



Научная статья
УДК 550.423



<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-50-59>

Свойства благородных металлов золоторудного месторождения Пионер

Сергей Михайлович Радомский^a, Валентина Ивановна Радомская^b

^{a,b}Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Радомский Сергей Михайлович, rsm@ascnet.ru

Резюме. Целью представленного исследования являлась оценка массовых долей группы благородных металлов (золота, серебра, платины, рутения, осмия, палладия, иридия, родия) в рудах и вмещающих породах месторождения Пионер (Верхнее Приамурье, Россия), определение их миграционной активности и гидрохимической классификации металлов рудных минералов по размерностям. Объектом исследования служили первичные и окисленные руды, а также породы, вмещающие эти оруденения. В ходе работ были использованы количественный химический анализ, а также микропробирная плавка с погрешностью по правильности, точности и воспроизводимости результата $\leq 30\%$. Пионер является гидротермальным, близповерхностным месторождением с окисленными и сульфидными типами руд, которые перерабатываются как открытым способом щелочного, кучного, цианидного выщелачивания, так и закрытым, автоклавным способом соответственно. Для осуществления данных способов переработки была построена золотоизвлекательная фабрика. Главным извлекаемым компонентом по этой технологии является золото, а серебро и металлы группы платины присутствуют в промышленных продуктах в виде примесей. Технология отличается высокой рентабельностью, что позволяет экономически эффективно перерабатывать руды с массовыми долями 1–4 ppm золота. Выполненная гидрохимическая классификация размеров минералов самородного золота показала, что основная часть золотин первичных, сульфидных и окисленных руд на 74–78 % приходится на фракцию с размерами 160–1000 мкм и на 11–13 % – на фракцию с размерами 16–40 мкм. Мелкое золото месторождения способствует его полному растворению в процессе цианирования.

Ключевые слова: геохимия, благородные металлы, распределение, золоторудное месторождение Пионер, Верхнее Приамурье

Для цитирования: Радомский С. М., Радомская В. И. Свойства благородных металлов золоторудного месторождения Пионер // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 1. С. 50–59. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-50-59>.

Original article

Features of noble metals at Pioneer gold deposit

Sergey M. Radomskii^a, Valentina I. Radomskaya^b

^{a,b}Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia

Corresponding author: Sergey M. Radomskii, rsm@ascnet.ru

Abstract. The purpose of the present study is to evaluate the mass fractions of the group of noble metals (gold, silver, platinum, ruthenium, osmium, palladium, iridium, rhodium) in the ores and host rocks of the Pioneer deposit (the Upper Amur Region, Russia) and to determine their migration activity and hydrochemical classification of ore metals by sizes. The object of the study is primary and oxidized ores, as well as rocks hosting this mineralization. The study employs the method of quantitative chemical analysis, micro assay melting with an error of correctness, accuracy and reproducibility of the results of $\leq 30\%$. Pioneer is a near surface hydrothermal deposit with oxidized and sulfide types of ores, which are processed both by the open method of alkaline heap cyanide leaching, and by the closed pressure method, respectively. A gold concentration plant was built to implement these processing methods. The main recoverable component of this technology is gold, whereas silver and platinum group metals are present in industrial products as impurities. The technology is highly profitable, which allows cost-effective processing of ores with the mass fractions of 1–4 ppm of gold. The performed hydrochemical classification of the sizes of native gold minerals has showed that the bulk of the nuggets (74–78 %) of primary, sulfide, and oxidized ores accounts for the fraction with the sizes of 160–1000 μm and 11–13 % account for the fraction with sizes of 16–40 μm . Fine gold of the deposit provides its complete dissolution during the cyanidation process.

© Радомский С. М., Радомская В. И., 2022



Keywords: geochemistry, noble metals, distribution, Pioneer gold ore deposit, Upper Amur Region

For citation: Radomskii S. M., Radomskaya V. I. Features of noble metals at Pioneer gold deposit. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(1):50-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-50-59>.

Введение

Первые рудопроявления месторождения Пионер были открыты у одноименной деревни Амурской области в последней четверти XX в. и имеют следующие координаты: 53°28'47"N; 126°30'12"E. Исследования по поиску и разведке выполняла Лаборатория химического анализа Амурского комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН в статусе технически компетентной и независимой испытательной лаборатории в системе сертификации ГОСТ Р (№ 00996) при Государственном комитете Российской Федерации по стандартизации и метрологии (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21ПР48) в 1989–2005 гг. Анализы на благородные металлы были выполнены авторами по технике, описанной зарубежными коллегами в источнике [1]. Отбор образцов с рудного поля производили сотрудники Амурского комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН. В Хабаровском крае были открыты месторождения металлов группы платины с концентрациями, достигающими промышленных значений в несколько десятков миллионных долей (ppm) – Кондёр, Чад и др. [2]. Вследствие этого представляется актуальным выполнить комплексное исследование на присутствие полной группы благородных металлов – золота, серебра и платиновых металлов [3]. Рудник «Пионер» находится в Амурской части сегмента Монголо-Охотского золотоносного пояса в пределах Умлеканского звена Северобуреинской золотоносной зоны [4]. В рамках исторической геологии в россыпях золота Дамбукинского рудно-россыпного узла обнаруживали минералы платиноидов [2]. В связи с этим целью представленного в данной статье исследования являлось определение значений средних концентраций благородных металлов в рудах месторождения Пионер, установление миграционных активностей и проведение гидрохимической классификации рудных металлов по размерностям. Потенциал Гиббса ΔG° показывает самопроизвольно протекающий химический процесс [5].

Материалы и методы исследования

Образцы проб минерального сырья в количестве 1–3 кг были измельчены до размерности <100 мкм, отквартованы и сокращены по рекомендациям Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов и Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н. М. Федоровского, применяемым при проведении физико-химических исследований золоторудных месторождений. Масса используемой лабораторной навески при анализах группы благородных металлов составила 10 г [6, 7].

Для гидрохимической классификации частиц благородных металлов готовились пульпы из измельченных до 75 мкм образцов первичных и окисленных руд [8].

Количественный химический анализ соответствовал третьей категории точности количественных определений с правильностью, приборной погрешностью и вариацией результата $\leq 30\%$. Для аналитического контроля были использованы стандарт № 1702-86 и стандарт № 1703-86 [6, 7, 9].

Платиновые металлы определялись микропробирной плавкой [7, 9] измельченных образцов минерального сырья до размеров <100 мкм. Металлы группы платины выщелачивались в колбу объемом 25 мл, и аликвоты определялись методом атомно-абсорбционного анализа. Результат контролировался методами инверсионного вольтамперометрического анализа [10]. В ходе работы использовались современные методические указания [11].

Соотношения ионных (окисленных) и металлических (восстановленных) форм составляют в сумме валовые концентрации благородных металлов. Они разделялись после кипячения в разбавленной соляной кислоте (1:4) и отфильтровывались холодными [12]. Ионные формы определяют миграционный потенциал $E_{\text{мигр.}}$, В, по формуле

$$E_{\text{мигр.}} = \frac{0,059}{n} \lg \frac{C_{\text{БМ}}^a}{C_{\text{БМ}}^q},$$



где n – количество отданных электронов; a – стехиометрический коэффициент при окисленной форме благородных металлов; q – стехиометрический коэффициент при восстановленной форме благородных металлов [13].

Для правильности результата образцы обрабатывались плавиковой кислотой, которая впоследствии отгонялась выпариванием.

Результаты исследования

Месторождение Пионер расположено у истоков р. Улунги и включает в себя зоны гидротермалитов с золотым оруденением, представленным в глинах и неогеновых озерно-аллювиальных песках, а рудные штокерковые зоны (Звёздочка, Западная, Южная, Промежуточная, Бахмут, Андреевская, Николаевская, Бахмут – Северо-Восточная, Эрозионная, Отвальная и др.) находятся в разломах и зонах трещиноватости [14].

Рудные зоны в своей центральной части сложены брекчиями с кварцевым цементом, к периферии переходящими в прожилково-окварцованные породы, в которых и формируются окисленные руды из сульфидных рудопроявлений первичных руд, где на массовую долю сульфидов приходится 5–8 % общего количества серы.

На месторождении до глубины 300 м выявлены элементы вертикальной зональности в распределении жильных рудных минералов и их ассоциаций. От приповерхностных и верхних горизонтов к нижним (глубоким) последовательно изменяются количественные отношения среди алюмосиликатных минералов [14]. Пример последовательности минералов из этого класса: гидрослюда (адуляр) → серицит → полевые шпаты. В этом же направлении происходит смена минеральных ассоциаций. От поверхности на глубину золото-карбонат-кварцевая ассоциация сменяется золото-адуляр-кварцевой, далее – золото-сульфосольно-антимонитовой и завершается золото-халькопирит-галенитовой ассоциацией. Вертикальная зональность местами переходит в боковые ответвления. Продуктивными в отношении золотого оруденения являются кварц-калишпат-серицит-альбитовые вторичные изменения, сопровождающиеся образованием

прожилков серого тонкозернистого коллоидного, белого фарфорообразного и друзовидного кварца, также с тонкими вкраплениями сульфидов, с баритом и сульфосолями свинца [15].

Рудные поля заняты интрузиями: субвулканическими гранит-порфирами, разнообразными гранодиоритами верхнеамурского комплекса, среднезернистыми роговообманковыми и биотит-роговообманковыми кварцевыми диоритами буриндинского комплекса, обладающими высокой намагниченностью. Существенное влияние на формирование месторождения оказал Покровский палеовулкан, находящийся примерно в 35 км, в жерле которого также сформировалось крупное золоторудное месторождение, границы рудных полей вследствие воздействий вулканогенного тепла и гидротермальных растворов также существенно расширились [16]. Снижение температуры золотосодержащего флюида вело к падению растворимости золота и к его отложению в рудовмещающих структурах месторождения Пионер (табл. 1).

Выделения золота можно дополнительно разделить на две подгруппы по пробе самородного золота: первая находится дальше от Покровского палеовулкана на северо-восточной возвышенности месторождения и имеет пробу 710–780 ‰, вторая находится в низине на юго-западе рудопроявления в древних руслах гидротермальных потоков, имеет пробу 800–980 ‰ и относится к гипергенной подгруппе руд. Цвет выделений самородного золота изменяется от светло-желтого до зеленоватого и сгущенного коричневатого в природных пленках. Это явление также описано в источнике [17], но в связи с тонкостью пленок широкого распространения оно не получило [18]. Показано, что руды гидротермальных золоторудных месторождений, расположенные вблизи от поверхности, испытывают окислительное воздействие вмещающей среды и подразделяются на первичные и окисленные руды, условная граница между которыми характеризуется окислительно-восстановительным потенциалом +0,36 В, обеспечиваемым равенством концентраций ионов $[Fe]^{3+} = [Fe]^{2+}$ или минералогическим критерием – равенством концентраций гематита и пирита.



Таблица 1. Массовые доли благородных металлов в первичных рудах, окисленных рудах и вмещающих породах золоторудного месторождения Пионер (числитель – интервал определяемых содержаний, знаменатель – среднее значение, n – число проб), а также их кларк в земной коре

Table 1. Mass fractions of noble metals in primary ores, oxidized ores and host rocks of the Pioneer gold deposit (numerator – interval of determining content, denominator – average value, n – number of samples), as well as their clarke in the earth's crust

Элемент	Массовая доля, ppm			Кларк в земной коре [19]
	Первичные руды, $n = 24$	Окисленные руды, $n = 24$	Вмещающие породы, $n = 24$	
Au	$\frac{1,24-3,96}{2,6}$	$\frac{0,79-3,37}{2,08}$	$\frac{0,031-0,055}{0,042}$	0,0025
Ag	$\frac{1,17-3,86}{2,52}$	$\frac{0,16-0,62}{0,39}$	$\frac{0,0011-0,0016}{0,0014}$	0,07
Pt	$\frac{0,45-0,59}{0,52}$	$\frac{0,41-0,56}{0,48}$	$\frac{0,0005-0,001}{0,0008}$	0,0004
Ru	$\frac{0,012-0,056}{0,034}$	$\frac{0,011-0,036}{0,023}$	$\frac{0,005-0,008}{0,007}$	0,0001
Os	$\frac{0,011-0,019}{0,015}$	$\frac{0,008-0,013}{0,011}$	$\frac{0,0001-0,0003}{0,0002}$	0,00005
Pd	$\frac{0,003-0,029}{0,016}$	$\frac{0,001-0,024}{0,012}$	$\frac{0,0004-0,0006}{0,0005}$	0,0004
Ir	$\frac{0,001-0,009}{0,005}$	$\frac{0,001-0,006}{0,003}$	$\frac{0,0001-0,0001}{0,0001}$	0,00005
Rh	$\frac{0,001-0,005}{0,003}$	$\frac{0,001-0,003}{0,002}$	$\frac{0,0002-0,0005}{0,0004}$	0,00006

Валовые концентрации благородных металлов статистически значимо превышают кларки в земной коре в несколько десятков раз в рудах и превышают до десятка раз концентрации во вмещающих породах. Исключением становится серебро, что является особенностью большинства месторождений Приамурья [13, 19] (см. табл. 1). Первичные и окисленные руды заключены во вмещающие породы, где основным минералом является альбит. Значительное влияние на руды месторождения оказывает окислительно-восстановительный потенциал, который убывает при продвижении в глубокие слои пород¹.

Рядовые геохимические пробы руд месторождения обеднены по золоту (0,8–4 ppm) и серебру (0,2–3,9 ppm), им сопутствуют массовые доли платиновых металлов в количествах до 0,7 ppm, которые не представляют промышленного интереса для переработки и извлечения (см. табл. 1). Тем не менее на рудном поле месторождения довольно часто встречаются выходы штокверков и рудных

столбов с концентрациями в них золота до 1830 ppm и серебра до 1032 ppm. Окисленные руды легче перерабатываются по технологическим схемам и имеют больший процент выхода золота и серебра вследствие природной работы окислительных процессов, предваряющих технологическую переработку руд и снижение материальных затрат компонентов технологии на окисление первичных руд, рентабельность добычи из которых не превышала 70 % [14]. В выходах штокверков и рудных столбов отмечались максимальные концентрации платиноидов, зачастую превосходящие данные (см. табл. 1).

Связей с глубинными процессами благороднометалльной минерализации установлено не было, поэтому закономерности оруденений, описанных в источниках [20, 21], не были выявлены [22].

Самородное золото на месторождении относится к разряду мелкого (табл. 2), что также благотворно сказывается на процессе щелочного кучного выщелачивания и позволяет

¹ Mann A. W., Mann A. T., Humphreys D. B., Dowling S. E., Staltari S., Myers L. Soil geochemical anomalies – their dynamic nature and interpretation: report. Perth: Mineral and Energy Research Institute of Western Australia, 1997. 184 p.



вести технологическую отработку с высокими показателями рентабельности производственного цикла. В табл. 2 отчетливо просматриваются два суммарных класса выделений минералов самородного золота по классу крупности образований: выделения 1–40 мкм, цементирующие выделения 1–3 мкм, доминирующие в первичных сульфидных выделениях руд, а также выделения 160–1000 мкм, характерные для зоны гипергенеза месторождения Пионер. С уменьшением размера минералов на них возрастает доля окисленных форм благородных металлов.

Значения концентраций окисленной формы благородных металлов, определяющих количества мигрирующих форм, представлены в табл. 3. Они находятся в одном интервале концентраций платиновых металлов в поверхностных водах, приведенных в исследованиях² [12, 20, 21]. Содержания растворенного кислорода до 10 мг/дм³ и озона до 0,9 мг/дм³ в природных водах Амурского региона обеспечивают более высокие значения окислительно-восстановительного потенциала среды до +2,07 В³.

На процесс миграции влияют электрические поля как восстановленных форм платиноидов, так и мигрирующих окисленных форм, создающих потоки рассеивания благородных металлов и являющихся маркерами для геохимических поисков месторождений платиноидов. При этом электрические поля проявляются как в твердом, так и в растворенном гидрохимическом состоянии благородных металлов⁴.

Элементы группы платины Верхнеамурской провинции представлены следующими минералами: платиной (Pt), сперрилитом (PtAs₂), иридосминами (Ir-Os), осмииридами (Os-Ir), полисульфидами из твердых смесей

ирарсита (IrAsS) [13]. Также окисными пленками на поверхности минералов самородных благородных металлов они образуют окисленные формы благородных металлов и имеют отрицательный потенциал миграционной составляющей в потоках геохимических ореолов рассеивания минералов рудных тел. Минеральные же формы представлены в основном самородными благородными металлами (см. табл. 3). В связи с этим при обработке раствором концентрированной соляной кислоты при кипячении все перечисленные выше минералы за исключением сплавов осмиридов и иридосминов растворяются и переходят в комплексные окисленные формы, представленные в табл. 3. На химические и механические компактные формы платиновых металлов очень сильное влияние оказывают примеси⁵. Химические свойства платиновых металлов тождественны для элементов, расположенных в подгруппе в одном столбце периодической таблицы химических элементов Д. И. Менделеева: Ru-Os, Rh-Ir, Pd-Pt. Наиболее химически активны из всех платиновых металлов осмий и рутений, наименее активны иридий и родий, платина и палладий⁶.

Заключение

В целях переработки руд месторождения Пионер был выбран открытый способ щелочного кучного цианидного выщелачивания, для осуществления которого была построена золотоизвлекательная фабрика. Фабрика работает круглогодично: в зимний период осуществляется подготовка / разборка куч конгломератов и извлечения золота из концентратов на конвейере для окисленных типов руд, тогда как в летний период осуществляется кучное выщелачивание. Технология

² Mann A. W., Mann A. T., Humphreys D. B., Dowling S. E., Staltari S., Myers L. Soil geochemical anomalies – their dynamic nature and interpretation: report. Perth: Mineral and Energy Research Institute of Western Australia, 1997. 184 p.

³ Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Альянс, 2007. 447 с.

⁴ Сенчина Н. П. Поиски коренной платиноидной минерализации путем изучения естественных электрических полей и ореолов рассеивания подвижных форм нахождения химических элементов: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2017. 155 с.

⁵ Сенчина Н. П. Поиски коренной платиноидной минерализации путем изучения естественных электрических полей и ореолов рассеивания подвижных форм нахождения химических элементов: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2017. 155 с.

⁶ Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Альянс, 2007. 447 с.



Таблица 2. Содержание золота и серебра во фракциях интервалов классификации микрометр для выборок минерального сырья первичных и окисленных типов руд месторождения Пионер (n – число проб)
Table 2. Gold and silver content in the fractions of the intervals of the micrometer classification for the samples of mineral raw materials of primary and oxidized ore types of the Pioneer deposit (n – number of samples)

Фракция, мкм	Первичные руды, $n = 24$		Окисленные руды, $n = 24$	
	Au, масс. %	Ag, масс. %	Au, масс. %	Ag, масс. %
3000–1000	0,38	0,21	0,24	0,12
1000–160	74,2	77,35	76,06	77,47
160–80	2,83	5,14	2,13	3,18
80–40	1,19	1,17	2,1	2,43
40–16	12,56	8,1	11,8	5,38
16–10	3,72	2,12	1,31	1,74
10–1	3,25	2,1	1,15	2
1–0,45	0,84	0,89	2,23	1,89
0,45–0,2	0,67	1,01	0,94	1,61
0,20–0,1	0,15	0,72	0,8	1,19
0,10–0,05	0,11	0,97	0,66	1,57
0,05–0,001	0,1	0,22	0,58	1,42
Концентрация, ppm	0,76	0,35	0,57	0,32

Таблица 3. Концентрации благородных металлов в мигрирующих формах и поверхностных водах золоторудного месторождения Пионер (числитель – интервал определяемых содержаний, знаменатель – среднее значение, n – число проб), а также их миграционный потенциал
Table 3. Concentrations of noble metals in migrating forms and surface waters of the Pioneer gold deposit (numerator – the interval of determining contents, denominator – average value, n – number of samples) and their migration potential

Элемент	Концентрация, ppm		Миграционный потенциал, В
	Мигрирующие формы, $n = 24$	Поверхностные воды, $n = 24$	
Au	$\frac{0,04-0,17}{0,09}$	$\frac{0,0002-0,0005}{0,00035}$	-0,13
Ag	$\frac{0,005-0,036}{0,01}$	$\frac{0,00011-0,00016}{0,00014}$	-0,24
Pt	$\frac{0,02-0,052}{0,022}$	$\frac{0,00002-0,00004}{0,00003}$	-0,1
Ru	$\frac{0,001-0,009}{0,005}$	$\frac{0,00002-0,00001}{0,00002}$	-0,14
Os	$\frac{0,0001-0,0002}{0,0002}$	$\frac{0,00001-0,00003}{0,00002}$	-0,22
Pd	$\frac{0,0002-0,0008}{0,0006}$		-0,19
Ir	$\frac{0,0001-0,0014}{0,0006}$	$\frac{0,00001-0,00001}{0,00001}$	-0,13
Rh	$\frac{0,0003-0,0006}{0,0004}$		-0,14

отличается высокой рентабельностью, что позволяет экономически эффективно перерабатывать руды с массовыми долями 1–4 ppm золота, характерные для месторождения. Главным извлекаемым компонентом по этой технологии является золото, а серебро и металлы группы платины присутствуют в промышленных продуктах в виде примесей. К

настоящему моменту запасы легкоцианируемых окисленных руд на месторождении закончились, а возможности расширения границ за счет соседних рудопроявлений достигли предела рентабельности. Для продолжения производственной деятельности на фабрике было установлено четыре автоклава для отжига сульфидной серы в «упорных» для



цианирования первичных типах руд. В автоклавах концентраты сульфидных руд окисляются при 500 К в течение получаса и далее перерабатываются по традиционной схеме, описанной выше. Эта технология отличается большей глубиной дезинтеграции минерального сырья, что увеличивает извлечение как главного компонента – золота, так и сопутствующих ему примесей других благородных металлов. Кроме того, при замене открытого способа переработки на закрытый значительно уменьшается токсическое влияние производства, оказываемое на окружающую среду.

Таким образом, на основе всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Для руд месторождения Пионер вулканогенного класса, относящихся к эндогенным первичным и экзогенным окисленным типам руд, впервые выполнена гидрохимическая классификация по размерам рудных минералов и определены средние сопутствующие концентрации металлов группы платины.

2. По классам крупности выделяются минералы самородного золота в рудах первичного типа, связанные с минералами вмещающей среды класса крупности 1–40 мкм, на которые приходится 16,5 % выделений минералов золота, и минералы самородного золота окисленных руд, связанные с минералами класса крупности 160–1000 мкм, на которые приходится 76 % выделений самородного золота.

3. Средние концентрации сопутствующих платиноидов для первичных и окисленных типов руд находятся в интервале <1 ppm и не достигают значений индивидуальной рентабельной промышленной переработки.

4. Методами термодинамики определены интервалы концентраций окисленных и восстановленных форм благородных металлов, а также соответствующие им миграционные потенциалы, имеющие отрицательные значения и сдерживающие трансграничную миграцию с рудного поля месторождения.

Список источников

1. Ferreira S. L. C, Bezerra M. A., Santos A. S., dos Santos W. N. L, Novaes C. G., de Oliveira O. M. C., et al. Atomic absorption spectrometry – a multi element technique // *Trends in Analytical Chemistry*. 2018. Vol. 100. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.12.012>.
2. Моисеенко В. Г., Степанов В. А., Эйриш А. В., Мельников А. В. Платиноносность Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2004. 176 с.
3. Ni W., Mao X., Zhang H., Liu L., Gao X., Xiao F. Lead fire assay preconcentration and high resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry for the determination of ultra-trace amounts of Au, Ir, Pd, Pt and Rh in rocks and minerals // *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*. 2019. Vol. 158. P. 105643. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2019.105643>.
4. Хомич В. Г., Борискина Н. Г. Геологическая позиция благороднометалльных месторождений интрузивно-вулканического обрамления Гонжинского выступа докембрия (Верхнее Приамурье) // *Тихоокеанская геология*. 2006. Т. 25. № 3. С. 53–65.
5. Гаррелс Р. М., Крайст Ч. Л. Растворы, минералы, равновесия / пер. с англ. М.: Мир, 1968. 368 с.
6. Кубракова И. В., Никулин А. В., Кощеева И. Я., Тютюнник О. А. Платиновые металлы в окружающей среде: содержание, определение, поведение в природных системах // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2012. Т. 20. № 6. С. 645–656.
7. Радомский С. М., Радомская В. И. Группа благородных металлов на Токурском золоторудном месторождении Приамурья // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2019. № 1. С. 51–56. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2019-1-51-56>.
8. Радомский С. М., Радомская В. И. Классификация выделений минералов самородного золота Покровского золоторудного месторождения Приамурья // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № 6. С. 88–92.
9. Ni W., Mao X., Zhang H. Determination of ultra-trace platinum, palladium, ruthenium, rhodium, and iridium in rocks and minerals by inductively coupled – plasma mass spectrometry following nickel sulfide fire assay preconcentration and open mixed acid digestion // *Analytical Letters*. 2019. Vol. 52. Iss. 11. P. 1699–1710. <https://doi.org/10.1080/00032719.2019.1566348>.
10. Колпакова Н. А. Определение платиновых металлов в минеральном сырье методом инверсионной вольтамперометрии (обзор) // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2014. Т. 80. № 9. С. 5–13.
11. Bedard L. P., Esbensen K. H., Barnes S. J. Empirical approach for estimating reference material heterogeneity and sample minimum test portion mass for “Nuggety” precious metals (Au, Pd, Ir, Pt, Ru) // *Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 88. Iss. 7. P. 3504–3511. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b03574>.
12. Kerstin L., Philippe A., Wörle K., Schaumann G. E. Analytical strategies to the determination of metal-containing nanoparticles in environmental waters // *Trends in Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 84. P. 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.03.026>.
13. Радомский С. М. Естественный миграционный



потенциал благородных металлов Монголо-Охотского золотоносного пояса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 1. С. 29–38.

14. Власов Н. Г., Курник Л. П. Роль субмеридиональных геологических структур в формировании рудных узлов Приамурья // Разведка и охрана недр. 2013. № 11. С. 7–11.

15. Хомич В. Г., Власов Н. Г., Борискина Н. Г., Маслаков В. С. Геологическая позиция и особенности строения Пионерного золоторудного месторождения (Верхнее Приамурье) // Геология, минералогия и геохимия месторождений благородных металлов Востока России и новые технологии переработки благороднометалльного сырья: сб. науч. тр. / ред. В. Г. Моисеенко, А. П. Сорокин. Благовещенск: Изд-во ИГиП ДВО РАН, 2005. С. 121–125.

16. Goldberg I. S. Vertical migration of elements from mineral deposits // Journal of Geochemical Exploration. 1998. Vol. 61. Iss. 1–3. P. 191–202. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00045-9).

17. Альбов М. Н., Быбочкин А. М. Рудничная геология. М.: Недра, 1973. 430 с.

18. Ивенсен Ю. П., Левин В. И. Генетические золотооруденения и золоторудные формации // Золоторудные формации и геохимия золота Верхояно-Чукотской складчатой области: сб. стат. / отв. ред. Ю. П. Ивенсен. М.: Наука, 1975. С. 5–120.

19. Wedepohl K. H. The composition of the continental crust // *Geochemica et Cosmochimica Acta*. 1995. Vol. 59. Iss. 7. P. 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2).

20. Mann A. W., Birrel R. D., Fedikow M. A. F., de Souza H. A. F. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration de Souza Geological Society of London // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2005. Vol. 5. Iss. 3. P. 201–210. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-045>.

21. Cameron E. M., Hamilton S. M., Leybourne M. I., Hall G. E. M., McClenaghan M. B. Finding deeply buried deposits using geochemistry // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2004. Vol. 4. Iss. 1. P. 7–32. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-019>.

22. Шнейдерхен Г. Рудные месторождения / пер. с нем. М.: Иностранная литература, 1958. 502 с.

References

1. Ferreira S. L. C., Bezerra M. A., Santos A. S., dos Santos W. N. L., Novaes C. G., de Oliveira O. M. C., et al. Atomic absorption spectrometry – a multi element technique. *Trends in Analytical Chemistry*. 2018;100:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.12.012>.

2. Moiseenko V. G., Stepanov V. A., Eirish A. V., Mel'nikov A. V. *Platinum reserves of the Far East*. Vladivostok: Dal'nauka; 2004. 176 p. (In Russ.).

3. Ni W., Mao X., Zhang H., Liu L., Gao X., Xiao F. Lead fire assay preconcentration and high resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry for the determination of ultra-trace amounts of Au, Ir, Pd, Pt and Rh in rocks and minerals. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*. 2019;158:105643. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2019.105643>.

4. Khomich V. G., Boriskina N. G. The geological position of precious-metal deposits of intrusive-volcanogenic framing of the Precambrian Gonzhinsky protrusion (Upper Priamurye). *Tikhookeanskaya geologiya*. 2006;25(3):53-65. (In Russ.).

5. Garrels R. M., Christ Ch. L. Solutions, minerals and equilibria; 1965. 450 p. (Russ. ed.: *Rastvory, mineraly, ravnovesiya*. Moscow: Mir; 1968. 368 p.).

6. Kubrakova I. V., Nikulin A. V., Koshcheeva I. Ya., Tyutyunnik O. A. Platinum metals in the environment: content, determination, behavior in natural systems. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2012;20(6):645-656. (In Russ.).

7. Radomskii S. M., Radomskaia V. I. Group of precious metals at the Tokur gold deposit of Priamurye. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri = Geology and mineral resources of Siberia*. 2019;1:51-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2019-1-51-56>.

8. Radomskii S. M., Radomskaya V. I. Classification of isolations minerals native gold of Pokrovskiy gold-ore layer

of the Amur Region. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;6:88-92. (In Russ.).

9. Ni W., Mao X., Zhang H. Determination of ultra-trace platinum, palladium, ruthenium, rhodium, and iridium in rocks and minerals by inductively coupled – plasma mass spectrometry following nickel sulfide fire assay preconcentration and open mixed acid digestion. *Analytical Letters*. 2019;52(11):1699-1710. <https://doi.org/10.1080/00032719.2019.1566348>.

10. Kolpakova N. A. Stripping voltammetry in determination of platinum group metals in mineral raw materials (review). *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2014;80(9):5-13. (In Russ.).

11. Bedard L. P., Esbensen K. H., Barnes S. J. Empirical approach for estimating reference material heterogeneity and sample minimum test portion mass for "Nuggety" precious metals (Au, Pd, Ir, Pt, Ru). *Analytical Chemistry*. 2016;88(7):3504-3511. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b03574>.

12. Kerstin L., Philippe A., Wörle K., Schaumann G. E. Analytical strategies to the determination of metal-containing nanoparticles in environmental waters. *Trends in Analytical Chemistry*. 2016;84:107-120. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.03.026>.

13. Radomskiy S. M. Natural migration potential of noble metals of Mongol-Okhotsk gold belt. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(1):29-38. (In Russ.).

14. Vlasov N. G., Kurnik L. P. Role of submeridional geological structures in the formation of ore clusters in the Amur region. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*. 2013;11:7-11. (In Russ.).



15. Khomich V. G., Vlasov N. G., Boriskina N. G., Maslakov V. S. Geological position and structural features of the Pioneer gold field (Upper Amur Region). In: Moiseenko V. G., Sorokin A. P. (eds.). *Geologiya, mineralogiya i geokhimiya mestorozhdenii blagorodnykh metallov Vostoka Rossii i novye tekhnologii pererabotki blagorodnometall'nogo syr'ya = Geology, mineralogy and geochemistry of precious metal deposits in the Russian East and new processing technologies for precious metal raw materials*. Blagoveshchensk: Institute of Geology and Nature Management FEB RAS; 2005, p. 121–125. (In Russ.).

16. Goldberg I. S. Vertical migration of elements from mineral deposits. *Journal of Geochemical Exploration*. 1998;61(1-3):191-202. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00045-9).

17. Al'bov M. N., Bybochkin A. M. *Mining geology*. Moscow: Nedra; 1973. 430 p. (In Russ.).

18. Ivensen Yu. P., Levin V. I. Genetic gold mineralizations and gold formations. In: Ivensen Yu. P. (ed.). *Zolotorudnye formatsii i geokhimiya zolota Verkhoyano-Chukotskoi skladchatoi oblasti = Gold ore formations and*

gold geochemistry of the Verkhoyansk-Chukotka folded region. Moscow: Nauka; 1975, p. 5–120. (In Russ.).

19. Wedepohl K. H. The composition of the continental crust. *Geochemica et Cosmochimica Acta*. 1995;59(7):1217-1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2).

20. Mann A. W., Birrel R. D., Fedikow M. A. F., de Souza H. A. F. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration de Souza Geological Society of London. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2005;5(3):201-210. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-045>.

21. Cameron E. M., Hamilton S. M., Leybourne M. I., Hall G. E. M., McClenaghan M. B. Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2004;4(1):7-32. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-019>.

22. Schneiderhöhn H. Ore deposits; 1942. 502 p. (Russ. ed.: *Rudnye mestorozhdeniya*. Moscow: Inostrannaya literatura; 1958. 502 p.).

Информация об авторах / Information about the authors



Радомский Сергей Михайлович,

кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник Лаборатории рудогенеза,
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
г. Благовещенск, Россия,
rsm@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8522-5510>.

Sergey M. Radomskii,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher of the Ore Genesis Laboratory,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, Russia,
rsm@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8522-5510>.



Радомская Валентина Ивановна,

кандидат химических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории биогеохимии,
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
г. Благовещенск, Россия,
radomskaya@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3023-7565>.

Valentina I. Radomskaya,

Cand. Sci. (Chem.),
Leading Researcher of the Biogeochemistry Laboratory,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, Russia,
radomskaya@ascnet.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3023-7565>.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.



Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 03.12.2021; одобрена после рецензирования 12.01.2022; принята к публикации 09.02.2022.

The article was submitted 03.12.2021; approved after reviewing 12.01.2022; accepted for publication 09.02.2022.