объекты Артемовского рудного поля, к числу которых относятся небольшие по масштабу оруденения месторождения Кавказ, Копыловское и Догалдынская жила, а также рудопроявление Красное (Паленова и др., 2015). Золоторудная минерализация среднего по своим запасам месторождения Голец Высочайший и рудопроявления Верхне-Угаханское, локализованных в Хомолхинском рудном поле, охарактеризована 5 образцами сульфидов. Среди объектов Мараканского рудного поля нами было изучено только месторождение Ожерелье, для которого изотопный состав Pb проанализирован в пробе пирита из прожилково-вкрапленной минерализации.

Общий размах вариаций измеренных изотопных отношений Pb для изученной серии сульфидов месторождений и рудопроявлений БЗР значителен: для отношения  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 17.86 до 18.56, для  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 15.57 до 15.65 и для

**Таблица 1.** Результаты измерений изотопного состава Pb в сульфидах золоторудных месторождений и рудопроявлений Бодайбинского рудного района, а также Pb–Zn месторождения Холоднинское (Северное Забайкалье)

Номер пробы	Характеристика	Содержание, мкг/г			Изотопные отношения Pb (измеренные)		
		U	Th	Pb	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb
<i>Хомолхинское рудное поле</i>							
Месторождение Голец Высочайший							
ВЧ-13/10	Пирит/Прожилково-вкрапленная минерализация	0.20	1.1	22	18.3300	15.6215	38.6229
ВЧ-21/10	»	0.22	1.1	239	18.2285	15.6126	38.4496
ВЧ-20/10А-1	Галенит/Жильная минерализация				18.2772	15.6302	38.5797
ВЧ-20/10А-2	»				18.2664	15.6275	38.5495
Рудопроявление Верхне-Угаханское							
Угах-1	Пирит/Прожилково-вкрапленная минерализация	1.4	1.9	62	17.8639	15.5736	38.3333
<i>Артемовское рудное поле</i>							
Месторождение Кавказ							
516/110.5	Пирит/Прожилково-вкрапленная минерализация	0.15	0.50	2124	18.2912	15.6322	38.3379
516/108	»	0.25	0.79	7.4	18.4465	15.6364	38.6593
ГК-2	Галенит/Жильная минерализация				18.0716	15.5682	38.2885
ГК-5	»				18.0766	15.5698	38.2902
ГК-8	»				18.0775	15.5703	38.2908
Месторождение Копыловское							
509-14/110.71	Пирит/Прожилково-вкрапленная минерализация	0.28	0.68	628	18.1569	15.6022	38.2280
504а/138.5	»	2.3	3.1	381	18.2327	15.6285	38.2494
Месторождение Догалдынская жила							
Д-1	Галенит/Жильная минерализация				18.2940	15.6140	38.1644
Д-8	»				18.2740	15.6090	38.1611
Д-13	»				18.3060	15.6160	38.1783
Рудопроявление Красное							
КР-121	Пирит/Прожилково-вкрапленная минерализация	1.0	0.78	24	18.5642	15.6522	38.2208
Кр-1/15	Галенит/Жильная минерализация				18.5240	15.6519	38.4243
<i>Мараканское рудное поле</i>							
Месторождение Ожерелье							
Ож-1	Пирит/Прожилково-вкрапленная минерализация	0.3	0.6	14	18.3712	15.5927	38.4196
<i>Олокитская зона (Северное Прибайкалье)</i>							
Месторождение Холоднинское							
ХГ-1	Галенит/Массивные колчеданные руды				17.4620	15.5441	37.2470
ХГ-2	»				17.4620	15.5441	37.2510
ХГ-3	»				17.4679	15.5448	37.2548
ХГ-4	»				17.4633	15.5435	37.2486

$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 38.16 до 38.66. Поскольку часть из проанализированных пиритов обладали повышенными отношениями  $\text{U}/\text{Pb}$  (до 0.04) и  $\text{Th}/\text{Pb}$  (до 0.11), то полученные для них  $\text{Pb}-\text{Pb}$  данные были скорректированы на предполагаемый возраст прожилково-вкрапленной минерализации, т.е. на 450 млн лет. Максимальные отличия между измеренными значениями и скорректированными устанавливаются для отношений  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ( $\leq 1.2\%$ ) и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ( $\leq 0.4\%$ ), тогда как для  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  они в несколько раз меньше ( $\leq 0.08\%$ ), но также превышает аналитическую погрешность. Общий размах вариаций изотопных отношений  $\text{Pb}$ , которые могут быть оценены коэффициентом вариации ( $v$ , %), на изученных объектах, с учетом уже скорректированных для пирита значений  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t=450}$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t=450}$  и  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{t=450}$ , практически не изменился. Величины  $v$  для изотопных отношений  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  составляют:  $v_{6/4} = 0.9\%$ ,  $v_{7/4} = 0.2\%$  и  $v_{8/4} = 0.4\%$  соответственно. Фиксируемые вариации изотопного состава  $\text{Pb}$  по своему масштабу оказались сопоставимы с таковыми для отдельных ранее изученных месторождений Сухой Лог и Вернинское, расположенных в Кропоткинском рудном поле БЗР (Чернышев и др., 2009; Чугаев и др., 2014). Столь большие значения коэффициента вариации для рассмотренного ряда объектов БЗР свидетельствуют, прежде всего, о первичной неоднородности изотопного состава  $\text{Pb}$  в рудообразующих системах. При этом не обнаруживается какой-либо корреляции между изотопным составом  $\text{Pb}$  месторождений и их геологической позицией или минералого-геохимическими особенностями руд.

Наряду с изучением изотопного состава  $\text{Pb}$  в сульфиде из месторождений и рудопроявлений БЗР были также получены  $\text{Pb}-\text{Pb}$  данные для метаморфогенного пирита из безрудных метасадочных пород (табл. 2). Проанализировано 9 мономинеральных фракций пирита из различных свит неопротерозойских терригенно-карбонатных толщ, распространенных в пределах Бодайбинской и Патомской зон БПП. Все образцы были отобраны на удалении от рудных объектов. В самих породах отсутствовали признаки позднего метасоматического преобразования (карбонатизации, окварцевания, серицитизации), типичные для оклорудных изменений на месторождениях БПП (Бурак, Бакулин, 1998; Large et al., 2007, Русинов и др., 2008). Измеренные значения изотопных отношений  $\text{Pb}$  в метаморфогенном пирите лежат: для  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  — 18.25–19.15, для  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  — 15.60–15.70 и для  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  — 38.06–38.84. Столь большой размах вариаций, фиксируемый для всех трех изотопных отношений  $\text{Pb}$ , лишь отчасти может быть объяснен присутствием радиогенной добавки изотопов  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$ , накопленной в пирите с момента

проявления метаморфических процессов, и свидетельствует, прежде всего, об неоднородности изученных проб по начальному изотопному составу  $\text{Pb}$ .

В рамках настоящей работы было проведено изучение изотопного состава  $\text{Pb}$  в калиевых полевых шпатах гранит-порфиров конклюдеро-мамаканского комплекса, образующих небольшой шток, известный как Константиновский, вблизи месторождения Сухой Лог (табл. 2).  $\text{Pb}-\text{Pb}$  данные получены для трех образцов КПШ, выделенных из гранитов, образующих собственно сам шток, а также для одной пробы (УЗД-1), характеризующей дайку гранит-порфиров, расположенную на удалении от штока. За исключением образца УЗД-1, изотопный состав  $\text{Pb}$  в КПШ гранит-порфиров оказался одинаковым ( $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{cp}} = 18.491 \pm 3$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{cp}} = 15.603 \pm 2$ ,  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{cp}} = 38.618 \pm 8$ ). По результатам микроскопического изучения образца УЗД-1 установлено, что магматические расплавы, сформировавшие дайку, были контаминированы веществом вмещающих углеродистых сланцев, что позволяет объяснить отличие изотопного состава  $\text{Pb}$  в КПШ дайки от такового в КПШ гранитов Константиновского штока.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты изучения изотопного состава  $\text{Pb}$  в сульфидах различных месторождений и рудопроявлений БЗР представлены на  $\text{Pb}-\text{Pb}$  диаграммах (рис. 2а, 2б). Приведенные на графиках значения изотопных отношений  $\text{Pb}$  для пирита из рудных объектов были скорректированы с учетом измеренных для проб величин  $\text{U}/\text{Pb}$  и  $\text{Th}/\text{Pb}$  отношений на возраст прожилково-вкрапленной минерализации. Несмотря на значительные вариации изотопного состава  $\text{Pb}$  для изученных объектов, точки, отвечающие сульфидам прожилково-вкрапленной и жильной минерализации, образуют отчетливый линейный тренд на диаграмме в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (рис. 2б). Тренд имеет более пологий угол наклона по отношению к  $\text{Pb}-\text{Pb}$  изохронам модели Стейси–Крамерса и расположен между эволюционными кривыми глобальных геохимических резервуаров Земли “верхняя кора” и “ороген”. Большой разброс точек наблюдается на диаграмме с участием торогенного изотопа  $^{208}\text{Pb}$  (рис. 2а). При этом расположение точек может быть хорошо аппроксимировано двумя расходящимися трендами. Один из них полого ориентирован и субсогласен среднecкоровой эволюционной кривой модели Стейси–Крамерса, тогда как второй тренд имеет более крутой наклон и смещен в область изотопного состава  $\text{Pb}$ , характерного для “нижнекорового” резервуара.

**Таблица 2.** Результаты измерений изотопного состава Pb в минералах метаосадочных пород и отдельных интрузивных тел Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье)

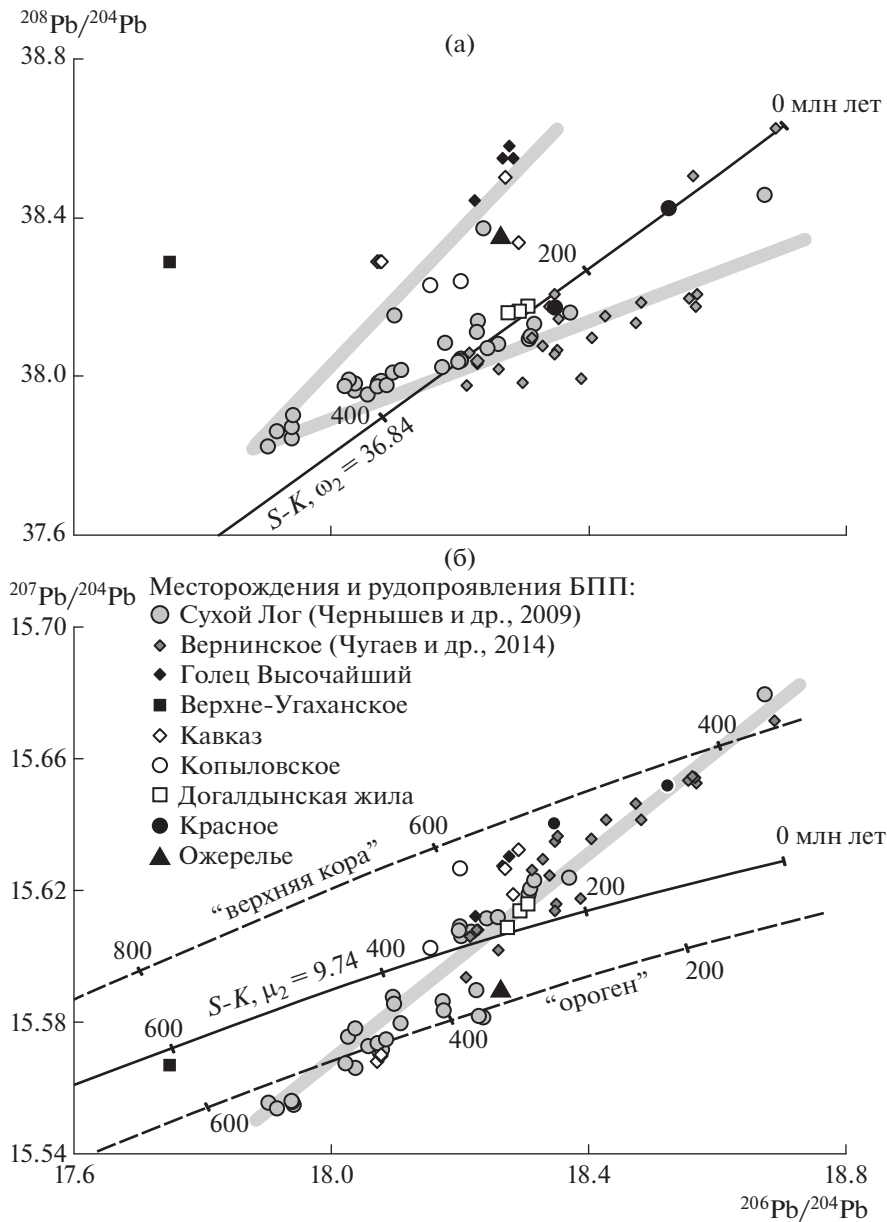
Номер пробы	Место отбора/Характеристика	Содержание, мкг/г			Изотопные отношения Pb (измеренные)		
		U	Th	Pb	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb
Метаморфогенный пирит из безрудных метаосадочных пород							
514/86.93	Бодайбинская зона, Артемовский рудное поле/бодайбинская серия, догалдынская свита, песчаники	1.5	1.2	36	18.2523	15.6096	38.4446
22/05	60° 9'18.00" с.ш./117° 6'30.00" в.д. Патомская зона, р. Ура/жуинская серия, николевская свита, мергель	0.20	0.07	43	18.2806	15.6282	38.0629
104/04	58°54'54.00" с.ш./117°46'6.00" в.д. », р. Жуя/дальнетайгинская серия, валюхтинской свита, алевролитистый сланец	0.48	0.99	667	18.5446	15.6601	38.3131
25/05	»	0.27	0.08	77	18.4479	15.6579	38.3182
87/12	58°54'24.00" с.ш./116°25'0.48" в.д. »/», углеродистый известняк	0.71	0.10	38	18.9337	15.6953	38.8355
88/12	»	0.74	0.02	6.2	19.1477	15.6975	38.7311
50/12	58°48'37.14" с.ш./115°56'58.65" в.д. Бодайбинская зона. р. Кадали/ныгринская серия, хомолхинская свита, углеродистый алевролитистый сланец	1.2	2.8	21	18.2795	15.5963	38.4234
Калиевый полевоый шпат из гранит-порфиров Константиновского штока (Pz <sub>2</sub> )							
КШ-1	58°34'40.70" с.ш./115° 8'10.30" в.д. Бодайбинская зона/Константиновский шток, гранит-порфиры	0.44	0.21	40	18.4901	15.6005	38.612
КШ-2	»	0.44	0.20	37	18.4951	15.6043	38.6274
КШ-3	»	0.30	0.05	49	18.4889	15.6034	38.6156
УЗД-1	58°35'19.39" с.ш./115° 7'34.60" в.д. р. Угахан/Дайка гранит-порфиров	1.5	0.50	34	18.4498	15.5878	38.4875

Примечания. Координаты мест отбора образцов приведены в системе WGS84, с.ш./в.д.

Положение точек сульфидов, представляющих различные рудные объекты БЗР, на одних и тех же трендах изотопного состава Pb свидетельствует о том, что свинец поступал в их гидротермальные системы из общего источника (или источников). При этом не обнаруживается каких-либо значимых различий в расположении на графиках между точками пирита из прожилково-вкрапленной и галенита из жильной минерализации, что указывает на участие этого источника как при формировании ранней (~450 млн лет назад), так и поздней (~320 млн лет назад) золоторудной минерализации.

В рамках магматогенной гипотезы, разрабатываемой для золоторудных объектов БПП, в ряде работ (Рунквист и др., 1992; Лаверов и др., 2000;

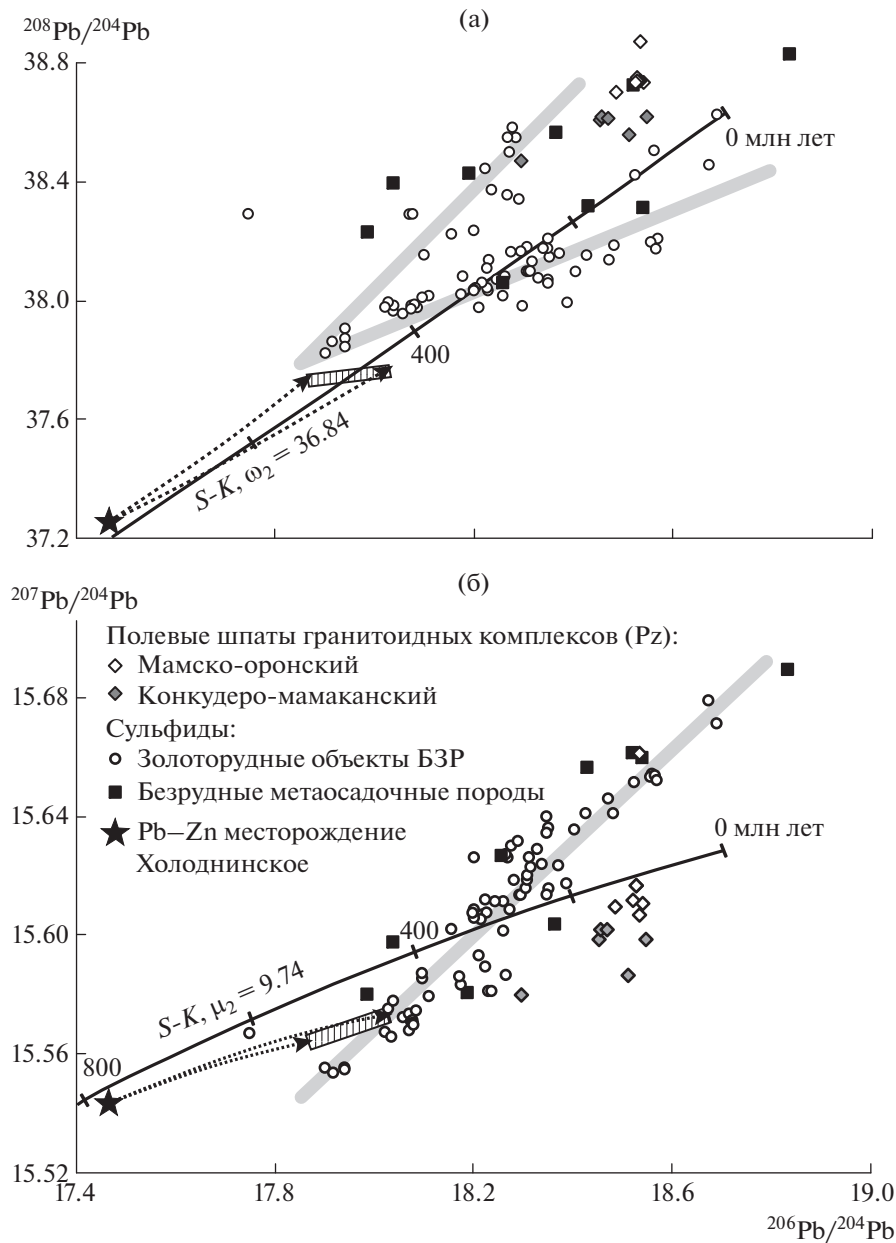
Distler et al., 2004 и др.) главным источником минералообразующих компонентов флюидов предполагаются магматические расплавы, с кристаллизацией которых связано образование в этом регионе различных по составу палеозойских интрузий. Большинство исследователей в качестве рудогенерирующего часто рассматривается гранитоидный магматизм, представленный породами раннепалеозойского мамско-оронского и позднепалеозойского конкудеро-мамаканского комплексов. Формирование пород этих комплексов, как было отмечено выше, по времени сближено соответственно с формированием ранней прожилково-вкрапленной минерализации и поздних золотоносных кварцевых жил. Свинцово-изотопные характеристики интрузивных пород были изучены



**Рис. 2.** Pb–Pb диаграммы для сульфидов из золоторудных месторождений и рудопроявлений Бодайбинского рудного района Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье). На диаграммы нанесены: сплошной линией среднекорневая эволюционная кривая по (Stacey, Kraters, 1975), пунктирными линиями модельные кривые эволюции изотопного состава Pb в глобальных геохимических резервуарах Земли “верхнекорневого” и “орогенного” типов по (Doe, Zartman, 1979). Серым цветом показаны тренды изотопного состава Pb сульфидов из золоторудных объектов Бодайбинского рудного района БПП

Л.А. Неймарком с соавторами (Неймарк и др., 1993). На диаграмме в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (рис. 3б) точки изотопного состава Pb гранитоидов мамско-оронского и конкудеро-мамаканского комплексов образуют относительно компактное поле, расположенное правее тренда изотопного состава рудного Pb. За пределами этого поля находятся две точки, которые нами не учитывались при сопоставлении изотопного состава Pb магма-

тических пород и сульфидов золоторудной минерализации объектов БЗР. Одна из них отвечает КПШ дайки гранит-порфиров, расположенной рядом с Константиновским штоком. Как уже ранее отмечалось, сдвиг изотопного состава Pb дайки по отношению к таковому в гранитах конкудеро-мамаканского комплекса, по-видимому, обусловлен контаминацией сформировавших ее магматических расплавов веществом вмещаю-



**Рис. 3.** Pb–Pb диаграммы, на которых приведено сопоставление изотопного состава Pb золоторудных объектов Бодайбинского рудного района (Чернышев и др., 2009; Чугаев и др., 2014; настоящая работа), метаморфогенного пирита из безрудных метаосадочных пород (настоящая работа) и полевых шпатов палеозойских гранитоидных комплексов (Неймарк и др., 1993; настоящая работа). На диаграммы нанесены: сплошной линией среднекоревая эволюционная кривая по (Stacey, Kratgers, 1975), пунктирной линией модельные кривые эволюции изотопного состава Pb в предполагаемом региональном источнике “орогенного” типа. Серым цветом показаны тренды изотопного состава Pb сульфидов из золоторудных объектов БПП. Области со штриховкой соответствуют расчетным значениям изотопных отношений Pb в предполагаемом “орогенном” источнике на возраст 450 млн лет назад

щих метаосадочных пород. Другая точка представляет изотопный состав Pb в пробе КПШ гранитов мамско-оронского комплекса (Неймарк и др., 1993). По сравнению с другими 5 пробами свинец в ней обладает повышенным содержанием  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$ . Отклонения значений отношений  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , полученных для этой

пробы, обнаруживают масс-зависимый характер, что может свидетельствовать о том, что они вызваны аналитическими причинами, а именно не полным учетом приборной масс-дискриминации.

Как видно из приведенных на графике данных, рассматриваемые магматические породы обладают высокой степенью однородности изо-

топного состава свинца. Для гранитов мамско-оронского комплекса величины коэффициента вариации изотопных отношений  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  близки к аналитическим погрешностям метода TIMS и составляют соответственно:  $v_{6/4} = 0.1\%$ ,  $v_{7/4} = 0.03\%$  и  $v_{8/4} = 0.05\%$ . Столь же низкие значения коэффициента вариации получены и для гранит-порфиров Константинского штока:  $v_{6/4} = 0.2\%$ ,  $v_{7/4} = 0.04\%$  и  $v_{8/4} = 0.06\%$ . По этому параметру магматические породы существенно отличаются от сульфидов рудных объектов БЗР, для которых вариации изотопных отношений Pb на порядок больше:  $v_{6/4} = 1.0\%$ ,  $v_{7/4} = 0.3\%$  и  $v_{8/4} = 0.5\%$ . Из приведенных данных следует, что только поступлением свинца из кислых расплавов в рудообразующие системы месторождений нельзя объяснить наблюдаемый для этих рудных объектов размах вариаций изотопного состава Pb. Кроме того, положение на графике точек гранитоидов относительно тренда, образованного сульфидами, не дает основание рассматривать магматические расплавы в качестве одного из потенциальных источников рудного свинца и, возможно, других минералообразующих компонентов.

В метаморфогенно-гидротермальной генетической модели основным источником вещества, участвовавшего в формировании золоторудной минерализации, принимаются метаосадочные породы БПП (Буряк, Бакулин, 1998; Large et al., 2007 и др.). С целью проверки такого предположения было проведено сопоставление изотопного состава Pb сульфидов из месторождений и рудопроявлений БЗР и метаморфогенного пирита из безрудных метаосадочных пород (рис. 3а, 3б).

Значения изотопных отношений ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t=450</sub>, ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t=450</sub> и ( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t=450</sub> для метаморфогенного пирита лежат в широких диапазонах: от 17.99 до 18.83, от 15.58 до 15.69, от 38.06 до 38.83 соответственно. По своему размаху вариации изотопного состава Pb близки к таковым в сульфидах рудных объектов БЗР. На Pb–Pb диаграммах (рис. 3а, 3б) точки метаморфогенного пирита расположены равномерно с некоторым разбросом вдоль трендов, образованных сульфидами золоторудной минерализации. Наблюдаемые на графиках соотношения изотопного состава Pb метаморфогенного пирита и сульфидов из рудных объектов БЗР свидетельствуют в пользу того, что основным источником поступления свинца в гидротермальные системы месторождений являлись терригенно-карбонатные толщи. В свою очередь, значительная неоднородность изотопного состава рудного Pb, которая установлена по результатам детального Pb–Pb изучения отдельных месторождений (Чернышев и др., 2009; Чугаев и др., 2014), является унаследованной и отражает Pb–Pb-изотопно-геохимическую неоднородность терригенно-карбонатных толщ, как источника свинца и, вероятно, других компонентов на момент развития рудообразующих процессов. Объяснение причин этой неоднородности важно для понимания особенностей генезиса золоторудной минерализации БПП. К вероятным причинам неоднородности следует отнести геохимическую дифференциацию U, Th и Pb при одновременном усреднении изотопного состава Pb в процессах накопления осадков в морском палеобассейне и в ходе последующего их диагенетического и катагенетического преобразования. В этом случае, тренд изотопного состава рудного Pb на диаграмме в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  может быть интерпретирован как вторичная изохрона, что позволяет нам оценить время возможного перераспределения U, Th и Pb в изначально геохимически однородном источнике (резервуаре). Полученное значение около 2.2 млрд лет<sup>1</sup> в несколько раз превышает имеющиеся геологические и геохронологические оценки времени накопления осадочных толщ (800(?)–540 млн лет назад, (Powerman et al., 2015)), формирующих неопротерозойскую часть разреза БПП. Тем более, это возрастная оценка древнее возраста регионального метаморфизма. Последний имел место около 520 млн лет назад (Виноградов и др., 1996; Scott et al., 2007). Можно предположить, что полученный палеопротерозойский возраст соответствует возрасту пород, послуживших источником кластогенного материала для осадков. Однако недавно опубликованные результаты U–Pb датирования детритовых цирконов из неопротерозойских метаосадочных пород Патомской зоны БПП показывают, что они были образованы за счет разрушения разновозрастных комплексов, среди которых присутствовали не только палеопротерозойские образования (2.4–2.1 млрд лет), но и более молодые породы мезопротерозойского (1.7–1.4 млрд лет) и неопротерозойского возраста (1.0–0.6 млрд лет) (Powerman et al., 2015). Таким образом, линейный тренд изотопного состава рудного Pb, наблюдаемый на диаграмме в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , нельзя отнести к типу “вторичных” изохрон. В пользу такого вывода также свидетельствует и отсутствие единого линейного тренда точек на диаграмме в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ .

Другой подход при интерпретации Pb–Pb данных, полученных как по сульфидам из рудных объектов, так и по метаморфогенному пириту, заключается в том, что неоднородность изотопного состава Pb, которая на графиках выражена в виде трендов, обусловлена смешением в процессах рудообразования свинца из различных источников. В пользу такого вывода также свидетельствует и отсутствие единого линейного тренда точек на диаграмме в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ .

Другой подход при интерпретации Pb–Pb данных, полученных как по сульфидам из рудных объектов, так и по метаморфогенному пириту, заключается в том, что неоднородность изотопного состава Pb, которая на графиках выражена в виде трендов, обусловлена смешением в процессах рудообразования свинца из различных источников. В пользу такого вывода также свидетельствует и отсутствие единого линейного тренда точек на диаграмме в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ .

<sup>1</sup> При расчетах для параметра  $t_2$  принималось значение, равное 450 млн лет, что соответствует возрасту прожилково-вкрапленной минерализации по (Лаверов и др., 2007).

дообразования и осадконакопления Pb из различных геохимических резервуаров, отличающихся по своим U–Th–Pb изотопным характеристикам. Положение линейного тренда на диаграмме с ураногенными изотопами  $^{206}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}$  относительно кривых, описывающих эволюцию изотопного состава Pb в различных глобальных геохимических резервуарах Земли (Doe, Zartman, 1979), позволяет заключить, что основными источниками свинца являлись резервуары “верхнекорового” и “орогенного” типов. Согласно имеющимся геодинамическим реконструкциям формирование осадочных толщ происходило в условиях пассивной континентальной окраины (Кузьмин и др., 2006; Немеров и др., 2010; Powerman et al., 2015). При этом основное поступление кластогенного материала в морской палеобассейн связывают с выветриванием архейско-палеопротерозойских пород метаморфических и гранитоидных комплексов Сибирского кратона (Кузьмин и др., 2006; Немеров и др., 2010; Powerman et al., 2015; Чугаев и др., 2017). Таким образом, присутствие свинца “верхнекорового” типа в метаосадочных толщах БПП может быть объяснено участием в процессах осадконакопления материала раннедокембрийской континентальной коры. В свою очередь, наличие двух разнонаправленных трендов изотопного состава рудного Pb и их соотношение на диаграмме в координатах  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (рис. 3а) указывает на участие как минимум двух типов “верхнекоровых” источников, близких по параметру  $\mu$  ( $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ), но отличающихся по величине  $\omega$  ( $\omega = ^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ ). Эти отличия свидетельствуют о поступлении свинца как из пород, образованных в верхнекоровых условиях (например, граниты), так и из глубокометаморфизованных пород, для которых характерны повышенные величины отношения  $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$  по сравнению со среднекоровым значением ( $\omega_2 = 36.84$ ).

Свинец “орогенного” типа, как правило, характерен для геологических объектов, генетически и пространственно связанных с областями формирования новой континентальной коры. В пределах Байкало-Патомского складчатого пояса выделяется протяженная палеорифтовая структура – Олоkitская зона, в которой развиты вулканогенные породы неопротерозойского возраста. К ним пространственно приурочен ряд свинцово-цинковых месторождений, наиболее крупным из которых является месторождение Холоднинское (Дистанов и др., 1977). Оно расположено в юго-западной части Олоkitской зоны среди вулканических и осадочных пород. Генезис колчеданно-полиметаллической рудной минерализации этого месторождения связывают с развитием бимодального вулканизма, проявившегося 720–710 млн лет назад в условиях континенталь-

ного рифтогенеза (Дистанов и др., 1977; Рыцк и др., 2002). Таким образом, месторождение Холоднинское может быть рассмотрено в качестве примера объекта с “орогенным” типом свинца (Неймарк и др., 1994). При этом его формирование происходило в то же время, что и накопление осадочных толщ в палеобассейне. Вышесказанное дает основание использовать величины изотопных отношений Pb руд месторождения Холоднинское в качестве начальных и выполнить численные оценки эволюции изотопного состава Pb “орогенного” типа с момента его поступления в осадочный бассейн до момента вовлечения в рудообразующие процессы.

Изотопный состав Pb в рудах месторождения Холоднинское изучался в разные годы несколькими исследователями (Tugarinov et al., 1976; Karpenko et al., 1981; Неймарк и др., 1994). Однако все эти данные были получены стандартным методом TIMS, не позволяющим полностью скорректировать результаты измерений на приборную масс-дискриминацию, что, возможно, объясняет плохую согласованность между собой цитируемых данных и большой их разброс. В связи с этим, нами дополнительно проведено изучение изотопного состава Pb в четырех пробах галенита, отобранного из массивных руд месторождения Холоднинское (табл. 1). В изученных пробах изотопный состав Pb оказался более однородным по сравнению с ранее опубликованными Pb–Pb данными (Tugarinov et al., 1976; Karpenko et al., 1981; Неймарк и др., 1994). В расчетах нами использовались только результаты настоящей работы, как наиболее точные.

При построении модельных кривых, описывающих эволюцию изотопного состава Pb “орогенного” типа в метаосадочных толщах БПП, рассматриваемых в качестве регионального геохимического резервуара, для параметров  $\mu$  и  $\omega$  принимались значения, находящиеся в диапазонах от 9.42 до 13.22 и от 36.84 до 39.20 соответственно. Указанные интервалы отражают возможные величины параметров  $\mu$  и  $\omega$  в геохимических резервуарах корового типа (Stacey, Kramers, 1975; Doe, Zartman, 1979). Результаты модельных построений приведены на Pb–Pb диаграммах (рис. 3а, 3б). Можно видеть, что на момент времени формирования рудных объектов БЗР источник “орогенного” типа обладал величинами изотопных отношений Pb близкими к таковым в свинце некоторых сульфидов из золоторудной минерализации. Области возможных значений изотопных отношений Pb источника “орогенного” типа расположены вблизи или накладываются на тренды изотопного состава Pb сульфидов золоторудной минерализации и метаморфогенного пирита. Таким образом, проведенные модельные расчеты подтверждают предположение об участии свинца “орогенного” типа как в про-

цессах осадконакопления, так и в рудообразующих процессах.

В связи с обсуждением возможных причин свинцово-изотопной неоднородности терригенно-карбонатных пород представляют интерес недавно опубликованные результаты Sm–Nd изучения неопротерозойских метаосадочных образований Приленской и Бодайбинской зон БПП (Чугаев и др., 2017). На основе полученных данных показано, что породы, слагающие разрезы этих зон, неомогенны по величине начального отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  (или  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ ). Значения  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$  изменяются в широких пределах от  $-19.4$  до  $-2.0$ . При этом минимальные величины  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$  ( $-19.4 \dots -16.3$ ) характерны для пород свит нижней части разреза, тогда как для вышележащих пород, начиная с валухтинской/хомолхинской свиты ( $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = -3.0 \dots -2.0$ ), происходит скачкообразное повышение  $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$  и значения находятся в интервале  $-8.3 \dots -2.0$ . Столь широкие вариации начального отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  объясняются изменением в процессе накопления осадков источников сноса кластогенного материала. На раннем этапе формирование осадочных толщ происходило в открытом морском палеобассейне за счет материала, образованного при выветривании раннедокембрийской коры Сибирского кратона. На позднем этапе, который соответствует режиму осадконакопления в условиях бассейна типа “форленд”, помимо сноса материала с Сибирского кратона также поступало и вещество новообразованной коры неопротерозойского возраста. Таким образом, Sm–Nd данные указывают на участие нескольких источников кластогенного материала, которые отличались по своим Nd-изотопным и, вероятно, геохимическим характеристикам, что согласуется с приведенной выше интерпретацией результатов изучения изотопного состава Pb в метаморфогенном пирите из метаосадочных толщ БПП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместная интерпретация новых и опубликованных Pb–Pb данных, полученных для золоторудных объектов БПП, а также сопоставление их с результатами изучения свинцово-изотопных характеристик палеозойских интрузивных пород и метаморфогенного пирита позволяет заключить, что ведущим источником свинца, поступавшего в гидротермальные системы месторождений, являлись неопротерозойские терригенно-карбонатные толщи Байкало-Патомского пояса. Этот вывод подтверждается результатами других изотопно-геохимических (O, C, S, Sr, Nd) исследований рудного и жильного вещества месторождений Сухой Лог, Вернинское и Голец Высочайший (Русинов и др., 2008; Кряжев и др., 2009;

Иконникова и др., 2009; Дубинина и др., 2010; Дубинина и др., 2014 и др.). Вовлечение свинца вмещающих метаосадочных пород в рудообразующие процессы при формировании золоторудных объектов орогенного типа было доказано на примере крупномасштабного месторождения Холмстейк (США) (Frei et al., 2009).

Значительные вариации изотопных отношений Pb, характерные в целом для рассмотренных рудных объектов БПП, отражают первичную свинцово-изотопную неоднородность источника Pb. Эта неоднородность обусловлена смешением при осадконакоплении вещества двух геохимических типов континентальной коры – древней (раннедокембрийской) коры Сибирского кратона, прошедшей длительную геохимическую эволюцию, и новообразованной позднедокембрийской коры.

В контексте обсуждения проблемы генезиса золоторудной минерализации Бодайбинского рудного района полученные Pb–Pb данные свидетельствуют в пользу гидротермально-метаморфогенной гипотезы, согласно которой ведущим источником рудного вещества являлись метаосадочные породы (Буряк, 1982; Буряк, Бакулин, 1998; Large et al., 2007 и др.). Однако, подтверждая эту гипотезу, нельзя не отметить, что формирование ранней прожилково-вкрапленной минерализации по времени было существенно оторвано (приблизительно на 70 млн лет) от процессов регионального метаморфизма, протекавшего ~520 млн лет назад. Кроме того, наблюдается возрастная корреляция между этапами рудообразования и главными циклами палеозойского магматизма, проявленными в пределах рассматриваемого региона соответственно около 420 и 300 млн лет назад. К косвенным доказательствам, указывающим на возможное участие магматических расплавов в генезисе золоторудной минерализации, относится широкое распространение в пределах месторождений Сухой Лог, Вернинское и Голец Высочайший K–Na метасоматических образований (Русинов и др., 2008). Эти противоречия, по видимому, требуют дальнейшей разработки и детализации метаморфогенно-гидротермальной модели с учетом геологических, геохимических и изотопно-геохимических особенностей конкретных месторождений БПП.

*Авторы признательны Ю.Г. Сафонову, Е.В. Белогуб, А.Е. Будяку, А.А. Вольфсону, Е.Е. Паленовой, О.Ю. Плотинской, и Б.Г. Покровскому за предоставленный для исследований геологический материал и обсуждение результатов.*

*Работа выполнена в рамках плана исследований по гранту Российского научного фонда (РНФ) №16-17-10221.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буряк В.А. (1982) *Метаморфизм и рудообразование*. М.: Недра, 256 с.
- Буряк В.А., Бакулин Ю.И. (1998) *Металлогения золота*. Владивосток: Дальнаука, 402 с.
- Виноградов В.И., Пичугин Л.П., Быховер В.Н., Головин Д.И., Муравьев В.И., Буякайте М.И. (1996) Изотопные признаки и время эпигенетических преобразований верхнедокембрийских отложений Уринского поднятия. *Литология и полезные ископаемые* (1), 68–78.
- Гусев Г.С., Хаин В.Е. (1995) О соотношениях Байкало-Витимского, Алдано-Станового и Монголо-Охотского террейнов (юг Средней Сибири). *Геотектоника* (5), 68–82.
- Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р., Шобогоров П.Ч. (1977) Особенности формирования метаморфизованных гидротермально-осадочных колчеданно-полиметаллических руд Холоднинского месторождения. *Вопросы генезиса стратиформных свинцово-цинковых месторождений Сибири*. Новосибирск: Наука, 5–43.
- Дубинина Е.О., Иконникова Т.А., Чугаев А.В. (2010) Неоднородность изотопного состава серы пирита на месторождении Сухой Лог и определяющие ее факторы. *Доклады РАН* **435**(6), 786–790.
- Дубинина Е.О., Чугаев А.В., Иконникова Т.А., Авдченко А.С., Якушев А.И. (2014) Источники вещества и флюидный режим формирования кварц-карбонатных жил на месторождении золота Сухой Лог, Байкало-Патомское нагорье. *Петрология* **22** (4), 347–379.
- Золоторудные месторождения России. (2010) Под ред. Константинов М.М. М.: Акварель, 339 с.
- Зорин Ю.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Пресняков С.Л., Сергеев С.А. (2008) Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны. *Доклады РАН* **423**(2), 228–233.
- Иконникова Т.А., Дубинина Е.О., Сароян М.Р., Чугаев А.В. (2009) Изотопный состав кислорода жильного кварца и вмещающих пород на месторождении Сухой Лог (Россия). *Геология рудных месторождений* **51**(6), 560–567.
- Кориковский С.П., Федоровский В.С. (1980) *Ранний докембрий Патомского нагорья*. М.: Наука, 468 с.
- Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А. (2009) Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным. *Геохимия* (10), 1108–1118.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Спиридонов А.И., Немеров В.К., Иванов А.И., Митрофанов Г.Л. (2006) Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба. *Доклады РАН* **407**(6), 793–797.
- Лаверов Н.П., Лишневицкий Э.Н., Дистлер В.В., Чернов А.А. (2000) Модель рудно-магматической системы золото-платинового месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия). *Доклады РАН* **375**(5), 652–656.
- Лаверов Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Баирова Э.Д., Гольцман Ю.В., Дистлер В.В., Юдовская М.А. (2007) Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия): результаты изотопно-геохронологического изучения. *Доклады РАН* **415**(2), 236–241.
- Ларин А.М. (2011) *Граниты рапакиви и ассоциирующие породы*. СПб: Наука, 402 с.
- Неймарк Л.А., Рыцк Е.Ю., Гороховский Б.М., Амелин Ю.В., Овчиникова Г.В., Смирнов М.Ю., Грачева Т.В. (1993) Геохронологическое и изотопно-геохимическое изучение золоторудных месторождений Байкальской складчатой области. *Изотопное датирование эндогенных формаций*. М.: Наука, 124–146.
- Неймарк Л.А., Рыцк Е.Ю., Гороховский Б.М. (1994) Pb-изотопные характеристики некоторых позднерифейских Pb-Zn-месторождений складчатого обрамления Сибирской платформы. *Доклады РАН* **339**(5), 662–665.
- Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Бурдяк А.Е., Корнилова Т.А. (2010) Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона. *Геология и геофизика* **51**(5), 729–747.
- Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Плотинская О.Ю., Новоселов К.А., Масленников В.В., Котляров В.А., Блинов И.А., Кузьменко А.А., Грибоедова И.Г. (2015) Эволюция состава пирита на золоторудных месторождениях Копыловское и Кавказ в черносланцевых толщах (Бодайбинский район, Россия) по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС. *Геология рудных месторождений* **57**(1), 71–92.
- Рундквист И.К., Бобров В.А., Смирнова Т.Н., Смирнов М.Ю., Данилова М.Ю., Ащеулов А.А. (1992) Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района. *Геология рудных месторождений* **34**(6), 3–15.
- Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев В.Г., Щегольков Ю.В., Альшева Э.И., Борисовский С.Е. (2008) Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе. *Геология рудных месторождений* **50**(1), 3–46.
- Рыцк Е.Ю., Шалаев В.С., Ризванова Н.Г., Крымский Р.Ш., Макеев А.Ф., Риле Г.В. (2002) Олоkitская зона Байкальской складчатой области: новые изотопно-геохронологические и петрогеохимические. *Геотектоника* (1), 29–41.
- Чернышев И.В., Чугаев А.В., Шатагин К.Н. (2007) Высоточный изотопный анализ Pb методом многоколлекторной ИСР-масс-спектрометрии с нормированием по  $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}$ : оптимизация и калибровка метода для изучения вариаций изотопного состава Pb. *Геохимия* (11), 1155–1168.
- Чернышев И.В., Чугаев А.В., Сафонов Ю.Г., Сароян М.Р., Юдовская М.А., Еремина А.В. (2009) Изотопный состав свинца по данным высокоточного МС-ИСП-МС-метода и источники вещества крупномасштабного благороднометалльного месторождения Сухой Лог (Россия) *Геология рудных месторождений*, **51**(6), 550–559.
- Чугаев А.В., Чернышев И. В., Лебедев В. А., Еремина А.В. (2013) Изотопный состав свинца и происхождение четвертичных лав вулкана Эльбрус (Большой Кавказ, Россия): данные высокоточного метода МС-ИСП-МС. *Петрология* **21**(1), 20–33.
- Чугаев А.В., Плотинская О.Ю., Чернышев И.В., Котов А.А. (2014) Неоднородность изотопного состава Pb в сульфидах различных парагенетических ассоциаций на золоторудном месторождении Вернинское (Байкало-Патомское нагорье, Россия) *Доклады РАН* **457**(3), 337–342.

- Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Шатагин К.Н., Олейникова Т.И., Тарасова Ю.И., Скузоватов С.Ю. (2017) Источники обломочного материала неопроterозойских метасадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) по Sm-Nd изотопным данным. *Геохимия* (1), 17-25.
- Чумаков Н.М., Покровский Б.Г., Мележек В.А. (2007) Геологическая история патомского комплекса, поздний докембрий, Средняя Сибирь. *Доклады РАН* **413**(3), 379-383.
- Цыганков А.А., Литвиновский Б.А., Джань Б.М., Рейков М., Лю Д.И., Ларионов А.Н., Пресняков С.Л., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А. (2010) Последовательность магматических событий на позднепалеозойском этапе магматизма Забайкалья (результаты U-Pb изотопного датирования). *Геология и геофизика* (9), 1249-1276.
- Belogub E.V., Palenova E.E., Chugaev A.V., Plotinskaya O.Yu. (2014) Origin of gold ores in black-shale hosted deposits of the Bodaybo region, Russia. *Acta Geol. Sinica* **88**(2), 252-253.
- Goldfarb R.J., Taylor R.D., Collins G.S., Goryachev N.A., Orlandini O.F. (2014) Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondwana Res.* **25**, 48-102.
- Goldfarb R.J., Groves D.I. (2015) Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos* **233**, 2-26
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. (1998) Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.* **13**, 7-27.
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Hart G.J.R. (2003) Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Econ. Geol.* **98**, 1-29.
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Y., Lishnevskii E.N. (2004) Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals Deposit, Russia. *Ore Geol. Rev.* **24**(1-2), 7-44
- Doe B.R., Zartman R.E. (1979) Plumbotectonics I. The Phanerozoic. In *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N. Y.: Wiley Interscience, 22-70.
- Frei R., Dahl P.S., Frandsson M.M., Jensen L.A., Hansen T.R., Terry M.P., Frei K.M. (2009) Lead-isotope and trace-element geochemistry of Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the Lead and Rochford basins (Black Hills, South Dakota, USA): Implications for genetic models, mineralization ages, and sources of leads in the Homestake gold deposit. *Precam. Res.* **172**, 1-24
- Karpenko S., Delevaux M.H., Doe B.R. (1981) Lead isotope analyses of galenas from selected ore deposits of the USSR. *Econ. Geol.* **76**, 716-742.
- Kerrick R., Cassidy K.F. (1994) Temporal relationships of lode-gold mineralization to accretion, magmatism, metamorphism, and deformation – Archean to present: a review. *Ore Geol. Rev.* **9**, 263-310.
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Scott R.J., Chang Z. (2007) Multi-stage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia. *Econ. Geol.* **102**, 1233-1267.
- Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N. (2015) Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia. *Precam. Res.* **267**(1), 39-71.
- Scott R.J., Large R.R., Meffre S., Maslennikov V.V. (2007) Structural controls on the development of the giant Sukhoi Log gold deposit, Siberia: Deformation in the Desert. In *Geological Society of Australia Specialist Group in Tectonics and Structural Geology* Alice Springs, 55.
- Stacey J.S., Kramers I.D. (1975) Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.* **26**(2), 207-221.
- Tugarinov, A.I., Varlamov, V.A., Karpenko, S.F., Ruchkin, G.V. (1976). The lead isotopic compositions of galena from the Kholodninskoe massive sulfide deposit and of the country rocks. *Geochemistry* (2), 202-210.