

## ГРУППА БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ТОКУРСКОМ ЗОЛОТОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ПРИАМУРЬЯ

С. М. Радомский, В. И. Радомская

Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия

Комплексное извлечение полезных компонентов из рудного минерального сырья становится все более актуальным. Методами химического и атомно-абсорбционного анализа впервые выполнено дополнительное исследование разрабатываемого крупного дальневосточного Токурского золоторудного месторождения на платиновую минерализацию. В результате получена полная характеристика месторождения по всей группе благородных металлов (Ru, Rh, Pd, Ag, Os, Ir, Pt, Au). Показано, что платиновая минерализация не достигает промышленных значений, а носит лишь сопутствующий характер с концентрациями в рудах менее 1 г/т. Установлено, что электроплавка сульфидных руд увеличивает извлечение металлов группы платины в штейн примерно в 100000 раз, что делает этот способ концентрирования весьма перспективным при наличии дешевой электроэнергии.

**Ключевые слова:** геохимия, благородные металлы, распределение, Токурское месторождение, Приамурье.

## GROUP OF PRECIOUS METALS AT THE TOKUR GOLD DEPOSIT OF PRIAMURYE

S. M. Radomskii, V. I. Radomskaia

Institute of Geology and Natural Management, FEB RAS, Blagoveshchensk, Russia

The complex extraction of useful components from ore mineral raw materials has recently become more and more relevant. For the first time the large-scale Far East Tokurskoye gold field was additionally studied for platinum mineralization using chemical and atomic absorption analysis methods. As a result, a full characteristic of the field was obtained for the whole group of precious metals (Ru, Rh, Pd, Ag, Os, Ir, Pt, Au). It is shown that platinum mineralization does not reach industrial values, but it is only concomitant at concentrations in ores less than 1 g/t. It has been established that the electric smelting of sulphide ores increases the extraction of platinum metals into matte by  $\approx 100,000$  times, which makes this method of concentration very promising in the presence of cheap electricity.

**Keywords:** geochemistry, precious metals, distribution, Tokur deposit, Priamurye.

DOI 10.20403/2078-0575-2019-1-51-56

Приамурье – один из старейших золотодобывающих регионов России, где добыча осуществлялась традиционными способами с середины XIX в. [6]. Основные золотороссыпные площади располагаются в пределах орогенных областей, а также вдоль периферии Амуро-Зейской равнины, охватывая разновысотные ландшафты. В Амурской области месторождения золота, золотоносные и платиноносные площади обособлены в 46 золотоносных и 7 потенциально платиноносных рудно-россыпных узлах, занимающих 45 % территории региона. Здесь отмечались случаи попутного извлечения выделений минералов группы платины размерами до 3 мм [8].

Токурское золоторудное месторождение было открыто в 1939 г. За время его эксплуатации было извлечено около 35 т золота. В лучшие времена производительность достигала 1,4 т золота в год, в последнее время качество запасов ухудшилось, добыча стала нерентабельной и сократилась до десятков килограммов в год. Рудное поле вскрыто горными выработками по вертикали до 400 м и по простиранию до 5 км (длиной примерно 130 км). Рудные тела, именуемые на месторождении кварцевыми жилами, образовались в результате цементации и метасоматического замещения рудным кварцем

материала дробления продольных близосогласных тектонических зон. Промышленные золоторудные жилы залегают в зоне контакта нижней песчаниковой и верхней аргиллитовой толщ, большая часть жил (90 %) не достигает поверхности. Средняя проба золота на месторождении 650–800 ‰ [12].

Золотосодержащие руды легко обогащаются по гравитационным и флотационным схемам. Основная часть золота была извлечена по классическим гравитационным схемам [12], меньшая – электроплавкой сульфидных руд, введенной в промышленную переработку в 1950–1960 гг. [10]. Штейн, получавшийся в результате сплавления, содержал золото и серебро, обогащенное платиновыми металлами до следующих средних значений: Pt 0,01 %; Pd 0,005 %; Ir 0,001 %; Os 0,001 %; Ru 0,0005 %; Rh 0,0001 %. Групповое коллективирование благородных металлов на никелевый штейн также используется и в аналитической геохимической лабораторной практике [5]. При анализах содержаний благородных металлов (БМ) в рудах и минеральном сырье следуют указаниям, предписываемым методиками государственных стандартов и аттестованными отраслевыми методиками Министерства природных ресурсов России [4, 5]. В целях комплекс-

ного использования руд месторождения представляется актуальным дополнительное исследование на содержание всей группы БМ, в которой, кроме золота, находятся серебро и металлы группы платины (МГП). Серебро входит в состав минералов самородного золота, и часто их минерализацию рассматривают совместно, тогда как минерализация МГП менее изучена.

Целью работы являлось дополнительное исследование платиновой минерализации в рудах Токурского золоторудного месторождения Приамурья.

### Материалы и методы исследования

В работе использованы и проанализированы образцы руд (32 пробы), вскрышных пород (13 проб) и подземных шахтных вод (9 проб). Количественное определение содержаний БМ в минеральном сырье, включая золото, серебро и МГП, проведено после отжига проб при температуре 650 °С в течение 1,5 ч для устранения мешающих определению влияний сульфидов, арсенидов и органического углерода [4]. Образцы подземных шахтных вод анализировались непосредственным внесением аликвоты в графитовую печь при электротермическом способе атомно-абсорбционного анализа. Навески проб золота и серебра 5–10 г вскрывались раствором смеси кислот HCl и HNO<sub>3</sub> в отношении 3:1 с последующим экстракционным атомно-абсорбционным определением золота в растворе 0,05 М дибутилсульфида в метилбензоле и иодидных комплексов серебра в растворе 3-метилбутанола-1 [1]. Методика определения металлов группы платины заключалась в концентрировании элементов из навески 10 г путем предварительного сплавления на никелевый штейн [5], последующем растворении его в растворе 6 М соляной кислоты и отделении нерастворимого остатка, содержащего элементы группы платины. Далее полученный остаток сплавлялся с пероксидом натрия, выщелачивался бидистиллированной водой и переводился в мерную колбу объемом 25 см<sup>3</sup>. Из нее отбирались аликвоты на дальнейшие раздельные определения металлов: аликвота осмия растворялась в 0,1 М уксуснокислом растворе, а остальных – в 2–3 М растворе HCl. Массовые доли рутения, осмия и иридия определяли кинетическим, каталитическим и фотоколориметрическими методами соответственно. Вторичное концентрирование платины, палладия, родия проводили методом экстракции смесью 0,025 М растворов ди-2-этилгексилдитиофосфорной кислоты и орто-алкиланилина в метилбензоле из 2–3 М раствора HCl [9]. Анализы выполняли на атомно-абсорбционных спектрофотометрах «Hitachi 180–50» и «SOLAAR M-6».

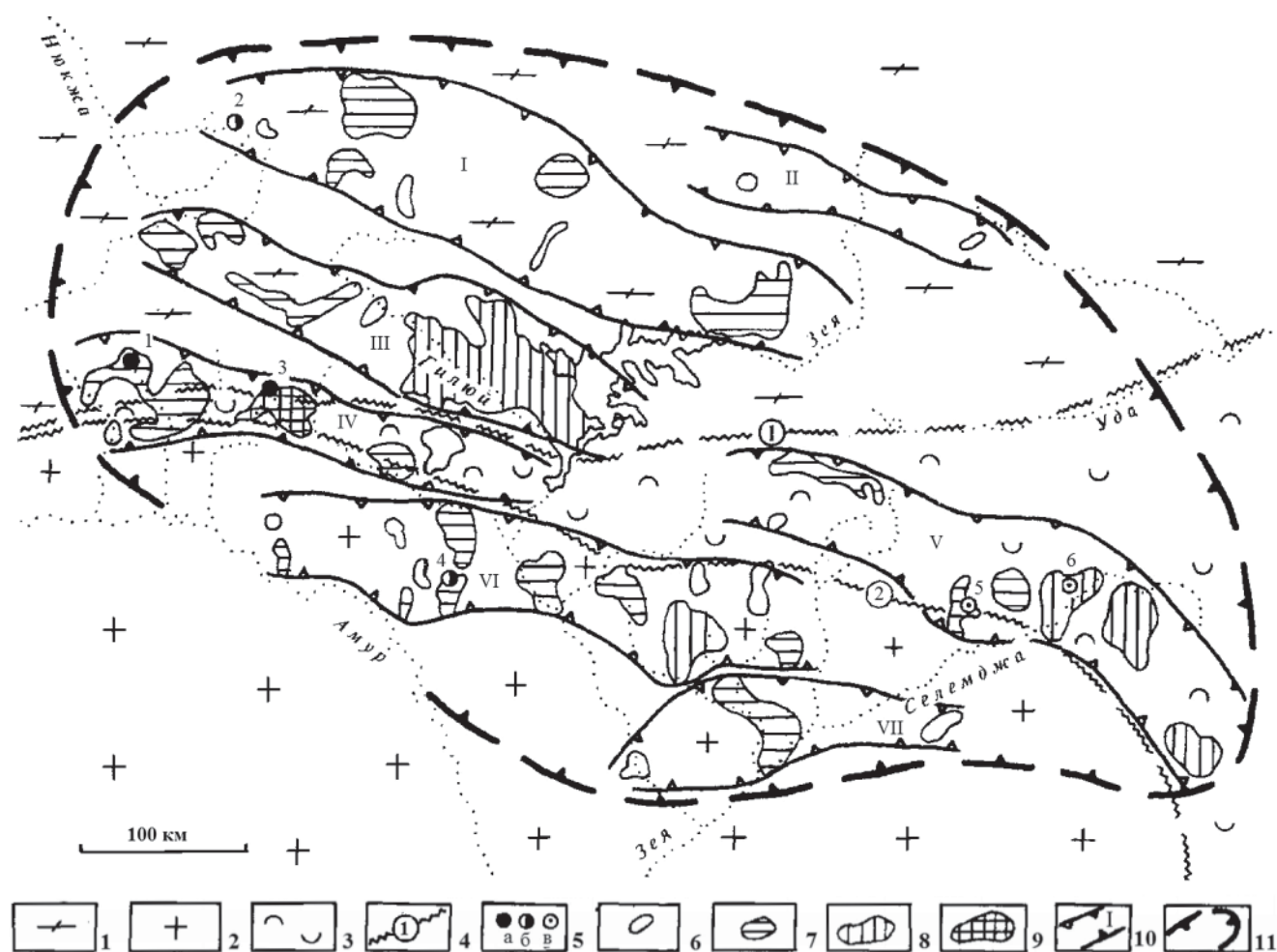
В природной среде БМ распределены крайне неравномерно, поэтому при исследовании их роли и поведения в геохимических объектах необходимо надежно и точно определять следовые количества, что задается условиями использования представи-

тельной навески для применяемых методов. Необходимо также и использование накопленного опыта в современных эффективных схемах анализов, связанных с предварительной подготовкой, отделением от матрицы и концентрированием как МГП, так и всей группы БМ. Это позволяет избавиться от матричного эффекта и значительно повысить соотношение сигнал/шум [1, 2, 4, 5, 9].

### Результаты и обсуждение

Токурское рудное поле расположено на участке сочленения Буреинского массива и Алданского щита Монголо-Охотского золотоносного пояса в зоне его Джагдинского поднятия в южной части Селемджинского участка и содержит жильные малосульфидные рудопоявления золото кварцевой формации. Оно находится в Селемджинском районе восточной части Амурской области в верховьях р. Селемджа в долине руч. Токур, расположенного над одноименным разломом субмеридионального направления с координатами 53°9'0" с. ш. и 132°52'0" в. д. Месторождение плутоногенно-метаморфогенного класса гидротермальной группы, мезотермального типа с окисленным типом руд, приуроченных к углеродсодержащим терригенным слабометаморфизированным толщам Амуро-Охотской геосинклинально-складчатой системы (см. рисунок) [11]. Сформировалось на глубине 1–1,5 км, на что указывает обилие порфировых структур в гранитоидах. Вмещающими породами для него являются переслаивающиеся серицитизированные песчаники и алевролиты средневерхнепалеозойского возраста. Вмещающие терригенные толщи и рудные тела испытали тектонические воздействия, смятия и растяжения. Дорудный этап характеризуется общим горизонтальным сжатием субмеридионального направления. На рудную фазу пришлось субширотное растяжение, а на пострудную – субмеридиональное сжатие до постепенного снижения и выравнивания литостатического давления. Разрывы, в фазе растяжений достигавшие 5–10 м, были установлены по инженерным подземным разработкам. Сжатия достигают 5 м по отдельным слоям. Метасоматические кварциты образуют линейно вытянутые зоны и полосы с заливообразными выступами, линзовидными раздувами и пережимами. Сложная морфология этих зон обусловлена физико-химическими свойствами пород. Размеры зон достигают нескольких десятков метров, их направление не зависит от простирания пликтивных структур, отражая конфигурацию разломов [12].

Терригенные породы прорваны небольшими штоками кварцевых диоритов, диоритов, плагиогранит-порфиров, диоритовых порфиритов, возраст которых трактуется от среднеюрского до мелового. На месторождении известно около 1200 золотоносных кварцевых жил, зон прожилкового окварцевания, окварцованных зон дробления кулисного типа. Вмещающими породами служат чернослан-



Приамурская золотоносная провинция (по В. А. Степанову [12])

1 – Становая складчато-блоковая система; 2 – Буреинский срединный массив; 3 – Амуро-Охотская геосинклинально-складчатая система; 4 – границы геоблоков, представленные глубинными разломами: Монголо-Охотским (1) и Южно-Тукурингским (2); 5 – месторождения золота: плутогенного (а), вулканогенного (б) и плутогенно-метаморфогенного (в) классов (1 – Березитовое, 2 – Бамское, 3 – Кировское, 4 – Покровское, 5 – Маломырское, 6 – Токурское); 6–9 – золотороссыпные узлы, содержащие россыпи с суммой добытого и разведанного золота (т): 6 – 0,1–0,9; 7 – 1–9; 8 – 10–90; 9 – >100; 10 – границы металлогенических зон (I – Северо-Становая, II – Чапско-Майская, III – Джелтулакская, IV – Янкано-Тукурингская, V – Джагды-Селемджинская, VI – Северо-Буреинская, VII – Чагойан-Быссинская); 11 – контур провинции

цевые толщи, представленные аргиллитами, алевролитами и песчаниками токурской и экимчанской свит. Временной интервал оруденения определен  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом по гидротемально измененным породам и оценивается в 133–112 млн лет [11], а по возрасту адуляра из продуктивной минеральной ассоциации основного кварцево-рудного тела – 122,4±2,0 млн лет. Учитывая отложение адуляра и золота в составе единой ассоциации, возраст может быть распространен на первичные руды изученного месторождения [3, 7].

Мощность кварцевых жил в среднем до 0,5 м, протяженность от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Жилы составляют серии коротких кулисообразных тел. Дайки диабазовых порфириров являются уже пострудными образованиями, пересекающими кварцевые жилы и зоны метасоматического окварцевания. Морфология их проста и определяется ровными и слабоволнистыми контактами с вмещающими породами. Штоки диоритов

овальной формы имеют незначительные размеры (до 3000 м<sup>2</sup>) и почти вертикальные контакты с вмещающими породами. Штоки пересекают метасоматические кварциты, золотокварцевые жилы и дайки диабазовых порфириров, образуя цепочки субмеридионального северо-восточного направления, аналогичного расположению даек. Кварц-карбонатные и карбонатные жилы пострудной стадии мощностью до 0,1 м и протяженностью несколько десятков метров пересекают метасоматические кварциты, золотокварцевые жилы, дайки диабазовых порфириров и штоки диоритов, самостоятельно заполняя разноориентированные трещины. Поздние нарушения представлены зонами дробления (до нескольких десятков метров). На рудном поле выявлены концентрации золота в жилах в интервале абсолютных отметок 900–100 м, а наиболее богатые руды добывались на отметках 800–700 м. Рудные жилы богаче в верхней части, особенно близ поверхности, с глубиной содержание золота уменьшается. На го-



Валовые концентрации благородных металлов в руде, вмещающих породах и подземных шахтных водах  
Токурского золоторудного месторождения

Элемент	Рудные породы (32 пробы)	Вмещающие породы (13 проб)	Подземные шахтные воды (9 проб)	Кларк в земной коре [14]
Ru	<u>0,068–0,092</u> 0,080	<u>0,008–0,036</u> 0,022	<u>0,0001–0,0002</u> 0,0002	0,0001
Rh	<u>0,021–0,055</u> 0,038	<u>0,002–0,005</u> 0,004	<u>0,00003–0,00005</u> 0,00004	0,00006
Pd	<u>0,032–0,062</u> 0,047	<u>0,003–0,006</u> 0,005	<u>0,0001–0,0003</u> 0,0002	0,0004
Ag	<u>0,74–1,06</u> 0,90	<u>0,016–0,062</u> 0,039	<u>0,0011–0,0016</u> 0,0014	0,07
Os	<u>0,080–0,118</u> 0,099	<u>0,008–0,018</u> 0,013	<u>0,0001–0,0003</u> 0,0002	0,00005
Ir	<u>0,094–0,136</u> 0,115	<u>0,009–0,026</u> 0,017	<u>0,0001–0,0001</u> 0,0001	0,00005
Pt	<u>0,42–0,68</u> 0,55	<u>0,033–0,045</u> 0,039	<u>0,0002–0,0004</u> 0,0003	0,0004
Au	<u>1,52–2,34</u> 1,93	<u>0,072–0,375</u> 0,224	<u>0,002–0,005</u> 0,0035	0,0025

Примечание. В числителе – интервал определяемых содержаний, в знаменателе – среднее значение, г/т.

ризонте ниже 700 м среднее содержание золота по блокам 10–30 г/т, выше 700 м – 40–100 г/т, а близ поверхности – уже 150–200 г/т. Самые богатые руды были охристыми и окисленными [11], а в отдельных рудных жилах концентрации золота достигали 500 г/т [7]. На месторождении БМ распределены крайне неравномерно. Повышенные их содержания фиксировались только в рудных жилах при сверхнормативном расхождении по интервалам, достигая следующих максимальных значений (г/т): Ru 0,1, Rh 0,07, Pd 0,1, Ag 155, Os 0,2, Ir 0,3, Pt 0,9, Au 250. По отраслевым правилам обработки первичной геохимической информации в расчет результатов, представленных в таблице, они не попали [4, 5].

Рудные тела малосульфидные, состоят из кварца, адуляра, серицита, хлорита и кальцита. Рудные минералы представлены арсенопиритом, пиритом, галенитом, сфалеритом и самородным золотом. Реже встречаются халькопирит, шеелит, пирротин и блеклые руды. Золото находится в свободном состоянии размерности 0,25–3 мм. Проба его меняется от 600 до 800 ‰, в среднем по месторождению 710 ‰ [11]. По химическому составу руды содержат (%) нерудные (SiO<sub>2</sub> 62,5) и рудные (Fe 8, S 3, As 4, Sb 0,5, Bi 0,3, Zn 0,5, Cu 0,3, Pb 0,2, W 0,2, Hg 0,1) компоненты. В золото кварцевых жилах наблюдается тенденция увеличения с глубиной количества шеелита, арсенопирита, сфалерита и уменьшения пирита и галенита. При этом концентрация золота убывает незначительно, а проба его возрастает до 760 ‰ [6].

Золото, серебро и МГП выделялись на всех этапах гидротермального процесса от самого начала до конца, образуя средне- и низкотемпературные генерации низкопробного золота. С понижением температуры образования в золотоносных рудах падает проба золота, а также концентрации золота

и металлов группы платины, тогда как концентрации серебра увеличиваются вплоть до образования им самостоятельных минеральных фаз. В целом следует отметить, что формирование минеральных ассоциаций и порядок кристаллизации минералов отдельных ассоциаций на месторождении не отвечает идеальной последовательности отложения минералов В. Линдгрена и др., выявленной на основании изучения многих гидротермальных месторождений [6]. Минерализация МГП была образована частично в примесных концентрациях из сульфидизированной магмы, представлена мелкодисперсными (до 100 мкм) частицами и характеризуется следующими минералами ассоциаций: сперрилит, иридо-смины, реже самородная платина, изоферроплатина, палладий, а также эрлихманит, лаурит и другие сульфиды, арсениды и сульфоарсениды [8].

Валовые концентрации БМ для образцов рудных пород (см. таблицу) статистически значимо превышают их концентрации в земной коре [14]: для подгруппы легких БМ (Ru, Rh, Pd) – для платиновых металлов в сотни раз, а для серебра – всего в 13 раз. Это, на наш взгляд, обусловлено более высокой миграционной способностью легких платиновых металлов по сравнению с тяжелыми и особенностью территориальной минерагении серебра, отчетливо выраженной для всего Приамурья [2]. Подгруппа тяжелых БМ (Os, Ir, Pt, Au) превышает соответствующие концентрации в земной коре примерно в 1000 раз, что указывает на большую склонность к минеральному концентрированию. Электроплавка сульфидных концентратов применяется для переработки материалов с широким интервалом размера кусков, приготовленных разными способами: мелкой руды, окатышей из концентратов, агломерата. Физико-химические превращения шихтовых материалов и образование продуктов





плавки происходят в ванне печи при 1000 °С на поверхности шихты, погруженной в шлак. Сульфиды расплавляются, растворяясь друг в друге, образуя основной продукт плавки – штейн, в котором также растворяются и благородные металлы. В результате образуется смесь жидких компонентов штейна ( $\text{Ni}_3\text{S}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{CoS}$ ,  $\text{FeS}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Au}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Pt}$ ,  $\text{Pd}$ ,  $\text{Ir}$ ,  $\text{Os}$ ,  $\text{Ru}$ ,  $\text{Rh}$ ). Штейн и шлак легко отделяются друг от друга при остывании [13]. Пробирное концентрирование платиноидов, достигаемое в представленном штейне, превышает их концентрации в земной коре [14] почти в 100000 раз, что делает способ электроплавки весьма перспективным при наличии дешевой электроэнергии.

Золоторудные жилы сопровождаются устойчивыми первичными геохимическими ореолами рассеивания золота и серебра шириной 5–20 м, а попутно мышьяка и вольфрама [12]. Кроме значительных примесей серебра, в них также отмечаются ртуть и медь [11]. Для группы БМ первичные геохимические ореолы рассеивания во вмещающих породах (см. таблицу) имеют 100-кратное превышение по сравнению с их кларками в земной коре, и лишь для серебра превышение концентраций достигает первого десятка значащих цифр кларка, что обусловлено его относительной распространенностью и высокой миграционной способностью [9].

Подземные шахтные воды являются сильно-кислыми (рН 1–3) и имеют слабовосстановительную среду, занимая интервал значений окислительно-восстановительного потенциала (Еh 0,09–0,3) Вольта, что создает возможность существования растворенных комплексных сульфидных форм БМ, благодаря процессам гидролиза сульфидных руд и водороду, диффундирующему из глубин земной коры по разлому [9]. В результате обогащение БМ подземных вод почти достигает значений их кларковых концентраций в земной коре (см. таблицу).

## Выводы

Современная золотодобыча на Токурском месторождении ведется артельным способом по устаревшим технологиям гравитационного обогащения в объемах нескольких десятков килограммов в год. В последнее время качество запасов руды ухудшилось, и добыча золота стала малорентабельной. Нижняя граница рентабельности такой золотодобычи – 2 г/т, что хуже среднего показателя в промышленности в 20 раз. По геологической обстановке Токурское рудное поле перспективно на оруденение БМ в этом районе, и дальнейшее развитие золотодобычи следует увязывать в основном с ним, а именно с переоценкой и доразведкой кварцево-рудных тел, штокерков, а также переработкой старых отвалов. С этой точки зрения интересна проработка естественного продолжения Токурского рудного поля по одноименному разлому в направлении пос. Экимчан.

На Токурском месторождении золоторудной минерализации 1,93 г/т сопутствуют серебряная и групповая платиновая минерализации в концентрациях менее 1 г/т.

Электроплавка сульфидных руд повышает концентрацию МГП в штейне примерно до 100000 раз по сравнению с соответствующими концентрациями в земной коре. Это делает данный способ обогащения сырья перспективным для переработки платиновых сульфидных руд при наличии дешевой электроэнергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Биогеохимия** благородных металлов в водотоках бассейна реки Амур / В. И. Радомская, С. М. Радомский, Ю. Г. Пискунов, Н. Г. Куимова // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, гео-криология. – 2005. – № 4. – С. 317–322.
2. **Благородные** металлы в ландшафтах Амурсо-Зейской равнины Приамурья / С. М. Радомский, В. И. Радомская, Н. В. Моисеенко, В. Г. Моисеенко // Докл. РАН. – 2008. – Т. 422, № 5. – С. 665–667.
3. **Возраст** адуляра из жил золоторудного месторождения Токур (Монголо-Охотский орогенный пояс, Россия): результаты датирования  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом / А. А. Сорокин, Н. С. Остапенко, В. А. Пономарчук, А. В. Травин // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53, № 3. – С. 297–304.
4. **ГОСТ** Р 52599–2006. Драгоценные металлы и их сплавы. Общие требования к методам анализа. Введен 2008–01–01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 10 с.
5. **ГОСТ** Р 55558–2013. Руда сульфидная медно-никелевая. Масс-спектрометрический метод определения содержания платины, палладия, родия, рутения, иридия и золота с предварительным коллективированием на никелевый штейн. Введен 2014–07–01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 36 с.
6. **Моисеенко В. Г., Эйриш Л. В.** Золоторудные месторождения Востока России. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 352 с.
7. **Остапенко Н. С., Нерода О. Н.** Условия отложения и особенности распределения индивидов самородного золота в жилах мезотермального месторождения Токур (Россия) // Геология рудных месторождений. – 2016. – Т. 58, № 3. – С. 239–250.
8. **Платиноносность** Дальнего Востока / В. Г. Моисеенко, В. А. Степанов, Л. В. Эйриш, А. В. Мельников. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 176 с.
9. **Радомский С. М.** Естественный миграционный потенциал благородных металлов Монголо-Охотского золотоносного пояса // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 1. – С. 29–38.
10. **Серебряный Я. Л.** Электроплавка медно-никелевых руд и концентратов. – М.: Металлургия, 1974. – 248 с.
11. **Степанов В. А.** Геология золота, серебра и ртути. Ч. 2. Золото и ртуть Приамурской провинции. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 161 с.

12. Эйриш Л. В. Металлогения золота Приамурья (Амурская область, Россия). – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 194 с.

13. **Extractive** metallurgy of nickel, cobalt and Platinum-group metals / F. K. Crundwell, M. S. Moats, V. Ramachandran et al. – Oxford: Elsevier, 2011. – 610 p.

14. Wedepohl K. H. The composition of the continental crust // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* – 1995. – Vol. 59, no. 2. – P. 1217–1232.

## REFERENCES

1. Radomskaia V.I., Radomskii S.M., Piskunov Iu.G., Kuimova N.G. [Biogeochemistry of precious metals in the streams of the Amur River basin]. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2005, no. 4, pp. 317–322. (In Russ.).

2. Radomskii S.M., Radomskaia V.I., Moiseenko N.V., Moiseenko V.G. Noble metals in landscapes of the Amur-Zeya plain in Priamurye. *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 423, no. 1, pp. 1250–1252.

3. Sorokin A.A., Ostapenko N.S., Ponomarechuk V.A., Travin A.V.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age of adularia from veins of the Tokur gold deposit, the Mongolian-Okhotsk orogenic belt, Russia. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, no. 3, pp. 264–271.

4. GOST R52599–2006. *Dragotsennyye metally i ikh splavy. Obshchiye trebovaniya k metodam analiza. Vved. 2008–01–01* [State Standard 52599–2006. Precious metals and their alloys. General requirements for analysis methods. Intr. 2008–01–01]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p. (In Russ.).

5. GOST R55558–2013. *Ruda sul'fidnaya medno-nikelevaya. Mass-spektrometricheskii metod opredeleniya sodержaniya platiny, palladiya, rodiya, ruteniya, iridiya i zolota s predvaritel'nyim kollektivirovaniyem na nikel'nyy shteyn. Vved. 2014–07–01* [State Standard R55558–2013. Ore sulfide copper-nickel. Mass spectrometric method for determining the content of platinum, palladium, rhodium, ruthenium, iridium

and gold with pre-collectivization on nickel matte. Intr. 2014–07–01]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 36 p. (In Russ.).

6. Moiseenko V.G., Eirish L.V. *Zolotorudnye mestorozhdeniya Vostoka Rossii* [Gold deposits of the East of Russia]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1996. 352 p. (In Russ.).

7. Ostapenko N.S., Neroda O.N. Deposition conditions and distribution features of native gold individuals in the veins of the Tokur mesothermal deposit, Russia. *Geology of ore deposits*, 2016, vol. 58, no. 3, pp. 213–223.

8. Moiseenko V.G., Stepanov V.A., Eirish L.V., Melnikov A.V. *Platinonosnost' Dal'nego Vostoka* [Platinum-bearing Far East]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2004. 176 p. (In Russ.).

9. Radomskii S.M. [The natural migration potential of precious metals of the Mongol-Okhotsk gold-bearing belt]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 29–38. (In Russ.).

10. Serebrianyi I.A. *Elektroplavka medno-nikel'nykh rud i kontsentratsiy* [Electric melting of copper-nickel ores and concentrates]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974. 248 p. (In Russ.).

11. Stepanov V.A. *Geologiya zolota, serebra i rtuti. Ch. 2. Zoloto i rtut' Priamurskoy provintsii* [Geology of gold, silver and mercury. Part 2. Gold and mercury of the Amur Province]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2000. 161 p. (In Russ.).

12. Eirish L.V. *Metallogeniya zolota Priamurya (Amurskaya oblast', Rossiya)* [Metallogeny of gold in Priamurye (Amur Region, Russia)]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002. 194 p. (In Russ.).

13. Crundwell F.K., Moats M.S., Ramachandran V., et al. *Extractive metallurgy of nickel, cobalt and Platinum-group metals*. Oxford, Elsevier, 2011. 610 p.

14. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust. *Geochim. et Cosmochim. Acta.*, 1995, vol. 59, no. 2, pp. 1217–1232.

© С. М. Радомский, В. И. Радомская, 2019