

УДК 550.43: 553.96

МЕТАЛЛОНОСНОСТЬ БУРЫХ УГЛЕЙ РАЙЧИХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ПРИАМУРЬЕ, ДАЛЬНИЙ ВОСТОК): УСЛОВИЯ НАКОПЛЕНИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ (ОБЗОР)

© 2023 г. А. П. Сорокин^{1,*}, О. А. Агеев^{1,**}, С. В. Дугин^{1,***}, А. А. Попов^{1,****}

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

*e-mail: sorokinap@ignm.ru

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

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

****e-mail: aqva@ascnet.ru

Поступила в редакцию 23.09.2022 г.

После доработки 03.10.2022 г.

Принята к публикации 05.10.2022 г.

Изучено формирование металллоносных угленосных отложений Райчихинского месторождения в зоне сопряжения питающих провинций Бурейского поднятия и областей угленакопления Зейско-Буреинского осадочного бассейна. Установлено, что оно происходило в условиях последовательных процессов извлечения рудных компонентов из кор выветривания Бурейского поднятия, транспортировки и разгрузки их в палео-дельте р. Бурея. Эти процессы протекали синхронно с вулканической деятельностью в Сихотэ-Алинском орогенном поясе, с которой связан привнос вулканического пепла. Сопряженность этих событий позволила выделить два типа обогащения редкоземельных элементов и иттрия (REY) райчихинских углей: терригенный – с поступлением REY поверхностными водами и комбинированный терригенно-вулканогенный, связанный с осыпанием и выщелачиванием кислых и щелочных вулканических пеплов. В углях и продуктах их сгорания преобладают лантаноиды цериевой группы. Наибольшая доля REY содержится в золе-уноса (0.11% от общей массы). Механизмы накопления рудных компонентов на стадии торфяной залежи рассмотрены с позиций локализации рудных микрокомпонентов в виде кластогенно-минеральных форм и в условиях взаимодействия рудных растворов с органической средой торфяников. Проведена оценка качества REY, выделены наиболее обогащенные участки пласта “Верхний”. Перспективы извлечения из угля лантаноидов рассмотрены с позиции возможности вовлечения в этот процесс также целого ряда редких, цветных и благородных металлов.

Ключевые слова: осадочный бассейн, горный массив, питающие провинции, металллоносные угли, коры выветривания, извлечение, транспортировка, накопление рудных компонентов, REY, редкие, цветные, благородные металлы, перспективность месторождения

DOI: 10.31857/S0023117723010097, EDN: IWEJRS

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уголь обеспечивает значительную часть мирового энергопотребления, но в то же время он рассматривается в качестве потенциального источника таких важных элементов, как Ge, Ga, U, V, Se, редкоземельных элементов, Y, Sc, Nb, Au, Ag и Re, а также Al и Mg [1–3]. Анализ тенденций развития мировой экономики свидетельствует о том, что спрос на эти металлы, в первую очередь на редкоземельные элементы, будет увеличиваться в течение последующих лет.

В 2022 г. распоряжением от 30 августа 2022 г. № 2473-р Правительство РФ большая группа редких, редкоземельных, цветных и благородных ме-

таллов отнесена к основным видам стратегического минерального сырья. Россия по запасам почти всех этих элементов занимает ведущие позиции в мире. Основная их часть (около 60%) связана с попутным извлечением из руд черных, цветных металлов, нерудного сырья, углей и других полезных ископаемых [4]. Это во многом определяет большое внимание, которое уделяется в последние десятилетия исследованию альтернативных, по отношению к собственно рудным месторождениям, источников редких металлов. Они включают коры выветривания алюмосиликатных и изверженных щелочных пород, близкие к “ионным” глинам Китая, переотложенные их

продукты, “У-земельные” аргиллизиты, бурые угли, в том числе обогащенные в условиях выщелачивания редкоземельных элементов из тонштейнов и за счет наложенных гидротермальных процессов, и др. [1–3, 5–13].

На российском Дальнем Востоке угли с высокими концентрациями редкоземельных элементов были впервые установлены в Приморье в конце прошлого столетия. Они содержатся в сорбированной форме (в органическом веществе и с частицами глины) и в мелкозернистых аутигенных минералах. Формирование их, по мнению В.В. Середина [14], происходило в эрозионно-тектонических депрессиях, с широко развитыми корами выветривания, на торфяной стадии одновременно с бимодальным вулканизмом.

В последующих публикациях В.В. Середина и соавт. [1, 7] были обобщены данные по распределению и обогащению редкоземельных элементов в угольных бассейнах, а также перспективы их использования в качестве попутных продуктов добычи при сжигании угля. Было установлено широкое распространение аномальных скоплений лантаноидов и иттрия во многих месторождениях угля при высоком содержании REY (>0.1%) не только в угольной золе (до 1830.04 г/т), но и во вмещающих породах (до 477.00 г/т). Для угольной золы с высоким содержанием REY характерны три схемы их распределения: легкие (*LREY*) – ($La_N/Lu_N > 1$), средние (*MREY*) – ($La_N/Sm_N < 1$, $Gd_N/Lu_N > 1$) и тяжелые (*HREY*) – ($La_N/Lu_N < 1$). Выделено четыре генетических типа обогащения REY в угольных бассейнах: терригенный тип с поступлением REY поверхностными водами; туфогенный тип, связанный с поступлением и выщелачиванием кислых и щелочных вулканических пеплов; инфильтрационный или метеорный тип, обусловленный подземными водами; и гидротермальный тип, связанный с восходящими потоками термальных минеральных и глубинных флюидов. Установлено, что основные режимы возникновения REY с высоким содержанием локализованы в тонкозернистых аутигенных минералах (REY-содержащие фосфаты и сульфаты алюминия алунитовой группы, водосодержащие фосфаты и карбонаты) и в органических соединениях.

Геохимические процессы, протекающие при формировании металллоносных углей туфогенного типа, детально исследованы в работах [12, 13, 15]. В [12] изучены минеральный и химический состав тонштейнов Азейского угольного месторождения Иркутского бассейна (Южная Сибирь, Россия). В тонштейнах и углях этого месторождения отмечены повышенные содержания лантаноидов, Y, Zr, Hf, U, Th, Ta, Sn, Ga, Cu, Pb, Se, Hg, Sb и Te. При этом наиболее высокие их концентрации установлены в углях на контакте с тон-

штейнами, где происходит их обогащение за счет выщелачивания микрокомпонентов из тонштейнов.

В последние десятилетия широкомасштабные исследования редкоземельного оруденения проводятся в южном Приморье [1, 14, 16–19]. В обзорной публикации И.Ю. Чекрыжова [20] изложены данные по Ванчинскому, Павловскому, Раковскому и Реттиховскому буроугольным месторождениям, в которых содержание в углях суммы лантаноидов и иттрия составляет $\geq 0.1\%$. Авторами выделено три типа редкоземельной минерализации: терригенная, туфогенная и эксфильтрационная. Концентрации лантаноидов в углях туфогенного генетического типа Ванчинского месторождения колеблются в пределах от 250 до 750 г/т, а в угольной золе – от 0.1 до 0.3%. Содержания иттрия в золе колеблются от 280 до 1349 г/т или от 22 до 58% от суммы редкоземельных элементов. Для терригенного типа (Раковское месторождение) среднее содержание REY в угольной золе изменяется от 0.14 до 0.22%. Широко развитый эксфильтрационный тип характеризуется максимальными концентрациями редкоземельных элементов до 316 г/т – в углях и до 1215 г/т – в золе углей Павловского месторождения и – до 0.5% – в золе углей Реттиховского месторождения.

В бурых углях Приамурья редкоземельные, рассеянные элементы, цветные и благородные металлы выявлены в палеогеновых (Ерковецкое, Райчихинское, Архаро-Богучанское) и нижне-среднемиоценовых (Свободное, Сергеевское, Тыгдинское) месторождениях. Установлено, что палеогеновые угли Приамурья характеризуются наиболее широким геохимическим и минералогическим разнообразием. Содержание REY в углях и продуктах их сгорания колеблется, соответственно, в пределах 80–100 г/т, достигая максимума в угольной золе 1000 г/т и более. Кроме этого, в продуктах их сгорания широко представлены самородное золото, серебро и платиноиды, а также Pb, Cu, Zn, Fe, Ni, Cr, W, Sn, Be [8, 21, 22].

Изучение рудоносности этих углей проводится в пределах угленосных площадей на восточной окраине Зейско-Буреинского осадочного бассейна, где с уже известными типами редкоземельных углей существуют широкие возможности выявления новых объектов [8–10].

Цель работы – изучение условия формирования типов оруденения в бурых углях зоны сопряжения Зейско-Буреинского бассейна и Туранского (Буреинского) массива; исследование минерального и элементного состава микровключений в бурых углях и продуктах их сгорания; оценка перспектив их промышленного освоения в качестве редкоземельного сырья.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Природные объекты (бурые угли осадочного бассейна и питающие их рудные провинции). В последние десятилетия изучение металлоносности палеогеновых углей проводилось на восточной окраине Зейско-Буреинского осадочного бассейна в зоне сопряжения с Туранским (Буреинским) массивом. Выбор этого региона определяется, с одной стороны, широким распространением угленосных площадей в этой части бассейна и, с другой, — разнообразием глубоко вскрытых питающих провинций массива с благородным, редкометалльным и редкоземельным типами минерализации. В то же время существуют определенные различия в условиях вскрытия и транспортировки рудных микрокомпонентов к областям их накопления. Эти особенности во многом определяются структурной неоднородностью Туранского массива, претерпевшего неоднократные этапы активизации. С одним из таких этапов в палеогене связано образование в центральной части массива Буреинского поднятия, ограниченного с севера и юга, соответственно, Селемджинско-Томской и Архаринской эрозионными депрессиями (грабенами) (рис. 1). В раннем кайнозое эти депрессии служили транспортными артериями, по которым палео-Томь переносила на многие десятки километров терригенный материал с рудными микрокомпонентами на равнину и разгрузала его в пределах Романовского прогиба с благоприятными условиями для формирования озерно-болотных комплексов [10]. Но, в это же время, существовали и другие формы взаимодействия в системе бассейн-массив. К ним можно отнести зону непосредственного сопряжения Буреинского поднятия с Завитинско-Архаринской угленосной площадью. Здесь процесс миграции включает транспортировку осадков палео-Буреей непосредственно по территории поднятия и разгрузку у их подножья в дельте реки, в пределах Куприяно-Райчихинского предгорного прогиба, с расположенным в его пределах Райчихинского бурого угленосного месторождения (рис. 1). История этих процессов исследована на базе вышеприведенных структур — как опорных объектов.

Угленосные отложения Райчихинского месторождения выделяются в составе кивдинской свиты палеогенового возраста мощностью 70–80 м. В нижних частях разреза свита сложена аллювиально-пролювиальными, песчано-гравийными и галечными отложениями, которые выше по разрезу сменяются глинами и алевролитами с линзами песков и пластами бурых углей. В кивдинской свите установлено пять угольных пластов, но только пласт “Верхний” обладает промышленными характеристиками. Угли месторождения

гумусовые — двух классов: гелитолиты и фюзенолиты. Мацеральный состав углей характеризуется высоким содержанием гуминита (в среднем 60–70%). Часто встречается инертинит (25–35%), редко — липтинит (1–3%). Минеральные включения составляют в среднем 10–18%. Качество угля следующее (%): влага 33–42; зола 10–23.4; содержание летучих 37–47; сера 0.14–0.34; углерод 70–71; водород 3–4. Теплота сгорания высшая 5700–6400 ккал/кг, низшая 3480 ккал/кг [23].

Изучение угленосных отложений проведено на значительной части территории месторождения с детальным описанием угольного пласта “Верхний” и вмещающих пород. Наряду с детальным исследованием наиболее мощного разреза пласта угля в центре месторождения (участок “Северо-Восточный центральный”) изучены разрезы на южной окраине месторождения с пониженной (до 2 м) мощностью пласта (участки “Вятка”, “Широкий”). Опробование проведено по двум схемам. С целью получения общей характеристики пласта “Верхний” в центральной части месторождения сплошной бороздой отобрана крупнообъемная проба весом 200 кг. Опробование углей по периферии месторождения выполнено с отбором бороздовых проб по пласту через 0.2–0.5 м, весом 12–15 кг, а по вмещающим породам — с интервалом 0.3–1.5 м.

Формирование угленосных отложений Райчихинского месторождения неразрывно связано с Буреинским поднятием. Основу поднятия формируют интрузивные породы преимущественно кислого состава палеозойского (Суларинский, Тирма-Буреинский комплексы) и триасового (Харинский комплекс) возраста и лишь на восточной окраине Буреинского поднятия развиты раннемеловые эффузивно-осадочные породы. В позднем мелу Буреинское поднятие развивалось в условиях тектонического покоя с формированием кор выветривания химического типа (рис. 1). В палеогене это состояние сменилось новейшими тектоническими движениями, которые сопровождалась размывом кор выветривания, вскрытием коренных источников, переносом терригенных образований вместе с рудными микрокомпонентами и накоплением их в дельте р. Бурей на выходе на аллювиальную равнину. Современный ресурсный потенциал Буреинского поднятия определяется преимущественно редкоземельной, благороднометалльной, свинцово-цинковой, молибденовой, олово-вольфрамовой, бериллиевой минерализацией. Коренные источники сосредоточены в основном на правобережной территории р. Бурей, где выявлены рудопроявления цинка, молибдена, вольфрама, бериллия, месторождение золота “Прогнозное” и др. Рудные объекты сопровождаются шлиховыми ореолами касситерита, золота, серебра, антимонита, шеелита, ксенотима, фергусонита, а также геохимическими

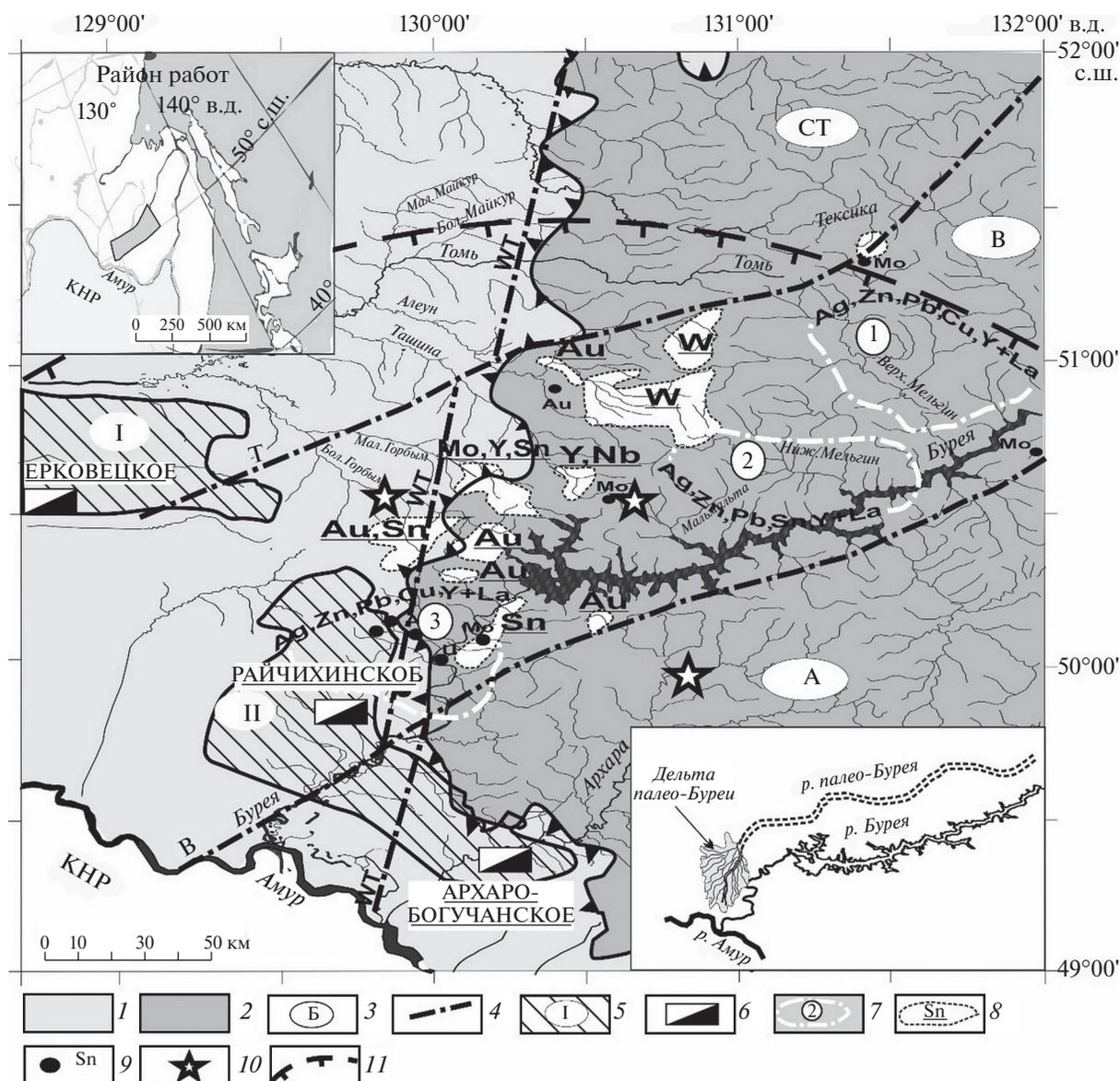


Рис. 1. Схема минерагенического районирования зоны сопряжения Завитинско-Архаринской угленосной площади и Туранского массива: 1 – Зейско-Буреинский осадочный бассейн; 2 – Туранский массив; 3 – тектонические структуры: СТ – Селемджинско-Томская, А – Архаринская эрозионные депрессии (грабены), Б – Буреинское поднятие; 4 – тектонические нарушения (Т – Томский, Б – Буреинский, ЗТ – Западнотуранский разломы); 5 – угленосные площади: Ромненско-Ерковецкая (I), Завитинско-Архаринская (II); 6 – бурогольные месторождения; 7 – геохимические потоки рассеяния; 8 – шлиховые ореолы; 9 – шлихи с повышенным содержанием элементов и минералов; 10 – фрагменты площадных кор выветривания химического типа; 11 – предполагаемая граница распространения пирокластике в палеогене. Граница РФ и КНР проходит по р. Амур.

потоками меди, свинца, цинка, серебра [8, 10, 22, 24–27].

1.2. Исследование углей с получением отдельных продуктов их сгорания. Выделение минеральных компонентов из первичных углей проведено на шлюзовой установке из пробы весом 20.5 кг, измельченной до -0.2 мм. Принцип их выделения основан на разделении в водном потоке тяжелых органических и неорганических веществ, техно-

логия которого приведена в работе А.П. Сорокина и соавт. [28]. Всего из исходного угля было получено четыре пробы минеральных компонентов весом от 25.0 до 47.0 г. Для получения отдельных продуктов сгорания угля (ПСУ) использована авторская установка – Экспериментально-технологический комплекс (ЭТК “Амур”), позволяющая выделять шлак, золу-уноса и шлам [29]. Отдельные усовершенствования ЭТК “Амур-М”, предусматривающие слоевое сжигание углей и нара-

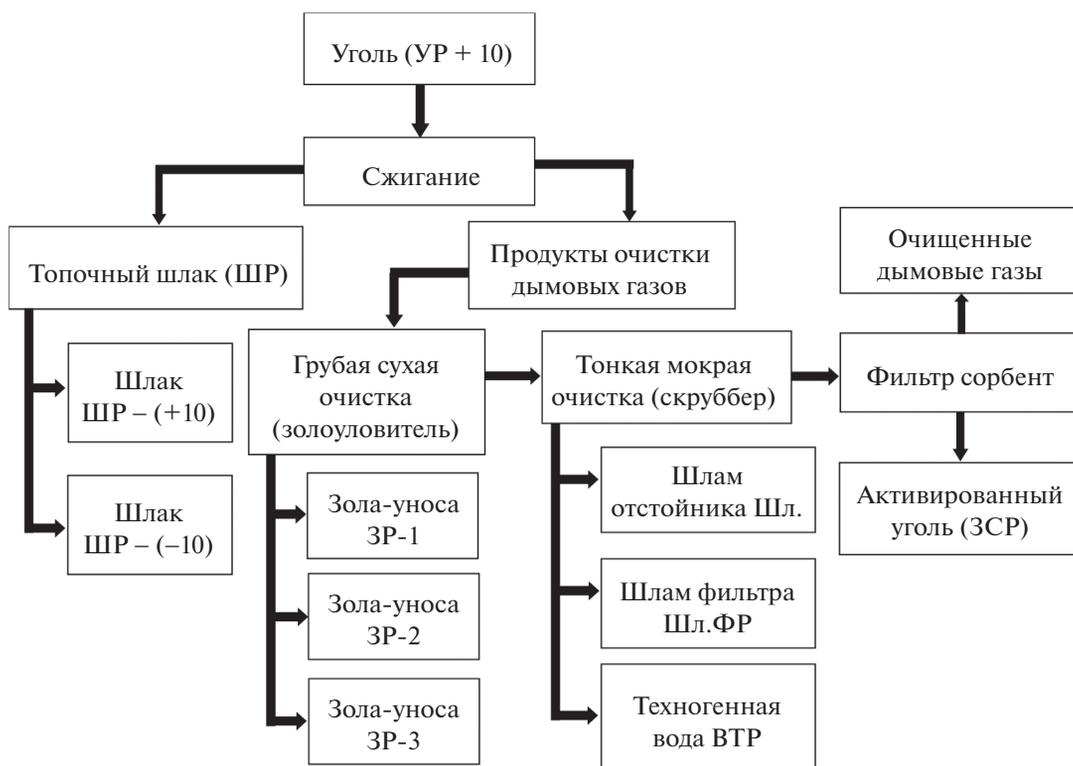


Рис. 2. Схема получения разделенных продуктов сгорания бурых углей Райчихинского месторождения на ЭТК "Амур-М".

щивание золы-уноса третьей секцией, включены в схему получения отдельных продуктов сгорания из углей Райчихинского месторождения (рис. 2).

Для выделения минеральных компонентов из сгоревших углей ПСУ проходили последовательную процедуру обогащения, включающую измельчение, гравитацию с получением рудного концентрата и легкой фракции [28]. В итоге из ПСУ было получено десять проб минеральных компонентов весом от 25.0 до 44.0 г.

1.3. Аналитические процедуры. Химический состав пород был изучен с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) (Cs, Ga, Rb, Sr, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, Nb, Hf, Ta, Th, U, Pb) в Институте тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина (ИТиГ) ДВО РАН (г. Хабаровск). Исследование проводилось в стандартном режиме с использованием Perkin Elmer ICP-MS ELAN 9000 (Perkin Elmer, Уолтем, Массачусетс, США). Кислотное растворение образцов выполнено в HCl, HNO₃, HF и HClO₄. Чувствительность по всей шкале масс была откалибрована с использованием стандартных эталонных растворов, содержащих все элементы, подлежащие анализу в образцах. Относительная погрешность измерения главных и малых элементов составляла 3–10%.

Химический состав, размер и морфология частиц золы изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM/EDS) на приборе YVEGA 3LMH (TESCAN, Брно, Чешская Республика) с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором X-Max80 (Oxford Instruments, Хай-Уиком, Соединенное Королевство) в ИТиГ ДВО РАН. Фотографирование образцов и поиск микровключений проводили преимущественно в режиме обратно рассеянных электронов (BSE-детектор). С его помощью фазы с более высоким средним атомным числом при получении изображения отражаются в контрасте более ярко по сравнению с фазами, имеющими меньшее среднее атомное число. Применявшееся ускоряющее напряжение составляло 20 кВ, ток пучка ~500 пА. Для количественного анализа использовали комплексный эталон № 6067 фирмы "MAC" (Великобритания) и библиотеку профилей линий элементов, встроенную в программу AZtec.

Химический состав зольных остатков исследовали методом атомно-эмиссионной спектроскопии стандартным способом анализа твердых топлив (ГОСТ) на спектрометре с индукционно-связанной плазмой iCAP 6500 Duo LA фирмы "Thermo Scientific" в ИТиГ ДВО РАН. Содержание органического углерода определяли в ЦКП "Амурский центр минералого-геохимических исследований" Института геологии и природопользования

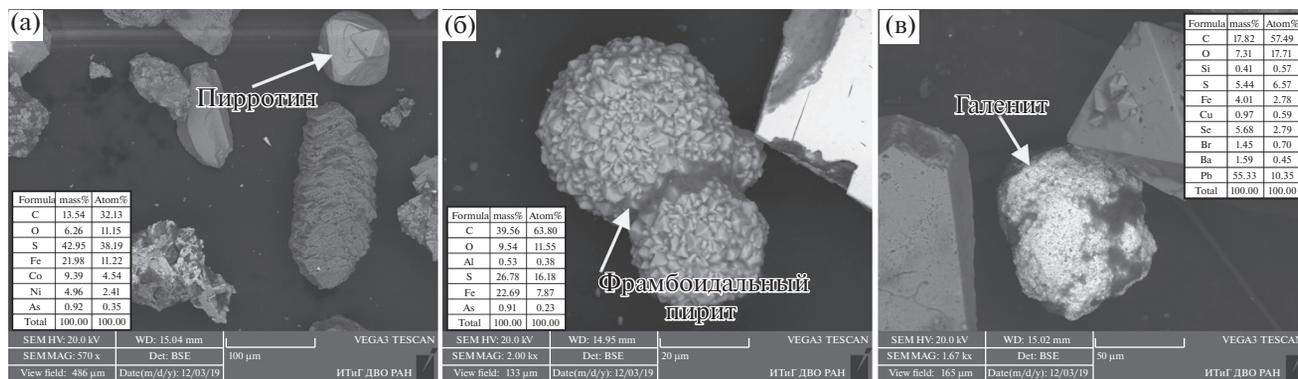


Рис. 3. Пирротин (а), фрамбоидальный пирит (б) и галенит (в) в первичных углях Райчихинского месторождения.

(ИГиП) ДВО РАН на анализаторе общего органического углерода *TOC – L (Shimadzu, Япония)* с приставкой на твердые образцы *SSM-5500*.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ИХ АНАЛИЗ

2.1. Химический состав углей и ПСУ Райчихинского месторождения. В результате сжигания 200 кг угля на ЭТК “Амур-М” вес ПСУ составил 28.72 кг. Топочный шлак (ШР) – 26.70 кг (93%), в том числе фракция +10 мм (ШР +10) – 9.50 кг (33.1%), фракция – 10 мм (ШР –10) – 17.20 кг (59.9%). Зола-уноса (ЗУ) – 1.46 кг (5.1%), в том числе: ЗУ-1 – 0.87 кг, ЗУ-2 – 0.57 кг, ЗУ-3 – 0.025 кг. Выход продуктов мокрой очистки дымовых газов составил 0.47 кг (1.6%), в том числе шлак фильтра-отстойника (Шл.ОР) – 0.08 кг, шлак фильтрации (Шл.ФР) – 0.38 кг, техногенная вода (осадок после выпаривания 70 л техногенной воды) (ВТР) – 0.09 кг (0.3%). Вес активированного угля фильтра сорбента (ЗСР) – 0.33 кг.

Химический состав угольной золы (%): SiO_2 – 23.6, Al_2O_3 – 11.50, TiO_2 – 0.42, Fe_2O_3 (общ.) – 40.01, MnO – 0.83, CaO – 21.00, MgO – 1.41, Na_2O – 0.06, K_2O – 0.19, P_2O_5 – 0.07, S (общ.) – 4.39. Отмечено достаточно высокое содержание оксидов кремния и алюминия. По их количественному отношению ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 < 0.9$) угольную фракцию можно отнести к алюмосиликатному типу [30], в котором минеральная составляющая в основном глинистой природы, вероятно, каолинового состава, если учитывать наличие каолиновых глин в кровле и почве угольного пласта. Следует отметить высокие концентрации в золе оксида кальция (21%), что при значительном содержании оксида Fe может быть связано с присутствием в углях гуматов, органических соединений железа, а также сульфидов (пирит, марказит, сидерит).

2.2. Минеральные комплексы в первичных углях и продуктах их сгорания. Для проведения дальнейших минералогических исследований выделенные из первичных углей и ПСУ минеральные

компоненты были разделены на магнитную, электромагнитную, немагнитную тяжелую и легкую фракции. Полученные фракции исследовались с помощью бинокулярного микроскопа МБС-10 И, а также с использованием электронной микроскопии.

Во фракциях исходных углей преобладают (от 0.20 до 67.50%) обломки горных пород и породообразующие минералы (от 10.50 до 51.70%) изверженных образований Туранского массива. Также, с помощью минералогического анализа, определены акцессорные (апатит, сфен, магнетит, циркон, ильменит, гранат, корунд и др.) и вторичные (эпидот, серицит, хлорит и др.) минералы. В единичных знаках присутствуют сульфиды цинка, свинца, меди и карбонат.

Результаты электронно-микроскопического анализа (рис. 3) в целом подтверждают вышеприведенный состав минералов. Большинство из них, например, пирротин встречается в форме хорошо ограненных кристаллов и их обломков (рис. 3, а) размером от 50 до 470 мкм. Кристаллы пирротина (рис. 3, а) содержат Co (9.39%), Ni (4.96%) и As (0.92%). Также присутствуют микросферы фрамбовидного пирита (рис. 3, б) радиусом от 15 до 30 мкм. Микросферы включают примеси As (0.91%) и Al (0.03%). Исключение составляют зерна предположительно галенита (рис. 3, в) с примесью Se (5.68%), Ba (1.59%) и Cu (0.97%).

Минералогические исследования продуктов сгорания углей показали преобладание (до 70%) обломков горных пород, породообразующих, акцессорных и вторичных минералов, но впервые в шлаке обнаружены единичные зерна Au. Электронно-микроскопическим анализом (рис. 4) установлено, что Au округлой (окатанной) формы размером 121×98 мкм с примесью Hg (9.08–18.30%) и Ag (1.51–3.92%) (рис. 4, а). Кроме того, в шлаке выявлены частицы Cu в форме округлого зерна (рис. 4, б) и в виде проволоки (рис. 4, в). Зерно Cu содержит Al (6.66%), покрыто налетом из SiO_2 с примесями Al (3.44%), Ca (1.05%), K

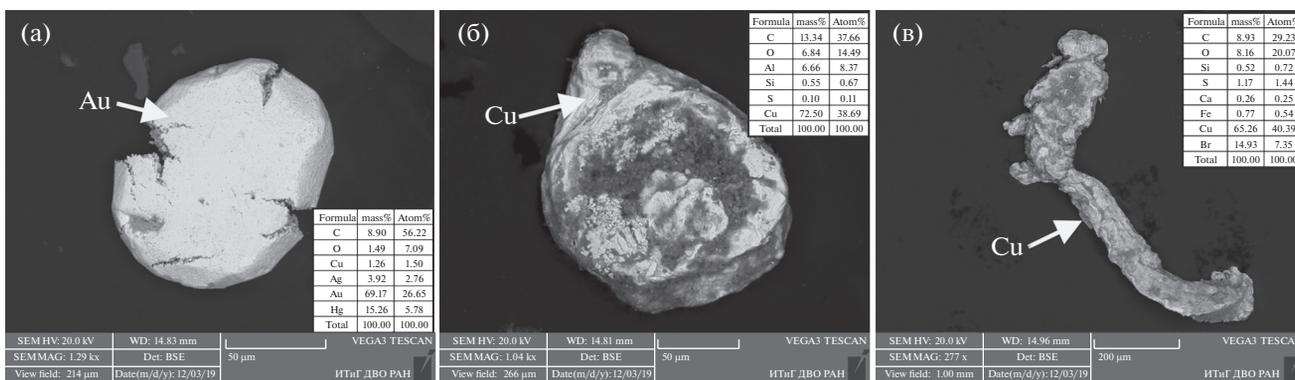


Рис. 4. Au (а) и Cu (б), (в) в шлаке продуктов сгорания углей Райчихинского месторождения.

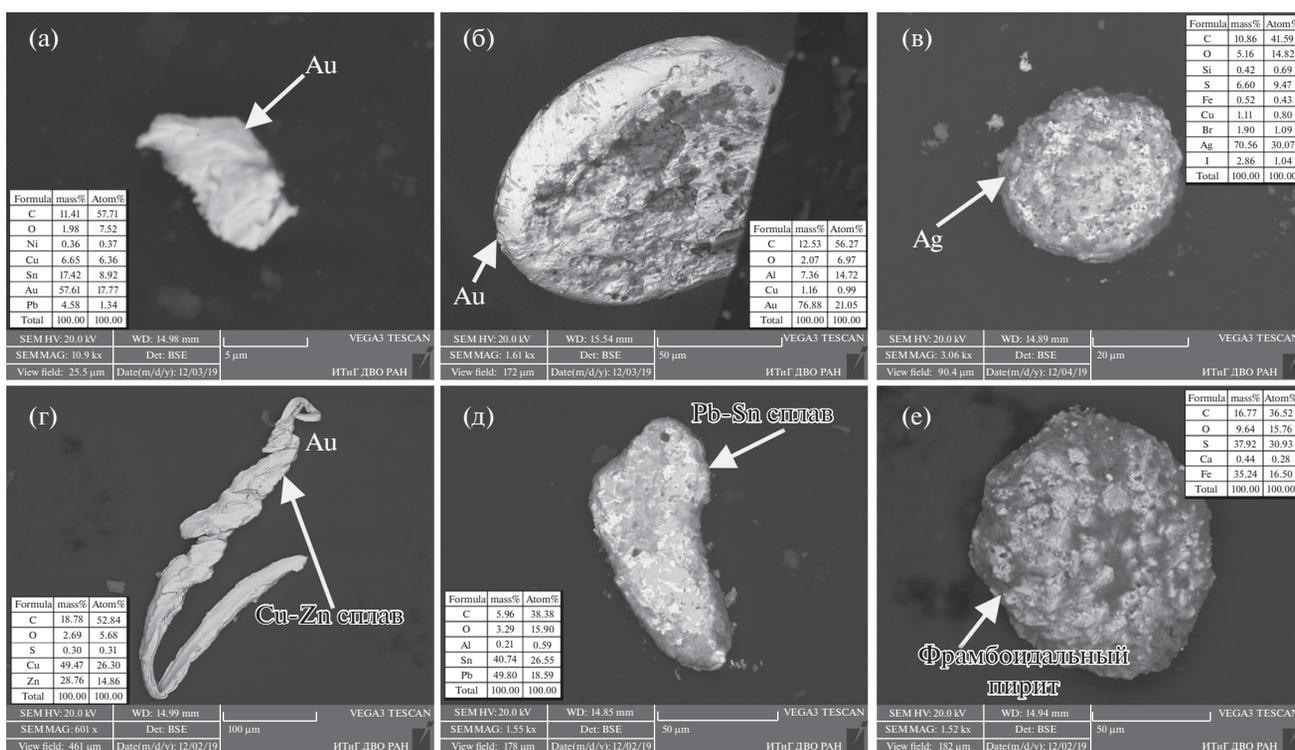


Рис. 5. Au (а), (б), Ag (в), сплавы: Cu–Zn (г), Pb–Sn (д), фрамбоидальный пирит (е) в золе-уноса продуктов сгорания углей Райчихинского месторождения.

(0.93%), Fe (0.73%) и Br (0.63%). Частица Cu в виде проволоки (рис. 4, в) содержит Br (от 10.11 до 22.36%), Pb (8.78%) и Ta (1.63%).

Существенно меняются состав и форма рудных микрокомпонентов в золе-уноса (рис. 5). Электронно-микроскопическим анализом обнаружены Au, Ag, Cu, сплавы Zn и Cu, Pb и Sn. Золото (рис. 5, а, б) представлено в форме чешуек (рис. 5, а) размером 12×7 мкм с содержанием 57.61% и примесями Sn (17.42%), Cu (6.65%), Pb (4.58%). Также золото встречается в виде круглой (окатанной) формы (рис. 5, б) диаметром 123 мкм с содержа-

нием 76.88% и примесью Al (7.36%) и Cu (1.16%). Серебро (рис. 5, в) присутствует в виде микросферы с содержанием 70.56% с примесью S (6.60%), I (2.86%), Br (1.90%), Cu (1.11%). Сплавы представлены Zn и Cu (рис. 5, г), Pb и Sn (рис. 5, д). Агломераты сложены зернами пирита (рис. 5, е) с примесями Br (5.25%), Ca (3.18%), Al (1.87%), Zn (0.25%).

В шлаке (рис. 6) установлены гематит (рис. 6, а), ильменит (рис. 6, б), геденбергит (рис. 6, в). Они встречаются в виде расплавленных частиц и микросфер размером от 40 до 120 мкм простой тексту-

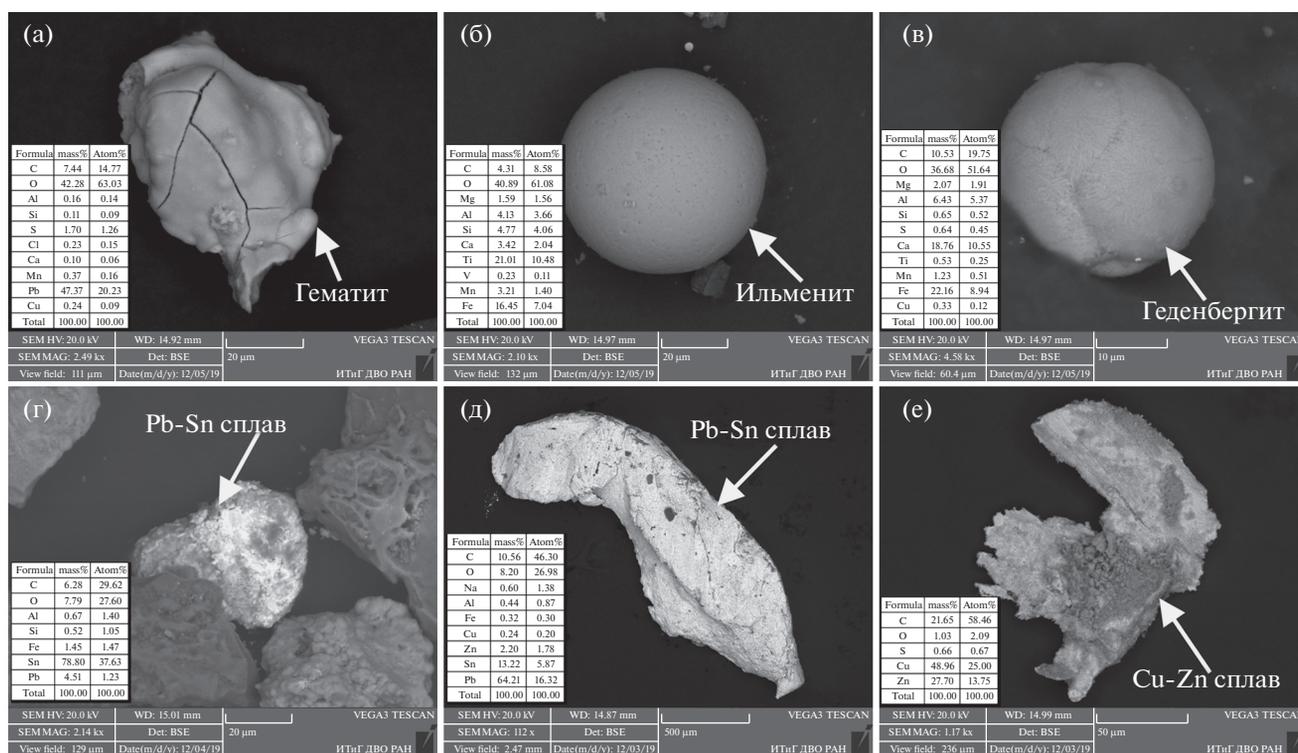


Рис. 6. Гематит (а), ильменит (б), геденбергит (в), сплавы: Pb–Sn (г), (д), Cu–Zn (е) в шламе продуктов сгорания Райчихинского месторождения.

ры. Ильменит (рис. 6, б) содержит примеси Al (4.13%), Ca (3.42%), Mn (3.21%) и Mg (1.59%). Сплав Pb и Sn установлен в виде застывших капель размером от 70 (рис. 6, г) до 2400 мкм (рис. 6, д), а сплав Cu и Zn (рис. 6, е) – древовидной формы (30–150 мкм). На поверхности сплава Cu и Zn присутствует налет железа Fe (42.55%).

2.3. Содержание и распределение элементов в углях и ПСУ Райчихинского месторождения. Проанализировано распределение в углях и ПСУ редких металлов, в том числе: редкоземельных (REY), рассеянных (PPЭ), включая тугоплавкие (РТЭ), радиоактивных (РЭ) элементов, а также цветных тяжелых и легких (ЦМ) и благородных металлов (БМ). Также было рассчитано содержание этих элементов в ПСУ. Расчет проводился по формуле: $C_{\text{псу}} = ((C_{\text{шп}} \cdot M_{\text{шп}}) + (C_{\text{зр}} \cdot M_{\text{зр}}) + (C_{\text{шл.ор}} \cdot M_{\text{шл.ор}}) + (C_{\text{шл.фр}} \cdot M_{\text{шл.фр}}) + (C_{\text{втр}} \cdot M_{\text{втр}})) / M_{\text{псу}}$, где $C_{\text{псу}}$ – содержание в ПСУ, $C_{\text{шп}}$ – содержание в шлаках, $C_{\text{зр}}$ – содержание в золе-уноса, $C_{\text{шл.ор}}$ и $C_{\text{шл.фр}}$ – содержание в шлаках, $C_{\text{втр}}$ – содержание в техногенной воде, $M_{\text{псу}}$ – масса ПСУ, $M_{\text{шп}}$ – масса шлаков, $M_{\text{зр}}$ – масса золы-уноса, $M_{\text{шл.ор}}$ и $M_{\text{шл.фр}}$ – масса шламов, $M_{\text{втр}}$ – масса техногенной воды.

Для описания распределения REY использовалась геохимическая классификация, разделяющая REY на легкие (LREY – La, Ce, Pr, Nd, Sm), средние (MREY – Eu, Gd, Tb, Dy, Y) и тяжелые

(HREY – Ho, Er, Tm, Yb и Lu). В этом порядке концентрации REY в исследованных образцах углей и ПСУ приведены в табл. 1.

Анализ распределения REY показывает, что в углях содержание этих элементов существенно не превышает кларки. Возрастание их отмечается в золе-уноса с максимумами 1083.49 и 1018.99 г/т в двух секциях золоуловителя. Далее наблюдается понижение их значений с небольшим повышением до 593.45 г/т в шламе фильтрации. При этом в золе-уноса содержания целого ряда REY (Y, La, Ce, Nd, Sm, Yb и др.) превышают кларки в 10–20 раз. В целом для распределения REY в ПСУ очевиден тренд повышенных содержаний в виде двух пиков (рис. 7).

Уровень высоких концентраций REY в золе-уноса составляет – 9.23%, в шламе – 1.46% при 86.46% в топочном шлаке от общей суммы содержаний REY в продуктах сгорания (табл. 2).

Содержание редких рассеянных, тугоплавких и радиоактивных элементов в углях и ПСУ приведено в табл. 3. Распределение тугоплавких элементов в целом схоже с распределением радиоактивных элементов (рис. 8). Наибольшие содержания их характерны для золы-уноса первой (РТЭ 388.30 г/т, РЭ 42.54 г/т) и второй (РТЭ 369.66 г/т, РЭ 41.47 г/т) секций. Также присутствует небольшой пик содержаний в шламе фильтра отстойника (РТЭ 249.83 г/т, РЭ 31.37 г/т) (табл. 4). Распре-

Таблица 1. Содержание REY в углях центральной части Райчихинского месторождения и продуктах его сгорания, г/т

| Элемент | УР (+10) | ШР (+10) | ШР (–10) | ЗР-1 | ЗР-2 | ЗР-3 | ШЛ.ОР | ШЛ.ФР | ВТР | ЗСР | ПСУ | Кларк* |
|---------|----------|----------|----------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| La | 13.90 | 66.09 | 130.16 | 217.30 | 205.01 | 87.61 | 47.28 | 103.62 | 57.10 | 50.78 | 112.25 | 10.00 |
| Ce | 28.57 | 123.63 | 228.91 | 392.20 | 364.24 | 173.68 | 105.67 | 210.75 | 109.51 | 106.66 | 200.71 | 22.00 |
| Pr | 3.06 | 11.89 | 22.69 | 39.21 | 36.48 | 16.93 | 10.75 | 19.88 | 10.76 | 10.52 | 19.78 | 3.50 |
| Nd | 11.74 | 44.81 | 82.88 | 140.58 | 131.43 | 65.52 | 42.46 | 78.55 | 41.11 | 39.68 | 72.68 | 11.00 |
| Sm | 2.33 | 8.31 | 15.37 | 26.04 | 24.33 | 12.43 | 8.73 | 15.79 | 7.60 | 7.65 | 13.50 | 1.90 |
| LREY | 59.61 | 254.72 | 480.02 | 815.33 | 761.49 | 356.17 | 214.87 | 428.58 | 226.08 | 215.29 | 418.92 | – |
| Y | 14.23 | 56.99 | 104.50 | 169.33 | 162.88 | 72.76 | 53.11 | 92.24 | 58.76 | 43.30 | 91.43 | 8.60 |
| Eu | 0.46 | 1.56 | 3.01 | 5.12 | 4.84 | 2.32 | 1.60 | 3.07 | 1.42 | 1.42 | 2.62 | 0.50 |
| Gd | 2.72 | 9.96 | 19.01 | 31.84 | 30.02 | 14.80 | 10.36 | 18.91 | 10.11 | 9.01 | 16.57 | 2.60 |
| Tb | 0.37 | 1.37 | 2.51 | 4.16 | 3.93 | 1.93 | 1.39 | 2.55 | 1.32 | 1.23 | 2.20 | 0.32 |
| Dy | 2.18 | 8.25 | 14.27 | 23.41 | 22.33 | 10.90 | 8.22 | 14.88 | 7.70 | 7.36 | 12.68 | 2.00 |
| MREY | 19.97 | 78.13 | 143.29 | 233.86 | 223.99 | 102.72 | 74.67 | 131.64 | 79.30 | 62.31 | 125.50 | – |
| Ho | 0.45 | 1.74 | 2.90 | 4.73 | 4.59 | 2.18 | 1.70 | 3.02 | 1.62 | 1.44 | 2.60 | 0.50 |
| Er | 1.40 | 5.40 | 8.79 | 14.04 | 13.60 | 6.52 | 5.20 | 9.16 | 4.76 | 4.35 | 7.91 | 0.85 |
| Tm | 0.20 | 0.78 | 1.19 | 1.88 | 1.85 | 0.88 | 0.73 | 1.28 | 0.61 | 0.62 | 1.09 | 0.31 |
| Yb | 1.35 | 5.13 | 7.57 | 11.90 | 11.72 | 5.59 | 4.72 | 8.36 | 3.69 | 4.14 | 6.96 | 1.00 |
| Lu | 0.21 | 0.78 | 1.14 | 1.74 | 1.75 | 0.83 | 0.71 | 1.25 | 0.56 | 0.61 | 1.05 | 0.19 |
| HREY | 3.61 | 13.83 | 21.60 | 34.30 | 33.51 | 16.00 | 13.07 | 23.08 | 11.24 | 11.17 | 19.61 | – |
| ΣREY | 83.19 | 346.68 | 644.90 | 1083.49 | 1018.99 | 474.89 | 302.61 | 583.30 | 316.62 | 288.77 | 564.03 | – |

*Значение кларка по М.П. Кетрис и Я.Е. Юдович [31] (LREY – легкие, MREY – средние, HREY – тяжелые редкоземельные элементы).

деление редких рассеянных элементов несколько отличается от приведенных. Наибольшие их содержания выявлены в шлаке (РРЭ 270.36 г/т) и в шламе фильтра отстойника (РРЭ 249.83 г/т).

Тяжелые (ТЦМ) и легкие (ЛЦМ) цветные металлы отличаются различным типом распределения в ПСУ (рис. 9). В продуктах сгорания для ТЦМ характерно последовательное повышение содержаний в шлаке (от 233.85 г/т), резко переходящих в высокие, начиная с золы-уноса третьей секции (3249.90 г/т) и достигая пика в шламе отстойника. ЛЦМ имеют несколько другой тип распределения. Наибольшие содержания обнаружены в золе-уноса первой (5425.92 г/т) и второй секций (5362.79 г/т). Начиная с золы третьей секции (2072.22 г/т), установлено понижение содержаний ЛЦМ, с небольшим пиком в шламе фильтра (3269.70 г/т). Стоит отдельно отметить резко выделяющиеся высокие содержания Zn (1891.96 г/т) и Ва (2122.56 г/т) в техногенной воде.

Содержание ЦМ в шлаке составляет 86.20%, в золе-уноса и шламе уменьшается, соответственно, до 10.20 и 3.60%. Значения ЦМ (г/т) возрастают до 3109.10 – в шлаке, до 6672.00 – в золе-уноса и 7362.24 – в шламе (табл. 6).

Содержания благородных металлов показывают последовательное повышение по мере движения газового потока. Наиболее высокие содержания благородных металлов в ПСУ отмечаются в шламе (табл. 7, рис. 10).

2.4. Критерии оценки углей Райчихинского месторождения и продуктов их сгорания как сырья для редкоземельных элементов. Для оценки сырья для REY принята промышленная классификация, основанная на прогнозах о соотношении спроса и предложений отдельных элементов [32]. На основании этой классификации REY делятся на критические (Nd, Eu, Tb, Dy, Y и Er), некритические (La, Pr, Sm и Gd) и избыточные (Ce, Ho, Tm, Yb и Lu) элементы. Исходя из этого, богатые руды REY должны содержать высокие концентрации критических и минимальное количество избыточных элементов. С учетом указанных критериев, для первичной оценки качества редкоземельных руд используется соотношение относительного количества критических элементов к сумме REY к относительному количеству избыточных к сумме REY [1]. Этот показатель назван коэффициентом перспективности и рассчитывается по формуле: $KП(C_{out}) = (Nd + Eu + Tb + Dy + Y + Er) / \Sigma REY) / (Ce + Ho + Tm + Yb + Lu) / \Sigma REY)$. Очевидно, что чем выше этот коэффици-

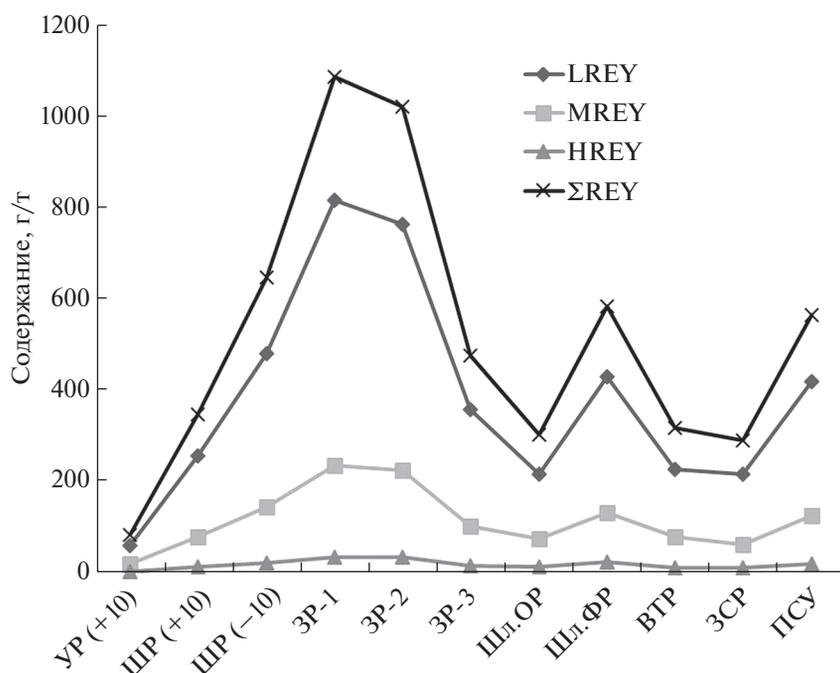


Рис. 7. Распределение REY в углях центральной части Райчихинского месторождения и продуктах его сгорания.

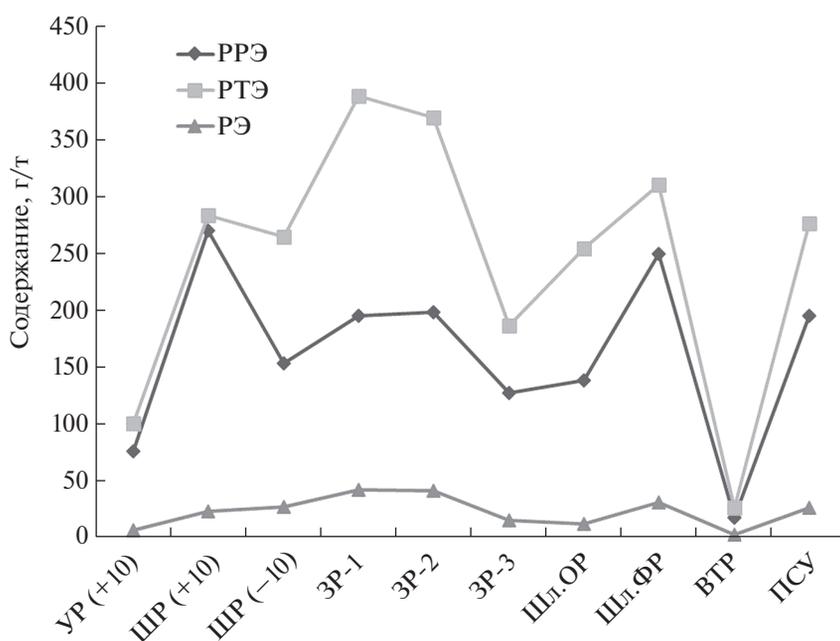


Рис. 8. Распределение редких рассеянных, тугоплавких и радиоактивных элементов в продуктах сгорания углей центральной части Райчихинского месторождения.

ент, тем перспективнее руда REY с точки зрения потенциальной промышленной ценности.

Для предварительной оценки угольной золы в качестве сырья REY в последние годы учитываются не только количество, но индивидуальные их составы. Для золы с повышенными концен-

трациями REY, как отмечалось выше, выделяются три схемы распределения REY: *LREY* – ($La_N/Lu_N > 1$), *MREY* – ($La_N/Sm_N < 1$, $Gd_N/Lu_N > 1$) и *HREY* – ($La_N/Lu_N < 1$). L-тип характеризует богатые руды с высоким выходом золы (15–50%) и мощностью пластов от 0.6 до 26.7 м. Содержание

REO в угольной золе колеблется от 0.11 до 0.23%, КП(C_{outl}) от 0.5 до 0.9, а отношение La_N/Lu_N – от 1.1 до 2.9. Аномальное содержание REY с L-типом терригенного или туфогенного происхождения формируется на стадии торфяной залежи. М-тип, по целому ряду месторождений угля Китая, Дальнего Востока России и других стран, характеризуется выходом золы от 9 до 32%, с мощностью пластов угля от 0.54 до 16.5 м. Содержание REO в угольной золе колеблется от 0.1 до 0.6%, а КП(C_{outl}) – в пределах 0.8–1.3%. Распределение REY Н-типа ($La_N/Lu_N < 1$) присуще богатым угольным золам. Зольность углей 1–4%, мощность паста угля 0.4–6.0 м, содержание REO – 0.1–1.0%, КП(C_{outl}) – от 0.9 до 3.8, La_N/Lu_N – 0.1–0.9.

В целом по Райчихинскому месторождению концентрации REY составляет по углю 83.19 г/т, по золе – 1028.09–1083.49 г/т, REY ≤ 0.11%, КП(C_{outl}) – 0.53.

Распределение REY и КП(C_{outl}) в углях рассмотрено на шести участках месторождения по отдельным горизонтам угольного пласта (табл. 8, 9). В центральной части месторождения на участках “Северо-восточный центральный 1 и 2” повышенные концентрации REY (92.47–217.44 г/т) со значениями КП(C_{outl}) до 0.47 приурочены к нижним частям пласта угля (табл. 8). В разрезах на участке “Северо-восточный центральный 1” в средних горизонтах пласта установлено три прослоя туфов (тонштейнов). В сопряженных с ними углях отмечено возрастание КП(C_{outl}) от 0.67 до 0.71.

Существенно отличаются показатели рудоносности углей на южной окраине Райчихинского месторождения (табл. 9). В пределах участков “Вятка” и “Широкий” пласты угля пониженной мощности, но имеют наиболее высокие содержания REY (782.05–1830.04 г/т), приуроченные к верхним горизонтам угольного пласта. В тоже время, эти угли отличаются несколько пониженными значениями КП(C_{outl}).

В среднем по месторождению КП(C_{outl}) составил 0.49, а REY – 32.15%. По показателю КП(C_{outl}) оно соответствует классу бесперспективных (КП(C_{outl}) ≤ 0.7), а по REY (32.15%) – подходит под класс перспективных (30% ≤ REY ≤ 51). Райчихинское бурогольное месторождение отнесено к переходному типу перспективности. Ресурс месторождения может быть повышен за счет возможности извлечения, совместно с REY, редких, цветных и благородных металлов (Be, Sc, V, Ga, Sb, Cs, Mo, W, Pb, Au, Ag, Pt и Re), которые при определенных условиях, по мнению целого ряда исследователей [1, 3, 7, 33, 34], обладают повышенным потенциалом экономического извлечения в качестве побочных продуктов из углей и золы.

Таблица 2. Среднее весовое и процентное содержания REY и их распределение в углях центральной части Райчихинского месторождения и продуктах его сгорания

| Уголь ПСУ | Вес, кг | Среднее содержание, | | Распределение | |
|------------------------|---------|---------------------|------|---------------|--------|
| | | г/т | %% | вес, г | %% |
| Уголь | 200.00 | 83.19 | 0.01 | 16.64 | 100.00 |
| Шлак | | | | | |
| ШР +10 | 9.50 | 346.68 | 0.03 | 3.29 | 19.79 |
| ШР –10 | 17.20 | 644.90 | 0.06 | 11.09 | 66.67 |
| Всего: | 26.70 | 538.79 | 0.05 | 14.39 | 86.46 |
| Зола-уноса | | | | | |
| ЗР-1 | 0.87 | 1083.49 | 0.11 | 0.94 | 5.67 |
| ЗР-2 | 0.57 | 1018.99 | 0.10 | 0.58 | 3.49 |
| ЗР-3 | 0.03 | 474.89 | 0.05 | 0.01 | 0.07 |
| Всего: | 1.46 | 1051.60 | 0.11 | 1.54 | 9.23 |
| Шлам | | | | | |
| ШЛ.ОР | 0.09 | 302.61 | 0.03 | 0.03 | 0.16 |
| ШЛ.ФР | 0.38 | 583.30 | 0.06 | 0.22 | 1.34 |
| Всего: | 0.47 | 531.34 | 0.05 | 0.25 | 1.50 |
| ВТР | 0.09 | 316.62 | 0.03 | 0.03 | 0.17 |
| ЗСР | 0.33 | 288.77 | 0.03 | 0.10 | 0.58 |
| Неустановленные потери | | | | | 2.06 |

Рассмотренные критерии оценки угля и ПСУ как сырья редкоземельных элементов основаны на прогнозе современного спроса и предложений. В то же время уровень содержаний промышленно ценных элементов может оцениваться и с учетом близости минеральной матрицы угля или угольной золы к микроэлементному составу промышленных типов руд, используя при этом максимальные промышленные содержания в рудах [33, 35–37]. Это, в первую очередь, касается редких, редкоземельных, цветных, благородных и радиоактивных металлов. Например, исследования вышеприведенных авторов позволяют определять минимально-промышленные содержания для REY (при зольности 10–20%) в золе – ΣTR_2O_3 – 400 г/т, а углях – 340 г/т. При таком же пороге зольности минимальные промышленные содержания, соответственно, составляют (г/т): для Cu – 100 и 10–20; Zn – 500 и 50–100; Mo 100 и 10–20; Ag и Au – в золе 0.2–10 и 0.1.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование металлоносных угленосных отложений восточного Приамурья на рубеже мела и палеогена происходило в обстановке крупных динамических преобразований, связанных с

Таблица 3. Содержание редких рассеянных, тугоплавких и радиоактивных элементов в углях центральной части Райчихинского месторождения и продуктах его сгорания, г/т

| Элемент | УР (+10) | Содержание в ПСУ | | | | | | | ПСУ | Кларк* | |
|------------------------------------|----------|------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | ШР (+10) | ШР (-10) | ЗР-1 | ЗР-2 | ЗР-3 | ШЛ.ОР | ШЛ.ФР | | | ВТР |
| Редкие рассеянные элементы (РРЭ) | | | | | | | | | | | |
| Rb | 18.64 | 132.60 | 38.03 | 30.82 | 31.80 | 16.98 | 9.46 | 24.62 | 6.84 | 68.61 | 10.00 |
| Ga | 12.15 | 37.90 | 27.95 | 36.45 | 38.80 | 19.94 | 23.33 | 41.21 | 1.41 | 31.79 | 5.50 |
| Ge | 3.42 | 2.69 | 8.89 | 19.13 | 20.99 | 28.27 | 23.27 | 40.10 | 4.09 | 7.84 | 2.00 |
| Hf | 1.42 | 5.00 | 4.97 | 7.30 | 7.21 | 2.66 | 1.35 | 5.22 | 0.20 | 5.07 | 1.20 |
| V | 40.02 | 92.17 | 72.70 | 99.48 | 93.69 | 43.73 | 38.51 | 87.54 | 3.72 | 80.23 | 22.00 |
| Se | 0.61 | <0.001 | 1.04 | 2.22 | 6.44 | 15.94 | 42.41 | 51.14 | 1.40 | 1.63 | 1.00 |
| Σ РРЭ | 76.26 | 270.36 | 153.58 | 195.40 | 198.93 | 127.52 | 138.33 | 249.83 | 17.66 | 195.17 | — |
| Редкие тугоплавкие элементы (РТЭ) | | | | | | | | | | | |
| Cr | 30.39 | 54.24 | 39.77 | 64.42 | 54.58 | 47.47 | 163.10 | 80.14 | 11.25 | 46.40 | 15.00 |
| Zr | 59.35 | 199.02 | 193.30 | 279.09 | 270.58 | 97.07 | 44.53 | 176.76 | 6.09 | 198.04 | 35.00 |
| Nb | 8.56 | 20.38 | 16.71 | 22.62 | 23.08 | 7.37 | 3.93 | 14.22 | 0.47 | 18.10 | 2.20 |
| Mo | 1.10 | 4.03 | 7.04 | 14.00 | 12.40 | 22.70 | 37.11 | 29.75 | 3.52 | 6.74 | 3.30 |
| Ta | 0.41 | 1.63 | 1.22 | 1.65 | 1.70 | 0.45 | 0.26 | 0.89 | <0.001 | 1.37 | 0.26 |
| W | 0.91 | 4.32 | 6.60 | 6.52 | 7.32 | 11.93 | 5.70 | 8.77 | 5.70 | 5.88 | 1.20 |
| Σ РТЭ | 100.72 | 283.62 | 264.64 | 388.30 | 369.66 | 186.99 | 254.63 | 310.53 | 27.03 | 276.53 | — |
| Редкие радиоактивные элементы (РЭ) | | | | | | | | | | | |
| Th | 5.48 | 18.34 | 21.30 | 33.33 | 32.59 | 12.00 | 10.17 | 25.49 | 0.75 | 20.86 | 3.3 |
| U | 1.50 | 4.94 | 5.98 | 9.21 | 8.88 | 3.72 | 2.67 | 5.88 | 1.96 | 5.77 | 2.9 |
| Σ РЭ | 6.98 | 23.28 | 27.28 | 42.54 | 41.47 | 15.72 | 12.84 | 31.37 | 2.71 | 26.63 | — |

*Значение кларка по М.П. Кетрис и Я.Е. Юдович [31].

неотектоническим этапом развития региона. Они выражались в блоковых перемещениях в пределах Туранского массива при колебательном типе движений на восточной окраине Зейско-Буреинского осадочного бассейна. В зоне контрастного сопряжения Бурейского поднятия и Куприяно-Райчихинского предгорного прогиба это привело к резкому усилению эрозии области сноса с размывом кор выветривания каолинового типа. Бы-

ли вскрыты и переотложены коренные источники редкоземельных, рассеянных, цветных и благородных металлов, основной объем которых в составе терригенных осадков последовательно перемещался в раннем кайнозое по палео-Бурее вплоть до выхода на Зейско-Бурейскую равнину с локализацией в пролювиально-аллювиальных и озерно-болотных отложениях дельты реки.

Таблица 4. Среднее весовое и процентное содержание редких рассеянных, тугоплавких и радиоактивных элементов в продуктах сгорания углей центральной части Райчихинского месторождения

| Элемент | Содержание в ПСУ | | | | | | |
|---------|------------------|-------|------------|------|--------|------|-------|
| | шлак | | зола-уноса | | шлам | | всего |
| | г/т | % | г/т | % | г/т | % | |
| РРЭ | 195.00 | 89.60 | 195.61 | 7.80 | 229.19 | 0.26 | 100 |
| РТЭ | 271.30 | 89.90 | 377.62 | 6.90 | 300.18 | 3.20 | 100 |
| РЭ | 25.70 | 91.10 | 41.67 | 5.30 | 27.94 | 3.60 | 100 |
| Σ РМ | 492.00 | 92.00 | 614.90 | 6.20 | 556.55 | 1.80 | 100 |

Процесс миграции рудных компонентов был многостадийным, обусловленный многократными проявлениями тектонической активности региона, что приводило к частому смещению палео-Бурей, переуглублению русла реки, многократному перемыву осадков, в котором значительная роль принадлежала наводнениям. Чередуемость режимов повышенной активности и стабилизации зоны сопряжения в системе поднятие-бассейн обусловили так же изменчивость палеогеографических условий в дельте палео-Бурей: эпизодическому возникновению и последующему размыву торфяных массивов, а также неравномерному обогащению рудными микрокомпонентами озерно-болотных отложений.

Таблица 5. Содержание цветных и благородных металлов в углях центральной части Райчихинского месторождения и продуктах его сгорания, г/т

| Элемент | УР (+10) | Содержание в ПСУ | | | | | | | ПСУ | Кларк* | |
|--------------------------------------|----------|------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | | ШР (+10) | ШР (-10) | ЗР-1 | ЗР-2 | ЗР-3 | ШЛ.ОР | ШЛ.ФР | | | ВТР |
| Тяжелые цветные металлы (ТЦМ) | | | | | | | | | | | |
| Co | 5.45 | 30.20 | 51.30 | 82.15 | 76.67 | 35.54 | 48.06 | 35.70 | 34.08 | 45.48 | 4.20 |
| Ni | 48.57 | 70.70 | 86.92 | 127.72 | 115.43 | 74.38 | 164.82 | 95.30 | 163.05 | 83.91 | 9.00 |
| Cu | 19.86 | 43.43 | 44.99 | 68.61 | 57.94 | 99.55 | 812.88 | 488.52 | 286.21 | 54.25 | 15.00 |
| Zn | 44.97 | 77.58 | 152.40 | 314.40 | 387.78 | 696.63 | 971.21 | 885.92 | 1891.96 | 155.05 | 18.00 |
| Sn | 1.85 | 2.67 | 3.54 | 6.55 | 9.03 | 11.38 | 27.26 | 32.89 | 0.36 | 3.90 | 0.79 |
| Sb | 0.30 | 0.65 | 2.97 | 8.61 | 7.72 | 19.62 | 46.92 | 45.27 | 0.57 | 3.16 | 0.84 |
| Hg | 0.04 | 0.24 | 0.42 | 0.48 | 0.46 | 0.79 | 0.71 | 0.69 | 0.39 | 0.37 | 0.10 |
| Pb | 14.53 | 8.38 | 174.55 | 714.32 | 596.21 | 2312.01 | 3694.80 | 2600.54 | 78.50 | 187.40 | 6.60 |
| ΣТЦМ | 135.57 | 233.85 | 517.09 | 1322.84 | 1251.24 | 3249.90 | 5766.66 | 4184.83 | 2455.12 | 533.51 | — |
| Легкие цветные металлы (ЛЦМ) | | | | | | | | | | | |
| Li | 6.40 | 23.17 | 20.54 | 27.22 | 28.65 | 10.64 | 5.12 | 17.98 | 6.18 | 21.65 | 10.00 |
| Be | 1.89 | 7.70 | 14.13 | 20.70 | 20.88 | 7.76 | 5.00 | 10.88 | 5.95 | 12.24 | 1.20 |
| Sr | 106.62 | 372.08 | 775.23 | 1293.48 | 1233.24 | 427.45 | 190.77 | 508.50 | 581.05 | 660.62 | 120.00 |
| Cs | 2.60 | 16.73 | 4.98 | 3.63 | 3.66 | 1.91 | 1.05 | 2.60 | 0.73 | 8.74 | 4.11 |
| Ba | 312.61 | 1413.45 | 2353.20 | 4080.89 | 4076.36 | 1624.46 | 987.64 | 2729.74 | 147.14 | 2122.56 | 150 |
| ΣЛЦМ | 430.12 | 1833.13 | 3168.08 | 5425.92 | 5362.79 | 2072.22 | 1189.58 | 3269.70 | 741.05 | 2825.81 | — |
| Благородные металлы (БМ) | | | | | | | | | | | |
| Ag | 0.57 | 2.01 | 0.93 | 2.40 | 1.84 | 2.57 | 1.16 | 3.18 | 0.47 | — | 0.90 |

*Значение кларка по М.П. Кетрис и Я.Е. Юдович [31].

Характеризуя в целом Райчихинское месторождение (по крупнообъемной пробе), можно отметить преобладание в углях (г/т) $LREY$ (52.61) при пониженных значениях $MREY$ (19.97) и низких $HREY$ (3.61). Среди них критические элементы составляют 30.01 г/т при близких концентрациях избыточных (30.58 г/т). При этом в углях и ПСУ отмечается преобладание лантаноидов цериевой группы (La_N/Yb_N), которое изменяется от 7.10 до 12.60. В диаграмме хондрит-нормализованных содержаний лантаноидов в углях и ПСУ четко выражена отрицательная аномалия Eu , характерная для магматических пород кислого состава, что подтверждает связь REY с гранитоидами Бурейского поднятия (рис. 11).

Общие параметры редкоземельной минерализации пласта “Верхний” Райчихинского месторождения были детализированы с учетом опробования разреза, включая вмещающие породы. Существенные различия концентраций REY в углях и породах вскрыши во многом связаны с различиями в составе органического материала, образованного на месте и привнесенного в процессе катастрофических наводнений [38, 39]. В центральной части месторождения REY обогащены метровые интервалы угля в почве пласта

с содержанием 92–217 г/т, реже – в кровле (до 77.31 г/т) с концентрациями REY 15.98–233.11 г/т. В средней части разреза пласта с содержанием REY в туфах до 38.95 г/т резко повышается значение $KP(C_{out})$, что, по-видимому, связано с понижением содержания избыточных элементов в углях.

На окраине месторождения резко повышен фон металлоносности углей на участке “Вятка”. Значение REY здесь колеблется от 607.69 до 1830.04 г/т с наиболее обогащенными интервалами углей в кровле и почве пласта. При этом в

Таблица 6. Среднее весовое и процентное содержание ЦМ в продуктах сгорания углей центральной части Райчихинского месторождения

| Металл | Содержание в ПСУ | | | | | | |
|--------|------------------|-------|------------|-------|---------|-------|-------|
| | шлак | | зола-уноса | | шлам | | всего |
| | г/т | % | г/т | % | г/т | % | |
| ТЦМ | 416.30 | 65.30 | 1327.87 | 11.60 | 4477.64 | 23.10 | 100 |
| ЛЦМ | 2692.80 | 87.40 | 5344.13 | 9.50 | 2884.60 | 3.10 | 100 |
| ΣЦМ | 3109.10 | 86.20 | 6672.00 | 10.20 | 7362.24 | 3.60 | 100 |

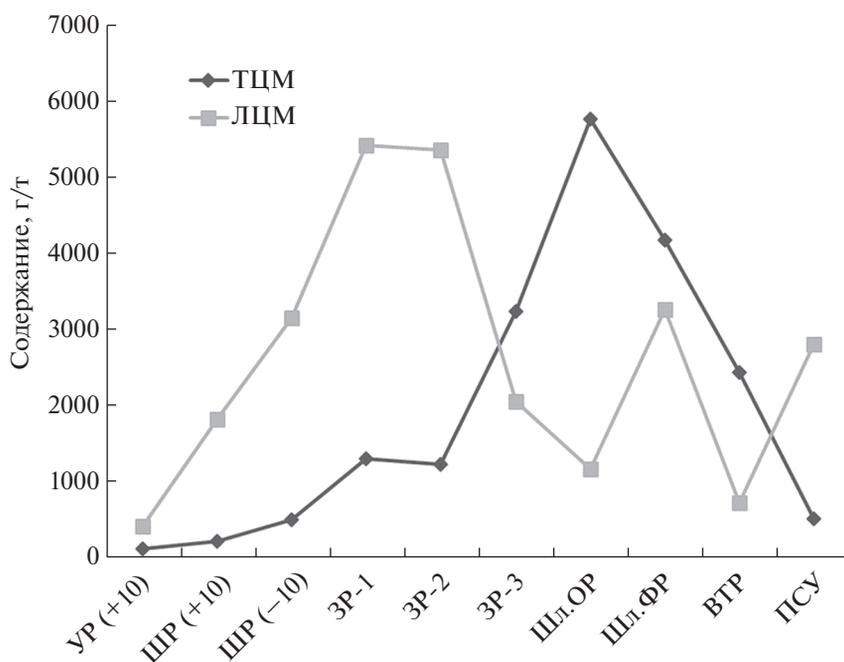


Рис. 9. Распределение цветных металлов в углях центральной части Райчихинского месторождения и продуктах его сгорания.

кровле, по-видимому, значительная роль в обогащении углей связана с туфами, в которых REY составляет 802.55 г/т.

Распределение других элементов в ПСУ более разнообразное. Редкие рассеянные (Rb, Ga, Ce, Hf, V, Se), тугоплавкие (Cr, Zr, Nb, Mo, Ta, W) и радиоактивные (Th, U) концентрируются, как и лантаноиды, преимущественно в золе-уноса в количестве от 5.30 до 7.8%. Цветные металлы преобладают в двух фракциях: тяжелые цветные (Co, Ni, Cu, Zn, Sn, Sb, Hg, Pb) наиболее распространены в шламе (23.10%) и золе-уноса (11.60%), а легкие (Li, Be, Sr, Cs, Ba) – в золе-уноса (9.50%) и шламе (3.10%). Благородные металлы (Au, Ag) концентрируются в основном в золе-уноса, соответственно, в количествах 6.20 и 8.10%. Оценивая

Таблица 7. Среднее весовое и процентное содержание БМ в продуктах сгорания углей центральной части Райчихинского месторождения

| Металл | Содержание Au и Ag в ПСУ | | | | | | |
|--------|--------------------------|-------|------------|------|------|------|-------|
| | шлак | | зола-уноса | | шлак | | всего |
| | г/т | % | г/т | % | г/т | % | |
| Au* | 0.22 | 90.40 | 0.31 | 6.20 | 0.47 | 3.40 | 100 |
| Ag | 1.30 | 88.60 | 2.19 | 8.10 | 2.81 | 3.30 | 100 |
| ΣБМ | 1.52 | 88.60 | 2.50 | 8.00 | 3.28 | 3.40 | 100 |

* Определение Au выполнено в пробирной лаборатории Института геологии и природопользования ДВО РАН.

условия накопления вышеприведенных рудных компонентов в ПСУ Райчихинского месторождения, следует отметить, что наиболее продуктивной фракцией локализации этих рудных микрокомпонентов служит зола-уноса.

В схеме современных генетических типов обогащения REY угольных бассейнов [1] райчихинские угли можно отнести к двум типам: терригенному и комбинированному – терригенно-вулканогенному. Терригенный тип формировался на стадии торфяной залежи с поступлением REY поверхностными водами системы р. Буря. Транспортировка их осуществлялась в ионном виде, коллоидах, а также в форме обломков горных пород и минералов. До 70% обломков пород представлены гранитоидами кислого состава Бурейского поднятия (рис. 11). Минеральные разновидности из питающих провинций Бурейского поднятия (касситерит, вольфрамит, золото, антимонит, висмутин, циркон, ксенотим, фергюсонит) присутствуют в углях и ПСУ. Подвижные формы REY (до 90%) связаны с органическим веществом [40].

В комбинированном терригенно-вулканогенном типе REY поступали в основном на стадии формирования торфяника в обстановке вулканической деятельности в сопредельном Сихотэ-Алинском орогенном поясе, что приводило к периодическому привносу пирокластики, обогащенной REY. В дальнейшем, в процессе диагенеза, происходило выщелачивание редкоземельных

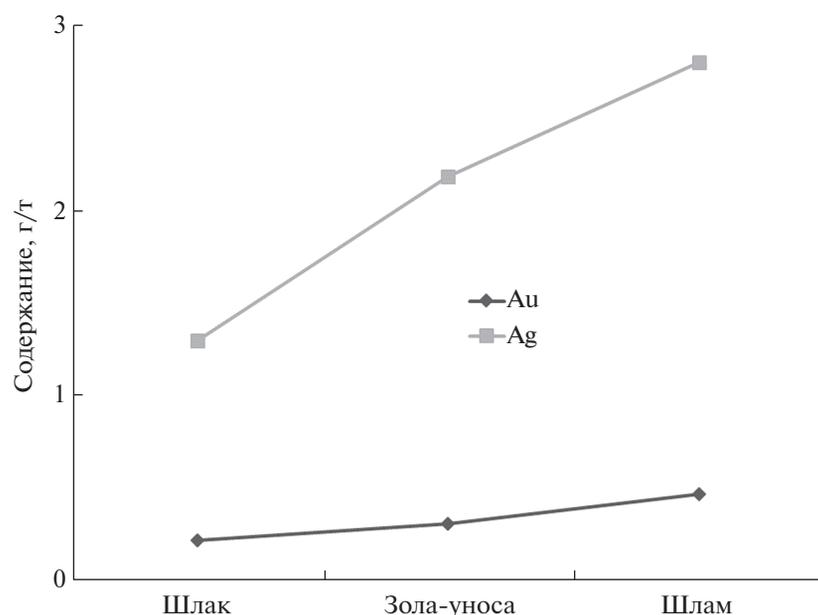


Рис. 10. Распределение Au и Ag в продуктах сгорания углей центральной части Райчихинского месторождения.

элементов из туфов (тонштейнов) с обогащением соседних горизонтов угля [12].

Взаимодействие растворенных микроэлементов с органической средой и механизмы их накопления опираются на результаты совместных исследований [41–43]. Н.Г. Куимова и соавт. на основании изучения низинного торфа р. Зeya (Приамурье) установила, что концентратом и

носителем золота в торфяной залежи являются гуминовые кислоты, накапливающие до 70% от его общего содержания, а 30% – в негидролизуемой части органического вещества. Была установлена возможность восстановления ионного золота до элементного состояния размерностью 200–600 нм с последующим отложением его в виде пленок и агломератов.

Таблица 8. Характеристика углей в центральной части Райчихинского месторождения

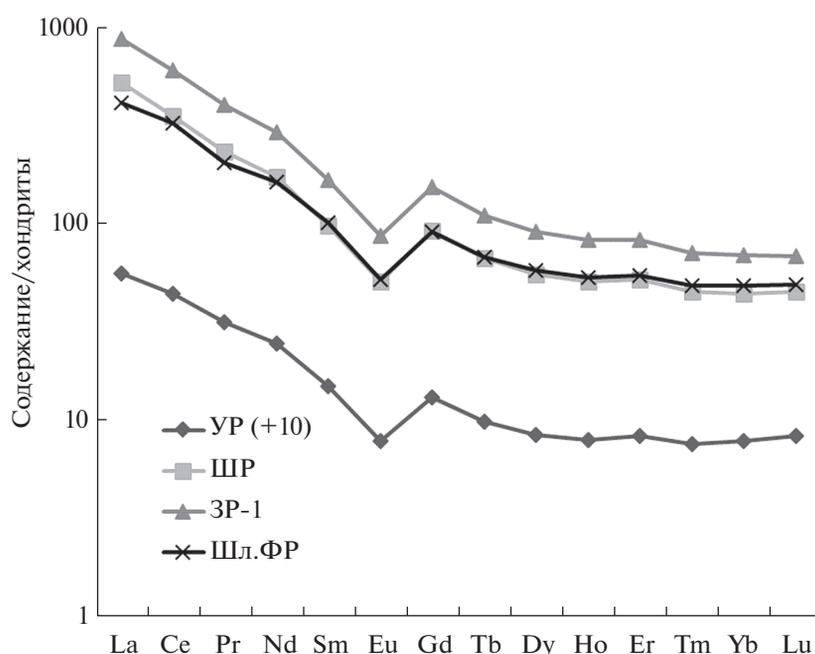
| Участок “Северо-восточный центральный 1” | | | | Участок “Северо-восточный центральный 2” | | | |
|---|--------|----------------|------------------------|---|--------|----------------|------------------------|
| мощность, м | порода | сумма REY, г/т | КП(C _{outl}) | мощность, м | порода | сумма REY, г/т | КП(C _{outl}) |
| 0.5 | Глина | 34.95 | 0.56 | 3.0 | Песок | 115.98 | 0.53 |
| 0.5 | Уголь | 39.60 | 0.66 | 1.5 | Глина | 233.11 | 0.41 |
| 0.5 | Туф | 38.95 | 0.63 | 0.4 | Уголь | 77.31 | 0.62 |
| 0.5 | Уголь | 38.13 | 0.50 | 0.4 | Уголь | 24.57 | 0.53 |
| 0.5 | Уголь | 24.42 | 0.58 | 0.4 | Уголь | 25.48 | 0.34 |
| 0.5 | Туф | 23.63 | 0.50 | 0.5 | Туф | 23.51 | 0.39 |
| 0.5 | Уголь | 10.42 | 0.67 | 0.4 | Уголь | 23.56 | 0.42 |
| 0.5 | Уголь | 13.06 | 0.70 | 0.5 | Уголь | 14.03 | 0.50 |
| 0.5 | Уголь | 36.63 | 0.42 | 0.4 | Уголь | 26.08 | 0.40 |
| 0.5 | Туф | 35.03 | 0.51 | 0.4 | Уголь | 15.08 | 0.45 |
| 0.5 | Уголь | 16.98 | 0.65 | 0.5 | Уголь | 35.29 | 0.46 |
| 0.5 | Уголь | 44.64 | 0.47 | 0.5 | Уголь | 27.64 | 0.47 |
| 0.5 | Уголь | 92.47 | 0.47 | 0.3 | Уголь | 217.44 | 0.33 |
| 0.5 | Глина | 97.02 | 0.63 | 0.4 | Уголь | 135.37 | 0.45 |

Таблица 9. Характеристика углей на южной окраине Райчихинского месторождения

| Участок “Вятка”, точка 20 | | | | Участок “Широкий 2”, точка 1 | | | |
|---------------------------|----------|----------------|------------------------|------------------------------|--------|----------------|------------------------|
| мощность, м | порода | сумма REY, г/т | КП(C _{outl}) | мощность, м | порода | сумма REY, г/т | КП(C _{outl}) |
| 1.0 | Глина | 339.52 | 0.46 | 1.5 | Уголь | 77.20 | 0.47 |
| 0.2 | Орг в-во | 713.93 | 0.61 | 0.5 | Туф | 21.19 | 0.47 |
| 0.2 | Глина | 936.57 | 0.53 | 0.5 | Уголь | 41.77 | 0.50 |
| 0.6 | Уголь | 726.77 | 0.46 | 0.5 | Уголь | 45.42 | 0.51 |
| 0.6 | Уголь | 745.69 | 0.40 | 0.5 | Уголь | 32.14 | 0.41 |
| 0.6 | Уголь | 607.79 | 0.46 | Участок “Широкий 2”, точка 2 | | | |
| 0.5 | Глина | 111.09 | 0.45 | 0.5 | Уголь | 782.05 | 0.68 |
| Участок “Вятка”, точка 21 | | | | 0.5 | Уголь | 118.03 | 0.37 |
| 1.5 | Глина | 477.98 | 0.48 | 0.5 | Уголь | 91.46 | 0.42 |
| 0.5 | Уголь | 1830.04 | 0.57 | 0.5 | Уголь | 41.34 | 0.54 |
| 0.05 | Туф | 802.55 | 0.41 | | | | |
| 0.5 | Уголь | 132.59 | 0.46 | | | | |
| 0.5 | Уголь | 383.13 | 0.42 | | | | |

Л.М. Павловой и соавт. [42] изучена сорбция химических элементов из многокомпонентных растворов биомассой микроскопических грибов. Установлено, что максимальным извлечением (85–100%) всеми штаммами грибов из разбавленных растворов обладают преимущественно Bi, Sn, Pb, Hg, Fe, а из концентрированных – Bi, Sn, Fe, Pb, Cr, Sb (75–100%). В меньшей мере (до 50%) извлекаются Mn, Co, As, Sr, Ni, меньше Cu, V, Cd,

Zn (из растворов с высокой концентрацией), Sb и Se (из растворов с низкой концентрацией элементов). В последующей работе [43] с исследованиями сорбции элементов-примесей компонентами бурых углей показано, что на начальной стадии биомасса микроскопических грибов, за счет полного обмена, хелатирования и восстановительных реакций, способна фиксировать значительные объемы элементов, поступающих с кис-

**Рис. 11.** Диаграмма хондрит-нормализованных содержаний REY в углях Райчихинского месторождения и продуктах его сгорания.

лыми дренирующими растворами. В результате этого могут образоваться нуль-валентные частицы. В дальнейшем существенную роль в сорбции элементов начинают играть гуминовые кислоты, которые за счет ионного обмена могут фиксировать большие количества Cu, Cr, Zn, Co, Ni, Pb и Fe, но с образованием органоминеральных соединений. Это позволяет считать, что на буровой стадии, в отличие от торфяной, сорбируется гораздо меньше элементов в основном по механизму межмолекулярных взаимодействий.

При рассмотрении эволюции форм нахождения лантаноидов в процессе углеобразования С.И. Арбузовым и соавт. [18] было установлено, что на стадии торфообразования преобладают подвижные формы органических соединений, а минеральная составляющая присутствует в виде устойчивых редкоземельных элементов. На буровой стадии также доминируют органические соединения лантаноидов хелатного типа при второстепенной роли минеральных форм. Последующие преобразования органического вещества в процессе углефикации, по мнению этих исследователей, приводят к образованию аутигенных минералов.

Перспективы вовлечения в освоение углей и золы угольных месторождений, подобных Райчихинскому, во много зависят от экономической конъюнктуры этого вида сырья. V. Seredin и S. Dai [1] отмечают, что существующие цены на REY при мощности угольных пластов более 5 м могут быть пригодны для селективной отработки с содержанием REY 800–900 г/т, а в золе – при $REY \geq 1000$ г/т. При этом следует иметь в виду, что среднее суммарное содержание REY в углях мира, основанное на средней индивидуальной концентрации лантаноидов и иттрия [31], оценивается (г/т): в 65.5, в углях США – 62.1 [44], а Китая – 137.9 [45]. В то же время среднемировые концентрации REY в угольной золе составляют 404 г/т, что сопоставимо с некоторыми рудами коренных месторождений редкоземельного сырья.

Учитывая это, ранее указанные исследователи предлагают установить минимально промышленный порог для REY в углях и золе определенным уровнем зольности. В частности, при зольности угля 10–20%, присущей Ерковецкому, Райчихинскому и Архаро-Богучанскому месторождениям Приамурья, минимально-промышленные содержания ΣTR_2O_3 могут быть определены (г/т): для золы – 400, а для угля – 340. Также вполне приемлемо для освоения выглядят содержания ряда цветных, редких и благородных металлов. Учитывая, что они концентрируются в золе-уноса, можно разрабатывать условия их извлечения из угольных месторождений, соответственно, с REY. Указанный методический подход оценки промышленно-ценных микроэлементов апробиро-

ван при исследовании металлоносных углей Дальнего Востока. С учетом ранее приведенных материалов они показывают ориентиры, нацеленные на создание на востоке России минерально-сырьевой базы редкоземельных, редких, цветных и других ценных металлов, связанных с угленосными отложениями.

Значительная часть дальневосточных месторождений и проявлений редкоземельной минерализации расположена в пределах Цзямусы-Бурейского и Ханкайского континентальных массивов Центрально-Азиатского складчатого пояса или в зонах его сопряжения в эрозионно-тектонических депрессиях (прогибах). Континентальные массивы – это глубоко эродированные структуры, неоднократно переживавшие периоды стабилизации с формированием в мезозое кор выветривания химического типа. Примером их может служить месторождение Лонгнан (КНР). Производные рудопроявления такого типа, связанные с размывом кор выветривания, развиты и в угольных бассейнах Приморья и Приамурья [1, 13, 20, 46]. На российской территории в пределах этих массивов можно прогнозировать редкоземельную минерализацию в корах выветривания и продуктах их переотложения (бурые угли и вмещающие породы), терригенного, терригенно-вулканогенного комбинированного, инфильтрационного типов с наложенными низкотермальными процессами, с нисходящими и восходящими потоками подземных вод.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали тесную связь питающих провинций Бурейского поднятия и областей угленакпления Зейско-Бурейского осадочного бассейна. Накопление рудных микрокомпонентов происходило на торфяной стадии с привносом вулканического пепла с прилегающей к поясу территории Приамурья. Эти события обусловили наличие двух типов обогащения райчихинских углей REY: терригенного, связанного с поступлением рудных микрокомпонентов с поверхностными водами, и комбинированного – терригенно-вулканогенного – с привносом акцессорных минералов вулканитов. Установлено, что лантаноиды в продуктах сторания доминируют в золе-уноса и частично в шламе, а цветные и благородные металлы – наращивают минерализацию преимущественно в шламе.

2. На ранней стадии формирования торфяной залежи процессы накопления рудных микрокомпонентов проходили по двум направлениям: с локализацией кластогенно-минеральных форм за счет привноса в водной среде и сорбции элементов биомассой из рудных растворов. На основании экспериментальных исследований установлено, что биомасса (в частности, микроскопиче-

ские грибы из современных торфов) на начальной стадии может фиксировать значительное количество элементов, поступающих с кислыми растворами. В дальнейшем существенная роль в сорбции элементов принадлежит гуминовым кислотам.

3. Оценка REY райчихинских углей исследована на участках по отдельным горизонтам пласта. Установлено, что в центре месторождения отмечается три горизонта с повышенными значениями коэффициента перспективности: верхний и нижний – за счет общих повышенных значений REY, средний – обогащенный тяжелыми REY, по-видимому, из тонштейнов. На южной окраине месторождения при уменьшении мощности пласта в его кровле отмечаются наиболее высокие значения REY.

4. Оценка рудоносности райчихинских углей определяется также возможностью извлечения ряда редких, цветных и благородных металлов в качестве побочных продуктов. Наряду с этим заслуживает внимание более детальное изучение выделенных перспективных горизонтов пород кровли и подошвы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.В. Штареву и В.Е. Зазулину (ИТиГ ДВО РАН, г. Хабаровск) – за проведение измерений содержания металлов в твердых объектах методом ИСП-МС, В.О. Крутиковой (ИТиГ ДВО РАН, г. Хабаровск) – за проведение микронзондовых исследований, А.С. Сегреневу (ИГиП ДВО РАН, г. Благовещенск) – за выполнение аналитических работ по определению химического состава углей, Е.Н. Воропаевой (ИГиП ДВО РАН, г. Благовещенск) – за минералогические исследования фракций угля и ПСУ, В.Н. Борисову (ИГиП ДВО РАН, г. Благовещенск) – за выполнение опытных работ по выделению из углей минеральных фракций; Е.А. Копчинской (ИГиП ДВО РАН, г. Благовещенск) – за определение общего и органического углерода в углях, Т.В. Артеменко (ИГиП ДВО РАН, г. Благовещенск) – за участие в построении минерагенической схемы и Т.В. Дехнич (ИГиП ДВО РАН, г. Благовещенск) – за оформление статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00116, <https://rscf.ru/project/22-27-00116/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Seredin V.V., Dai S.* // Int. J. Coal Geology. 2012. V. 94. P. 67.
2. *Кременецкий А.А., Архипова Н.А.* // Разведка и охрана недр. 2012. № 9. С. 83.

3. *Dai S., Finkelman R.B.* // Int. J. Coal Geology. 2018. V. 186. P. 155.
4. *Кременецкий А.А., Калиш Е.А.* // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 3.
5. *Seredin V.V.* // Int. J. Coal Geology. 1996. V. 30. P. 101.
6. *Середин В.В.* // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. № 1. С. 43. [Geology of Ore Deposits, 2004. V. 46. № 1. P. 36.]
7. *Seredin V.V., Finkelman R.B.* // Int. J. Coal Geology. 2008. V. 76. P. 253.
8. *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. V. 446. № 2. P. 1215. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12100182>].
9. *Сорокин А.П., Сорокина А.Т., Каплун В.Б., Рождествина В.И., Попов А.А., Артеменко Т.В.* // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 5. С. 3. [Russian Journal of Pacific Geology, 2017. V. 11, №. P. 315. <https://doi.org/10.1134/S1819714017050050>]
10. *Сорокин А.П., Белозеров Н.И., Попов А.А.* // Тихоокеанская геология. 2021. Т. 40. № 5. С. 33. [Russian Journal of Pacific Geology, 2021. V. 15. № 5. P. 417. <https://doi.org/10.1134/S1819714021050092>. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-5-33-43>]
11. *Кузеванова Е.В.* Металлоносность углей кайнозойских бурогольных месторождений Приморья: автореф. дис. канд. геол.-минер. наук. СПб: ВСЕГЕИ, 2014. 26 с.
12. *Arbuzov S.I., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Shal'dybin M.V., Belaya E.V., Spears D.A.* // Int. J. Coal Geology. 2016. V. 153. P. 99.
13. *Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Soktoev B.R., Chekryzhov I.Y., Popov N.Y., Spears D.A.* // Ore Geology Reviews. 2021. V. 139. P. 104537.
14. *Середин В.В.* // Доклады Академии наук СССР. 1991. Т. 320. № 6. С. 1446.
15. *Арбузов С.И., Кикина Е.В., Чекрыжов И.Ю., Блохин М.Г., Иванов В.В., Зарубина Н.В., Sun Y.Zh., Zhao C.L.* // Комплексное использование потенциала каменных и бурых углей и создание комбинированных экологически безопасных технологий их освоения, 19–22 сент. 2017 г., Благовещенск: [сб. докл.]. Благовещенск: АмурНЦ ДВО РАН, 2017. С. 95–99.
16. *Вялов В.И., Кузеванова Е.В., Нелюбов П.А., Змиевский Ю.П., Ключарев Д.С.* // Разведка и охрана недр. 2010. № 12. С. 53.
17. *Seredin V.V., Dai S., Sun Y., Chekryzhov I.Yu.* // Appl. Geochem. 2013. V. 31. P. 1.
18. *Арбузов С.И., Финкельман Р.Б., Ильенко С.С., Маслов С.Г., Межибор А.М., Блохин М.Г.* // ХТТ. 2019. № 1. С. 3–25. [Solid Fuel Chemistry, 2019. V. 53. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.3103/S0361521919010026>. <https://doi.org/10.1134/S002311771901002X>]
19. *Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Ivanov V.P., Spears D.A., Chekryzhov I.Y.* // Ore Geology Reviews. 2021. V. 132. P. 103986.
20. *Чекрыжов И.Ю., Нечаев В.П., Трач Г.Н., Трач Д.А.* Горный журнал. 2018. № 2. С. 35.

21. *Рождествина В.И., Сорокин А.П.* // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 6. С. 26. [Russian Journal of Pacific Geology, 2010. V. 15. № 5. P. 417. <https://doi.org/10.1134/S1819714010060035>].
22. *Сорокин А.П., Рождествина В.И., Кузьминых В.М., Жмодик С.М., Аношин Г.Н., Митькин В.Н.* // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 7. С. 876. [Russian Geology and Geophysics, 2013. V. 54. № 7. P. 671. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.06.003>].
23. *Васильев И.А., Капанин В.П., Ковтонюк Г.П., Мельников В.Д., Луэнов В.Л., Данилов А.П., Сорокин А.П.* Минерально-сырьевая база Амурской области на рубеже веков. Благовещенск: ПКИ “Зея”, 2000. 168 с.
24. *Эйриш Л.В.* Металлогения золота Приамурья (Амурская область, Россия). Владивосток: Дальнаука, 2002. 194 с.
25. *Вьюнов Д.Л.* Прогнозно-геохимическая оценка металлоносности Верхнего Приамурья: Дис. ... канд. геол.-минерал. наук: Благовещенск: Амур. комплекс. НИИ ДВО РАН, 2005. 102 с.
26. *Волкова Ю.Р., Шадрин Н.И., Петрук Н.Н.* Карта полезных ископаемых. 1: 1000000. Лист М-52 (Благовещенск). Дальневосточная серия. СПб: Картограф ВЕСЕГИ, 2012.
27. *Сорокин А.П., Конюшок А.А.* // ДАН. 2018. Т. 483. № 6. С. 662. [Doklady Earth Sciences, 2018. V. 483. № 2. P. 1571. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18120218>. <https://doi.org/10.31857/S086956520003452-0>].
28. *Сорокин А.П., Чантурия В.А., Агеев О.А., Дугин С.В.* // ХТТ. 2020. № 4. С. 8-20. [Solid Fuel Chemistry, 2020. V. 54. № 4. P. 196. <https://doi.org/10.3103/S0361521920040072>. <https://doi.org/10.31857/S0023117720040076>].
29. *Сорокин А.П., Агеев О.А.* Устройство для получения разделенных продуктов сгорания углей. Пат. 2699642 РФ // Б.И. 2019. № 25. С. 9.
30. *Шпирт М.Я.* Безотходная технология. Утилизация отходов добычи и переработки твердых горючих ископаемых. М.: Недра, 1986. 255 с.
31. *Ketris M.P., Yudovich Y.E.* // Int. J. Coal Geology. 2009. V. 78. P. 135.
32. *Kingsnorth D.J.* An Overview of the Rare Earth Market. IMCOA. 2009. <http://www.ggg.gl/userfiles/file/Reports/GGG%20Annual%20Report/202009.pdf>.
33. *Неженский И.А., Вялов В.И., Мирхалева Н.В., Чернышев А.А.* // Региональная геология и металлогения. 2013. 54. С. 99.
34. *Вялов В.И., Богомолов А.Х., Шишов Е.П., Чернышев А.А.* // Георесурсы. 2017. Спецвыпуск. Ч. 2. С. 256.
35. *Вялов В.И., Ларичев А.И., Кузеванова Е.В., Богомолов А.Х., Гамов М.И.* // Региональная геология и металлогения. 2012. № 51. С. 96.
36. *Вялов В.И., Неженский И.А., Балахонова А.С., Шишов Е.П.* // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 18.
37. *Вялов В.И., Наставкин А.В.* // ХТТ. 2019. № 5. С. 63. [Solid Fuel Chemistry, 2019. V. 53. № 5. P. 314. <https://doi.org/10.3103/S0361521919050112>. <https://doi.org/10.1134/S0023117719050116>].
38. *Sorokin A.P., Konyushok A.A., Kuz'minykh V.M., Dugin S.V.* // Minerals. 2021. V. 11. P. 682.
39. *Сорокин А.П., Носкова Л.П.* // ХТТ. 2021. № 6. С. 3. [Solid Fuel Chemistry, 2021. V. 55. № 6. P. 357. <https://doi.org/10.3103/S0361521921060136>. <https://doi.org/10.31857/S002311772106013X>].
40. *Радомская В.И., Шумилова Л.П., Носкова Л.П., Сорокин А.П., Павлова Л.М., Иванов В.В.* // ХТТ. 2023. № 1. С. 22. [Solid Fuel Chemistry, 2023. V. 57. № 1. P. 20. <https://doi.org/10.3103/S0361521923010068>. <https://doi.org/10.31857/S0023117723010061>].
41. *Куимова Н.Г., Павлова Л.М., Сорокин А.П., Носкова Л.П., Сергеева А.Г.* // Литосфера. 2011. № 4. С. 131.
42. *Павлова Л.М., Шумилова Л.П., Радомская В.И., Сорокин А.П., Иванов В.В.* // ДАН. 2019. Т. 488. № 4. С. 425 [Doklady Earth Sciences, 2019. V. 488. № 2. P. 1178. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19100088>. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524884425-428>].
43. *Павлова Л.М., Радомская В.И., Шумилова Л.П., Сорокин А.П., Радомский С.М.* // ДАН. 2020. Т. 492. № 2. С. 57. [Doklady Earth Sciences, 2020. V. 492. № 2. P. 438. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20060148>. <https://doi.org/10.31857/S2686739720060146>].
44. *Finkelman R.B.* // Organic geochemistry / Eds. M.H. Engel, S. Masco.— New York: Plenum. 1993. P. 593.
45. *Dai S. Li D., Chou C.-L., Zhao L., Zhang Y., Ren D., Ma Y., Sun Y.* // Int. J. Coal Geology. 2008. V. 74. P. 185.
46. *Сорокин А.П., Конюшок А.А., Кузьминых В.М., Артеменко Т.В., Попов А.А.* // Геотектоника. 2019. № 2. С. 33. [Geotecton, 2019. V. 53. № 2. P. 193. <https://doi.org/10.1134/S0016852119020092>. <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019233-45>].