

УДК 543.53+546.59+546.63+622.17

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОДУКТАХ СЖИГАНИЯ УГЛЕЙ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ МЕТОДОМ ИНАА С РАДИОНУКЛИДНЫМ ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ

© 2024 г. С. И. Иванников^{1,*}, Н. С. Маркин^{1,**}, А. В. Таскин^{2,***},
О. А. Агеев^{3,****}, Л. А. Земскова^{1,*****}

¹ФГБУН Институт химии ДВО РАН, Владивосток, 690022 Россия

²ФГАУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, 690922 Россия

³ФГБУН Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, 675000 Россия

*e-mail: fyajkfqn@mail.ru

**e-mail: markkin.ns@gmail.com

***e-mail: taskin@yandex.ru

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

*****e-mail: zemskova@ich.dvo.ru

Поступила в редакцию 27.07.2023 г.

После доработки 16.08.2023 г.

Принята к публикации 04.10.2023 г.

Рассмотрены золошлаковые отходы от сжигания углей в качестве источника получения ценных металлов. Приведены результаты исследования золошлаковых отходов ТЭЦ Приморья, продуктов сжигания углей Амурской области и некоторых продуктов фракционирования золошлаковых отходов на содержание золота и скандия. Изучены уровни концентраций этих металлов для предварительной оценки их возможной промышленной значимости методом инструментального нейтронно-активационного анализа.

Ключевые слова: техногенное сырье, золошлаковые отходы, золото, скандий, инструментальный нейтронно-активационный анализ

DOI: 10.31857/S0023117724010095 EDN: OPPNNB

ВВЕДЕНИЕ

Альтернативным рудам источником для получения стратегически важных и благородных металлов, составляющих основу передовых технологий и новых материалов, являются техногенные сырьевые источники, а именно отходы металлургической, химической, энергетической переработки полезных ископаемых [1]. В частности, в результате работы теплоэлектростанций, работающих на твердом топливе, образуются золошлаковые отходы (ЗШО), представляющие собой смесь золы и шлака. Количество накопленных в России золошлаков составляет, по разным оценкам, 1.7–2.0 млрд т, а занимаемая ими площадь – 22–30 тыс. га, кроме того, запасы угольной золы постоянно увеличиваются на 20–30 млн т в год [2, 3]. По вещественному составу угольную золу можно рассматривать как перспективный сырьевой источник редких и других металлов, она выгодно отличается от обычных месторождений тем, что находится

на поверхности, не требует расходов на добычу из недр. Техногенное сырье дезинтегрировано, локализовано в промышленно обустроенных районах с развитой инфраструктурой [1, 4]. Многие ценные элементы (Sc, Cu, Ga, Se, Rb, Sr, Ag, Te) образуют в продуктах сжигания углей повышенные концентрации, иногда на уровне потенциально пригодном для промышленного извлечения [5–8]. Разработка эффективных методов выделения ценных элементов из продуктов сжигания углей может повысить экономическую рентабельность переработки накопленных ЗШО и тем самым способствовать более активному решению связанных с этим экологических проблем. Вместе с тем промышленное извлечение важнейших элементов из угля и угольной золы сталкивается с различными теоретическими, технологическими, экономическими и экологическими трудностями [9]. Многие теоретические вопросы нуждаются в уточнении. Высокоэффективное и экономичное извлечение критических металлов из углей

определяется их концентрацией и формами нахождения. Достоверное знание о концентрациях и запасах ценных металлов имеет чрезвычайное значение для определения возможности/невозможности отработки месторождений полезных ископаемых [10]. В то время как оценка накопления металлов в компонентах угля (зола) даст важную информацию для разработки способов извлечения. Для того чтобы преодолеть технологические проблемы, необходимо разработать методы, позволяющие обеспечить одновременное извлечение разных ценных компонентов (элементов) из ЗШО в рамках одной технологической схемы. Кроме того, важно максимально утилизировать все компоненты ЗШО, чтобы минимизировать экологические проблемы.

Решение экологических проблем предполагает полную утилизацию ЗШО с высвобождением занимаемых площадей и снижением негативного воздействия на окружающую среду. Золошлаковые отходы утилизируются в строительно-дорожном комплексе (для устройства насыпей, строительстве дорог, дамб, фундаментов и других целей, закладке подземных выработок) и в комплексе промышленности строительных материалов (добавки в бетон, производство шлакоблоков, кирпича, цемента, керамзита, ячеистого бетона и др.), при проведении рекультивационных работ [2, 11].

Экспериментально доказана перспективность разделения ЗШО на органическую и минеральную составляющие: углеродсодержащий продукт, магнитную железосодержащую фракцию, алюмосиликатные микросферы, инертную массу алюмосиликатного состава. По этой технологии выделяется минеральная часть с содержанием углерода от 3 до 5% (для производства качественных стройматериалов) и угольный концентрат, который может быть возвращен в энергетический цикл или использован как сорбент для очистки промышленных сточных вод, в качестве наполнителей бетонов и резин и др. технических потребностей [2, 3].

В связи с этим представляет интерес оценить содержание дорогих металлов (например, Sc и Au), наиболее перспективных с экономической точки зрения, в отдельных фракциях золы и перераспределение этих металлов в процессе фракционирования золы для установления рациональных способов переработки ЗШО и оценки попутного извлечения этих металлов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования были выбраны золошлаковые отходы, отобранные на полигонах энергопредприятий Приморского края: Приморская ГРЭС (г. Лучегорск) и центральной котельной (г. Арсеньев). Отбор проб золошлаковых отходов проводился на различной глубине от 0.5 до 1.5 м от поверхности золоотвалов. Расстоянием между точками отбора составляло от 20 до 100 м. Пробы отбирались на пробных площадках из одного или нескольких слоев, или горизонтов. Отобранные образцы подвергались сушке при температуре в 105°C в течение 24 ч.

Для выделения магнитной фракции проба ЗШО предварительно подвергалась дезинтеграции до класса крупности менее 400 мкм на шаровой мельнице сухого помола марки МСШП-06, после чего направлялась на магнитную сепарацию на ПБМ-П-25-10, при напряженности магнитного поля в 300 Тл и частоте вращения 30 об/мин.

Для выделения недожога угля из крупных фракций ЗШО (более 0.5 мм) применяли сепарацию на концентрационном столе СКО-1 (ОАО “Машзавод “Труд”, Россия). Из мелких фракций ЗШО (менее 0.5 мм) для отделения недожога угля использовали специально модернизированную импеллерную флотационную установку ФМЛ-12.

Для изучения процесса распределения золота и скандия в продуктах сжигания углей (ПСУ) был использован Экспериментально-технологический комплекс ЭТК “Амур”, позволяющий создавать различные режимы сжигания угля и очистки дымовых газов с получением отдельных по размерным, плотностным и другим параметрам фракций (топочный шлак, зола-унос и продукты мокрой очистки дымовых газов — шлам и техногенная вода) [12]. Для сжигания на ЭТК “Амур” использовали бурые угли Еркевецкого месторождения (Амурской области).

Для определения содержания скандия и золота в пробах золошлаковых отходов и продуктах их фракционирования применялся метод инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА). Золото и скандий характеризуются высоким сечением захвата тепловых нейтронов, что делает возможным определение данных элементов не только при облучении на реакторе, но и при использовании мощных радионуклидных источников нейтронов. ИНАА

проводился на разработанной в Институте химии ДВО РАН установке, выполненной на базе радионуклидного источника нейтронов ^{252}Cf тип НК252М11 (АО “ГНЦ НИИАР”, Россия), с суммарным потоком нейтронов — 1×10^9 нейтр/с.

Определение наведенной активности Sc осуществлялось по гамма-линиям дочернего продукта реакции радиационного захвата ($^{45}\text{Sc} + n = ^{46}\text{Sc} + \gamma$) — 889.3 кэВ (99.9 %) и 1120.0 кэВ (99.9%). Определение наведенной активности Au осуществлялось по гамма-линии дочернего продукта реакции ($^{197}\text{Au} + n = ^{198}\text{Au} + \gamma$) — 411.8 кэВ (96%). Длительность активации образцов золы составляла 7–14 дней, время выдержки облученных образцов перед измерением наведенной активности — 1 сут. Объем проб составлял 50 мл. Измерение наведенной активности проводилось на коаксиальном *HPGe*-детекторе *GC2018* (“*Canberra*”, США). При времени измерения (экспозиции) пробы в 15 ч, порог определения по Sc составил — 1.0 г/т, а по Au — 0.01 г/т. Для времени измерения пробы в 0.5–1.0 ч, порог определения по Sc составил — 3.0–5.0 г/т, а по Au — 0.1–0.2 г/т.

Верификация результатов метода ИНАА проводилась путем определения Sc и Au методом ИННА в стандартных образцах золы бурого угля (ЗУК-1 и ЗУК-2) и черного сланца (СЧС-1 и СЛг-1) (Институт геохимии им. А.П. Виноградова ИГХ СО РАН, Россия), в которых содержание элементов было предварительно установлено другими методами анализа (АЭА, АЭА-ИСП, МС-ИСП, РФА, ИНАА на реакторе). Содержание Sc в пробах стандартных образцов варьировалось в диапазоне от 8.6 до 23 г/т, а содержание Au — от 0.1 до 2.5 г/т. Расхождение результатов ИНАА с сертифицированным значением для стандартных образцов по исследуемым элементам не превышало 15%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные за последние несколько десятилетий исследования элементов-примесей в угольных месторождениях во всем мире показали, что угли являются концентраторами многих ценных металлов. Особый интерес среди них представляет скандий, как элемент, почти не имеющий собственных промышленных месторождений, но нередко образующий аномалии в золах углей, вплоть до промышленно значимых концентраций [13–17]. Кларк скандия в углях

составляет 3.9 г/т, а для золы — 23 г/т [18]. Вместе с тем, ряд авторов отмечают повышенное содержание Sc в углях Сибири, Дальнего Востока, Монголии, Казахстана, Ирана. Так, в отдельных пробах углей Яхлинского месторождения Западной Сибири отмечаются аномальные концентрации скандия, вплоть до 43 г/т в угле и 1320 г/т в золе [14]. Аналогичная ситуация наблюдается и для углей Иркутского бассейна: при среднем содержании Sc на уровне 6.7 г/т в угле и 46.9 г/т в золе угля, в отдельных пробах содержание Sc в угле достигает 40 г/т, при концентрации в золе — до 300–500 г/т [17].

В работе [19] обобщены результаты исследования форм нахождения Sc, в которых рассматриваются условия его концентрирования в углях. Установлено, что Sc может быть связан как с органическим, так и минеральным веществом угля. На ранних стадиях углеобразовательного процесса основная масса Sc связана с органическим веществом. Характер распределения скандия по фракциям разной плотности зависит, в первую очередь, от зольности угля и содержания в нем скандия. В высокзолных углях с рядовым содержанием металла преобладает роль минерального вещества в балансе Sc, а в низко- и среднезолных — органического. В углях с высоким содержанием скандия его распределение по фракциям либо не зависит от зольности, либо слабо связано с ней. Сделан вывод о том, что в малозолных и среднезолных углях преобладает связь скандия с органическим веществом угля, а в высокзолных — с минеральным. При этом связь с органическим веществом не означает, что Sc находится в угле только в виде органоминеральных соединений. В метаморфизованных углях возможна и микроминеральная форма его нахождения в связи с образованием аутигенных скандийсодержащих минералов. Из-за малых размеров они не отделяются от органической матрицы при традиционном гравитационном обогащении угля.

При промышленном сжигании углей наблюдаются два типа распределения скандия в зольных отходах. В большинстве случаев Sc при сжигании не фракционируется, но сжигание скандиеносных углей с заметным вкладом органической формы ($\text{Sc}_{\text{орг}}$) ведет к улетучиванию существенной части Sc, с последующим обогащением уловленного зольного уноса и/или с безвозвратной атмосферной эмиссией скандия. Химическая природа этих процессов пока остается неясной и нуждается в изучении [20].

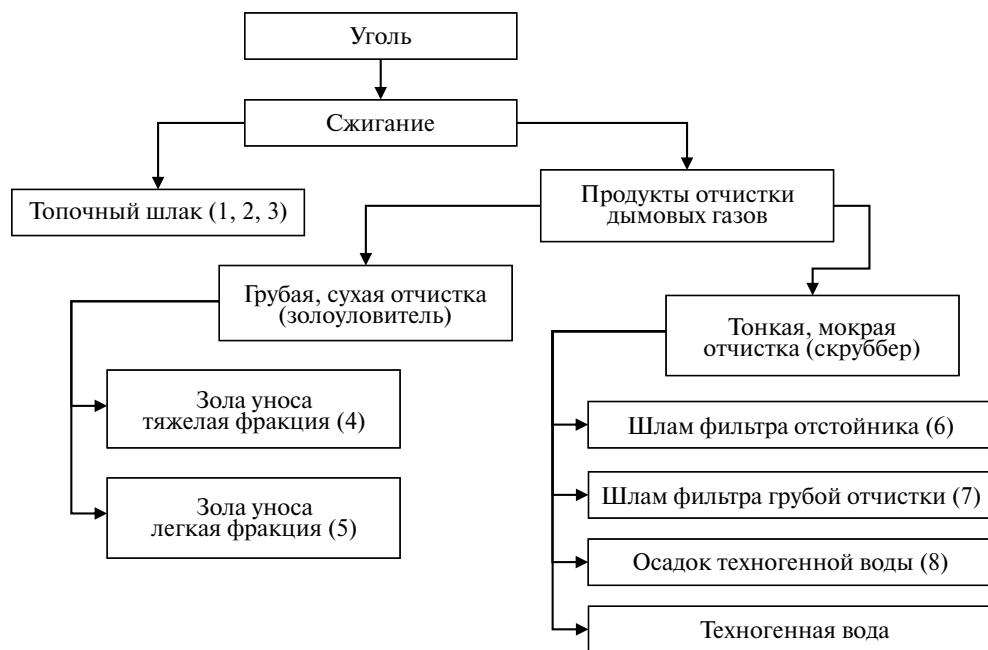


Рис. 1. Схема получения продуктов сгорания угля на ЭТК “Амур” [32].

Золото тоже может концентрироваться в углеродсодержащих объектах, например, в графитовых рудах или углеродистых сланцах, помимо этого, оно может концентрироваться и в различных природных углях. В результате переоценки ряда угольных месторождений и шлаковых отвалов тепловых станций с помощью современных аналитических методов установлено наличие угольных месторождений с повышенным содержанием золота [20, с. 431]. Так, в углях некоторых месторождений содержание Au может находиться на уровне обычных золотосодержащих руд (1.0–5.0 г/т) [21], а концентрация в золе может достигать десятка грамм на тонну [22]. Хотя такие значения можно, скорее, отнести к локальным аномалиям.

В составе угольных месторождений золото может находиться в виде собственных минералов и органических соединений, а также в виде изоморфной примеси в сульфидах. Например, количество “органического” золота в буром угле Лузановского разреза Павловского месторождения (Приморский край, Россия) составляет 52.4% общего содержания [23]. Микроминеральные формы самородного золота найдены как в углефицированной древесине, так и в пластах молодых углей Приморья. В ряде угольных месторождений и золошлаковых отходах предприятий Дальнего Востока отмечено локальное присутствие золота, преимущественно находящегося в виде

самородных зерен размером 5–40 мкм [24]. Такие же данные получены для Иркутского и Минусинского бассейнов [25].

В последние два десятилетия появилось много публикаций, посвященных благородным металлам в углях и продуктах их сжигания. В частности, в Амурском научном центре (АмурНЦ) и Институте геологии и природопользования (ИГиП) ДВО РАН проведены систематические исследования по выявлению золотосодержащих углей, разработке способов определения содержания металлов в них, выявлению условий миграции и взаимодействию с органическими веществами гуматной природы. С помощью созданного ЭТК “Амур” удалось отдельно получать и исследовать шлак, золу уноса, шлам и осадок технологической воды, что дало возможность детально изучить особенности переноса золота и других микрокомпонентов в процессе термического воздействия на уголь [12, 21, 26, 27].

Основным механизмом формирования наиболее мелкой субмикронной части летучей золы считается освобождение органоминеральных металлов из органических соединений в процессе сгорания углей и их конденсация при снижении температуры газового потока. В процессе мокрой очистки дымовых газов в скруббере ЭТК “Амур” температура газового потока понижается до 80°C,

Таблица 1. Содержание Au и Sc в продуктах сгорания углей Ерковецкого месторождения с ЭТК “Амур”, по данным ИНАА

Проба	C(Sc), г/т	C(Au), г/т
1. Шлак исходный	24.7 ± 7.1	0.22 ± 0.05
2. Шлак (+0.10 –0.20 мм)	24.8 ± 6.3	0.21 ± 0.03
2. Шлак (+0.071 –0.10 мм)	19.9 ± 7.0	0.32 ± 0.04
4. Зола уноса тяжелая фракция	18.3 ± 5.2	< 0.11 ± 0.05
5. Зола уноса легкая фракция	37.1 ± 9.3	< 0.12 ± 0.06
6. Шлам с фильтраотстойника	20.1 ± 7.1	0.39 ± 0.05
7. Шлам с фильтра грубой отчистки	23.5 ± 6.8	0.46 ± 0.06
8. Осадок техногенной воды	15.8 ± 4.3	0.41 ± 0.06

Таблица 2. Содержание Au в ЗШО с полигона Приморской ГРЭС (пгт. Лучегорск), по данным ИНАА

Проба	Кол-во	C(Au), г/т		
		мин.	макс.	среднее
Зола исходная	2	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01
Недожог угля	6	<0.01	0.02 ± 0.01	<0.01
Магнитная фракция	2	<0.01	<0.01	<0.01

Таблица 3. Содержание Au в ЗШО с полигона Центральной котельной (г. Арсеньев), по данным ИНАА

Проба	Кол-во	C(Au), г/т		
		мин.	макс.	среднее
Зола (+0.125 –0.250 мм)	3	<0.01	0.06 ± 0.04	0.02 ± 0.01
Зола (+0.25 –0.50 мм)	3	<0.01	0.04 ± 0.02	0.01 ± 0.01
Зола (+0.50 –2.00 мм)	3	<0.01	<0.01	<0.01

Таблица 4. Содержание Sc в ЗШО с полигона Приморской ГРЭС (пгт. Лучегорск), по данным ИНАА

Проба	Кол-во	C(Sc), г/т		
		мин.	макс.	среднее
Зола исходная	2	22.9 ± 1.9	28.5 ± 2.4	25.7
Недожог угля	6	13.0 ± 2.2	20.9 ± 3.3	13.6
Магнитная фракция	2	35.1 ± 2.5	40.1 ± 2.9	37.6

Таблица 5. Содержание Sc в ЗШО с полигона Центральной котельной (г. Арсеньев), по данным ИНАА

Проба	Кол-во	C(Sc), г/т		
		мин.	макс.	среднее
Зола (+0.125 –0.250 мм)	3	12.2 ± 0.4	16.5 ± 0.6	13.9 ± 2.3
Зола (+0.25 –0.50 мм)	3	7.77 ± 0.26	18.8 ± 0.58	12.2 ± 5.8
Зола (+0.50 –2.00 мм)	3	6.77 ± 0.24	9.85 ± 0.36	8.1 ± 1.6

что способствует конденсации микрокомпонентов металлов в шламе [28].

В процессе изучения распределения золота при сжигании пылеугольного топлива в топках ТЭЦ при температуре факела 1200–1400°С в

вихревом потоке газодымовой смеси происходит интенсивная дезинтеграция золотин до коллоидной и наноразмерной крупности. Есть основания считать, что бо́льшая часть золота, присутствующего в углях при его горении, улетучивается с дымом, а в топке остается в основном золото, за-

консервированное в недожогах, либо достаточно крупные частицы, не транспортируемые газовыми тепловыми потоками [12, 21, 29].

Отмечено, что золото в золошлаковых отходах обладает мобильными свойствами. Установлено, что оно в значительной части (до 30%) переходит в смывную воду, которая используется для транспортировки золы от котельных установок до золоотвала (Благовещенской ТЭЦ) [12, 21]. Были испытаны различные варианты извлечения золота из разных потоков: из дымов и смывных вод.

Для установления рациональных способов комплексной переработки ЗШО с использованием различных процессов осуществляется разделение ЗШО на фракции с оценкой возможности попутного извлечения ценных компонентов или продуктов из них [3, 30, 31]. Систематические исследования распределения микрокомпонентов металлов в продуктах горения углей Ерковецкого, Райчихинского и других месторождений угля Амурской области, проводимые в АмурНЦ ДВО РАН с использованием уже упомянутой установки ЭТК “Амур”, позволили выделить минеральные компоненты золы. С применением различных процедур обогащения, включающих измельчение, гравитацию, были выделены неорганические компоненты золы: шлак, зола-уноса, продукты тонкой мокрой очистки дымовых газов (отобранные фракции золы обозначены цифрами на рис. 1) [32].

Таким образом, оценка уровня концентрации Au и Sc в ПСУ позволяет выделить наиболее перспективные для промышленного извлечения фракции:

- легкая фракция ЗШО, с содержанием Sc в 37.1 ± 9.3 г/т, при промышленно значимом содержании (подлежащими количественной оценке) 5–10 г/т в углях и 50–100 г/т в угольной золе;
- продукты мокрой очистки дымовых газов, потенциально пригодные для извлечения Au, с содержанием 0.39–0.46 г/т, при минимальном промышленном содержании в золе 0.1 г/т. [7].

Результаты анализа этих фракций золы на содержание Au и Sc приведены в табл. 1.

Как показывают исследования, роль рассеянного углеродистого вещества (РУВ) в процес-

сах переработки углерод-золотосодержащих руд очень велика. Углерод, как известно, является причиной прег-роббинга, и для уменьшения его влияния руды подвергаются обжигу, желательно до его полного выжигания. При неполном выжигании углерод, оставшийся в огарке, обладает большей сорбционной активностью, чем в исходной руде [33], поэтому отдельный интерес представляет исследование распределения металлов Sc и Au, обладающих повышенным сродством к углероду, в углеродсодержащей фракции – недожоге. Органическая часть углей (недожог) имеется во всех золах. По разным данным, содержание недожога составляет от менее 5% [11] до 11.5% ЗШО [3].

Принято считать, что угольные месторождения Приморья имеют “региональную зараженность золотом”, аномальные содержания Au установлены на десяти буроугольных месторождениях и углепроявлениях [20]. Так, в работе Коростылева и др. [34], указывалось, что в отдельных пробах золы угля Синегорского месторождения содержится 0.3–5.9 г/т (среднее 3.75 г/т). Однако, согласно результатам, полученным нами методом ИНАА (см. табл. 2 и 3), для зол приморских электростанций характерно низкое содержание золота как в исходной золе, так и продуктах ее фракционирования (недожоге и магнитной фракции). Полученные значения 0.01–0.06 г/т существенно ниже уровня, определяющего возможную промышленную значимость – 0.2 г/т золы [20, с. 431]. Также содержание золота в золах с приморских объектов оказалось существенно ниже, чем в минеральных продуктах фракционирования золы угля Ерковецкого месторождения (см. табл. 1).

Что касается скандия, то можно видеть перераспределение металла по фракциям золы. В золе Приморской ГРЭС наибольшее содержание скандия наблюдается в магнитной фракции золы, в недожоге Sc не концентрируется и, по-видимому, улетучивается с дымовыми газами (табл. 4), также как и Au (табл. 2). Более высокое содержание Sc наблюдается во фракциях золы с более мелкими частицами (табл. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом ИНАА с радионуклидным источником нейтронов ^{252}Cf исследованы ЗШО с полигонов энергопредприятий Приморского края

и продукты их фракционирования, а также продукты сгорания угля Ерконецкого месторождения с ЭТК “Амур”. В исследованных образцах оценено содержание критических металлов Sc и Au. Верификация метода ИНАА по Sc и Au проведена на стандартных образцах золы бурого угля и черных сланцев (Институт геохимии им. А.П. Виноградова ИГХ СО РАН).

Установлено, что ЗШО с полигонов Приморского края и продукты сгорания угля Ерконецкого месторождения существенно отличаются по содержанию Au. Показано, что в ЗШО Приморской ГРЭС и Центральной котельной г. Арсеньева и их продуктах фракционирования содержание Au не превышает кларка для угольной золы (0.02 г/т) [18]. В то время как содержание Au в продуктах сгорания угля Ерконецкого месторождения существенно выше и находится в диапазоне 0.11–0.46 г/т.

Установлено, что содержания Sc в исследованных продуктах сгорания угля с объектов Приморского края и Амурской области находятся примерно на уровне кларка для угольной золы (20–25 г/т). При фракционировании зол Приморских ТЭЦ происходит перераспределение Sc между продуктами разделения. Концентрирование Sc наблюдается в магнитной фракции, а пониженные концентрации в недожоге угля (углеродной части).

Полученные данные могут быть использованы при разработке схем переработки ЗШО.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет государственного задания ФГБУН Института химии ДВО РАН, тема № 0205-2023-0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Темнов А.В., Быховский Л.З. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2021. № 1–6. С. 6.
2. Рубинштейн Ю.Б., Лавриненко А.А., Юсупов Т.С., Линёв Б.И. // Международная конференция “Международное совещание “Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья” (Плаксинские чтения – 2014), 16–19 сент. 2014 г., Алматы: [сб. докл.]. Алматы: ТОО “Арко”, 2014. С. 51.
3. Лавриненко А.А., Кунилова И.В., Гольберг Г.Ю., Лусинян О.Г., Кравченко В.Н. // Международная конференция “Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья” (Плаксинские чтения – 2020), 21–26 сент. 2020 г., Апатиты: [сб. докл.] Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. С. 309.
4. Оскембеков И.М., Бектурганов Н.С., Акубаева М.А. // Международная конференция “Международное совещание “Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья” (Плаксинские чтения – 2014), 16–19 сент. 2014 г., Алматы: [сб. докл.]. Алматы: ТОО “Арко”, 2014. С. 376.
5. Вялов В.И., Кузеванова Е.В., Нелюбов П.А., Змиевский Ю.П., Ключарев Д.С. // Разведка и охрана недр. 2010. № 12. С. 53.
6. Bielowicz B. // Resources. 2020. V. 9. № 9. P. 115. <https://doi.org/10.3390/resources9090115>
7. Вялов В.И., Наставкин А.В. // ХТТ. 2019. №. 5. С. 63. [Solid Fuel Chemistry, 2019. V. 53. P. 314. <https://doi.org/10.3103/s0361521919050112>. <https://doi.org/10.1134/S0023117719050116>
8. Вялов В.И., Гамов М.И., Наставкин А.В. // ХТТ. 2022. №. 5. С. 12. <https://doi.org/10.31857/S0023117722050097>
9. Hu Y., You M., Liu G., Dong Z., Jiao F., Meng Y. // Energies. 2021. V. 14. P. 4710. <https://doi.org/10.3390/en14154710>
10. Борисенко Л.Ф., Поликашина Н.С. Методические рекомендации по перспективной оценке различных типов скандийсодержащего сырья. М.: ИМГРЭ. 1991. 92 с.
11. Пашков Г.Л. // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 11. С. 67.
12. Sorokin A., Ageev O. // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2018. V. 56. P. 03003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185603003>
13. Seredin V.V., Finkelman R.B. // Int. J. Coal Geology. 2008. V. 76. P. 253. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.07.016>
14. Середин В.В., Арбузов С.И., Алексеев В.П. // ДАН. 2006. Т. 409. №. 5. С. 677. [Doklady Earth Sciences, 2006. V. 409. № 6. P. 967. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06060304>].
15. Арбузов С.И., Волостнов А.В., Машенькин В.С., Межибор А.М. // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 11. С. 1649. [Russian Geology and Geophysics. 2014. V. 55. P. 1306. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.10.005>].
16. Arbutov S.I., Volostnov A.V., Mezhibor A.M., Rybalko V.I., Plenok S.S. // Int. J. Coal Geology. 2014. V. 125 P. 22. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.01.008>
17. Арбузов С.И. // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2013. Т. 323. №. 1. С. 56.
18. Ketris M.P., Yudovich Y.E. // Int. J. Coal Geology. 2009. V. 78. №. 2. P. 135.

- <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>
19. Арбузов С.И., Маслов С.Г., Ильенко С.С. // ХТТ. 2015. № 3. С. 39.
 20. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 538 с.
 21. Кузьминых В.М., Сорокин А.П., Рождествина В.И., Зубенко И.А. // Международная конференция “Международное совещание “Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья” (Плаксинские чтения – 2014), 16–19 сент. 2014 г., Алматы: [сб. докл.]. Алматы: ТОО “Арко”, 2014. С. 144.
 22. Chanturia V.A., Lavrinenko A.A., Sorokin A.P. // XVIII International Coal Preparation Congress, 28 June – 01 July 2016, Saint-Petersburg, Russia. Springer International Publishing, 2016. С. 29–34.
 23. Захаров Б.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2013. 452 с.
 24. Середин В.В. Угольная база России. Т. VI. Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России. М.: Геоинформмарк, 2004. 779 с.
 25. Арбузов С.И., Ильенко С.С. // Матер. Всерос. конф. “Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований”, 29–31 марта 2010 г., Москва, ИГЕМ РАН. М.: ИГЕМ, 2010. Т. 1. С. 44.
 26. Сорокин А.П., Кузьминых В.М., Рождествина В.И. // ДАН. 2009. Т. 424. № 2. С. 239. [Doklady Earth Sciences. 2009. V. 424. № 1. P. 109–113. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09010231>].
 27. Сорокин А.П., Конюшок А.А., Агеев О.А., Кузьминых В.М. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 4. С. 141. [Journal of Mining Science. 2019. V. 55. № 4. P. 643 <https://doi.org/10.1134/S1062739119045990>]. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190415>
 28. Агеев О.А., Юдаков А.А. Иванников С.И. Зубенко И.А. // Комплексное использование потенциала каменных и бурых углей и создание комбинированных экологически безопасных технологий их освоения. 19–22 сентября 2017 г., Благовещенск: [сб. докл.]. Благовещенск: АмурНЦ ДВО РАН, 2017. С. 129.
 29. Рождествина В.И., Сорокин А.П., Кузьминых В.М., Киселева А.А. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 6. С. 123.
 30. Sahoo P. K., Kim K., Powell M.A. // Int. J. Coal Sci. Technol. 2016. V. 3. № 3. P. 267. <https://doi.org/10.1007/s40789-016-0141-2>
 31. Jyothi R.K., Parhi P.K. Clean Coal Technologies. Beneficiation, Utilization, Transport Phenomena and Prospective. Springer Nature Switzerland AG, 2021. (e-Book) <https://doi.org/10.1007/978-3-030-68502-7>.
 32. Сорокин А.П., Агеев О.А., Дугин С.В., Попов А.А. // ХТТ. 2023. № 1. С. 13. <https://doi.org/10.31857/S0023117723010097>
 33. Меретуков М.А. Золото и природное углистое вещество. М.: Издательский дом “Руда и металлы”, 2007. 112 с.
 34. Коростылёв П.Г. // Геология и горное дело в Приморье в прошлом, настоящем и будущем: Тезисы докл. конф., 6–7 апр. 2000 г. Владивосток: [сб. докл.]. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 45.

Estimation of Valuable Metals Content in Coal Combustion Products of the Russian Far East by INAA Method with Radionuclide Neutron Source

S. I. Ivannikov^{1, *}, N. S. Markin^{1, **}, A. V. Taskin^{2, ***},
O. A. Ageyev^{3, ****}, L. A. Zemskova^{1, *****}

¹*Institute of Chemistry FEB RAS, Vladivostok, 690022 Russia*

²*Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690922 Russia*

³*Institute of Geology and Nature Management FEB RAS, Blagoveshchensk, 675000 Russia*

**e-mail: fyajkfqn@mail.ru*

***e-mail: markkin.ns@gmail.com*

****e-mail: taskin@yandex.ru*

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

******e-mail: zemskova@ich.dvo.ru*

Ash and slag waste from coal combustion as a source of obtaining valuable metals are considered. The results of the study of ash and slag waste from CHPPs of Primorye, coal combustion products of the Amur region and some products of ash and slag waste fractionation for gold and scandium content are presented. The concentration levels of these metals for preliminary assessment of their possible industrial significance were studied by instrumental neutron activation analysis.

Keywords: technogenic raw materials, ash and slag waste, gold, scandium, instrumental neutron activation analysis