

УДК 553.411(470.5)

DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-386-396

Изотопный состав свинца даек и руд Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал)

В. В. Мурзин¹, И. В. Викентьев², О. Б. Азовскова¹, М. Ю. Ровнушкин¹, М. В. Стрелецкая¹,
В. И. Блоков², О. В. Викентьева²

¹Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mail: murzin@igg.uran.ru
²Институт рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 35

Поступила в редакцию 01.10.2019 г., принята к печати 13.11.2019 г.

Объект исследования. Воронцовское месторождение тонковкрапленного золота в терригенно-карбонатных породах (карлинский тип). Цель работы – выявление источников свинца различных типов руд (в скарнах, джаспероидах, туфопесчаниках и известняковых брекчиях) и роли магматических пород (апофизы Ауэрбаховской интрузии и дайки среднего-основного состава) в становлении оруденения. **Материалы и методы.** Образцы руд и пород для исследований отобраны в карьере – на средних и глубоких горизонтах месторождения, а также из разведочных скважин. Определение изотопного состава свинца осуществлялось в ЦКП “Геоаналитик” в ИГГ УрО РАН на базе масс-спектрометра Neptune Plus методом TL_N MC ICP MS. **Результаты исследования.** Изотопный состав свинца руд и магматических пород указывает на смешанные мантийно-коровые источники вещества. Первичный, скорректированный на возраст 400 млн лет, изотопный состав свинца магматических пород характеризуется линейным трендом с широкими вариациями $^{207}Pb/^{204}Pb$ (15.6824–15.5182) и $^{206}Pb/^{204}Pb$ (18.1973–17.7707). Наименее радиогенный свинец имеют дайки лампрофиров, располагающиеся между эволюционными кривыми для мантии и орогена в модели Доу–Зартмана, а наиболее радиогенный свинец характерен для гранодиорита апофизы Ауэрбаховской интрузии. Точки анализ даек диоритовых порфиритов, габбро-диоритов и диоритов располагаются между кривыми орогена и верхней коры. Сульфиды руд обладают меньшими вариациями первичного изотопного состава свинца по отношению к магматическим породам – $^{207}Pb/^{204}Pb$ (15.6009–15.5421) и $^{206}Pb/^{204}Pb$ (18.0434–17.8404). Наиболее продуктивные руды в туфопесчаниках и известняковых брекчиях характеризуются резким преобладанием коровой компоненты над мантийной. Их точки на диаграмме $^{207}Pb/^{204}Pb$ – $^{206}Pb/^{204}Pb$ располагаются между кривыми орогена и корового источника с $\mu_2 (U^{238}/^{204}Pb) = 9.74$. **Выводы.** “Мантийный” свинец в дайках, по-видимому, отражает природу их родоначальных магм и мог частично заимствоваться расплавами из залегающих ниже мафических пород с колчеданными залежами, а “коровый” свинец рассматривается как результат ассимиляции вещества рамы при достижении магматическими расплавами верхнекорового уровня. Коровый свинец в рудообразующую систему привносился метаморфическим флюидом, образующимся при тепловом воздействии крупной Ауэрбаховской интрузии на сульфидизированные вулканогенно-осадочные породы, а свинец с мантийными метками транспортировался флюидным потоком из глубинного магматического очага.

Ключевые слова: изотопный состав свинца, золото-мышьяковые руды, магматические породы, карлинский тип, источники вещества

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (№ госрегистрации АААА-А18-118052590028-9) и ИГЕМ РАН (№ АААА-А18-118021590141-1) при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 19-35-90115).

Isotopic composition of lead from dikes and ores of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals)

Valery V. Murzin¹, Ilya V. Vikentyev², Oksana B. Azovskova¹, Mikhail Yu. Rovnushkin¹,
Mariya V. Streletskaya¹, Vyacheslav I. Blokov², Olga V. Vikent'eva²

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620016, Russia,
e-mail: murzin@igg.uran.ru

²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) RAS, 35 Staromonetny lane, Moscow
119017, Russia, e-mail: viken@igem.ru

Received 01.10.2019, accepted 13.11.2019

Для цитирования: Мурзин В.В., Викентьев И.В., Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Стрелецкая М.В., Блоков В.И., Викентьева О.В. (2020) Изотопный состав свинца даек и руд и роль магматизма в образовании Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал). *Литосфера*, **20**(3), 386–396. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-386-396

For citation: Murzin V.V., Vikentyev I.V., Azovskova O.B., Rovnushkin M.Yu., Streletskaya M.V., Blokov V.I., Vikent'eva O.V. (2020) Isotopic composition of lead from dikes and ores of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). *Litosfera*, **20**(3), 386–396. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-386-396

© В.В. Мурзин, И.В. Викентьев, О.Б. Азовскова, М.Ю. Ровнушкин, М.В. Стрелецкая, В.И. Блоков, О.В. Викентьева, 2020

Research subject. The Vorontsovskoe deposit belongs to gold deposits, in which gold is disseminated finely across carbonate-terrigenous rocks (Carlin-type). This study was aimed at identifying the sources of lead in various ore types (in skarn, jasperoid, tuff-sandstone and limestone breccia) and evaluating the role of magmatic rocks (apophyses of Auerbakh intrusions and dykes of medium-basic composition) in the mineralization. **Materials and methods.** Ore and rock samples for isotopic analysis were collected in the northern quarry of the deposit, as well as were retrieved from exploration holes. The lead isotopic composition was studied in the analytical centre *Geoanalytic*, Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, using a mass spectrometer Neptune Plus on the basis of the TL_N MC ICP MS method. **Results.** The lead isotopic composition of ores and igneous rocks indicates mixed mantle-crustal sources. The primary lead isotopic composition of igneous rocks corrected for the age of 400 Ma is characterized by a linear trend with wide variations in $^{207}Pb/^{204}Pb$ (15.6824–15.5182) and $^{206}Pb/^{204}Pb$ (18.1973–17.7707). The lamprophyre dykes feature the least radiogenic lead located between the evolutionary curves for the mantle and orogen in the Doe–Zartman model. The most radiogenic lead is typical of the granodiorite of the Auerbakh intrusion apophyses. The analysis points of diorite porphyrite, gabbro-diorite and diorite dykes are located between the orogen and upper crust curves. The sulphide ores are characterized by lower variations in the primary lead isotopic composition compared to igneous rocks – $^{207}Pb/^{204}Pb$ (15.6009–15.5421) and $^{206}Pb/^{204}Pb$ (18.0434–17.8404). The most productive ores in tuff-sandstones and limestone breccias are characterized by a significant predominance of the crustal component over the mantle component. Their points in the diagram $^{207}Pb/^{204}Pb$ – $^{206}Pb/^{204}Pb$ are located between the curves for the orogen and the crustal source with μ_2 ($^{238}U/^{204}Pb$) = 9.74. **Conclusion.** Mantle lead in the dykes under study appears to reflect the nature of their parent magmas and may have been partially extracted by melts from the footwall mafic rocks containing pyrite ores. However, crustal lead is likely to have resulted from assimilating host rocks when magmatic melts reached the upper crust level. Crustal lead migrated with the metamorphic fluid formed by the heat action of the Auerbakh intrusion on sulphide-bearing volcano-sedimentary rocks. Mantle lead might have been transported by the fluid flow from a deep-seated magmatic chamber.

Keywords: lead isotopic composition, gold-arsenic ores, igneous rocks, Carlin type, sources of ore matter

Funding information

The work was performed within the scientific themes of IGG UB RAS (No. AAAA-A18-118052590028-9) and IGEM RAS (No. AAAA-A18-118021590141-1) with partial financial support of RFBR (project 19-35-90115).

Acknowledgements

The authors are grateful to reviewer for a deep and informative review, which improved the quality of the manuscript.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования стало Воронцовское месторождение на Северном Урале, золото-мышьяковое оруденение которого отнесено нами и другими исследователями к типу тонкого вкрапленного золота в терригенно-карбонатных породах (карлинскому) (Сазонов и др., 1998, Мурзин и др., 2010; Викентьев и др., 2016; Murzin et al., 2017). Месторождение относится к разряду крупных, а сам этот тип оруденения по своим масштабам является в настоящее время одним из ведущих в мире. Данное обстоятельство обусловило интерес зарубежных исследователей к выявлению источников вещества карлинских руд изотопными методами, в том числе с использованием изотопов свинца (Tosdal et al., 2003; Thompson et al., 2004; Chen et al., 2015; Liu et al., 2015; Wong et al., 2017).

Первые данные об изотопном составе свинца сульфидов основных типов руд Воронцовского месторождения в кратком виде приведены в монографической работе И.В. Викентьева с соавторами (2016), а в развернутом – в их статье (Vikentyev et al., 2019) и электронном приложении к ней. В этих

работах был выявлен единый корово-мантийный тренд изменения изотопного состава свинца этого месторождения и колчеданных месторождений Среднего и Северного Урала.

Расположение Воронцовского месторождения вблизи Ауэрбаховского интрузива и наличие на его площади апофиз этой интрузии, а также большого количества даек различного состава позволяют рассматривать рудное вещество магматического источника в качестве преобладающего. Между тем в разработанной нами модели формирования месторождения (рис. 1), опирающейся на изучение геохимии изотопов С, О, Sr и S, преобладающее участие магматического источника вещества установлено лишь для второстепенных по значимости руд месторождения – скарновых, золото-кварцевых и частично в рудных джаспероидах (Викентьев и др., 2016; Murzin et al., 2017; Vikentyev et al., 2019). Магматические массы Ауэрбаховской интрузии при становлении основных типов золото-сульфидных руд в данной модели рассматриваются лишь как источник тепла (Murzin et al., 2017). Имеется также модель, в которой источник гидротермальных растворов, сформировавших золотую

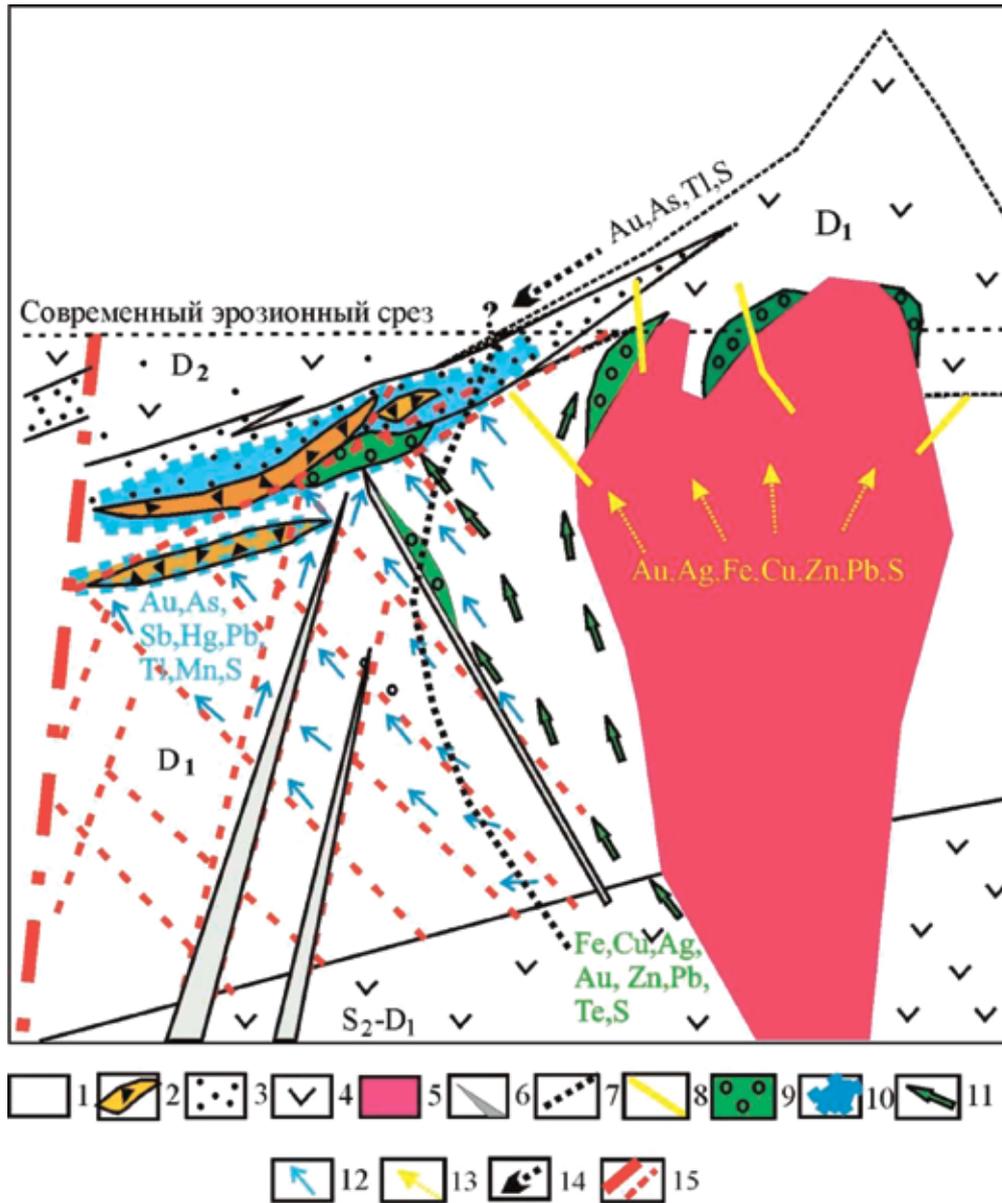


Рис. 1. Модель формирования Воронцовского месторождения золота (Murzin et al., 2017).

1 – известняки; 2 – рудоносные известняковые брекчии; 3 – вулканогенно-осадочные породы; 4 – вулканиты; 5 – гранитоиды Ауэрбаховского массива; 6 – дайки; 7 – зона мраморизации известняков; 8 – кварцевые жилы, джаспероиды; 9 – скарны; 10 – золото-мышьяковые руды; 11–14 – флюиды: 11 – глубинный, 12 – метаморфогенный, 13 – магматогенный, 14 – гипотетический вулканогенный; 15 – разломы.

Fig. 1. Formation model of Vorontsovskoe gold deposit (Murzin et al., 2017).

1 – limestone; 2 – limestone ore-bearing breccias; 3 – volcanic-sedimentary rocks; 4 – volcanics; 5 – granitoids of Auerbakh massif; 6 – dykes; 7 – marmorization aureole; 8 – quartz veins, jasperoid; 9 – skarn; 10 – gold-arsenic ore; 11–14 – fluid types: 11 – deep, 12 – metamorphic, 13 – magmatic, 14 – a hypothetical volcanic; 15 – faults.

минерализацию Воронцовского месторождения, представлен в более сложном виде с более заметной ролью магматических флюидов (Vikentyev et al., 2019). Роль даек в формировании золотого оруденения остается спорной (Сазонов и др., 1998; Нечкин, Ровнушкин, 2011; Azovskova et al., 2019).

Задачей настоящего исследования стало дополнение данных об изотопном составе свинца руд, а также известных на месторождении магматических пород в целях выявления их роли в становлении оруденения. Кроме того, ставилась задача сопоставить определения изотопных соотношений свинца,

выполненные в двух лабораториях – одной из ведущих в России – ИГЕМ РАН и в ИГГ УрО РАН.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Воронцовское золоторудное месторождение расположено на восточном склоне Северного Урала в 12 км южнее г. Краснотурьинска. В региональном плане оно находится в восточной части Тагильской мегазоны и локализовано в юго-западной экзоконтактовой части Ауэрбаховского габбро-диорит-гранодиоритового интрузива ранне- и среднедевонского возраста. Этот интрузивный массив (площадь выхода около 100 км²) входит в вулканно-плутоническую ассоциацию зрелой островной дуги и комагматичен стратифицированным породам андезитовой формации (Ферштатер и др., 1984; Грабежев и др., 2014; Vikentyev et al., 2019). Он имеет концентрически-зональное строение, сложен в центральной части гранитами, гранодиоритами и кварцевыми диоритами, а по периферии – диоритами, подчиненными габбро и габбро-диоритами. Массив представлен тремя фазами: 1) габбро, габбро-долериты (νD_{1ems_3}), 2) диориты, кварцевые диориты (δD_{1ems_3}), 3) фаза – граниты, гранодиориты (γD_{2ef_1}). В северо-западном и западном экзоконтакте массива, которому соответствует Воронцовское рудное поле, развиты мелкие тела интрузивных пород среднего, реже кислого состава и поля даек пестрого состава.

Рудное поле приурочено к крылу моноклиальной пологопадающей на запад структуры, сложенной вулканогенно-осадочными породами краснотурьинской свиты. На контакте с интрузией известняки этой свиты мраморизованы, в них хорошо проявлен ореол ороговикования.

Золотое оруденение контролируется тремя структурными факторами: 1) маркирующей зоной контакта между толщами известняков и вулканогенно-осадочных пород; 2) параллельными этому контакту пологими надвигами и сопряженными с ними зонами дробления и 3) крутопадающими на запад дизъюнктивными разломами, часть из которых контролируют дайки основного и среднего состава. В зоне маркирующего контакта находится горизонт брекчиевидных известняков проблематичного происхождения (Сазонов и др., 1998; Викентьев и др., 2016), в пределах которого локализована значительная часть рудных тел. Обломки брекчий представлены известняками, местами мраморизованными и перекристаллизованными, а цемент сложен смесью вулканогенного, вулканотерригенного и карбонатного материала в переменных соотношениях.

Отложения краснотурьинской свиты на месторождении пересечены многочисленными дайками, преимущественно средне-основного состава

нормальной и повышенной щелочности: это порфириты пироксен-плагиоклазовые, амфибол-плагиоклазовые, долериты, габбро, габбро-долериты, габбро-диориты, лампрофиры типа спессаррита и керсантита (Azovskova et al., 2019). Большая часть даек пропилитизирована, местами скарнирована. Пропилитизированные и аргиллитизированные базитовые дайки несут рассеянную вкрапленность сульфидов, преимущественно пирита. Ореолы скарнирования вдоль контактов этих даек сопровождаются магнетит-сульфидной минерализацией. Лампрофиры также содержат рассеянный пирит в небольшом количестве. Считается, что большинство даек являются дорудными по отношению к золото-мышьяковому оруденению (Сазонов и др., 1991). Содержание золота в дайках не превышает 0.2 г/т (Нечкин, Ровнушкин, 2011).

Более детальные сведения о геологическом строении месторождения приводятся в следующих работах (Сазонов и др., 1998; Черемисин, Злотник-Хоткевич, 1997; Викентьев и др., 2016; Murzin et al., 2017), а разработанная модель его формирования показана на рис. 1.

На месторождении выделяются не имеющая промышленного значения ранняя колчеданоподобная стратиформная минерализация в вулканогенно-осадочных породах, а также пять более поздних основных минеральных типов гипогенных руд и соответствующих им сорудных метасоматических изменений (Викентьев и др., 2016; Murzin et al., 2017) (табл. 1).

Руды типа А являются продуктами наложения низкотемпературного рудно-метасоматического процесса аргиллизитового типа на более ранние образования (Сазонов и др., 1998). По присутствию в близповерхностных рыхлых глинистых образованиях “новообразованных” неокисленных пирита, арсенипирита, галенита и других сульфидов, а также самородных металлов (Pb, Cu, Sn и др.), в том числе самородного золота, сделан вывод о наложении на коры выветривания и карстовые отложения гипогенной аргиллизации (Азовскова и др., 2011). Их новообразованию, вероятно, способствовали нейтрализующее действие известняков и восстанавливающее – рассеянного органического вещества.

Золотосодержащие магнетит-сульфидные руды типа Б в гранатовых и пироксен-гранатовых скарнах и эпидотовых скарноидах приурочены к контактам даек среднего и основного состава с мраморами, а также развиваются послойно в туфогенно-осадочных породах. Они сложены густовкрапленным магнетитом и обычно подчиненными сульфидами (пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит).

Руды типа В представлены телами золотоносных джаспероидов. С кварцевой фацией джаспероидов сопряжена сульфидная полиметаллическая минерализация, выраженная густой вкрапленностью (вплоть до сплошных руд) пирита, сфалери-

Таблица 1. Основные минеральные типы гипогенных золотых руд и сорудных метасоматитов на Воронцовском месторождении**Table 1.** Major mineral types of hypogenic gold ores and syn-ore alteration in the Vorontsovskoe deposit

Минеральный тип руд	Тип сорудных метасоматических изменений
А. Золото-сульфидно-глинистый	Аргиллизация
Б. Вкрапленный золото-магнетит-сульфидный	Скарнирование, пропицитизация
В. Вкрапленный золото-полиметаллический	Окварцевание, доломитизация (джаспероиды)
Г. Тонковкрапленный золото-пирит-арсенопиритовый	Пропицитизация, окварцевание, серицитизация
Д. Тонковкрапленный пирит-реальгаровый	Окварцевание, серицитизация

та, халькопирита, галенита, блеклой руды в окварцованных туфоалевролитах и известняках. С доломит-анкеритовой фацией джаспероидов ассоциирует малосульфидная (до 2–3 об. % сульфидов) сульфосольно-полиметаллическая минерализация, представленная рассеянной вкрапленностью пирита, арсенопирита, сульфидов и сульфосолей Cu, Zn, Pb в брекчированных известняках, туфоалевролитах, а также в породах даек.

Руды типа Г – слоистые кремнистые, кремнисто-карбонатные туфопесчаники, туфоалевролиты, туффиты с рассеянной вкрапленностью сульфидов (пирита, арсенопирита, блеклой руды, реальгара и др.), а также самородных мышьяка и золота. По данным В.Н. Сазонова с соавторами (1998), вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы на месторождении подверглись пропицитизации (эпидот-хлоритовая фация) с последующим развитием кварц-серицитового метасоматоза и постепенным нарастанием в измененных породах концентрации золота.

Руды типа Д слагают сульфидизированные известняковые брекчии. Обломки брекчий содержат рассеянный реальгар (а местами густо насыщены им) или, редко, аурипигмент. Цемент брекчий представлен карбонатным и туфогенным материалом и содержит очень мелкие (менее 0.1 мм) неравномерно рассеянные зерна пирита, арсенопирита, пирротина и небольшое количество сульфидов Zn, Pb, Cu, Hg, Tl, Sb, As, а также самородное золото. Вулкано-терригенный материал цемента брекчий претерпел метасоматические изменения пропицититового и кварц-серицитового типов.

МЕТОДИКА ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА И ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы руд и пород даек для изотопных исследований отобраны в северном (главном) карьере месторождения на горизонтах +115 ... +145 м, а также из разведочных скважин 21г, 276, 287 и 334. Определение изотопного состава свинца осуществлялось с помощью методики, описанной в (Вотьяков и др., 2011) на базе многоколлекторного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой

Neptune Plus, методом TL_N MC ICP MS (Чернышев и др., 2007), предусматривающим нормирование результатов всех текущих измерений изотопных отношений Pb по эталонному значению отношения $^{205}Tl/^{203}Tl$ (Ронкин и др., 2012). Измерения выполнены в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН (аналитик М.В. Стрелецкая). Для измерений использованы стандарты NSB 981 и AGV-2. Для определения исходных отношений изотопов свинца в пробах сульфидов и породах с пониженным содержанием свинца выполнена коррекция измеренных изотопных отношений на соответствие возрасту руд и пород, близкое в нашем случае к 400 млн лет (Мурзин и др., 2017). Величина коррекции измеренных значений отношений $^{206}Pb/^{204}Pb$ существенно превышает 2σ -погрешность анализа (0.018%) и достигает 3.3 отн.% при содержании свинца в пробе менее 100 г/т и становится сопоставимой с ней при содержании свинца более 300 г/т (до 0.19 отн.%). Для изотопных отношений $^{207}Pb/^{204}Pb$ величина коррекции близка к 2σ -погрешности определений (0.016%) или ниже нее.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измеренные соотношения изотопов свинца в магматических породах и сульфидах из различных типов руд Воронцовского месторождения приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Вариации измеренных отношений изотопов свинца в сульфидах руд Воронцовского месторождения на диаграмме $^{207}Pb/^{204}Pb$ – $^{206}Pb/^{204}Pb$ описываются двумя трендами, модельный Pb-Pb-возраст которых, согласно (Vikentyev et al., 2019), составил 425–416 и 398–388 млн лет соответственно для I и II трендов. Эта диаграмма отражает также хорошую сходимость результатов измерений свинцовых изотопных отношений в лабораториях ИГГ УрО РАН и ИГЕМ РАН.

В I тренде сосредоточено наибольшее количество точек анализов сульфидов всех известных на месторождении типов руд и околорудных изменений. II тренд характеризует вариации изотопного состава свинца пирита, арсенопирита и сульфидно-

Таблица 2. Изотопный состав свинца в магматических породах, сульфидных концентратах Воронцовского месторождения
 Table 2. Lead isotopic composition in the igneous rocks, sulfides and sulfide concentrates of Vorontsovskoe deposit

№ обр.	Материал проб	Th, г/г	U, г/г	Pb, г/г	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}^*$	Тип руд и пород
Вор-33/2	Галенит-пиритовый концентрат	0.350	0.023		17.9818	15.5726			А. Аргиллизиты нижних частей карстовых отложений
Вор-58/2	Пирит-арсенопиритовый концентрат	5.557	0.495	452.1	18.0243	15.5819	17.9750	15.5792	
Вор-72	Пирит-галенитовый концентрат	1.314	0.162		17.9847	15.5720			
Вор-908	Пирит-магнетитовый концентрат	0.046	0.061	361.3	17.9729	15.5494	17.8404	15.5421	Б. Сульфидная минерализация скарнов и оклодайковых скарноидов
Вор-927	–"	2.622	1.400	74.9	18.0060	15.5788	18.0055	15.5788	
Вор-930	Сульфидно-магнетитовый концентрат	1.503	0.071	45.4	18.0538	15.5809	17.9132	15.5732	В. Дзаспероиды (окварцованные и доломитизированные известняки и известковые туфоалевролиты)
21g-137	Сульфидно-галенитовый концентрат	0.898	0.024		18.0434	15.6009			
287/53.5	Пиритовый концентрат	0.792	0.020	30.1	17.9855	15.5749	17.8799	15.5691	
Вор-6а	–"	1.779	0.060	211.8	17.9577	15.5547	17.9241	15.5529	
Вор-76-2а	Пирит	0.678	0.121	829.2	17.9565	15.5508	17.9533	15.5506	
Вор-76-2b	Галенит	2.209	0.042		17.9849	15.5723			
Вор-27/3	Галенитовый концентрат	0.512	0.321		18.0090	15.5766			Г. Туфоалевролиты с рассеянной сульфидной минерализацией
Вор-42/4	Галенит-пиритовый концентрат	0.317	0.094		17.9655	15.5711			
Вор-42/4Аз	Концентрат галенита и Pb-сульфосолей	1.119	0.146		18.0060	15.5809			
Вор-62/3	Монофракция пирита	1.686	0.241	297.5	18.0279	15.5863	18.0051	15.5850	
276/113.0	Галенитовый концентрат	1.174	0.162		18.0294	15.5930			Д. Брекчии известняка с сульфидизированным цементом
334/128.6	Галенит-пиритовый концентрат	1.169	0.239		18.0112	15.5830			
110	Гранодиорит	2.547	1.034	7.0	18.8048	15.7156	18.1973	15.6824	Магматические породы апофиз Ауэрбаховской интрузии и даек
110-1	Габбро-диорит	3.82	1.521	10.3	18.5661	15.6303	17.9642	15.5974	
110-2	Диорит	4.56	1.347	10.7	18.5327	15.6408	18.0178	15.6126	
8/1	Лампрофир	1.854	0.744	12.8	18.0032	15.5309	17.7707	15.5182	
8/2	–"	1.659	0.593	14.9	18.1175	15.5553	17.9575	15.5465	
10/1	Диоритовый порфирит	2.586	1.221	16.0	18.2501	15.5967	17.9419	15.5798	
9/3	–"	3.19	1.499	9.8	18.5731	15.6458	17.9521	15.6118	
11/1	Долерит	2.924	1.272	8.5	18.5646	15.6217	17.9582	15.5885	
9/1	Пироксеновый порфирит	2.544	1.21	13.7	18.4138	15.6602	18.0561	15.6406	
3р-1590	Керсантит	6.161	3.303	29.3	18.2816	15.5726	17.8269	15.5477	

*Отношения, скорректированные на радиогенную добавку свинца на возраст 400 млн лет и использованные для построения диаграммы $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (см. рис. 3).
 *Ratios corrected for radiogenic lead addition for 400 million years of age and used to the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram (see Fig. 3).

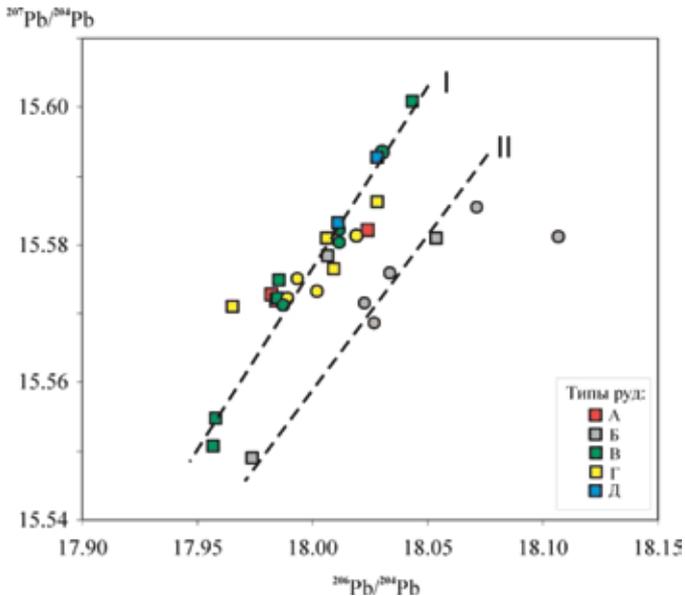


Рис. 2. Измеренные отношения изотопов свинца в сульфидах из различных типов руд Воронцовского месторождения.

Кружками отмечены анализы сульфидов из соответствующего типа руд, выполненные в ИГЕМ РАН (Vikentyev et al., 2019), квадратами – в ИГГ УрО РАН. I, II – тренды.

Fig. 2. Measured ratios of lead isotopes in sulfides from various ore types of Vorontsovskoe deposit.

Circles mark the analyses performed at IGEM RAS (Vikentyev et al., 2019), squares – in IGG UBr RAS. I, II – trends.

магнетитового концентрата из скарнов и околорудных скарноидов, установленные в ИГЕМ РАН. Этот тренд объясняется влиянием поздней фазы Ауэрбаховского плутона (Vikentyev et al., 2019).

Для определения первичного изотопного состава свинца измеренные изотопные отношения для проб с низким содержанием свинца (менее 300 г/т) скорректированы на радиогенную добавку на возраст 400 млн лет (вариации в диапазоне 380–420 млн лет существенно картину не меняют). Скорректированные отношения изотопов свинца сульфидов из различных типов руд на диаграмме $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ приведены на рис. 3, на котором они дополнены точками изотопного состава пород даек. Поскольку в работе И.В. Викентьева с соавторами (Vikentyev et al., 2019) данные о содержании свинца в пяти пробах пирита и арсенопирита II тренда на рис. 2 отсутствовали, то их коррекция была невозможной и при построении диаграммы на рис. 3 эти анализы исключены.

Анализ диаграммы $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ показывает, что первичный изотопный состав свинца магматических пород характеризуется собственным линейным трендом с широкими вари-

ациями $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (15.6824–15.5182) и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (18.1973–17.7707) (см. табл. 2). Наименее радиогенный свинец имеют дайки лампрофиров, располагающиеся между эволюционными кривыми для мантии и орогена в модели Доу–Зартмана (Дое, Zartman, 1979), а наиболее радиогенный свинец характерен для гранодиорита апофизы Ауэрбаховской интрузии. Даже по сравнению с более кислыми по составу дайками пробы лампрофиров обогащены свинцом, что может быть связано с заимствованием родоначальной для них магмой свинца из пересекаемых ими нижележащих колчеданосных уровней (нижний силур). Об этом косвенно свидетельствует близость свинцово-изотопного состава лампрофиров, с одной стороны, и колчеданных руд этих уровней, с другой (см. рис. 3). Этим же отчасти, наряду с его повышенной щелочностью, может быть обусловлено обогащение пробы керсантита ураном и торием (см. табл. 2).

Точки анализов даек порфириров, габбро-диоритов и диоритов располагаются между кривыми орогена и верхней коры. Направление эволюции изотопного состава пород даек соответствует направлению изохрон по модели Стейси–Крамерса (Stacey, Kramers, 1975) в Pb–Pb модельном возрастном диапазоне 520–470 млн лет, совпадающем с возрастом колчеданной минерализации Тагильской мегазоны. Этот возрастной диапазон существенно больше как модельного Pb–Pb-возраста руд Воронцовского месторождения (425–388 млн лет), так и имеющихся в литературе радиоизотопных датировок магматических пород Ауэрбаховского комплекса (411–393 млн лет), а также Ag–Ag-датировки (391.1 ± 4.9 млн лет), характеризующей завершающую стадию формирования золото-мышьяковых руд (см. (Мурзин и др., 2017)).

Сульфиды основных типов руд характеризуются меньшими вариациями первичного изотопного состава свинца $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (15.6009–15.5421) и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (18.0434–17.8404) по отношению к магматическим породам. Поле анализов сульфидов руд типов Г и Д, в которых заключены основные запасы золота на месторождении, на диаграмме $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ располагается локально между кривыми орогена и корового источника с μ_2 ($U^{238}/^{204}\text{Pb}$) = 9.74. В поле руд находятся также точки изотопного состава свинца “свежих, неокисленных” сульфидов (пирита, арсенопирита, галенита) из рыхлых проб “аргиллизитов” из карстовых отложений (руд типа А). Аргиллизитовые изменения рыхлых пород относятся рядом авторов к продуктам наложения низкотемпературного метасоматического процесса на мезозойские коры выветривания и карстовые отложения (Баранников, Угрюмов, 2003; Azovskova et al., 2013; и др.) или метасоматоза, исключаяющего участие “догидротермального” выветривания (Бобров, 1991, 2013). Изотопное сходство сульфидов из всех типов руд,

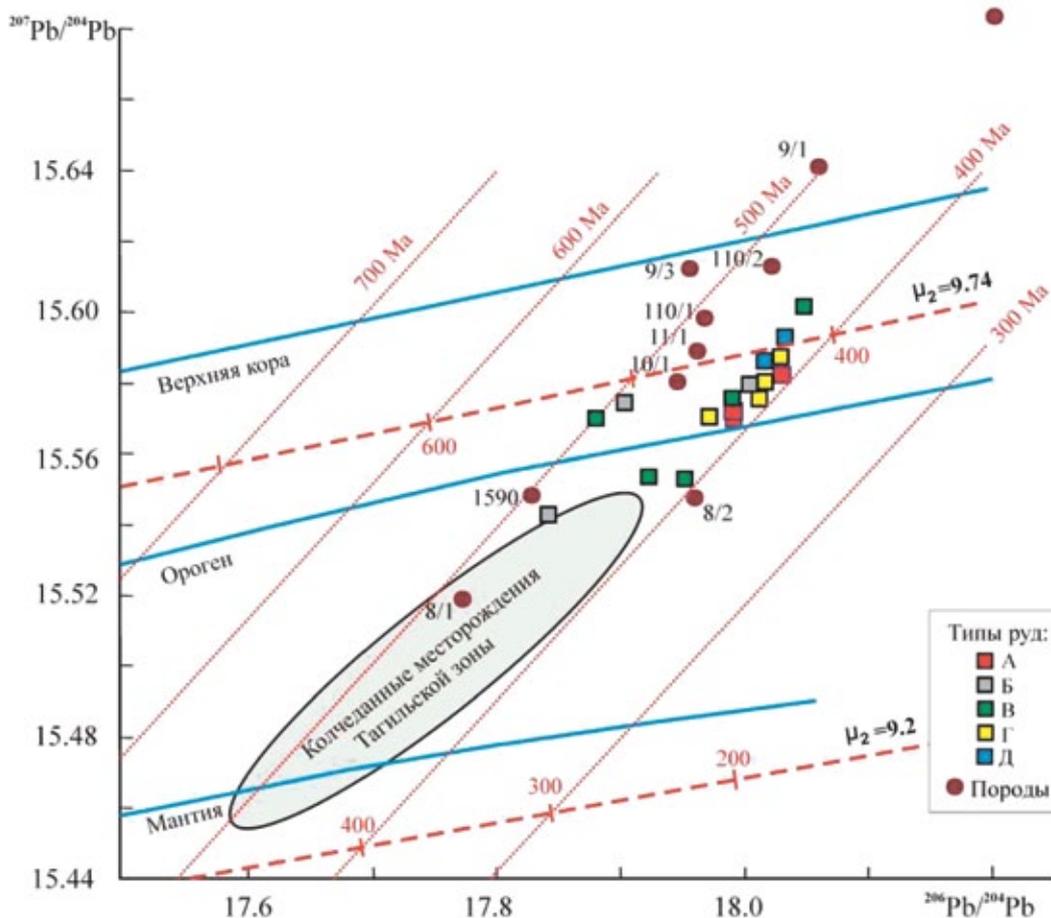


Рис. 3. Изотопный состав свинца галенита и скорректированный на возраст 400 млн лет изотопный состав свинца других сульфидов из различных типов руд и магматических пород Воронцовского месторождения.

Номера проб соответствуют таковым в табл. 2. На диаграмме приведены также кривые изотопного состава свинца мантии, орогена и верхней коры в модели Доу–Зартмана (Doe, Zartman, 1979), кривые и изохроны в модели Стейси–Крамерса (Stasey, Kramers, 1975) и положение поля изотопного состава галенита колчеданных месторождений Тагильской зоны на Среднем и Северном Урале (Викентьев и др., 2016).

Fig. 3. Lead isotopic composition of sulfides from various types of ores and igneous rocks of the Vorontsovskoe deposit, corrected for the age of 400 Ma.

Numbers of rock samples correspond to their numbers in the Table 2. The graph shows also the curves of lead isotope composition of the mantle, orogen and upper crust in the Doe–Zartman model (Doe, Zartman, 1979), evolution curves and isochrons in the Stasey–Kramers model (Stasey, Kramers, 1975) and the field of isotopic composition of galena from VMS deposits of the Tagil zone of the Middle and Northern Urals (Vikentyev et al., 2016).

наряду с их принадлежностью к модельному возрастному Pb–Pb кластеру 425–416 млн лет, не согласуется с точкой зрения на образование руд типа А в связи с особым послемезозойским импульсом тектоно-магматической активизации.

Тренды изотопного состава свинца, пересекающие эволюционные кривые в модели Доу–Зартмана на диаграмме $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, трактуются обычно как результат смешения мантийных и коровых источников, например, в (Чернышев и др., 2008; Чугаев и др., 2014). Участие корового и мантийного источников вещества при формировании руд Воронцовского месторождения было ранее по-

казано в работах (Murzin et al., 2017; Vikentyev et al., 2019) при изучении изотопов С, О, Sr и S. Изотопными исследованиями выявлены основные поставщики этих элементов – карбонатные отложения вмещающей толщи и глубинный магматический флюид. Установлено также, что магматический источник вносил основной или существенный вклад лишь при образовании руд в скарнах и джаспероидах (типы В и В) и был незначительным для других типов. Эта закономерность просматривается и на рис. 3, где демонстрируется сходство изотопного состава свинца некоторых проб сульфидов из околодайковых скарноидов (см. обр. Vor-908 и Vor 930

в табл. 2) и джаспероидов (проба 287/53.5), с одной стороны, с изотопным составом даек (преимущественно керсантитов и лампрофиров), несущих наименее радиогенный свинец, с другой.

Как было показано выше, И.В. Викентьевым с соавторами (Викентьев и др., 2016; Vikentyev et al., 2019) был выявлен единый тренд изменения изотопного состав свинца руд Воронцовского месторождения и колчеданных месторождений Среднего и Северного Урала (см. рис. 3) и сделано предположение о том, что преобладающий вклад в формирование этих месторождений имело мантийное вещество – из источника деплетированной мантии DMM-A типа, испытавшее флюидно-магматическое взаимодействие с коровым субстратом с величиной $\mu_2 = 9.74$. Изотопный состав свинца руд Воронцовского месторождения в этом тренде отражает резкое преобладание коровой компоненты над мантийной. Мы полагаем, что мантийное вещество транспортируется флюидным потоком из глубинного магматического очага (см. рис. 1). В качестве корового источника свинца выступает сульфидная минерализация, рассеянная во вмещающих силуро-девонских вулканогенно-осадочных породах. Свинец и другие компоненты гидротермальных растворов извлекаются из этих пород метаморфическим флюидом, освобождающимся при тепловом воздействии на породы внедряющихся магматических масс Ауэрбаховской интрузии. Не исключено, однако, что истинная модель эволюции гидротермальной системы рассмотрена в работе (Vikentyev et al., 2019), в соответствии с которой эти растворы были напрямую отделены от диорит-гранодиоритовой магмы корневых частей интрузива. Данный рудообразующий флюид был модифицирован при взаимодействии с вмещающими породами и в связи с добавлением глубинного мантийного флюида и метаморфической/метеорной воды.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенное нами исследование изотопного состава свинца руд и магматических пород, представленных на площади Воронцовского месторождения апофизами Ауэрбаховской интрузии и дайками среднего-основного состава, указывает на происхождение его золоторудной минерализации в результате смешения вещества, поступившего из мантийных и коровых источников.

2. Наиболее продуктивные руды характеризуются резким преобладанием коровой компоненты над мантийной. Коровый свинец, вероятно, привносился в руды метаморфическим флюидом, образующимся при тепловом воздействии магматических масс Ауэрбаховской интрузии на вмещающие сульфидизированные вулканогенно-осадочные породы. Первичный изотопный состав свинца флюида характеризовался, по-видимому, вели-

чиной $\mu_2 = 9.74$, отвечающей среднекоровым значениям. Свинец с мантийными метками транспортировался флюидным потоком из глубинного магматического очага.

3. Первичные изотопные составы свинца магматических пород и руд различны. Тем не менее свинец даек частично заимствовался при формировании сульфидно-магнетитовой минерализации в скарнах и сульфидной – в джаспероидах. “Мантийный” свинец в дайках, по-видимому, отражает природу их родоначальных магм, он мог частично заимствоваться расплавами из нижезалегающих мафических пород с колчеданными залежами, а “коровый” свинец рассматривается как результат ассимиляции вещества рамы при достижении магматическими расплавами верхнекорового уровня.

4. Показана хорошая сходимость результатов измерений свинцовых изотопных отношений в лабораториях ИГГ УрО РАН и ИГЕМ РАН.

Благодарности

Авторы благодарны рецензенту за глубокую и содержательную рецензию, позволившую улучшить качество статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Корякова О.В., Янченко М.Ю. (2011) Органическое вещество в рудах и вмещающих породах Воронцовского месторождения. *Ежегодник-2010*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 46-51.
- Баранников А.Г., Угрюмов А.Н. (2003) Проблемы эндогенного золотого рудогенеза мезозоя Урала. *Литосфера*, (1), 13-26.
- Бобров В.Н. (1991) Метасоматическая и сопровождающая золоторудная зональность на месторождении благородных металлов. *Рудоносные метасоматические формации Урала*. Свердловск: УрО АН СССР, 44-46.
- Бобров В.Н. (2013) Воронцовский клад. Поиски и открытия. Карпинск: Печатный дом “Перспектива”, 32 с.
- Викентьев И.В., Тюкова Е.Э., Мурзин В.В., Викентьева О.В., Павлов Л.Г. (2016) Воронцовское золоторудное месторождение. Геология, формы золота, генезис. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 206 с.
- Вотьяков С.Л., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Лепихина Г.А., Стрелецкая М.В., Солошенко Н.Г. (2011) Аналитический комплекс на базе TIMS Triton Plus и MC SF ICP-Ms Neptune Plus в Институте геологии и геохимии УрО РАН. *Ежегодник-2010*. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 158, 203-208.
- Грабежев А.И., Ронкин Ю.Л., Пучков В.Н., Гердес А., Ровнушкин М.Ю. (2014) Краснотурьинское медно-скарновое рудное поле (Северный Урал): U-Pb возраст рудоконтролирующих диоритов и их место в схеме металлогении региона. *Докл. АН*, **456**(4), 443-447.
- Мурзин В.В., Наумов Е.А., Ровнушкин М.Ю., Азовскова О.Б. (2017) Ag-Ag возраст золото-мышьяковых руд Воронцовского золоторудного месторождения (Сев. Урал, Россия). *Литосфера*, **17**(3), 127-132.
- Мурзин В.В., Сазонов В.Н., Ронкин Ю.Л. (2010) Модель формирования Воронцовского золоторудного ме-

- сторождения на Урале (карлинский тип): новые данные и проблемы. *Литосфера*, (6), 66-73.
- Нечкин Г.С., Ровнущкин М.Ю. (2011) Сульфидная око-лодайка минерализация на Воронцовском месторождении золота (Ауэрбаховский комплекс, Северный Урал). *Ежегодник-2010*. Тр. ИГТ УрО РАН. Вып. 158, 187-190.
- Ронкин Ю.Л., Стрелецкая М.В., Молошаг В.П., Нохрина Д.А., Лепихина О.П., Вотяков С.Л. (2012) Изотопы свинца и Рb-Рb модельный возраст галенитов Тамуньерского золоторудного месторождения: первые TLN MC ICP MS данные. *Материалы V Российской конференции по изотопной геохронологии "Геохронометрические изотопные системы, методы их изучения, хронология геологических процессов"*. М.: ИГЕМ РАН, 317-319.
- Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А. (1998) Воронцовское золоторудное месторождение – пример минерализации карлинского типа на Урале. *Геология рудн. месторождений*, **40**(2), 157-170.
- Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А., Гладковский Б.А. (1991) Эндогенное оруденение девонского андезитовидного вулcano-плутонического комплекса (Урал). Свердловск: УрО АН СССР, 184 с.
- Ферштатер Г.Б., Малахова Л.В., Бородин Н.С., Рапорт М.С., Смирнов В.Н. (1984) Эвгеосинклинальные габбро-гранитоидные серии. М.: Наука, 264 с.
- Черемисин А.А., Злотник-Хоткевич А.Г. (1997) Воронцовское золоторудное месторождение. *Руды и металлы*, (1), 59-70.
- Чернышев И.В., Викентьев И.В., Чугаев А.В., Шатагин К.Н., Молошаг В.П. (2008) Источники вещества колчеданных месторождений Урала по результатам высокоточного MC-ICP-MS изотопного анализа свинца галенитов. *Докл. АН*, **418**(4), 530-535.
- Чернышев И.В., Чугаев А.В., Шатагин К.Н. (2007) Высокоточный изотопный анализ Рb методом многоколлекторной ICP-масс-спектрометрии с нормированием по 205 Tl/203 Tl: оптимизация и калибровка метода для изучения вариаций изотопного состава Рb. *Геохимия*, (11), 1155-1168.
- Чугаев А.В., Плотинская О.Ю., Чернышев И.В., Котов А.А. (2014) Неоднородность изотопного состава Рb в сульфидах различных парагенетических ассоциаций на золоторудном месторождении Вернинское (Байкало-Патомское нагорье, Россия). *Докл. АН*, **457**(3), 337-342. DOI: 10.7868/S0869565214210191
- Azovskova O.B., Malyugin A.A., Nekrasova A.A., Yanchenko M.Yu. (2013) Pyrite from zones of MZ-KZ reactivation of large faults on the eastern slope of the Ural Mountains, Russia. *WASET. Engineer. Technol.*, **79**, London, 463-467.
- Azovskova O.B., Rovnushkin M.Yu., Soroka E.I. (2019) Petrochemical features of the dike complex of the Vorontsovskoye gold-ore deposit (Northern Urals). *News of the Ural State Mining University*, **53**(1), 18-27.
- Chen M., Zhang Z., Santosh M., Dang Y., Zhang W. (2015) The Carlin-type gold deposits of the "golden triangle" of SW China: Pb and S isotopic constraints for the ore genesis. *J. Asian Earth Sci.*, **103**, 115-128.
- Doe B.R., Zartman R.E. (1979) Plumbotectonics. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. (Ed. H.L. Barnes), Wiley, N.Y., 22-70.
- Liu J., Dai H., Zhai D., Wang J., Wang Y., Yang L., Mao G., Liu X., Liao Y., Yu C., Li Q. (2015) Geological and geochemical characteristics and formation mechanisms of the Zhaishang Carlin-like type gold deposit, western Qinling Mountains, China. *Ore Geol. Rev.*, **64**, 273-298.
- Murzin V.V., Naumov E.A., Azovskova O.B., Varlamov D.A., Rovnushkin M.Yu., Pirajno F. (2017) The Vorontsovskoe Au-Hg-As ore deposit (Northern Urals, Russia): Geological setting, ore mineralogy, geochemistry, geochronology and genetic model. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 271-298. DOI:10.1016/j.oregeorev.2016.10.037
- 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.
- Thompson J.F.H., Gale V.G., Tosdal R.M., Wright W.A. (2004) Characteristics and Formation of the Jerónimo Carbonate-Replacement Gold Deposit, Potrerillos District, Chile. *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.*, (11), 75-95.
- Tosdal R.M., Cline J.S., Fanning C.M., Wooden J.L. (2003) Lead in the Getchell-Turquoise Ridge Carlin-Type Gold Deposits from the Perspective of Potential Igneous and Sedimentary Rock Sources in Northern Nevada: Implications for Fluid and Metal Sources. *Econ. Geol.*, **98**, 1189-1211.
- Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Vikent'eva O.V., Chugaev A.V., Dubinina E.O., Prokof'ev V.Yu., Murzin V.V. (2019) Vorontsovka Carlin-style gold deposit in the North Urals: mineralogy, fluid inclusion and isotope data for genetic model. *Chem. Geol.*, **508**, 144-166. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.07.020>
- Wong K.-H., Zhou M.-F., Chen W.T., O'Brien H., Lahaye Y., Chan S.-L. J. (2017) Constraints of fluid inclusions and in-situ S-Pb isotopic compositions on the origin of the North Kostobe sediment-hosted gold deposit, eastern Kazakhstan. *Ore Geol. Rev.*, **81**, 256-269.

REFERENCES

- of SW China: Pb and S isotopic constraints for the ore genesis. *J. Asian Earth Sci.*, **103**, 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2014.08.022>
- Cheremisin A.A., Zlotnik-Khotkevich A.H. (1997) The Vorontsovka gold deposit. *Rudy i Metally*, (1), 59-70. (In Russian)
- Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Shatagin K.N. (2007) High-precision Pb isotope analysis by multicollector-ICP-mass spectrometry using $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}$ normalization: Optimization and calibration of the method for the studies of Pb isotope variations. *Geochem. Int.*, **45**(11), 1065-1076.
- Chernyshev I.V., Vikent'ev I.V., Chugaev A.V., Shatagin K.N., Moloshag V.P. (2008) Sources of material for massive sulfide deposits in the Urals: Evidence from the high-precision MC-ICP-MS isotope analysis of Pb in galena. *Dokl. Earth Sci.*, **418**(1), 178-183. DOI: 10.1134/S1028334X0801039X
- Chugaev A.V., Plotinskaya O.Yu., Chernyshev I.V., Kotov A.A. (2014) Lead isotope heterogeneity in sulfides from different assemblages at the Verninskoe gold deposit (Baikal-Patom Highland, Russia). *Dokl. Earth Sci.*, **457**(1), 887-892 DOI: 10.1134/S1028334X14070216
- Doe B.R., Zartman R.E. (1979) Plumbotectonics. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. (Ed. H.L Barnes). Wiley, N.Y., 22-70.
- Fershtater G.B., Malakhova L.V., Borodina N.C., Rapoport M.S., Smirnov V.N. (1984) *Evgeosinklinal'nye gabbro-granitoidnye serii* [Eugeosynclinal gabbro-granitoid series]. Moscow, Nauka Publ., 264 p. (In Russian)
- Grabezhev A.I., Ronkin Yu. L., Puchkov V.N., Gerdes A., Rovnushkin M.Yu. (2014) Krasnotur'insk skarn copper ore field, northern Urals: the U-Pb age of orecontrolling diorites and their place in the regional metallogeny. *Dokl. Earth Sci.*, **456**(2), 641-645.
- Liu J., Dai H., Zhai D., Wang J., Wang Y., Yang L., Mao G., Liu X., Liao Y., Yu C., Li Q. (2015) Geological and geochemical characteristics and formation mechanisms of the Zhaishang Carlin-like type gold deposit, western Qinling Mountains, China. *Ore Geol. Rev.*, **64**, 273-298. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2014.07.016
- Murzin V.V., Naumov E.A., Azovskova O.B., Varlamov D.A., Rovnushkin M.Yu., Pirajno F. (2017) The Vorontsovskoe Au-Hg-As ore deposit (Northern Urals, Russia): Geological setting, ore mineralogy, geochemistry, geochronology and genetic model. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 271-298. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.037
- Murzin V.V., Naumov E.A., Rovnushkin M.Yu., Azovskova O.B. (2017) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of gold-arsenic ores Vorontsovskoe gold deposit (the Northern Urals). *Litosfera*, **17**(3), 127-132. (In Russian)
- Murzin V. V., Sazonov V. N., Ronkin Yu. L. (2010) A formation model of the Vorontsovskoe gold deposit in the Urals (Carline type): New data and problems. *Litosfera*, (6), 66-73. (In Russian)
- Nechkin G.S., Rovnushkin M.Yu. (2011) Sulfide near-dyke mineralization at Vorontsovskoe gold deposit (Auerbach complex, Northern Urals). *Ezhegodnik-2010*. Tr. IGG UrO RAN. 158, 187-190. (In Russian)
- Ronkin Yu.L., Streletskaya M.V., Moloshag V.P., Nokhrina D.A., Lepikhina O.P., Votyakov S.L. (2012) The lead isotopes and Pb-Pb model age of galena of Tamunyer gold deposit: the first TLN MC ICP MS data. *Materialy V Rossiiskoi konferentsii po izotopnoi geokhronologii "Geokhronometricheskie izotopnye sistemy, metody ikh izucheniya, khronologiya geologicheskikh protsessov"* [Proceedings of the V Russian conference on isotope geochronology "Geochronometric isotope systems, methods of their study, chronology of geological processes"]. Moscow, IGEM RAS, 317-319. (In Russian)
- Sazonov V.N., Murzin V.V., Grigor'ev N.A. (1998). Vorontsovskoe gold deposit: An example of Carlin-type mineralization in the Urals, Russia. *Geol. Rudn. Mestorozhd.* **40**(2), 157-170. (In Russian)
- Sazonov V.N., Murzin V.V., Grigor'ev N.A., Gladkovskii B.A. (1991). *Endogennoe orudnenie devonskogo andezitoidnogo vulkano-plutonicheskogo kompleksa (Ural)* [Endogenous mineralization in the Devonian andesitoid volcano-plutonic complex (the Urals)]. Sverdlovsk, UB Akad. Nauk SSSR, 184 p. (In Russian)
- 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.
- Thompson J.F.H., Gale V.G., Tosdal R.M., Wright W.A. (2004) Characteristics and Formation of the Jerónimo Carbonate-Replacement Gold Deposit, Potrerillos District, Chile. *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.*, **11**, 75-95.
- Tosdal R.M., Cline J.S., Fanning C.M., Wooden J.L. (2003) Lead in the Getchell-Turquoise Ridge Carlin-Type Gold Deposits from the Perspective of Potential Igneous and Sedimentary Rock Sources in Northern Nevada: Implications for Fluid and Metal Sources. *Econ. Geol.*, **98**, 1189-1211.
- Vikent'ev I.V., Tyukova Ye.E., Murzin V.V., Vikent'eva O.V., Pavlov L.G. (2016) *Vorontsovskoe zolotorudnoe mestorozhdenie. Geologiya, formy zolota, genezis* [Vorontsovskoe gold deposit. Geology, gold modes, genesis]. Ekaterinburg, Fort Dialog-Iset' Publ., 206 p. (In Russian)
- Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Vikent'eva O.V., Chugaev A.V., Dubinina E.O., Prokof'ev V.Yu., Murzin V.V. (2019) Vorontsovsk Carlin-style gold deposit in the North Urals: mineralogy, fluid inclusion and isotope data for genetic model. *Chem. Geol.*, **508**, 144-166. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2018.07.020
- Votyakov S.L., Ronkin Yu.L., Lepikhina O.P., Lepikhina G.A., Streletskaya M.V., Soloshenko N.G. (2011) Analytical complex based on TIMS Triton Plus and MC SF ICP-Ms Neptune Plus at the Institute of Geology and Geochemistry UB of RAS. *Ezhegodnik-2010*. Tr. IGG UrO RAN, V. 158, 203-208. (In Russian)
- Wong K.-H., Zhou M.-F., Chen W.T., O'Brien H., Lahaye Y., Chan S.-L. J. (2017) Constraints of fluid inclusions and in-situ S-Pb isotopic compositions on the origin of the North Kostobe sediment-hosted gold deposit, eastern Kazakhstan. *Ore Geol. Rev.*, **81**, 256-269. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.004