

УДК 550.43:553.96

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ УГЛЕЙ АРХАРО-БОГУЧАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ПРИАМУРЬЕ)

© 2020 г. А. П. Сорокин^{1,*}, В. А. Чантурия^{2,**}, О. А. Агеев^{1,***}, С. В. Дугин^{1,****}

¹ ФГБУН Институт геологии и природопользования ДВО РАН, 675000 Благовещенск, Россия

² ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020 Москва, Россия

*e-mail: sorokinAP@ignm.ru

**e-mail: vchan@mail.ru

***e-mail: vip.ageev2014@mail.ru

****e-mail: duservad@gmail.com

Поступила в редакцию 24.01.2020 г.

После доработки 06.02.2020 г.

Принята к публикации 30.03.2020 г.

Исследованы химические и физико-химические характеристики бурых углей Архаро-Богучанского месторождения, обладающих повышенной зольностью (до 18.7%), высоким содержанием алюминия (до 30.5%), кремния (до 69.5%) и основными петрографическими составляющими – витринитом (42%) и семивитринитом (46%). С помощью сжигания крупнообъемной пробы весом 270 кг в Экспериментально-технологическом комплексе “Амур” получены отдельные продукты сгорания (шлак, зола-уноса и шлам). В процессе их исследования во всех этих фракциях установлены благородные металлы (БМ) Au, Ag и Pt, которые представлены двумя морфологическими разновидностями. Первая из них – массивные комковатые индивидуумы, часто с заметной обработкой в водной среде – характеризуются высоким содержанием золота (более 80%), размером от 2.0 · 1.6 до 115.0 · 160.0 мкм и наличием элементов-примесей. По своим характеристикам (пробности, составу элементов-примесей и др.) они в значительной мере отражают минеральную специализацию рудных объектов областей сноса. Вторая форма выделения БМ – рыхлые агломераты, состоящие из зерен Au и Ag с различными концентрациями в интервале температур 600–800°С. Способность концентрирования зерен БМ различной генетической природы позволяет рассматривать этот интервал как начальную стадию сохранения золота в золе-уноса от улетучивания газовым потоком.

Ключевые слова: *бурый уголь, продукты сгорания углей, температурные режимы, морфология и состав благородных металлов*

DOI: 10.31857/S0023117720040076

ВВЕДЕНИЕ

Исследование металлоносности угленосных отложений продолжается уже более 100 лет. Длительное время они рассматривались как нетрадиционный тип благородно-металльного оруденения, которое в настоящее время известно в осадочных бассейнах Сибири, Дальнего Востока, Нового Южного Уэльса, Австралии, Узбекистана и в КНР [1–3]. Одновременно с этим в последние десятилетия серьезное внимание уделяется также изучению в углях и продуктах их сгорания стратегически важных рассеянных (Ga, V, Se), редкоземельных (Y, Sc и др.) элементов, а также Al и Mg. На Дальнем Востоке и в Сибири указанное оруденение в углях установлено во второй половине XX века [4–7]. В Зейско-Буреинском осадочном бассейне на основе изучения Тыгдинского,

Свободного, Сергеевского, Ерквецкого, Райчинского и Архаро-Богучанского буроугольных месторождений (рис. 1) установлена связь распределения металлоносных углей с геодинамическими особенностями развития и палеогеографическими условиями формирования бассейна, изучены генетические типы благородно-металльной, рассеянной и редкоземельной минерализации, условия миграции, формы переноса микрокомпонентов и взаимодействие их с органическим веществом [8–10]. В ряде районов выявлены закономерности накопления благородных металлов в углях при сингенетических процессах россыпеобразования и торфонакопления: в одних случаях – вдоль обрамления статичных морфоструктур с широко развитыми корами выветривания химического типа, а в других – в обстановке контрастных форм сопряжения с оро-

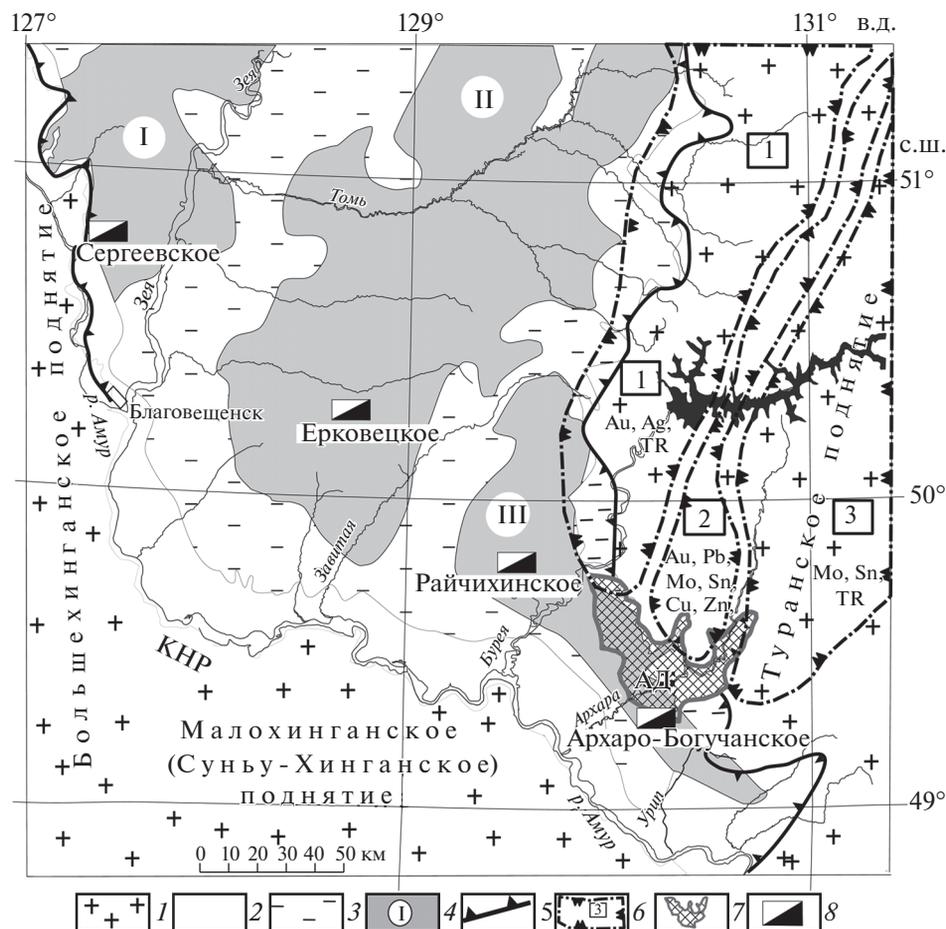


Рис. 1. Схема размещения угленосных площадей Зейско-Буреинского бассейна в зонах сопряжения с горно-складчатый обрамлением: 1 – горно-складчатое обрамление бассейна; 2 – денудационная равнина; 3 – аллювиальная равнина; 4 – угленосные площади (I – Пиканско-Сергеевская, II – Селемджинско-Ерковецкая, III – Завитинско-Архаринская); 5 – граница бассейна; 6 – минерагенические зоны (1 – Западнотуранская цеолит-редкоземельно-серебро-золоторудно-россыпная, 2 – Центральнобуреинская олово-молибденово-ураново-золоторудно-россыпная, 3 – Нимано-Мельгинская редкоземельно-олово-молибденово-рудная); 7 – Архаринская депрессия (АД); 8 – месторождения бурого угля. Граница РФ и КНР проходит по р. Амур.

генными структурами – в приразломных впадинах, на конусах выноса и т.д. Это позволило внести существенные коррективы в решение проблемы миграции неорганического материала, поступающего в торфяные массивы из областей сноса, а также глубже понять минеральный состав объектов рудных провинций [3]. Все эти работы направлены на разработку методов извлечения комплекса благородных, рассеянных металлов (БМ, РМ) и редкоземельных элементов (РЗЭ), решение которых позволит рассматривать месторождения угля экономически и экологически привлекательным ресурсом.

В Амурском научном центре (АмурНЦ) ДВО РАН и Института геологии и природопользования (ИГиП) ДВО РАН эти работы ведутся с начала текущего столетия [3, 11, 12]. В настоящее время они выполняются с помощью созданного в 2017 г. Экспериментально-технологического комплекса “Амур” (ЭТК “Амур”), позволяющего

раздельно получать и исследовать шлак, золуноса, шлам (продукты мокрой очистки дыма) и осадок технологической воды. Это дает возможность, в первую очередь, изучить особенности переноса золота и других микрокомпонентов в процессе термических воздействий на уголь, исследовать состав, морфологию минералов и рыхлых агломератов БМ и провести корреляцию Au, Pt и Ag с коренными источниками питающих провинций обрамления бассейнов.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Природные объекты (бурые угли осадочных бассейнов и питающие их рудные провинции). Физико-химические, минералогические, морфологические и ряд других характеристик БМ зависят как от состава руд, питающих области сноса угленосных бассейнов, так и от условий их транспор-

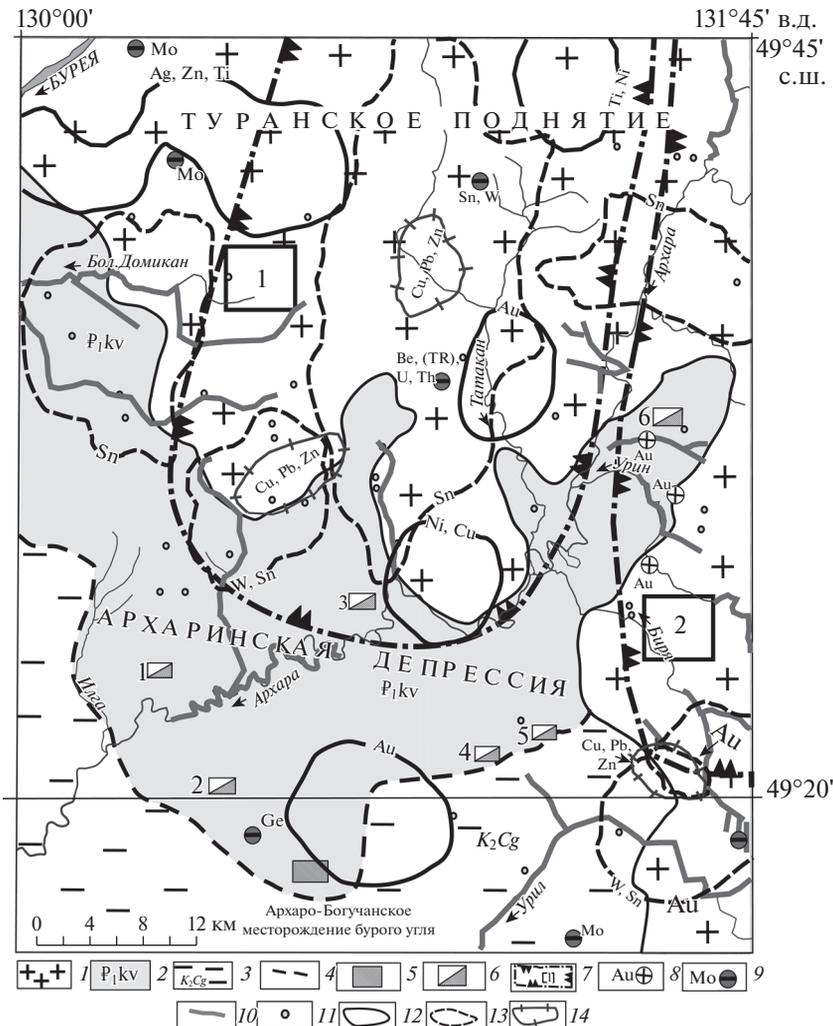


Рис. 2. Зона сочленения Туранского поднятия и Архаринской депрессии: 1 – горно-складчатое обрамление; 2 – отложения кивдинской свиты; 3 – отложения цагайской свиты; 4 – условная граница между кивдинской и цагайской свитами; 5 – месторождения бурого угля; 6 – углепроявления (1 – Аркадие-Семеновское, 2 – Сухушинское, 3 – Могилевское, 4 – Леводжелменское, 5 – Верхнеджелменское, 6 – Треногское); 7 – минерагенические зоны (1 – Центральнобуреинская олово-молибденово-ураново-золоторудно-россыпная, 2 – Нимано-Мельгинская редкоземельно-олово-молибденово-рудная); 8 – рудопроявления золота; 9 – рудопроявления иных элементов; 10 – россыпи золота; 11 – шлиховые пробы, обогащенные золотом; ореолы рассеяния: 12 – литохимические, 13 – шлиховые, 14 – гидрохимические.

тировки и осадения в процессе взаимодействия с органической массой торфяников [11], поэтому наряду с месторождениями металлоносных углей изучаются также и рудные провинции обрамления. В соответствии с этим в качестве таких объектов выбраны Завитинско-Архаринская угленосная площадь и сопряженная с ней южная окраина Туранского массива (рис. 1).

В пределах указанной угленосной площади расположено Архаро-Богучанское бурогольное месторождение с целым рядом углепроявлений позднемелового, палеогенового и раннемиоценового возраста, непосредственно обрамляющих южный фланг массива. Позднемеловые отложения на рассматриваемой территории слагают

структуры северо-восточного простирания, выполненные аллювием палеодолин Архары, Урила, Татакана, Илги, глубоко проникающие в горно-складчатое обрамление Туранского массива, а угленосные палеогеновые породы на участках разгрузки меловых водотоков вдоль поднятия формируют предгорную Архаринскую депрессию, в пределах которой, кроме Архаро-Богучанского месторождения, расположены Грибовское, Верхнеджелменское, Сухушинское и Аркадие-Семеновское углепроявления. И, наконец, неогеновые отложения с маломощными пластами угля наложены на более древние структуры, развитые в близмеридиональных речных системах Илги, Татакана, Урила, заложенных вдоль наиболее молодых разрывов (рис. 2).

Исследования проводили на южном борту Архаринской депрессии, на участке “Придорожный” Архаро-Богучанского месторождения. В действующем карьере эксплуатируются два пласта угля: Двойной (1.5 м) и Нижний (1.5 м), включающие линзы туфов и глин мощностью 1–2 см, разделенные глинами (1.5 м). Изучение угленосности участка проводили в 2018 г. с детальным описанием разреза и опробованием. Угли опробованы бороздовыми пробами секциями по 0.5 м и весом 12–15 кг, а вмещающие породы – точно, по 2–3 кг. Из указанных выше пластов угля отобрана крупнообъемная проба весом 270 кг, включающая все разновидности угля из обоих пластов.

С южной окраины Туранского массива транспортная рудных микроэлементов в Архаринскую депрессию проходила в обстановке регионального морфоструктурного перегиба с севера на юг, обусловившего сток поверхностных вод в меридиональном направлении. Изучение геодинамической обстановки южного и восточного флангов Туранского массива позволяет считать, что этапы его тектонической активности, сопряженные с высокой степенью эрозионной деятельности, приходились на границу позднего мела – палеоцена и ранний миоцен, которым предшествовали периоды тектонического покоя с образованием поверхностей выравнивания и кор выветривания химического типа [11]. В данном случае эрозия Туранского массива системами палеорек Илга, Архара, Татакан и Урил на рубеже мезозоя и кайнозоя обеспечивала вынос породного и в том числе рудного материала с южной окраины Западно-Туранской цеолит-редкоземельно-серебро-золоторудно-олово-молибден-руднороссыпной минерогенической зоны.

Непосредственно в озерно-болотные отложения Архаринской депрессии микрокомпоненты поступали из месторождений и рудопроявлений олова, молибдена, вольфрама, ниобия, циркония, иттрия, церия вышеуказанной минерогенической зоны, которые фиксируются шлиховыми ореолами и единичными пробами касситерита, киновари и циркона, а также (по металлометрическому и гидрохимическому опробованию) серебра, меди, свинца и цинка [13]. БМ в зоне сопряжения Турана и Архаринской депрессии представлены золотом и серебром. Золото в современных и палеоген-неогеновых россыпных месторождениях, а также в шлиховых пробах в бассейнах рек Архара, Татакан, Илга, Урил, Домикан и др. представлено зернами неправильной комковатой и пластинчатой форм в сростках с серебром размером от 0.05 до 1 мм. Пробность золота – от 632.5 до 852.5. Серебро, по данным гидрохимического опробования, установлено в между-речье Илга-Татакан.

1.2. Химические и физико-химические методы исследования бурых углей. Изучение технического и элементного состава угля и золы Архаринского бурогоугольного месторождения выполнено в Федеральном исследовательском центре угля и углехимии СО РАН (г. Кемерово) по двум пробам из пластов Промежуточный (2540 г) и Нижний (2020 г). Пробы подвергались разделке, включающей измельчение, перемешивание и сокращение, проведенной вручную методом квартования. Подготовленные пробы углей, измельченные до размеров менее 3 мм, использовались для определения общей влаги по ГОСТ Р 52911-2013. После ее определения методом квартования были отобраны образцы угля массой примерно по 100 г, доведены в лаборатории до воздушно-сухого состояния и измельчены до размера менее 0.2 мм для дальнейших аналитических исследований.

Определение влаги в аналитических пробах выполнено по ГОСТ 33503-2015, зольности – по ГОСТ Р 55661-2013, выход летучих веществ – по ГОСТ Р 55660-2013, серы – по ГОСТ 8606-2015 (метод Эшка), содержания углерода и водорода – по ГОСТ 2408.1-95 (ИСО 625:1996), азота – методом Кельдаля по ГОСТ 28743-93.

Петрографический анализ проводили на автоматизированном комплексе оценки марочного состава углей системы *SIAMS-620* (Россия) в среде масляной иммерсии. Порции воздушно-сухой пробы, измельченной по ГОСТ Р 55663-2013, смешивали со связующим веществом (шеллак), одну сторону которого шлифовали и полировали до получения гладкой поверхности. Мацералы идентифицировали в иммерсионной среде по их показателю отражения, цвету, морфологии, высоте микрорельефа, структуре, степени ее сохранности, а также по размерам. Подсчет микрокомпонентов проводили вручную при увеличении в отраженном свете в 300 раз.

Золу для анализа получали медленным озолением аналитических проб исследуемых бурых углей в муфельной печи при температуре 815°C согласно ГОСТ 11022-95. Химический состав зольных остатков определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре с индукционно-связанной плазмой *iCAP 6500 Duo LA* фирмы *Thermo Scientific*.

Термический анализ проводили на термоанализаторе фирмы *Netzsch STA 409* с масс-спектрометрической приставкой *Aeolos* в следующих условиях: масса образца 40 мг; тигель платиново-иридиевый; нагрев до 1000°C со скоростью 10°C/мин в среде гелия. В ходе анализа регистрировали потерю массы (ТГ) и скорость потери массы (ДТГ). Термогравиметрические данные обрабатывали с использованием программного обеспечения *NETZSCH Proteus*. Для характеристики термического разложения использовали показате-

Таблица 1. Получение продуктов сгорания бурого угля Архаро-Богучанского месторождения на ЭТК “Амур”

№	Описание процесса	Продукт сгорания
1	Послойное сжигание угля (рис. 3, I) при температуре 800–1100°C (рис. 3, термопара 5.1), в топочной камере с формированием несгораемого остатка из минеральных примесей (топочный шлак) (рис. 3, II)	Сжигаемый исходный уголь
		Шлак топочный
2	Принудительный перенос воздушно-газовой смеси, создаваемый дымососом, из топочной камеры в камеру дожига золоуловителя. В двухсекционном золоуловителе происходит дожиг летучих соединений углерода при температуре 600–800°C (рис. 3, термопара 5.2) и осаждение золы-уноса (рис. 3, III)	Зола-уноса
3	Газовый поток, очищенный от золы-уноса массой более 20 мкг, а также летучие продукты сгорания топлива, состоящие из горячих газов, содержащих окислы углерода, азота, серы и водяного пара, выводятся из золоуловителя дымососом в скруббер для дальнейшей “мокрой” очистки дымовых газов от примесей с понижением температуры <200–250°C на выходе из золоуловителя (рис. 3, термопара 5.3) до 60–80°C на выходе из скруббера (рис. 3, термопара 5.4). Из скруббера очищенные газы выносятся в атмосферу, а жидкая фаза с взвесями попадает в фильтровальный блок. В фильтровальном блоке проводится многоступенчатая очистка техногенной воды от шлама (рис. 3, IV) и ионов тяжелых металлов	Шлам фильтрации техногенной воды скруббера
4	Очищенная техногенная вода поступает в емкость (рис. 3, V) для дальнейшего использования (оборотное водоснабжение)	Очищенная техногенная вода

тели: T_{\max} – температура максимальной скорости разложения, V_{\max} – скорость разложения в точке перегиба на кривой ДТГ. Потерю массы (Δm) рассчитывали в интервалах температур наиболее интенсивного разложения образца. Масс-спектры продуктов термической деструкции регистрировали на масс-спектрометрической приставке *Aeolos* при ионизации электронным ударом с энергией 70 эВ в диапазоне сканирования 1–300 а.е.м.

Исследования текстурных характеристик образцов бурых углей проводили методом низкотемпературной адсорбции азота на объемной вакуумной статической установке *ASAP-2020 Micromeritics*. Величину удельной поверхности образцов получили с помощью анализа изотерм адсорбции-десорбции N_2 при $-196^\circ C$ (77 К). Перед проведением адсорбционных измерений исследуемые образцы вакуумировали непосредственно в специальном порту прибора при $105^\circ C$, в течение 15 ч до остаточного давления не менее $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Измерения изотерм адсорбции-десорбции азота проводили в области равновесных относительных давлений паров от 10^{-3} до $0.995 P/P_0$.

1.3. Технология получения отдельных фракций продуктов сгорания бурых углей. Выделение из угля продуктов сгорания проводили на ЭТК “Амур” [12]. При сжигании крупно-объемной

пробы угля Архаро-Богучанского месторождения весом 270 кг были получены (кг): топочный шлак (16.0), две фракции золы-уноса (тяжелая – 2.0 и легкая – 1.08), шлам фильтра-отстойника (0.24), шлам скруббера (0.37), шлам фильтрации (осадок техногенной воды) (2.4). Общий вес ПСУ (продукты сгорания угля) – 22.09 кг, объем техногенной воды – 80 л (табл. 1, рис. 3).

Полученные продукты сгорания бурых углей проходили последовательную процедуру обогащения. Топочный шлак измельчался на щековой дробилке ДЛЩ-80-150 до фракции – 1 мм. Для выделения и разделения недожога и легких частиц использовали слабонаклонный шлюз прямоугольного сечения, на дно которого укладывали дражные коврики, позволяющие создать в придонных слоях турбулентный поток и удерживать осевшие на дно тяжелые частицы. Измельченная тяжелая фракция шлюза пропусклась через мокрый магнитный сепаратор ММС-0.1. Немагнитная фракция стола подавалась на концентратный стол СКО-0.5, на котором были получены конечные продукты обогащения: концентрат и хвосты обогащения. Основное количество благородных металлов и других полезных компонентов установлено в концентрате тяжелой фракции.

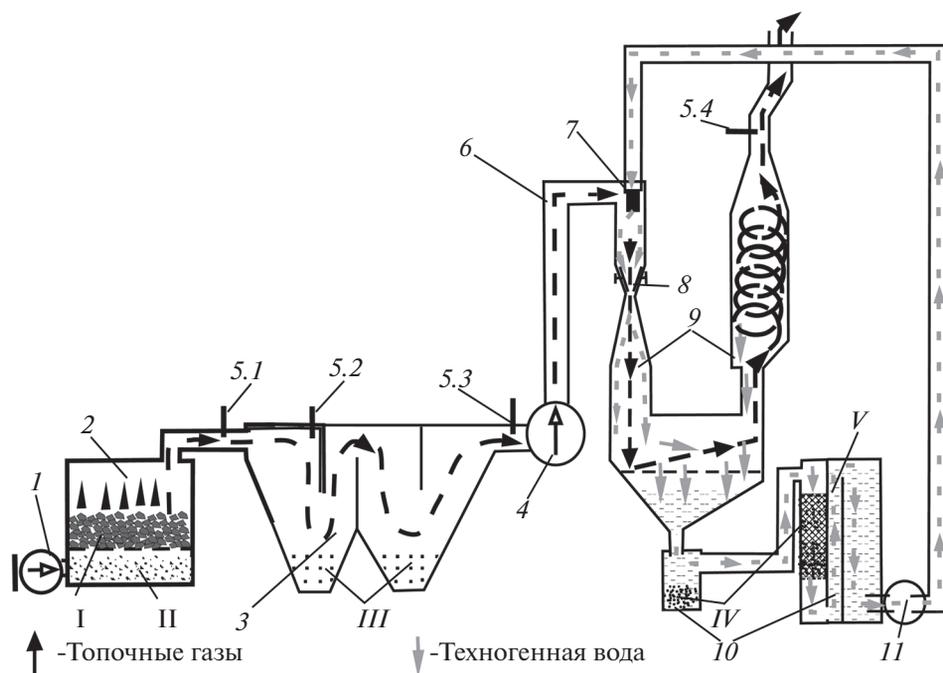


Рис. 3. Схема экспериментально-технологического комплекса (ЭТК) “Амур”: 1 – дутьевой вентилятор; 2 – топочная камера; 3 – двухсекционный золоуловитель с камерой дожига летучих соединений углерода; 4 – дымосос; 5.1–5.4 – термопары; 6 – дымоход; 7 – спринклерный ороситель; 8 – конфузор; 9 – скруббер с влагоуловителем; 10 – фильтровальный блок; 11 – насосная секция с водопроводом; I – сжигаемый уголь; II – топочный шлак; III – зола-уноса; IV – шлам фильтрации техногенной воды; V – техногенная вода.

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-0.1 выделены магнитная и немагнитная фракции, после чего немагнитная фракция обогащалась на концентрационном столе СКО-0.5.

Шлам, полученный в результате очистки техногенной воды на фильтре грубой очистки, промывали в бромформе и разделяли на магнитную, электромагнитную, немагнитную тяжелую и немагнитную легкую фракции.

С помощью гравитационного и магнитного обогащения из шлака и золы-уноса получили объединенный концентрат. Из него выделили частицы БМ, которые исследовали минералогическим методом с применением микрохимических реакций и иммерсионного метода в лаборатории ИГиП ДВО РАН. Химический состав частиц определяли с помощью сканирующей электронной микроскопии (YEGA 3LMH) с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором X-Max80 в Хабаровском инновационно-аналитическом центре Института тектоники и геофизики имени академика Ю.А. Косыгина (ИТиГ) ДВО РАН. Пробирный анализ золота выполняли в АмурНЦ ДВО РАН.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Химические и физико-химические характеристики бурых углей. Результаты анализов показали, что бурые угли Архаро-Богучанского месторождения характеризуются повышенной зольностью (до 18.7%), содержанием кислорода (до 28.7%). В составе углей установлено содержание семивитринита до 46% с показателем $R_{o,r}$ витринита 0.403%. В золе угля отмечается высокое содержание оксидов алюминия (17.7–30.5%) и кремния (36.8–69.5%) и, судя по их отношению ($Al_2O_3/SiO_2 < 0.9$), они могут быть отнесены к алюмосиликатному типу глинистой природы. Это подтверждает широкое развитие кор выветривания химического типа на южной окраине Туранского поднятия в период формирования палеогеновых торфяников Архаринской депрессии. В золе углей присутствуют также кальций (до 15.3%), железо (до 12.72%), титан (1%) и калий (до 0.3%).

Термогравиметрический анализ углей месторождения показывает, что термическое разложение угля при нагреве до температуры 1000°C протекает в несколько стадий: ниже 200°C – удаление связанной влаги, а при 300–600°C – основная потеря массы угля, обусловленная деструкцией

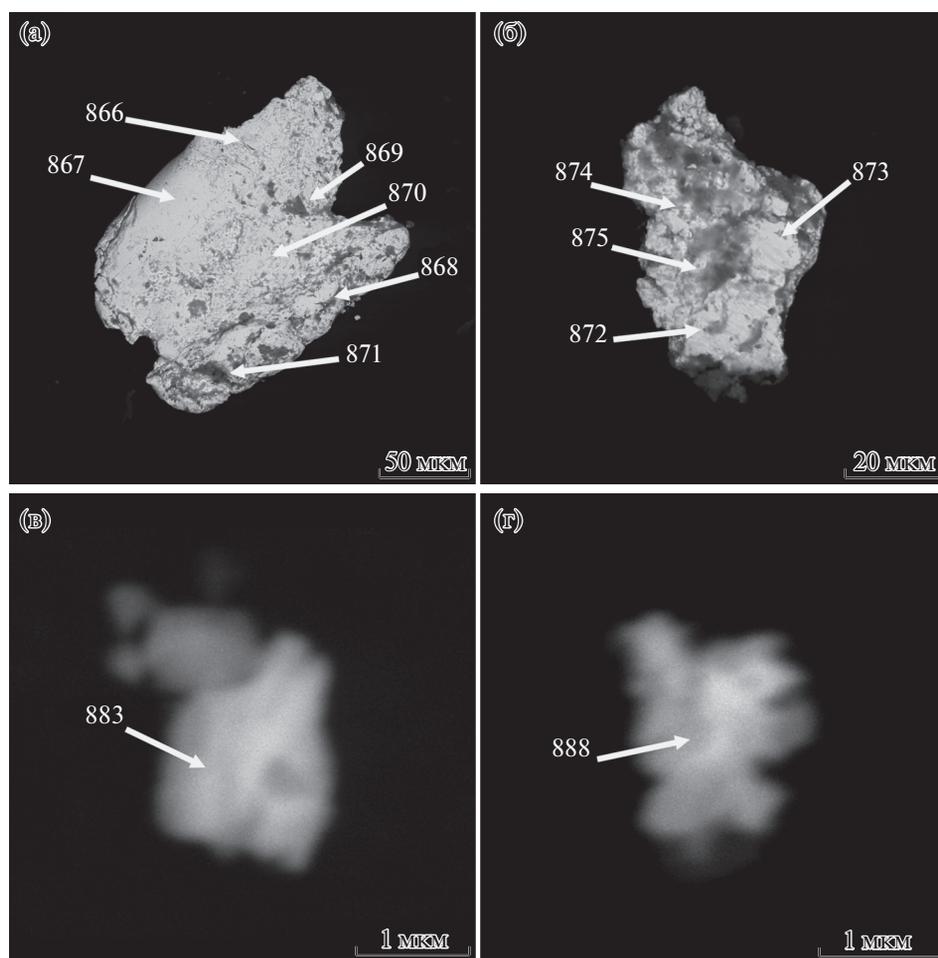


Рис. 4. Микрофотографии самородного золота (а)–(в) и платины (г), извлеченных из шлаков.

углерод-углеродных связей с выделением летучих продуктов и формированием полукокса. Третий интервал разложения ($750\text{--}1000^\circ\text{C}$) связан с процессами структурирования углеродного остатка в кокс. При этом в интервале температур $600\text{--}800^\circ\text{C}$, вероятно, происходит разложение минеральных веществ (сидерит, пирит, каолинит) [14]. В масс-спектрах летучих продуктов пиролиза отмечается возрастание интенсивности пиков, характерных для карбоксильных и карбонильных ионов, что подтверждает наличие в его минеральной составляющей карбонатных минералов.

Анализируя результаты экспериментальных данных по изучению удельной поверхности, можно отметить, что угли в исследованных образцах характеризуются мезопористой структурой с повышенной адсорбционной емкостью по азоту (до $0.036\text{ см}^3/\text{г}$) и наличием щелевидных плоскопараллельных мезопор.

2.2. Морфологические характеристики частиц благородных металлов в продуктах сгорания бурых углей. Фотографии частиц Au в ПСУ показаны на рис. 4,а,в, а их химический состав представлен в табл. 2–5. Благородные металлы в шлаках представлены Au и Pt (рис. 4, табл. 2). На рис. 4,а – золото наблюдается в виде зерна массивной текстуры размером $160.0 \cdot 115.0\text{ мкм}$, окатанного с одной стороны, а с другой – с неровной (зазубренной) поверхностью с включениями Fe_2O_3 (спектр 871) и FeTiO_3 (спектр 869). Структура зерна комковатая, текстура массивная. Концентрация Au (спектры 866–868, 870) колеблется от 98.76 до 99.45% с примесями (мас. %): Fe (0.33), Cu (0.55–1.24). На рис. 4,б золото представлено рыхлым агломератом (“спеком”) размером $60.0 \cdot 36.0\text{ мкм}$, неправильной комковатой формы с острыми гранями, с примесью (мас. %): Cu (от 0.48 до 7.65), Hg (от 5.30 до 15.85) и алюмосиликатов, цементирующих отдельные зерна золота с содержаниями Au 80.45–86.25% (спектры 872–874) и 21.20%

Таблица 2. Химический состав благородных металлов, извлеченных из шлаков, мас. %

Элемент	Номер спектра											
	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	883	888
	рис. 4,а						рис. 4,б				рис. 4,в	рис. 4,г
Au	98.78	99.45	99.10	0.65	98.76	7.45	80.45	86.25	82.56	21.20	73.06	—
Ag	—	—	—	—	—	—	—	—	1.41	—	—	—
O	—	—	—	33.45	—	14.04	—	—	—	35.99	—	—
Na	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.81
Al	—	—	—	0.16	—	0.81	—	—	—	9.18	—	0.92
Si	—	—	—	0.14	—	0.95	—	—	—	4.85	—	—
Cl	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.43	—	—
Ca	—	—	—	—	—	0.14	—	—	—	9.44	—	—
Ti	—	—	—	25.34	—	—	—	—	—	—	—	—
V	—	—	—	0.26	—	—	—	—	—	—	—	—
Mn	—	—	—	1.79	—	—	—	—	—	0.36	—	—
Fe	0.33	—	—	37.37	—	61.93	—	—	—	5.59	0.69	—
Cu	0.89	0.55	0.90	0.57	1.24	14.67	3.70	0.48	1.59	7.65	6.63	1.14
Sn	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.59	—
Sb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.60	—
As	—	—	—	0.26	—	0.00	—	—	—	—	—	—
Hg	—	—	—	—	—	—	15.85	13.27	14.43	5.30	—	—
Pb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.42	—
Pt	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	97.14
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Таблица 3. Химический состав благородных металлов, извлеченных из золы-уноса, мас. %

Элемент	Номер спектра									
	922	923	924	926	927	928	929	930	932	
	рис. 5,а				рис. 5,б				рис. 5,в	рис. 5,г
Au	81.25	80.05	79.00	80.46	82.19	80.85	—	—	—	
Ag	18.75	19.95	21.00	19.54	17.43	18.71	—	—	89.79	
O	—	—	—	—	—	—	47.74	10.14	—	
Na	—	—	—	—	—	—	—	0.55	—	
Al	—	—	—	—	—	—	8.00	0.89	—	
Si	—	—	—	—	—	—	20.97	—	—	
S	—	—	—	—	—	—	0.18	—	10.21	
Cl	—	—	—	—	—	—	0.20	—	—	
K	—	—	—	—	—	—	1.03	0.85	—	
Ca	—	—	—	—	—	—	0.27	—	—	
Ti	—	—	—	—	—	—	0.13	—	—	
Fe	—	—	—	—	0.38	0.44	20.53	—	—	
Cu	—	—	—	—	—	—	0.96	1.32	—	
Pt	—	—	—	—	—	—	—	86.25	—	
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

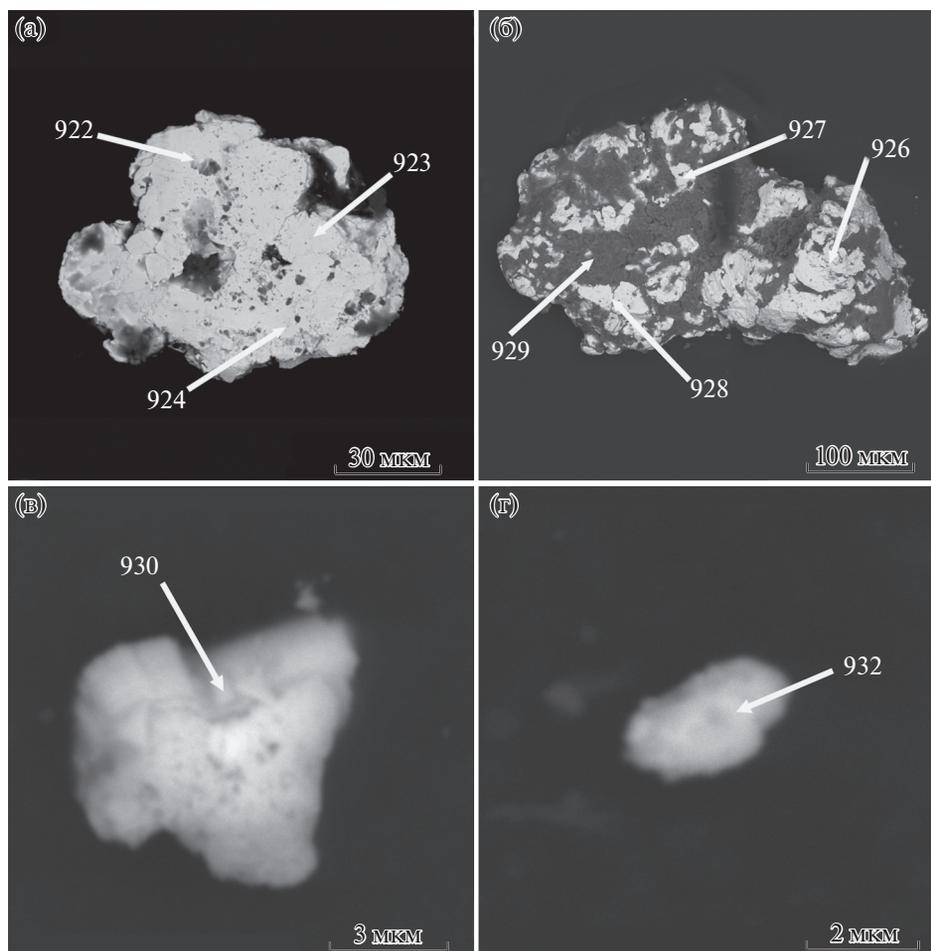


Рис. 5. Микрофотографии самородного золота (а), (б), платины (в) и серебра (г), извлеченных из золы-уноса.

(спектр 875). Золото на рис. 4, в наблюдается в виде зерна размером $2.0 \cdot 1.6$ мкм (спектр 883) массивной текстуры с содержанием 73.06%; в качестве примесей в нем присутствуют (мас. %): Fe (0.69), Cu (6.63), Sn (4.59), Sb (7.60), Pb (7.42). На рис. 4, г установлено зерно платины (спектр 888) размером $2.0 \cdot 1.6$ мкм с содержанием 97.14%. Среди примесей выявлены Na, Al и Cu.

Благородные металлы в золе-уноса представлены на рис. 5, а их характеристики — в табл. 3. На рис. 5, а наблюдается полуокатанное зерно электрума с гладкой поверхностью массивной текстуры размером $98.0 \cdot 74.0$ мкм. Содержание Au в нем колеблется от 79.00 до 81.25% (спектры 922–924). На рис. 5, б представлено полуокатанное зерно электрума с концентрацией Au от 80.46 до 82.19%, а Ag — от 17.43 до 19.54% (спектры 926–928). На рис. 5, в изображено зерно платины неокатанной прямоугольной формы размером $6.5 \cdot 6.0$ мкм (спектр 930). Содержания (мас. %): Pt (86.25), Cu (1.32), O (10.14). На рис. 5, г — зерно серебра размером $3.0 \cdot 1.6$ мкм комковато-оваль-

ной формы с неровной поверхностью (спектр 932). Содержание (мас. %): Ag (89.79), S (10.21).

Золото и серебро в золе-уноса показаны также и на рис. 6 (табл. 4). Рисунок 6, а (спектры 944–947) характеризует рыхлый агломерат размером $28.0 \cdot 21.0$ мкм с частицами золота и серебра (мас. %): Au (60.71–74.08), Ag (2.64–10.15) с Cu (1.50–8.60), сцементированными Hg (19.52–27.37). Рисунок 6, б иллюстрирует полуокатанное зерно золота размером $65.0–44.0$ мкм с гладкой поверхностью с концентрацией Au (80.94–81.49%), Ag (2.08–2.66%) и значительным содержанием Hg (15.93–16.59%) (спектры 941–943). На рис. 6, в показан агломерат (“спек”) пористой текстуры размером $60 \cdot 68$ мкм, основу которого составляет (мас. %): Au (69.19–76.71) с примесью Ag (4.90–8.97) и Hg (17.73–21.30) (спектры 937–940). На рис. 6, г представлен агломерат размером $4.5 \cdot 4.0$ мкм (спектр 952), в виде спекшихся частиц Ag (66.88%) и Cu (0.45%) величиной от 0.5 до 1.25 мкм.

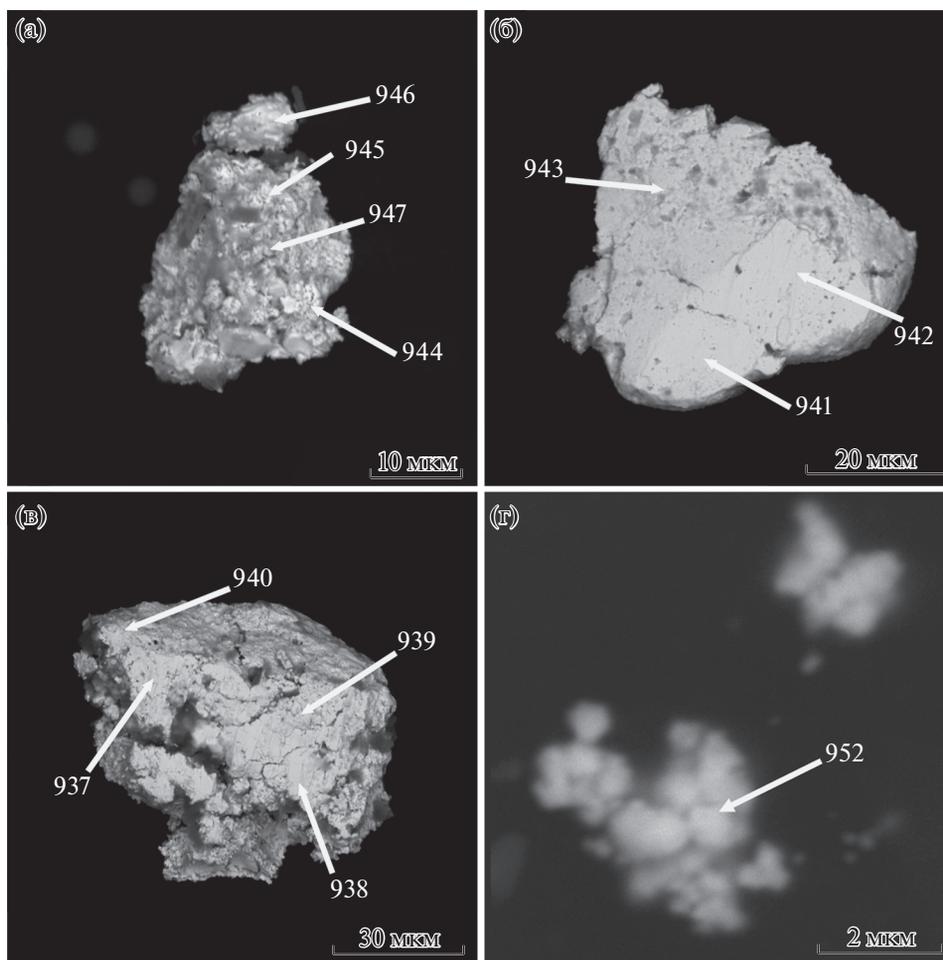


Рис. 6. Микрофотографии самородного золота (а)–(в) и серебра (г), извлеченных из золы-уноса.

В шламе (рис. 7, табл. 5) обнаружены Au (рис. 7,а) и Ag (рис. 7,б): первая золотина (рис. 7,а) брусковидной формы с гладкой поверхностью с широкими бороздами вдоль краев с удлиненной поверхностью размером 86.0 · 40.0 мкм (спектр 274) и содержанием (мас. %): Au (94.15), Ag (5.85). На рис. 7,б наблюдается раздробленное зерно округлой формы размером меньшего индивидуума 0.4 · 0.4 мкм (спектр 461), основу которого составляет Pt (75.83%) с обилием включений (мас. %): S (9.32), Fe (2.61), Cu (3.21), Zn (1.25).

Анализируя распределение БМ в продуктах сгорания углей Архаро-Богучанского месторождения, следует отметить, что их основу составляют золото, серебро и реже платина. Золото по составу элементов-примесей в значительной мере сохраняет связь с коренными источниками из областей сноса [13]. Судя по месторождениям, рудопроявлениям и ореолам рассеяния в обрамлении (см. рис. 2), можно предполагать, что часть из них (Cu, Pb, Fe, как и Hg) могли формироваться в

первичных золоторудных и комплексных месторождениях в виде постоянных элементов-примесей [15]. В то же время некоторые из них могли заполнять пустоты и каверны в самородном золоте во время термических и других природных процессов. Эти вопросы будут рассматриваться в процессе последующих исследований.

Самородное золото существенно различается по морфологическим признакам. В шлаках — это комковатые массивные обломки различной степени окатанности, вероятно, поступающие в торфяники из россыпей и шлиховых ореолов в период наводнений и паводков [16]. Содержание Au в них обычно превышает 80%, размер зерен — от 2.0 · 1.6 до 160.0 · 115.0 мкм. В золе-уноса вместе с золотом в значительной мере присутствуют серебро и платина. Как правило, это плохо- и полуокатанные обломки, пластины и бруски размером 98.7 · 74.0 мкм с концентрацией Pt до 86.5%, а Ag — от 21.8 до 66.88%. Элементы-примеси в них крайне редки (Fe, Cu).

Таблица 4. Химический состав благородных металлов, извлеченных из золы-уноса, мас. %

Элемент	Номер спектра											
	944	945	946	947	941	942	943	937	938	939	940	952
	рис. 6,а				рис. 6,б			рис. 6,в				рис. 6,г
Au	60.71	74.08	61.83	68.71	81.49	81.33	80.94	71.86	76.71	71.24	69.19	–
Ag	9.36	4.89	10.15	2.64	2.08	2.08	2.66	8.33	4.90	6.09	8.97	66.88
Na	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.46
Al	–	–	–	–	–	–	0.47	–	–	0.33	–	–
Cl	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5.31
Ca	0.23	–	–	0.41	–	–	–	–	–	–	–	–
Ti	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fe	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Cu	2.82	1.50	0.66	8.60	–	–	–	1.08	–	4.61	0.54	0.45
Br	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	26.89
Hg	26.89	19.52	27.37	19.64	16.43	16.59	15.93	18.73	18.39	17.73	21.30	–
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Кроме рассмотренных минеральных ассоциаций, в золе-уноса в значительном количестве присутствуют рыхлые агрегированные образования (агломераты) размером от $4.5 \cdot 4.0$ до $60.0 \cdot 68.0$ мкм, формирование которых связано с процессами термических преобразований. Они состоят из зерен Au и Ag с различной концентрацией – от 2.4 до 89.79%, размером от 0.5–1.0 до 1.6–3.0 мкм с включением Hg до 19.5% и Cu 8.6%, реже – алюмосиликатов и Mn. Указанные индивидуумы, су-

дя по размерности, составу включений и морфологии, представляют собой, по мнению авторов, продукты разных генетических групп: обломки руд из обрамления бассейна, привнесенные в торфяники водными потоками, новообразованные формы, созданные во время миграции в речной среде и при взаимодействии с органической средой торфяников. Их “спекание” происходит преимущественно в золе-уноса в интервале температур 600–800°C. Этот интервал может рас-

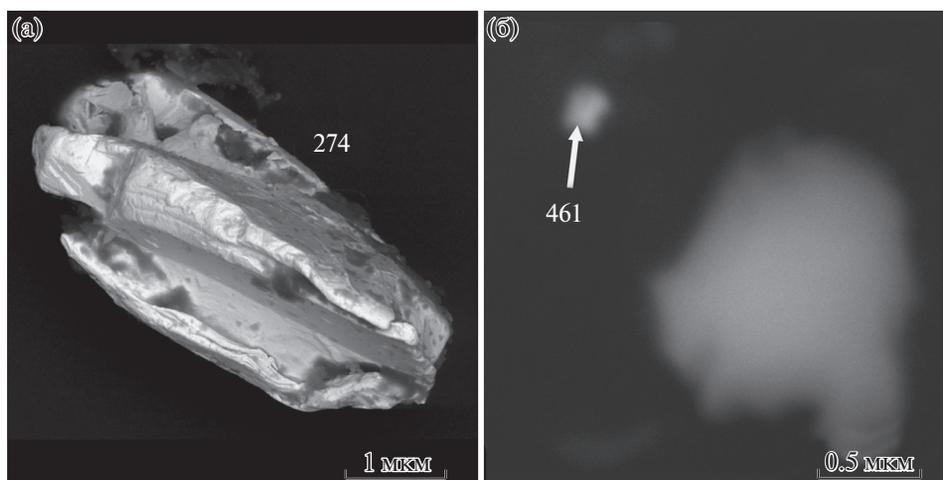
**Рис. 7.** Микрофотографии самородного золота (а) и платины (б), извлеченных из шлама.

Таблица 5. Химический состав благородных металлов, извлеченных из шлама, мас. %

Элемент	Номер спектра	
	274	461
	рис. 7,а	рис. 7,б
Au	94.15	–
Ag	5.85	–
Na	–	1.47
Al	–	3.17
S	–	9.32
Cl	–	2.47
K	–	0.76
Fe	–	2.61
Cu	–	3.21
Zn	–	1.25
Pt	–	75.83
Сумма	100	100

смагиваться наиболее продуктивным для осаждения и “спекания” мелких, в том числе дисперсных частиц БМ, замедляющий их унос газовым потоком. Количество золота в продуктах сгорания угля приведено в табл. 6.

При рассмотрении состава элементов-примесей в шлаке и золе-уноса обращает внимание присутствие значительного количества в них ртути, что связано, по-видимому, с технологическими особенностями проведения эксперимента на ЭТК “Амур”. Уголь сжигался в топочной камере на горизонтальных колосниках слоевым способом с периодом загрузки топлива 30 мин. Часть ртути оставалась в шлаковых и зольных отходах вследствие небольшого временного интервала температурного воздействия в зонах более низких температур и в “недожогах”. Отметим, что технология отпарки ртути из амальгамы продолжается

от 3 до 6 ч при температуре 400–800°C. Следует также подчеркнуть наличие повышенных концентраций ртути в месторождениях углей Приамурья (г/т): в Сутарском – 0.65, Ушумунском – 0.14, Архаро-Богучанском – 0.32 при кларке в бурых углях 0.1–0.2 г/т [17]. Наличие ртути ранее отмечалось в золе Приморской ГРЭС [18], в ЗШО ТЭЦ Хабаровска [19], причем в ЗШО ртуть была обнаружена в капельно-жидком состоянии в составе тяжелой фракции продуктов обогащения. Таким образом, вопрос о поведении ртути в процессе сгорания угля пока остается открытым, хотя имеет первоначальное значение вследствие высокой ее токсичности.

ВЫВОДЫ

1. Бурые угли Архаро-Богучанского месторождения характеризуются повышенной зольностью (до 18.7%), высоким содержанием семивитринита, оксидов алюминия (до 30.52%) и кремния (до 69.52%), указывающими на алюмосиликатный тип глинистой природы. Установлено, что термическое разложение этих углей происходит в несколько стадий: при 20–120°C – удаление влаги, при 300–600°C – основная потеря массы угля с выделением летучих продуктов, а при 600–800°C – разложение минеральных веществ.

2. Разработана технология отдельного получения фракций продуктов сгорания угля, изучена морфология, особенности состава и строения БМ Архаро-Богучанского бурогоугольного месторождения. Выявлены две основные их разновидности: первая – массивные комковатые индивидуумы, часто с заметными элементами обработки поверхности при переносе водными потоками, в значительной мере сохраняющие рудную специализацию коренных источников областей сноса. По мере снижения температурного режима сгорания они “облагораживаются” и теряют элементы-примеси в шламе. Вторая разновидность БМ – рыхлые агломераты, слабо сцементированные окислами железа и ртути, которые при макроскопическом изучении легко распадаются с выделением частиц золота различной концентрации. Эти соединения формируются в интервале тем-

Таблица 6. Содержание золота в продуктах сгорания углей Архаро-Богучанского месторождения

№	Наименование	Масса, кг	Содержание Au		
			г/т	итого, г	%
1	Топочный шлак	16.00	0.91	0.01456	83.5
2	Зола-уноса	3.08	0.31	0.00096	5.5
3	Шлам (продукты мокрой очистки)	3.01	0.64	0.00192	11.0
	Итого ПСУ:	22.09	0.79	0.01745	100

ператур 600–800°C, создавая режим термического “концентрирования” обломков различной генетической природы, которые можно рассматривать как начальный этап сохранения БМ от уноса в газовом потоке.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Середин В.В.* // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 1. С. 3. [Geology of Ore Deposits, 2007, vol. 49, № 1, p. 1. <https://doi.org/10.1134/S1075701507010011>]
2. *Сорокин А.П., Чантурия В.А., Рождествина В.И., Кузьминых В.М., Жмодик С.М.* // ДАН. 2012. Т. 446. № 6. С. 672. [Doklady Earth Sciences, 2012, vol. 446, № 2, p. 1215. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12100182>]
3. *Сорокин А.П., Рождествина В.И., Кузьминых В.М., Жмодик С.М., Анохин Г.Н., Митькин В.Н.* // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 7. С. 876. [Russian Geology and Geophysics 2013, vol. 54, № 7, p. 671. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.06.003>]
4. *Крапивенцева В.В.* // Тихоокеанская геология. 2005. Т. 24. № 1. С. 73.
5. *Сорокин А.П., Конюшок А.А., Агеев О.А., Кузьминых В.М.* // ФТПРПИ. 2019. № 4. С. 141. [Journal of Mining Science, 2019, vol. 55, № 4, p. 643. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190415>]
6. *Арбузов С.И., Ильенко С.С., Машенькин В.С., Сунь Юйчжуан, Жао Цунлянь, Блохин М.Г., Иванов В.В., Зарубина Н.В.* // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 8. С. 74.
7. *Неженский И.А., Вялов В.И., Мирхалевская Н.В., Чернышев А.А.* // Региональная геология и металлогения. 2013. № 54. С. 99.
8. *Куимова Н.Г., Сорокин А.П.* // ДАН. 2010. Т. 430. № 1. С. 94. [Doklady Earth Sciences, 2010, vol. 430, № 1, p. 43. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10010095>]
9. *Павлова Л.М., Некрасов Э.В., Радомская В.И., Шумилова Л.П., Сорокин А.П.* // ДАН. 2018. Т. 483. № 6. С. 190. [Doklady Earth Sciences, 2018, vol. 483, № 1, p. 1442. DOI: 10.1134/S1028334X18110120] <https://doi.org/10.31857/S086956520003479-9>
10. *Sorokin A.P., Konyushok A.A., Ageev O.A., Zarubina N.V., Ivanov V.V., Wang J.* // Energy Exploration & Exploitation. 2019. V. 37. № 6. P. 1721.
11. *Сорокин А.П., Конюшок А.А., Кузьминых В.М., Артеменко Т.В., Попов А.А.* // Геотектоника. 2019. № 2. С. 33. [Geotectonics, 2019, vol. 53, №. 2, p. 193. DOI: 10.1134/S0016852119 0200 92] <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019233-45>
12. *Сорокин А.П., Агеев О.А.* Устройство для получения разделенных продуктов сгорания углей. Пат. 2699642 РФ // Б.И. 2019. № 25. С. 9.
13. Карта полезных ископаемых СССР масштаба 1:200 000. Лист М-52-XXIII (Архара). Хинганно-Бурейнская серия / Под ред. Л.Б. Кривицкого. Л.: Аэрогеология, 1975.
14. *Шпирт М.Я.* Безотходная технология. Утилизация отходов добычи и переработки твердых горючих ископаемых. М.: Недра, 1986. 255 с.
15. *Петровская Н.В.* Самородное золото. М.: Наука, 1973. 347 с.
16. *Crosdale P.J., Sorokin A.P., Woolfe K.J., Macdonald D.I.M.* // Int. J. Coal Geology. 2002. V. 51. P. 215.
17. *Юдович Э.Я., Кетрис М.П.* // Вестн. Ин-та геол. Коми НЦ УРО РАН. 2004. № 10. С. 6.
18. *Рассказова А.В., Лаврик Н.А., Литвинова Н.М., Богомяков Р.В.* // ГИАБ. 2016. № S21. С. 282.
19. *Черепанов А.А.* // Тихоокеанская геология. 2008. № 2. С. 16. [Russian Journal of Pacific Geology, 2008, vol. 2, № 2, p. 110. <https://doi.org/10.1134/S1819714008020024>]