

УДК 553.96 : 54(571.63) : 546.06

**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА  
В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ УГЛЕЙ ЕРКОВЕЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
(ВЕРХНЕЕ ПРИАМУРЬЕ)**

**А. П. Сорокин<sup>1</sup>, А. А. Конюшок<sup>2</sup>, О. А. Агеев<sup>2</sup>, В. М. Кузьминых<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт геологии и природопользования ДВО РАН,  
E-mail: igip@ascnet.ru, пер. Релочный, 1, 675000, г. Благовещенск, Россия*

<sup>2</sup>*Амурский научный центр ДВО РАН,  
E-mail: amurnc@ascnet.ru, пер. Релочный, 1, 675000, г. Благовещенск, Россия*

Проведены исследования крупнообъемной пробы угля Ерковецкого месторождения на экспериментально-технологическом комплексе “Амур”. Впервые получены отдельные фракции продуктов сгорания угля (шлак, зола уноса и шлам), в которых изучена морфология, пробность золота и состав включений. Установлено последовательное снижение его размерности и содержания по мере сгорания угля, транспортировки в газовой-дымовом потоке и последующей конденсации. Выполнен сравнительный анализ золота в продуктах сгорания угля и в коренных источниках горно-складчатого обрамления Зейско-Буреинского бассейна, рассмотрены пути его поступления в торфяники.

*Экспериментально-технологический комплекс, отдельное получение продуктов сгорания, самородное золото, извлечение, источники золота, механизмы миграции золота в торфяники*

DOI: 10.15372/FTPRPI20190415

В последние десятилетия исследованиями бурых углей и продуктов их сгорания, проведенными в Сибири, Забайкалье, на Дальнем Востоке, в Узбекистане, США, Китае и в других странах, установлено наличие в них металлов и элементов, которые представляют повышенный интерес для высокотехнологических направлений промышленности. Имеющиеся материалы позволяют рассматривать угли как возможный источник стратегически важных рассеянных (Ge, Ga, U, V, Se), редкоземельных элементов (Y, Sc, Nb), благородных металлов (Au, Ag, Re), а также Al и Mg [1]. Извлечение и использование этих элементов из углей может привести к ряду преимуществ, которые сделают этот источник экономически и экологически привлекательным ресурсом, особенно для Китая, США, России, Индии и других стран. Упомянутые элементы могут извлекаться из продуктов сгорания угля, поэтому весьма перспективным

---

Работа выполнена при поддержке Программы “Дальний Восток” (проект № 18-02-019 “Геолого-технологическая оценка ресурсного потенциала каустобиолитов угольного ряда Дальнего Востока, разработка научных основ комплексного их использования с получением конкурентоспособной продукции многоцелевого назначения”).

направлением становится обнаружение углей с повышенными концентрациями указанных микрокомпонентов и разработка технологий их извлечения. Для этого в первую очередь необходимо изучить распределение минерального вещества в отдельно получаемых фракциях, что дает возможность выявить наиболее перспективный продукт для исследования его в качестве возможного промышленного источника благородных, редких металлов и редкоземельных элементов. На решение этой проблемы направлены исследования, выполняемые в Амурском научном центре (АмурНЦ) и Институте геологии и природопользования (ИГиП) ДВО РАН.

Благородные металлы обнаружены в углях Свободного, Тыгдинского, Ерковецкого, Райчихинского [2], Павловского, Тавричанского, Артемовского [3], Огоджинского, Сутарского месторождений [4]. Одновременно выявлены высокие концентрации редких металлов и редкоземельных элементов целом ряде указанных месторождений [5]. С помощью разработанного в АмурНЦ ДВО РАН способа установлено, что распределение золота в угленосных отложениях весьма неравномерно. В 50–85 % из общего количества исследованных (более 3500) проб содержание золота находится в интервале от нескольких миллиграммов до 5 г/т. Наиболее полный массив данных по золотоносности углей формируется из результатов анализа золошлаковых отходов ТЭС и ТЭЦ Приамурья и Приморья [3, 6–8].

С помощью созданного в 2017 г. экспериментально-технологического комплекса “Амур” (ЭТК “Амур”) удалось отдельно получать и исследовать шлак, золу уноса, шлам (продукты мокрой очистки дыма) и осадок технологической воды [9], что дало возможность впервые детально изучить особенности переноса золота и других микрокомпонентов в процессе термических воздействий на уголь, исследовать состав, морфологию и структуру металлов.

#### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основного объекта исследования выбрано Ерковецкое бурогольное месторождение, расположенное на южной половине Зейско-Буреинского бассейна. Оно изучается с 2006 г. в карьере “Южный”, где вскрыт пласт палеоценовых углей мощностью до 9 м, с прослоями и линзами (до 10 см) глин, алевритов и туфов. Угли месторождения бурые, среднезольные (в среднем 16.9%) технологической группы 2Б, средней степени углефикации с низшей степенью теплоты сгорания 3060 МДж/кг. Кроме указанного месторождения, объектами служили Западно-Туранская и Центрально-Буреинская металлогенические зоны (источники поступления золота в угли) и золотоносные россыпи в водотоках, дренирующих Туранское поднятие (рис. 1).

Ерковецкое месторождение характеризуется высокой степенью изученности формирования и условиями обогащения углей микрокомпонентами, включая золото, из металлогенических зон Туранского горно-складчатого сооружения. Транспортировка металла осуществлялась постоянно действующими золотосодержащими водотоками, образующими ряд россыпных узлов. Россыпи местами сопряжены с угленосными площадями, что определяло непосредственное взаимодействие золотоносных водотоков с одновозрастными торфяниками.

Поступление микрокомпонентов в органическую среду торфяников происходило в форме коллоидов, комплексных растворимых соединений и частиц (кластогенов) аллювиального происхождения [10]. Среди кластогенного золота установлено не менее трех разновидностей тонкого и наноразмерного металла: в виде окатанных зерен пробностью 900, с низкими содержаниями Ni, Co, Bi, Cu; слабо окатанных частиц с высокими концентрациями Ag; комковатых, реже пластинчатых, лепешковидных и крючкообразных форм с типоморфными примесями Hg, Cu (до 0.33 %) и As (до 1.32 %) [11].

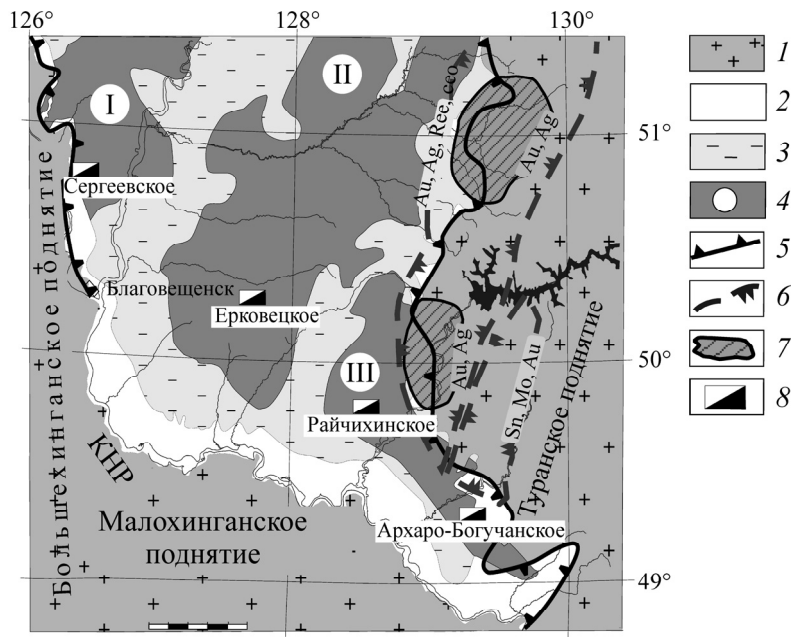


Рис. 1. Схема размещения угленосных площадей Зейско-Буреинского бассейна в зонах сопряжения с горно-складчатой обрамлением: 1 — горно-складчатое обрамление бассейна; 2 — денудационная равнина; 3 — аллювиальная равнина; 4 — угленосные площади (I — Пиканско-Сергеевская, II — Селемджинско-Ерковецкая, III — Завитинско-Архаринская); 5 — граница бассейна; 6 — границы минерагенических зон; 7 — комплексные золоторудно-россыпные узлы; 8 — месторождения бурых углей

Исследования Ерковецкого месторождения проводились в карьере “Южный” на 6–8 разрезах с интервалом 150–200 м и детальным описанием стенок карьера с периодичностью 2–3 года. Пласт угля опробывался бороздовыми пробами секциями длиной 0.5–0.8 м, массой 12–15 кг, вмещающие породы — отдельно по 2–3 кг. Изучалась минералогия зольной части углей, химический элементный состав углей и вмещающих пород. Крупнообъемная проба массой 251 кг, используемая в эксперименте, включала образцы угля из каждой бороздовой секции по результатам полевых работ в 2018 г.

Раздельное получение шлака, золы уноса и шлама в процессе сгорания угля Ерковецкого месторождения выполнено на ЭТК “Амур” (рис. 2), конструкция которого и принцип работы детально рассмотрены в [9]. Валовая проба угля сожжена в топочной камере 2 с горизонтальными колосниками 3 слоевым способом с периодической загрузкой угля и очисткой колосников от топочного шлака. Для полного сгорания угля предусмотрено вторичное смесеобразование топлива путем подачи дымососом 9 дополнительного воздуха в камеру дожига через воздухозаборник 6 с регулирующей заслонкой 4. В процессе сгорания угля установлен следующий интервал рабочей температуры: из топочной камеры — 650–1050 °С, из камеры дожига — 610–750 °С, на выходе из золоуловителя — не более 250 °С, из влагоуловителя — не более 60 °С. Выход летучих веществ происходит в интервале температур горения 400–800 °С. Для грубой очистки дыма от частиц золы средних размеров (до 40 мкм) применялся двухсекционный золоуловитель 7, в котором происходило значительное замедление скорости потока газа, облегчавшее осаждение твердых частиц. Для регулировки этого процесса установлена заслонка 8.

Очищенный от пыли газовый поток, а также водяной пар выводятся из золоуловителя 7 дымососом 9 в скруббер 14. В мокром скруббере запыленный газовый поток взаимодействует

с жидкостью, которая захватывает взвешенные частицы пыли и уносит их из скруббера в поддон для техногенной воды, где формируется минеральный осадок (шлам), а избыточная жидкость направляется далее в фильтровальный блок с тремя ступенями очистки. Первая ступень очистки — фильтр-отстойник 16, вторая — механический фильтр грубой очистки 17, третья — фильтр тонкой очистки для извлечения из техногенной воды растворенных веществ на адсорбенте. Очищенные газы выносятся в атмосферу.

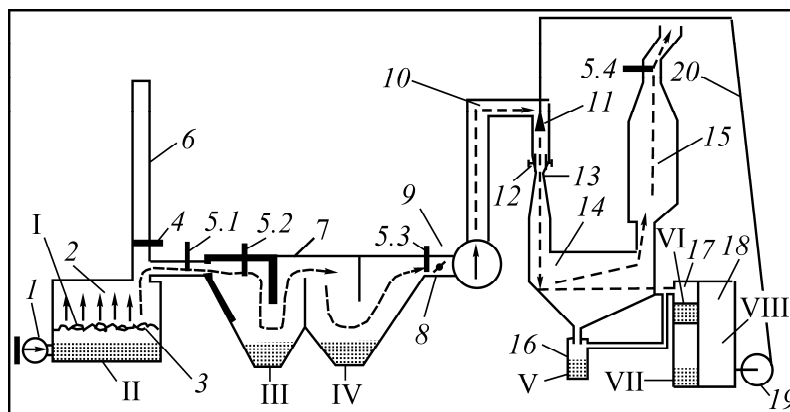


Рис. 2. Схема ЭТК “Амур” для получения разделенных продуктов сгорания углей: 1 — дутьевой вентилятор; 2 — топочная камера; 3 — колосники; 4 — заслонка; 5.1; 5.2; 5.3; 5.4 — термопары; 6 — воздухозаборник; 7 — золоуловитель; 8 — регулирующая заслонка; 9 — дымосос; 10 — дымоход; 11 — спринклерный ороситель; 12 — конфузор; 13 — регулируемая горловина; 14 — скруббер; 15 — центробежный влагоуловитель; 16 — фильтр-отстойник; 17 — фильтровальный блок; 18 — емкость для техногенной воды; 19 — насосная станция; 20 — трубопровод; I — сжигаемый уголь; II — топочный шлак; III — зола уноса (тяжелая фракция); IV — зола уноса легкая фракция; V — шлам фильтра-отстойника; VI — шлам скруббера; VII — осадок техногенной воды; VIII — техногенная вода

После окончания эксперимента отдельно получены следующие продукты сгорания угля: топочный шлак (II) — 27 кг, две фракции золы уноса (тяжелая — III и легкая — IV) общей массой 2.6 кг, шлам фильтра-отстойника (V) и шлам скруббера (VI) — 2.6 кг, осадок техногенной воды (VII) и техногенная вода (VIII) (рис. 2).

Отобранный из топочной камеры шлак измельчался на щековой дробилке ДЛЩ-80-150 до фракции –1 мм. Для выделения из состава недожога и легких частиц использовался слабо-наклонный шлюз прямоугольного сечения, на дно которого укладывались дражные коврики, позволяющие создать в придонных слоях турбулентный поток и удерживать осевшие на дно коврика тяжелые частицы. Измельченная (до –0.1 мм) тяжелая фракция шлюза пропусклась через мокрый магнитный сепаратор ММС-0,1. Немагнитная фракция стола подавалась на концентрационный стол СКО-0,5, на котором были получены конечные продукты обогащения — концентрат и хвосты стола. Основное количество благородных металлов, редкоземельных элементов и других полезных компонентов находилось в тяжелой фракции стола.

Зола уноса распределялась на ситовом анализаторе А-50 по классам крупности на фракции от +0.5 до –0.04 мм. На мокром магнитном сепараторе ММС-01 выделены магнитная и немагнитная фракции, после чего немагнитная фракция обогащалась на концентрационном столе СКО-0,5.

Шлам, полученный в результате очистки техногенной воды фильтром грубой очистки, гравитационному обогащению не подвергался. Он промывался в бромформе и разделялся на магнитную, электромагнитную, немагнитную тяжелую и немагнитную легкую фракции.

С помощью гравитационного и магнитного обогащения из шлака и золы уноса получен золотосодержащий концентрат. Из него выделены частицы золота, которые исследовались минералогическим методом с применением микрохимических реакций и иммерсионного метода в минералогической лаборатории ИГиП ДВО РАН. Химический состав частиц самородного золота определялся с помощью сканирующей электронной микроскопии (микроскоп VEGA 3 LMN) с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором X-Max80 в Хабаровском инновационно-аналитическом центре Института тектоники и геофизики им. академика Ю. А. Косыгина (ИТиГ) ДВО РАН.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным пробирного анализа, выполненного в период 2006–2012 гг. в пробирной лаборатории АмурНЦ ДВО РАН, среднее содержание золота в углях Ерковецкого месторождения составляло 1.85 г/т. Результатами опробования в 2018 г. оно установлено по всему разрезу пласта и определено в среднем 1.27 г/т с повышенными концентрациями в кровле (до 2.31 г/т) и нижних горизонтах пласта (до 3.87 г/т). В процессе сгорания угля содержание золота составило: в шлаке — 0.50, золе уноса — 0.22 и шламе — 0.26 г/т.

### МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛОТА ВО ФРАКЦИЯХ СГОРАНИЯ УГЛЯ

Фотографии частиц золота в шлаках показаны на рис. 3а–г, а их химический состав представлен в табл. 1. На рис. 3а золото имеет вид зерна округлой, несколько удлиненной формы размером 50 × 80 мкм. Концентрация его (спектр 110–111) от 97.45 до 97.26 %. Единственной примесью является серебро 4.56–2.74 %. На рис. 3б — золото шарообразной формы, с круглой гладкой поверхностью, размером 142 мкм. Концентрация золота (спектр 115) — 92.40 %, серебра — от 8.3 %. В точке 116 получен спектр, характеризующий вкрапление в золоте гематита (содержание Fe — 47.56 %, атомов кислорода — 38.14 %). Гематит находится среди минеральной массы, содержащей Al, K, Ca, Si, As.

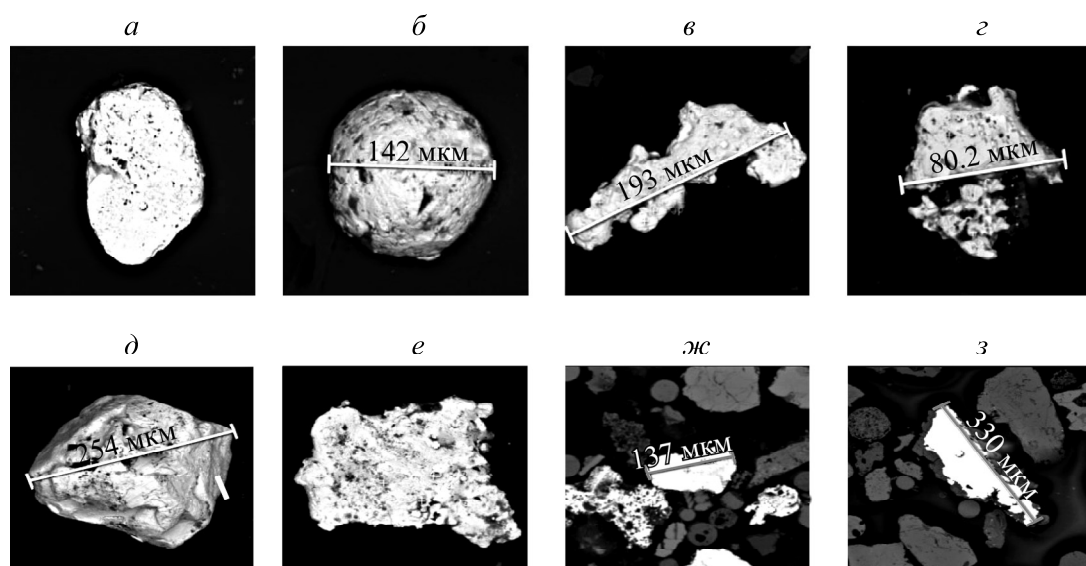


Рис. 3. Самородное золото с включениями минералов, извлеченное из шлаков (а–г) и из золы уноса (д–з)

ТАБЛИЦА 1. Химический состав золота и включений в нем элементов из шлаков, мас. %

Элемент	Номер спектра									
	110	111	115	116	122	123	124	125	127	128
	Рис. 3д		Рис. 3е		Рис. 3ж				Рис. 3з	
Au	<b>97.26</b>	<b>97.43</b>	<b>92.40</b>	5.62	11.03	5.19	28.77	19.18	11.94	<b>66.28</b>
Ag	2.47	2.55	7.60	0.54	2.40	1.64	6.42	4.23	3.72	24.25
C	—	—	—	—	—	10.66	5.66	—	4.90	8.29
O	—	—	—	38.14	29.64	47.66	42.70	47.71	34.87	0.89
Na	—	—	—	—	—	0.62	—	0.94	—	—
Mg	—	—	—	—	—	0.55	—	0.90	—	—
Al	—	—	—	1.33	0.34	5.49	0.19	6.02	0.91	—
Si	—	—	—	2.99	0.25	25.12	14.69	16.63	2.53	—
K	—	—	—	0.32	—	1.74	—	2.35	0.86	—
Ca	—	—	—	0.45	—	0.41	—	0.62	—	—
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	39.09	—
Mn	—	—	—	—	—	0.23	—	0.45	—	—
Fe	—	—	—	47.56	0.84	0.68	—	0.44	0.31	0.28
Cu	—	—	—	0.41	—	—	—	—	—	—
As	—	—	—	1.75	—	—	—	—	—	—
Nb	—	—	—	—	—	—	—	—	0.88	—
Ba	—	—	—	—	—	—	—	0.53	—	—
Hg	—	—	—	—	—	—	1.56	—	—	—
Pb	—	—	—	—	55.49	—	—	—	—	—
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

На рис. 3в — зерно золота губчатой формы в виде пластины неправильной формы размером  $193 \times 80$  мкм, неоднородное по составу. Оно содержит в порах включения угля, самородной ртути и кварца (спектр 124). На его поверхности обнаружены частицы самородного свинца (спектр 122), алюмосиликаты с оксидами железа (спектры 123 и 125). Содержание золота в указанных точках измерения низкое — до 5.19 %, серебра — до 1.64 %. На рис. 3г в точке 127 золото представлено агрегатом, состоящим из сростков золота разных размеров ( $80.2 - 5$  мкм) с титаном (вероятно, рутилом с примесью ниобия). В точке 128 выявлен сплав золота с серебром (Au — 66.28, Ag — 24.25 %) с примесью окислов железа.

Золото в золе уноса показано на рис. 3д–з, химический состав приведен в табл. 2. На рис. 3д — изометрический кристалл золота размером 254 мкм, оплавленный по периферии, с концентрацией Au — 94.6 % и Ag — 5.33 % (спектр 37). Микровключения в точке со спектром 38 представлены сульфидом меди (Cu — 54.01 %) и алюмосиликатами (включение в точке 39 имеет состав, %: Al — 13.06, Si — 27.73, O — 47.13, а также Na и Al). На рис. 3е — агрегированное зерно золота с ячеистым внутренним строением размером  $170 \times 120$  мкм из сплава Au и Ag (спектры 41 и 45). В точках со спектрами 42, 43 и 44 определены включения минералов Fe (до 69.31 %) и Si (до 40.10 %) и др. На рис. 3ж в шлифе обнаружено комковатое зерно с гладкими краями интерметаллида Au (спектр 502), состоящего из Au, Ag, Sn, Pb с Hg, на рис. 3е (спектр 516) — чистое золото (81.15 %) с примесью серебра (18.16 %).

Морфология частиц золота и самородной платины в шламе показаны на рис. 4, химический состав представлен в табл. 3. Золото имеет высокую пробность. На рис. 4а (спектр 56) — изометрическое микроскопическое зерно с высоким содержанием элементов, %: Au — 91.68, Ag — 6.34, Cu — 1.74, Ca — 0.24, а на рис. 4б (спектр 101) — пластинка золота с извилистыми краями размером  $5.2 \times 3.0$  мкм. Концентрация составляет, %: Au — 91.04, Ag — 7.73, Cu — 1.23. Платина (рис. 4в, спектр 59) имеет треугольную форму с закругленными краями. Размер  $4.04 \times 3.00$  мкм. Состав зерна, %: Pt — 97.75, Cu — 1.94, Ca — 0.31.

ТАБЛИЦА 2. Химический состав частиц золота из золы уноса, мас. %

Элемент	Номер спектра								
	37	38	39	41	42	43	44	45	502
	Рис. 4а				Рис. 4б				Рис. 4в
Au	94.67	9.03	1.28	87.92	3.56	10.41	7.08	74.70	49.81
Ag	5.33	—	—	11.56	0.38	1.20	1.12	10.87	6.09
O	—	11.90	47.13	—	51.74	15.28	13.79	11.94	—
Na	—	—	5.38	—	—	—	—	—	—
Al	—	1.12	13.06	—	0.40	1.26	0.47	—	—
Si	—	2.02	27.73	—	40.10	0.36	0.89	—	—
S	—	18.91	—	—	—	—	—	—	—
Cl	—	0.78	—	—	—	—	—	—	—
K	—	—	—	—	0.32	—	0.55	—	—
Ca	—	1.37	4.04	—	0.68	—	0.47	0.36	—
Fe	—	0.87	1.39	—	1.76	0.50	69.31	1.45	—
Cu	—	54.01	—	0.53	0.40	—	1.62	0.67	—
Zn	—	—	—	—	—	—	0.99	—	—
Sn	—	—	—	—	0.46	70.98	3.72	—	0.79
Hg	—	—	—	—	—	—	—	—	28.77
Pb	—	—	—	—	—	—	—	—	14.54
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Анализ проведенных результатов исследований позволяет проследить поведение самородного золота в процессе сгорания, транспортировки в газовой-дымовом потоке и последующей конденсации. Очевидно последовательное снижение размерности золота от 80–250 мкм шлаке до 1–5 мкм в золе уноса и шламе.



Рис. 4. Самородное золото и платина, извлеченные из шлама

В шлаке и частично в золе уноса золото сохраняет генетический код коренных источников, поступавших из металлогенических зон кремнистой, железорудной, медно-молибденовой, олово-вольфрамовой, полиметаллической, золото-серебряной и золото-ртутной рудных формаций Туранского массива [12], привнесенных в торфяники. Это подтверждается составом ассоциаций, установленных минералогическим анализом. В магнитной фракции обнаружены магнетит, гематит, ильменит, гранат, циркон, слюды и силикаты. Электромагнитная тяжелая фракция включает гематит, ильменит, амфибол, циркон, полевой шпат, зерна алюмосиликатного шлака, единичные знаки хромита, эпидота, пирита, сфена, кальцита и самородного золота. Немангнитная тяжелая фракция содержит циркон, полевой шпат, касситерит, гранат, пирит, арсенопирит, самородную медь, свинец и зерна золота. В единичных знаках обнаружены амфибол, галенит, молибденит, анатаз, апатит, сфен, монацит, турмалин, дистен. Легкая фракция представлена в основном кварцем и полевым шпатом с единичными знаками пироксена и алюмосиликатных форм кремния.

ТАБЛИЦА 3. Химический состав золота и платины, извлеченных из шлама, мас. %

Элемент	Номер спектра		
	56	101	59
	Рис. 5а	Рис. 5б	Рис. 5в
Au	91.68	91.04	—
Ag	6.34	7.73	—
Ca	0.24	—	0.31
Cu	1.74	1.23	1.94
Pt	—	—	97.75
Сумма	100	100	100

Анализируя морфологию индивидуумов золота, можно выделить глобулярные, агрегированные и губчатые типы. Первый из них представлен округлыми (окатанными) или пластинчатыми формами, свидетельствующими о возможном поступлении его из россыпей Притуранья. В основном это высокопробное золото с примесями Ag, Fe, As, S, Pb. Весьма своеобразны агрегированные (комковатые) композитные индивидуумы, представляющие собой сплавы с серебром, с включениями Fe, Sn, Cu, Pb, Hg, вероятно, сформированные в процессе “спекания” минералов-носителей с органическим материалом или алюмосиликатами.

Золото губчатого строения с пустотами и кавернами заполнено органическим веществом. По мнению авторов, они отражают результат проникновения растворенных соединений золота в угли, с заполнением в них трещин и пор на начальной стадии катагенеза. При сгорании органики золото остается в виде древовидных форм. Следует отметить высокую пробность золота в шламе, обусловленную выгоранием включений низкотемпературных минералов.

Проведенные исследования позволили изучить самородное золото определенной размерности (более 5 мкм), что составляет около 5 %. Это показывает известный уровень потерь, приводимый исследователями в [3, 10, 13].

#### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЗОЛОТА ПРИ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ СЖИГАНИЯ УГЛЯ

Исследуя поведение золота отдельно в концентратах, полученных при сжигании крупнообъемной пробы бурого угля Ерковецкого месторождения, установлено общее падение концентраций золота, т. е. возможность извлечения частиц размером более 5 мкм на фоне возрастания концентраций редкоземельных элементов (рис. 5). Данная тенденция объясняется способностью золота образовывать летучие комплексные органические соединения.

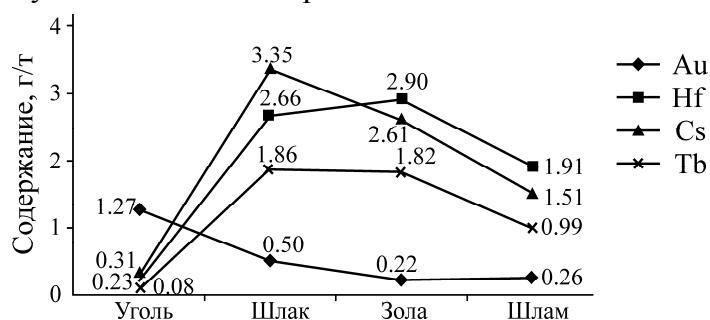


Рис. 5. Содержание Au, Hf, Cs и Tb в угле и продуктах сгорания угля

В качестве таких соединений могут выступать карбонилы при температурах 300–400°C [3]. В результате термодинамического моделирования в процессе сгорания углей выявлено, что золото переходит в газовую фазу при температуре равной или более 1000 °C с образованием



основного газообразного соединения — Au(g) [14]. С повышением температуры появляются другие соединения — AuH(g) и в меньшей степени — AuO(g). Содержание золота в первичном угле существенно влияет на образование его газообразных соединений. При концентрациях золота 0.3 и 1.4 г/т суммарный объем газообразных соединений составляет соответственно 73.4 и 15.7 %.

Экспериментами, проведенными в АмурНЦ ДВО РАН в 2008 г., установлено, что при горении угля с температурой 1000–1200°C содержание частиц золота размером менее 5 мкм в газовой-дымовом потоке составляет до 75 %.

### ВЫВОДЫ

Изучение морфологии и минералого-геохимических особенностей самородного золота, полученного отдельно в шлаке, золе уноса и шламе, показало, что оно представлено преимущественно округлыми, агрегированными и губчатыми формами. Первые из них, вероятно, поступали из россыпей Притуранья, а агрегированные индивидуумы — сплавы с серебром и с включениями Fe, Sn, Cu, Pb, образованные в результате спекания минералов-носителей. Губчатые формы золота сформировались в условиях преобразования при термических процессах в виде индивидуумов с пустотами, заполненными несгоревшей органической массой. При близких содержаниях золота в твердых продуктах сгорания, в шлаке отмечается наиболее высокая концентрация этого металла и состава включений. Более разнообразно золото в золе уноса, а в шламе оно характеризуется высокой пробностью. Эти материалы, а также минеральные ассоциации позволили установить источники поступления золота из рудных формаций Туранского массива.

В условиях термического процесса около 95 % золота улетучивается при улавливании частиц размером до 5 мкм. Установлены температурные интервалы, при которых золото может переходить в газовую фазу в последовательности, зависящей от присутствия в нем примесей с минералами различной степени летучести. Эти особенности определяют степень потерь металла в термическом процессе. Содержание золота в общем объеме продуктов сгорания составляет 0.46 г/т, что позволит при дальнейшей доработке конструкции ЭТК “Амур” накапливать экономически выгодный промышленный концентрат для извлечения из него золота и других компонентов и перейти к разработке технологических способов извлечения ценных металлов и элементов.

Авторы выражают признательность В. О. Крутиковой (ИТиГ ДВО РАН, г. Хабаровск) за выполнение аналитических работ по определению химического состава самородного золота и Е. Н. Воропаевой (ИГиП ДВО РАН, г. Благовещенск) за минералогический анализ проб. Авторы благодарны также Л. А. Чурсиной и С. Б. Турморе (АмурНЦ ДВО РАН, г. Благовещенск) за определение содержания золота в углях и в продуктах сгорания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dai S. and Finkelman R. B.** Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects, *J. of Coal Geology*, 2018, Vol. 186. — P. 155–164.
2. **Сорокин А. П., Рождествина В. И., Кузьминых В. М., Жмодик С. М., Анохин Г. Н., Митькин В. Н.** Закономерности формирования благородно- и редкометалльного оруденения в кайнозойских угленосных отложениях Дальнего Востока // *Геология и геофизика*. — 2013. — Т. 54. — № 7. — С. 876–893.
3. **Середин В. В.** Распределение и условия формирования благороднометалльного оруденения в угленосных впадинах // *Геология рудных месторождений*. — 2007. — Т. 49. — № 1. — С. 3–36.

4. **Лаврик Н. А.** Благородные металлы в бурых углях Сутарского проявления // ГИАБ. — 2009. — Т. 5. — № 12. — С. 70–78.
5. **Шишов Е. П., Чернышев А. А.** Металлоносность бурых углей Средне-Амурской угленосной площади // Региональная геология и металлогения. — 2017. — № 69. — С. 96–106.
6. **Черепанов А. А.** Благородные металлы в золошлаковых отходах Дальневосточных ТЭЦ // Тихоокеанская геология. — 2008. — Т. 27. — № 2. — С. 16–28.
7. **Рассказова А. В., Лаврик Н. А., Литвинова Н. М., Богомяков Р. В.** Исследование распределения золота в материале золошлаковых отходов // ГИАБ. — 2016. — № S21. — С. 282–296.
8. **Прохоров К. В., Богомяков Р. В., Лаврик Н. А., Литвинова Н. М.** К вопросу извлечения золота из магнитного концентрата золошлакового материала // ГИАБ. — 2016. — № S21. — С. 272–281.
9. **Агеев О. А., Сорокин А. П., Борисов В. Н., Зубенко И. А.** Экспериментально-технологический комплекс “Амур” для получения разделенных продуктов сгорания углей // Комплексное использование потенциала каменных и бурых углей и создание комбинированных экологически безопасных технологий их освоения: сб. Всерос. конф с междунар. участ., 19–22 сентября 2017 г. — Благовещенск, 2017. — С. 117–121.
10. **Сорокин А. П., Коношук А. А., Кузьминых В. М., Артеменко Т. В., Попов А. А.** Распределение кайнозойских металлоносных угленосных месторождений в Зейско-Буреинском осадочном бассейне (Восточная Сибирь): тектоническая реконструкция и палеогеографический анализ // Геотектоника. — 2019. — № 2. — С. 33–45.
11. **Кузнецова И. В.** Геология, тонкодисперсное и наноразмерное золото в минералах россыпей Нижнеселенгинского золотоносного пояса (Приамурье): дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2011. — 151 с.
12. **Некрасов И. Я.** Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. — М.: Наука, 1991. — 302 с.
13. **Варшал Г. М., Велюханова Т. К., Кошечева И. Я., Баранова Н. Н., Козеренко С. В., Галузинская А. Х., Сафронова Н. С., Банных Л. Н.** О концентрировании благородных металлов углеродистым веществом пород // Геохимия. — 1994. — № 6. — С. 814–824.
14. **Шпирт М. Я., Лавриненко А. А., Кузнецова И. Н., Гюльмалиев А. М.** Термодинамическая оценка соединений золота, серебра и некоторых других микроэлементов, образующихся при сжигании бурого угля // Химия твердого тела. — 2013. — № 5. — С. 11–19.

*Поступила в редакцию 31/V 2019  
После доработки 17/VI 2019  
Принята к публикации 03/VII 2019*