

УДК 550.43: 553.96

РЕДКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПАЛЕОГЕНОВЫХ БУРОУГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗЕЙСКО-БУРЕЙНСКОГО ОСАДОЧНОГО БАССЕЙНА (ПРИАМУРЬЕ, ДАЛЬНИЙ ВОСТОК): МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ, УСЛОВИЯ ОБОГАЩЕНИЯ, КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА (ОБЗОР)

© 2024 г. А. П. Сорокин*, С. В. Дугин**

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

*e-mail: sorokinap@ignm.ru

**e-mail: duservad@gmail.com

Поступила в редакцию 15.09.2023 г.

После доработки 25.09.2023 г.

Принята к публикации 04.10.2023 г.

Разработана модель формирования редкоземельных, включая иттрий, редких элементов и цветных металлов в платформенных и активизированных структурах Верхнего Приамурья. Рассмотрены генетические типы и степень обогащения лантаноидов, показана неравномерность их распространения по разрезу пластов угля и в продуктах их сгорания. В углях доминируют легкие редкоземельные элементы. Доказаны высокие сорбционные свойства торфа и углей из водных растворов. Рассмотрены критерии предварительной оценки угля в качестве сырья для извлечения лантаноидов и проанализированы перспективы их выявления.

Ключевые слова: *осадочный бассейн, горный массив, бурогольные месторождения, уголь, угольная зола, продукты сгорания углей, перенос и накопление рудных микрокомпонентов, редкоземельные, редкие элементы, цветные металлы, гуминовые кислоты, перспективность месторождений*

DOI: 10.31857/S0023117724010011 EDN: OQWRDV

ВВЕДЕНИЕ

Изучение металлоносности угленосных отложений продолжается более 100 лет. Длительное время оно было направлено на исследование благороднометалльного оруденения, но с конца прошлого столетия в этот процесс были вовлечены Ce, Ga, U, V, редкоземельные элементы, Yb, Sc, Nb, Al и Mg [13]. Анализ тенденции развития мировой экономики свидетельствует о том, что спрос на эти металлы, в первую очередь на редкоземельные элементы и иттрий (REY), будет увеличиваться в течение последующих лет. Значительная часть их извлекается из руд черных и цветных металлов, нерудного сырья, углей и других полезных ископаемых [4]. Поэтому значительное внимание уделяется поискам альтернативных, по отношению к рудным месторождениям, источников рудных металлов. Они включают коры выветривания алюмосиликатных и изверженных щелочных пород, близкие к “ионным” глинам Китая, переотложенные их продукты, Y-земельные аргиллизиты, бурые

угли, обогащенные пирокластикой и в процессе гидротермальной деятельности [1–3, 5–13].

В настоящее время установлено широкое распространение высоких концентраций REY (>0.1%) во многих месторождениях угля, в том числе в угольной золе и во вмещающих породах. Разработана классификация генетических типов обогащения REY в угольных бассейнах: терригенный тип – с привнесением REY поверхностными водами; туфогенный – связанный с поступлением и выщелачиванием кислых и щелочных вулканических пеплов; инфильтрационный – обусловленный подземными водами; гидротермальный – связанный с восходящими термальными и глубинными флюидами. Последние подразделяются на адсорбционные на поверхности органических веществ, растворенные в поровых водах и находящиеся в очень мелкозернистых минералах, заключенных внутри их или экранированных органическим веществом угля [14]. Но все же основные REY с высокими содержаниями локализованы в органических со-

единениях и в тонкозернистых аутигенных минералах: REY-содержащих фосфатах и сульфатах алюминиевой и алунитовой групп [1, 12–18].

На российском Дальнем Востоке угли с высоким содержанием редкоземельных элементов впервые установлены в конце прошлого века. Формирование их, по мнению В.В. Середина [16], происходило в эрозионно-тектонических впадинах с широко развитыми корами выветривания на торфяной стадии синхронно с бимодальным вулканизмом. В обзорной публикации И.Ю. Чекрыжова с соавторами [19] приведены данные по концентрациям REY целого ряда бурогоугольных месторождений Южного Приморья с содержанием $\geq 0.1\%$. Выделены три типа редкоземельной минерализации: терригенная, туфогенная и эксфильтрационная.

Металлоносность бурых углей Зейско-Буреинского бассейна изучается авторами статьи уже более 20 лет. Рассеянные, включая редкоземельные элементы, благородные и цветные, металлы установлены в палеогеновых (Ерковецкое, Райчихинское, Архаро-Богучанское), ниже-среднемиоценовых (Свободное, Сергеевское, Тыгдинское) месторождениях. Установлена связь распределения металлоносных углей с геодинамическими особенностями развития и палеогеографическими условиями формирования бассейна. Изучены генетические типы минерализации, условия миграции, формы переноса микрокомпонентов и взаимодействие их с органическим веществом, выделены типы обогащения REY и сопутствующих им металлов. В ряде районов выявлены закономерности накопления благородных и других металлов при сингенетических процессах россыпеобразования и торфонакопления. Установлено, что, кроме редкоземельных элементов, в углях и продуктах их сгорания (ПСУ) широко представлены также Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, W, Cu [18, 20–24].

Цель работы – разработка модели формирования рудных микрокомпонентов, в первую очередь REY, в углях, угольной золе и продуктах сгорания углей; расшифровка условий их обогащения; оценка как возможного сырья для промышленного извлечения; перспективы выявления новых типов редкоземельного оруденения.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Природные объекты (угленосные отложения, структуры обрамления). Раннекайнозойские металлоносные угли распространены преимуще-

ственно на южной половине Зейско-Буреинского бассейна в пределах Нижнезейской впадины, ограниченной с севера Амуро-Мамыньским выступом, а с запада и востока – соответственно Большим Хинганом и Туранским (Буреинским) массивом (рис. 1). Образование их связано с неотектоническим (инверсионным) палеоген-раннеогеновым этапом развития Амурского композитного массива, происходившим в обстановке одностороннего сжатия с юго-востока на северо-запад, связанного с движениями Евразийской и Индийской плит [25, 26]. Эти процессы сформировали современный структурный план Приамурья в составе Нижнезейской, Сунью-Цзяинской впадин, Сунью-Малохинганского и Полтавско-Воскресеновского поднятий [21, 27, 28].

Исследовалась Нижнезейская впадина, ограниченная с юга сложно построенным Полтавско-Воскресеновским инверсионным поднятием, формирующим южный склон раннекайнозойской области прогибания. В палеогене Нижнезейская впадина развивалась в виде асимметричной структуры с системами близширотных и северо-восточного направления прогибов и низковысотных валов (рис. 1). Палеогеновый чехол этих структур сложен верхнецагайскими терригенными породами и угленосными отложениями кивдинской свиты. На северном склоне Полтавско-Воскресеновского поднятия в разрезе палеогена доминируют верхнецагайские каолиносодержащие пески, гравийники и галечники с линзами алевритов и глин общей мощностью 50–100 м. Отложения кивдинской свиты на этой территории установлены только на юго-восточной окраине впадины в зоне сопряжения с Туранским массивом. Они локализованы в дельтах палео-Буреи и Архары на участках выхода их на предгорную равнину, в пределах которых расположены Райчихинское и Архаро-Богучанское бурогоугольные месторождения [10, 23]. К общим закономерностям их строения можно отнести мульдообразную форму залегания отложений и концентрацию угольных пластов в толще глин (20–30 м) верхней части разреза кивдинской свиты. В Райчихинском месторождении установлено пять пластов угля: Первый, Верхний, Нижний, Четвертый, и Пятый. Основной промышленный пласт на месторождении Верхний мощностью от 2 до 7 м, сложного строения, содержит до шести прослоев, линз глин и алевритов. Угленосные отложения Архаро-Богучанского месторождения (в среднем 50 м) содержат четыре промышленных пласта угля (сверху вниз): Великан, Проме-

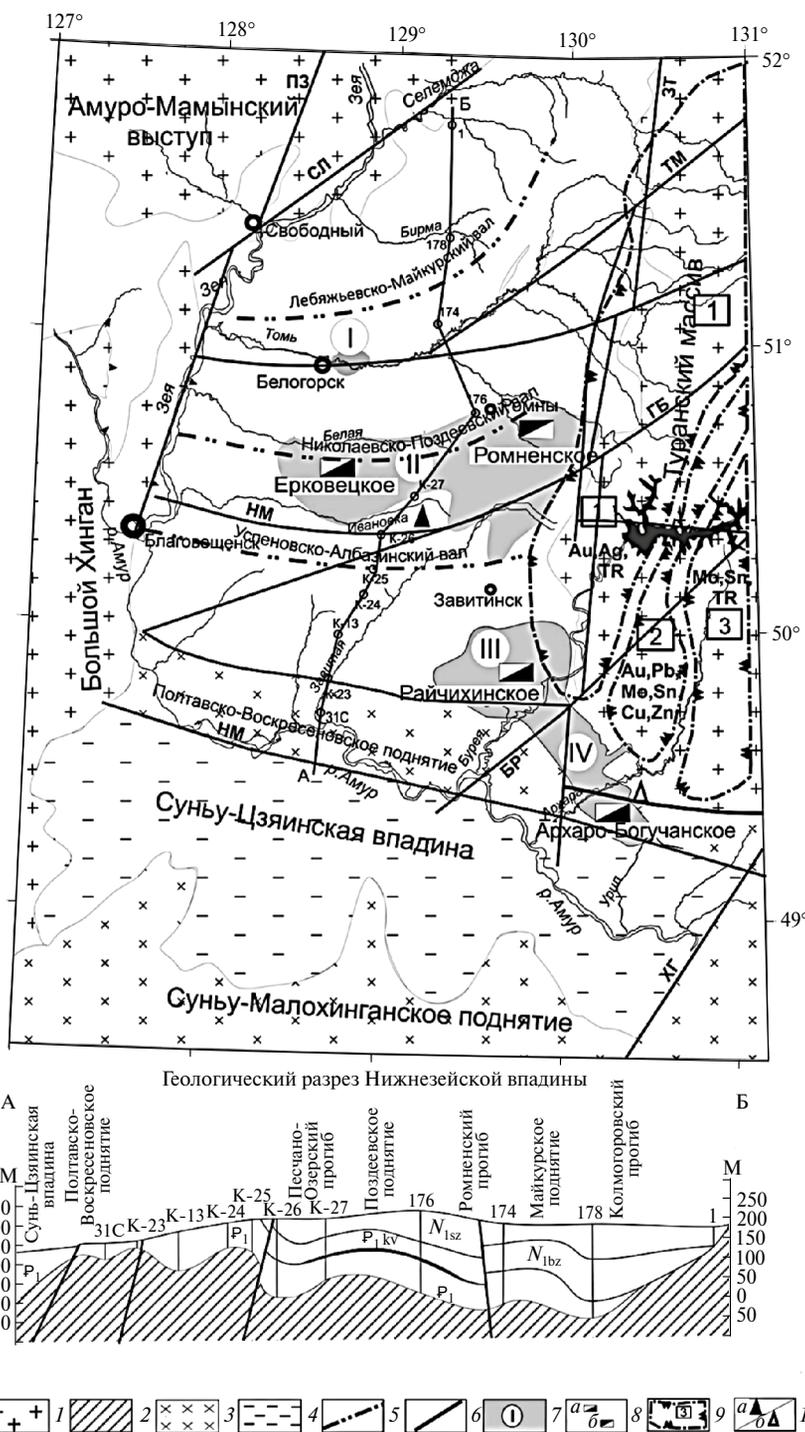


Рис. 1. Структурная схема Нижнезейской впадины Зейско-Буреинского бассейна с элементами минерации: 1 – горно-складчатое обрамление Нижнезейской впадины: Амуро-Мамынский выступ, Туранский массив, Большой Хинган; 2 – докайнозойский фундамент; 3–5 – инверсионные палеогеновые структуры: Полтавско-Воскресенское и Сунью-Малохинганское поднятия (3), Сунью-Цзяинская впадина (4), валы (5); 6 – основные тектонические нарушения: ПЗ – Призейское, ЗТ – Западнотуранское, СЛ – Селемджинское, ТМ – Томское, БР – Бурейское, ГБ – Горбыльское, НМ – Намуэрха, ХГ – Хинганское; 7 – угленосные площади: Белогорская (I), Ерковецко-Ромненская (II), Райчихинская (III), Архаро-Богучанская (IV); 8 – буроугольные месторождения (а), углепроявления (б); 9 – минерационные зоны (1 – Западнотуранская цеолит-редкоземельно-серебро-золоторудно-россыпная, 2 – Центральнотуранская олово-молибденово-ураново-золоторудно-россыпная, Нимано-Мельгинская редкоземельно-олово-молибденово-рудная); 10 – проявления инфильтрационного типа обогащения углей REY установленные (а), предполагаемые (б). Индексы на разрезе: нижнепалеогеновые отложения (P₁), в том числе кивдинской свиты (P_{1kv}), неогеновые отложения бузулинской (N_{1bz}) и сазанской (N_{1sz}) свит. Граница между РФ и КНР проходит по р. Амур.

жуточный, Двойной и Нижний 1 и 2, из которых эксплуатируется пласт Нижний 1 и 2 мощностью от 0.3 до 4 м.

В пределах северной части Нижнезейской впадины в разрезе палеогена доминируют терригенные породы верхнего цагаяна. Угленосные отложения кивдинской свиты расположены в прогибах, освоенных широтными долинами рек Белая и Ивановка, ограниченных системами Лебязьевско-Майкурского, Николаевско-Поздеевского и Успеновско-Албазинского валов (рис. 1). На территории отрицательных структур расположены Белогорская и Ерковецко-Ромненская угленосные площади с Ерковецким месторождением и Ромненским углепроявлением. Наиболее изучено Ерковецкое бурогольное месторождение, приуроченное к Константиноградскому и Песчано-Озерскому прогибам, дренирующимся р. Ивановка. Промышленная угленосность кивдинской свиты месторождения связана с пластом 1 мощностью до 9 м, от которого вдоль южной границы месторождения отщепляются от одного до трех пластов средней мощностью от 1.1 до 2.8 м, при максимальной – до 6.1 м.

Структуры обрамления Нижнезейской впадины, непосредственно отвечающие за привнос в область седиментации терригенного, в том числе рудного, материала, представлены Туранским (Буреинским) массивом и частично погребенным Полтавско-Воскресеновским поднятием. Основу массива составляют палеозойские и раннемезозойские интрузивные образования преимущественно кислого состава. Более молодые породы представлены раннемеловыми эффузивами и реже – терригенными отложениями, развитыми вдоль Западно-Туранского разлома. Процессы неотектонической активизации в пределах массива в палеогене, после тектонической паузы в позд-

нем мелу и формирования кор выветривания химического типа, проявились в форме восходящих движений, с амплитудой от 300 до 500 м, которые существенно повлияли на вскрытие коренных источников питающих провинций массива, сформировав рудный потенциал массива в виде трех минерогенических зон. Вдоль периферии массива расположена Западнотуранская цеолит-редкометалльно-серебро-золоторудно-россыпная зона, связанная с раннемеловым магматизмом [29]. Восточнее выделяются Центральнотуранская олово-молибденово-ураново-золоторудно-россыпная и Нимано-Мельгинская редкоземельно-олово-молибденово-рудная зоны (рис. 1), сформированные в позднепалеозойский этап тектоно-магматической активизации.

1.2. Методы исследования металлоносных бурогольных месторождений Приамурья. Опробование углей и вмещающих их пород выполнялось по двум схемам. С целью получения общих характеристик месторождений сплошной бороздой по разрезу пластов отбирались крупнообъемные пробы весом от 50 до 200 кг. Поинтервальное опробование пластов углей проводилось с отбором проб через 0.2–0.5 м весом 12–15 кг, а по вмещающим породам – с интервалом 0.5–2.0 м. Дальнейшая обработка проб предусматривала раздельное изучение первичного угля и продуктов его сгорания. Выделенная из угля минеральная фракция пропусклась через мокрый магнитный сепаратор (ММС-0,1) и концентрационный стол (СКО-0,5), с разделением на тяжелую немагнитную, магнитную и легкую немагнитную фракции. Для получения раздельных продуктов сгорания угля (ПСУ) использовалась авторская установка – Экспериментально-технологический комплекс (ЭТК “Амур”), позволяющая выделять шлак, золу-уноса и шлак [23]. Выделение минеральных компонентов отдельных фракций ПСУ включали

Таблица 1. Технические и элементные характеристики бурых углей Приамурья

Месторождение	Номер пробы	Технический анализ, %				Элементный состав, % на <i>daf</i>			
		W^a	A^d	V^{daf}	S_t^d	C	H	N	O
Райчихинское	P21-2	8.1	6.6	51.0	0.5	74.7	4.1	0.9	19.8
	P21-13	7.6	8.3	52.8	0.3	74.7	4.6	0.9	19.7
	P21-14	7.7	7.5	53.7	0.3	70.8	5.1	0.9	22.9
Архаро-Богучанское	АБ/18-2	14.4	13.1	64.1	0.4	71.8	5.0	0.8	22.4
	АБ/18-2-1	24.4	18.7	65.7	0.3	66.8	3.6	0.9	28.7
Ерковецкое	E13/18-3	8.5	8.6	54.0	0.5	75.4	4.3	0.9	19.4
	E13/18-7	8.3	11.7	54.5	0.3	72.8	4.6	0.7	21.9
	E13/18-10	12.9	10.8	55.2	0.3	70.7	4.7	1.1	23.5

Таблица 2. Петрографический состав бурых углей Приамурья

Месторождение	Номер пробы	Петрографический параметр, %				Показатель отражения витринита	
		V_t	S_v	I	ΣOK	$Ro,r, \%$	σR
Райчихинское	P21-13	43.0	38.0	13.0	38.0	0.4	0.04
	P21-14	45.0	36.0	11.0	36.0	0.4	0.04
Архаро-Богучанское	АБ/18-2	42.0	46.0	12.0	42.0	0.4	0.04
Ерковецкое	E13/18-7	48.0	11.0	41.0	48.0	0.4	0.09
	E13/18-10	46.0	10.0	44.0	51.0	0.4	0.04

последовательную процедуру обогащения, включающую измельчение, гравитацию с получением рудного концентрата и легкой фракции.

1.3. Аналитические процедуры. Изучение физико-химического и элементного состава угля и золы Ерковецкого, Архаро-Богучанского и Райчихинского бурого углей месторождений с первичной обработкой проб проведено в Федеральном исследовательском центре угля и углекислоты (ФИЦ УУХ) СО РАН, г. Кемерово в 2018 и 2021 гг. Определение влаги в пробах выполнено по ГОСТ 33503-2015, зольности – по ГОСТ Р 55661-2013, выход летучих веществ – по ГОСТ Р 55660-2013, серы – по ГОСТ 8606-2015 (метод Эшка), содержания углерода и водорода – по ГОСТ 2408.1-95 (ИСО 625:1996), азота – методом Кьельдаля по ГОСТ 28743-93. Петрографический анализ проведен на автоматизированном комплексе оценки марочного состава углей системы *SIAMS-620* (Россия) в среде масляной иммерсии. Зола для анализа получена медленным озолением аналитических проб исследуемых бурых углей в муфельной печи при температуре 815°C согласно ГОСТ 11022-95. Химический состав зольных остатков определен методом атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре с индукционно-связанной плазмой *iCAP 6500 Duo LA* фирмы *Thermo Scientific*. Термический анализ проведен на термоанализаторе фирмы *Netzsch STA 409* с масс-спектрометрической приставкой *Aeolos*. Термогравиметрические данные обработаны с использованием программного обеспечения *NETZSCH Proteus*.

Химический состав пород 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%. В этом же Институте изучен состав зольных остатков, который выполнен методом атомно-эмиссионной спектроскопии стандартным способом анализа твердых топлив (ГОСТ) на спектрометре с индукционно-связанной плазмой *iCAP 6500 Duo LA* фирмы *Thermo Scientific*.

Химический состав, размер и морфология частиц золы изучены 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 проведен преимущественно в режиме обратно рассеянных электронов (*BSE-детектор*). Содержания органического углерода определялись на анализаторе общего органического углерода *TOC-L* (*Shimadzu, Япония*) с приставкой на твердые образцы *SSM-5500* в Амурском центре минералого-геохимических исследований ИГиП ДВО РАН.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ИХ АНАЛИЗ

2.1. Химические и физико-химические характеристики бурых углей. Угленосные отложения изучены отдельно с исследованием углей и продуктов их сгорания. Угли Райчихинского, Архаро-Богучанского и Ерковецкого месторождений относятся к низкосернистым (0.3–0.5%) с зольностью 6.6–18.7% при значениях углерода

Таблица 3. Химический состав золы углей Приамурья, мас. %

Месторождение	Номер пробы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃
Райчихинское	P21-2	36.88	20.06	19.09	17.39	2.10	0.17	0.85	2.33	0.63	–
	P21-13	29.91	23.82	22.60	20.05	2.54	0.18	0.18	0.42	0.05	–
	P21-14	29.48	24.08	22.06	19.58	2.48	0.23	0.45	0.05	0.05	–
Архаро-Богучанское	АБ/18-2	69.5	17.7	5.5	3.6	0.9	0.2	1.0	1.0	0.0	0.6
	АБ/18-2-1	36.8	30.5	12.7	15.9	1.3	0.2	1.3	1.0	0.0	1.3
Ерковецкое	E13/18-3	15.5	10.4	42.2	25.2	2.4	0.3	0.1	0.3	0.1	3.5
	E13/18-7	24.1	16.1	35.6	19.7	1.7	0.3	0.1	0.4	0.7	1.3
	E13/18-10	25.2	20.6	32.8	17.3	1.6	0.4	0.1	0.5	0.0	1.5

Таблица 4. Результаты термогравиметрического анализа бурых углей Приамурья

Месторождение	Номер пробы	T _{max} , °C	V _{max} , %/min	Δm, мас. %, при температуре, °C					
				30–180	180–300	300 – T _{max}	T _{max} – 600	600–800	30–1000
Райчихинское	P21-2	418.8	1.11	9.32	3.83	32.50	9.74	8.33	45.65
	P21-13	426.2	1.39	9.00	4.26	34.69	8.24	7.22	47.96
	P21-14	426.0	1.41	9.19	4.49	34.91	8.69	7.36	48.59
Архаро-Богучанское	АБ/18-2	432.0	1.48	10.1	1.8	10.2	13.6	6.3	43.4
Ерковецкое	E13/18-10	432.0	1.28	8.8	3.1	10.8	12.4	9.1	46.3

Таблица 5. Текстурные характеристики исследуемых образцов бурых углей Приамурья

Месторождение	Номер пробы	S _{вет} , м ² /г	VΣ, см ³ /г	V _{микро} , см ³ /г	V _{мезо} , см ³ /г	D _{порес} , Å
Райчихинское	P21-2	2.22	0.0114	0.00007	0.0109	197
	P21-13	1.21	0.0074	0.0001	0.0068	224
	P21-14	1.39	0.0054	0.00008	0.0049	205
Архаро-Богучанское	АБ/18-2	8.67	0.036	<0.001	0.036	159
Ерковецкое	E13/18-7	3.46	0.020	0	0.020	224

66.8–74.7% (табл. 1). В составе их доминирует витринит (42.0–48.0%), но ерковецкие угли характеризуются повышенными значениями инертинита (41.0–44.0%) и пониженными (11.0–11.0%) – семивитринита (табл. 2).

Химический состав золы углей характеризуется повышенными содержаниями оксидов алюминия и кремния. По количественному отношению (Al₂O₃/SiO₂ ≤ 0.7) они относятся к алюмосиликатному типу [30]. Минеральная составляющая углей представлена монтмориллонитом и каолинитом с примесью кварца. Во всех зольных остатках установлено повышенное содержание оксидов кальция, особенно характерных для углей Ерковецкого месторождения (до 25.3%), что указывает на наличие в них органо-минеральных комплексов в виде гуматов. В зольных остатках углей Ерковецкого месторождения отмечается также высокое значение оксидов калия и железа, связанное, вероятно, с присутствием в углях минеральных соединений в виде сульфидов (пирит, марказит) и сидерита (табл. 3).

Процессы термического разложения углей протекают в несколько стадий с несколькими максимумами убыли массы. Первый из них (30–300°C) соответствует удалению влаги, при втором (300–600°C) происходит основная потеря массы в углях, обусловленная деструкцией углерод-углеродных связей с выделением летучих продуктов и формированием полукокса. Третий интервал разложения (750–1000°C), очевидно, связан с процессами структурирования углеродного остатка (полукокса) в кокс (табл. 4).

Угли Райчихинского, Архаро-Богучанского и Ерковецкого месторождений обладают мезопористой структурой. Повышенными сорбционными емкостями по азоту характеризуются угли Ерковецкого (3.46 м²/г) и Райчихинского (2.22 м²/г) месторождений (табл. 5).

2.2. Породно-минеральные комплексы, редкоземельные, включая редкие, рассеянные, тугоплавкие элементы и цветные металлы в первичных палеогеновых углях месторождений Приамурья.

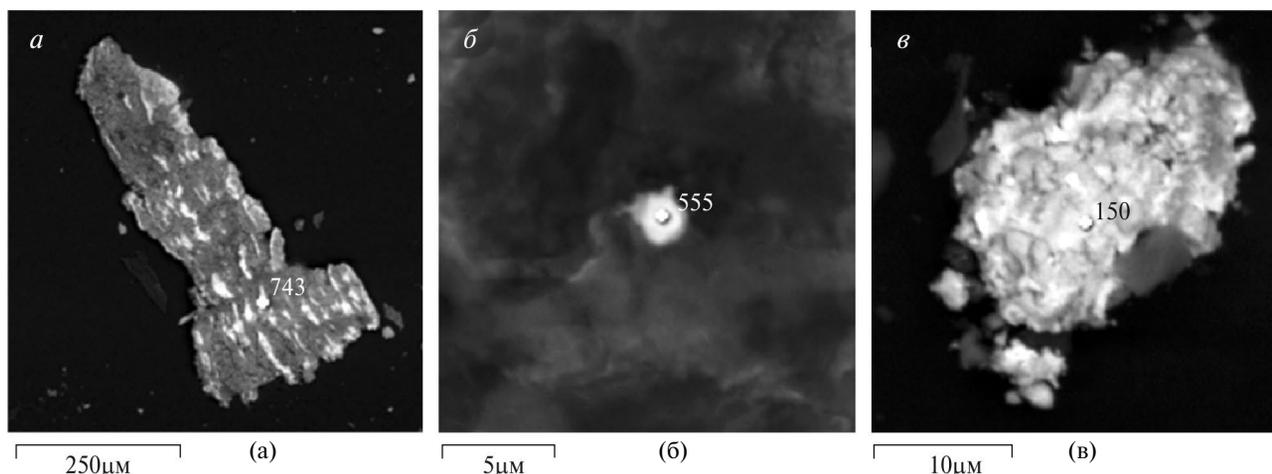
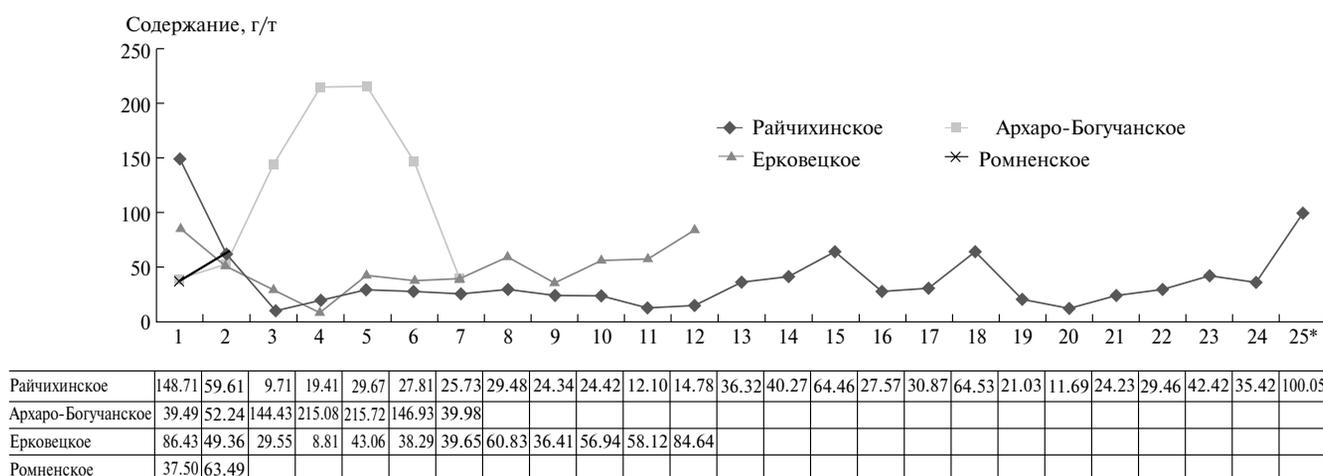


Рис. 2. Рудный обломок Cu (а), частица Mo (б), Sn с примесью Pb (в) в углях Архаро-Богучанского месторождения.



*Номер пробы по интервалам опробования пластов угля.

Рис. 3. Распределение REY в бурогольных месторождениях Приамурья.

Породно-минеральный состав первичного угля, исследованный в магнитной, электромагнитной, немагнитной и легкой фракциях, довольно однообразен. В классе крупности от +3 до -0.5 мм преобладают обломки преимущественно изверженных пород (60–100%), а в классе от -0.5 до -0.25 мм – доминируют породообразующие (полевой шпат, кварц, слюда), аксессуарные (рутил, сфен, гранат, апатит и др.), реже – рудные (пирротин, галенит, магнетит, касситерит, зерна Cu и Zn) минералы. В угольной матрице Райчихинского месторождения установлены частицы галенита, пирротина, пирита, сфена, полевого шпата, обломки фосфорита. Размеры частиц колеблются от 50 до 470 мкм. В минеральных комплексах углей Архаро-Богучанского месторождения также широко представлены рудные минералы (куприт, пирит, магнетит, касситерит), рудные обломки с Cu, Zn, Fe (рис. 2, а), кварц с включениями Mo, Fe, W (рис. 2, б), “агломерат”

Sn, Ag, Pb, Cu (рис. 2, в) размерами от 30 × 50 до 30 × 400 мкм.

Содержание и распределение REY в углях месторождений Приамурья выполнено в графическом варианте по интервалам опробования пластов угля (рис. 3), по геохимическим группам (LREY, MREY, HREY) (табл. 6, рис. 4), в том числе нормализованных по хондриту (рис. 5).

Графики на рис. 3 демонстрируют существенные различия в содержании и распределении REY по месторождениям и разрезам угольных пластов. График в углях Райчихинского месторождения ящикообразной формы, вдоль основания которого содержание REY колеблется в основном в пределах 19.41–29.48 г/т с чередованием минимальных значений в углях (9.71–14.0 г/т) и повышенных в туфах (40.27–64.46 г/т) (пробы 15, 18). В кровле и почве пласта угля

Таблица 6. Распределение REY по геохимическим группам в бурогольных месторождениях Приамурья, г/т

Элемент	Месторождение				Кларк*
	Райчихинское	Архаро-Богучанское	Ерковецкое	Ромненское	
La	7.17	18.81	10.30	9.24	10.00
Ce	14.48	47.48	18.24	18.46	22.00
Pr	1.46	4.75	1.84	1.89	3.50
Nd	5.45	18.02	6.86	7.85	11.00
Sm	1.04	3.43	1.23	1.38	1.90
$\Sigma LREY$	29.60	92.49	38.47	38.81	48.40
Y	4.97	16.88	6.55	6.89	8.60
Eu	0.19	0.61	0.22	0.17	0.50
Gd	1.18	3.48	1.46	1.33	2.60
Tb	0.15	0.56	0.18	0.18	0.32
Dy	0.86	3.08	0.99	1.19	2.00
$\Sigma MREY$	7.35	24.60	9.40	9.77	14.02
Ho	0.16	0.59	0.19	0.23	0.50
Er	0.49	1.84	0.59	0.77	0.85
Tm	0.07	0.28	0.08	0.10	0.31
Yb	0.43	1.90	0.53	0.73	1.00
Lu	0.06	0.27	0.08	0.09	0.19
$\Sigma HREY$	1.22	4.89	1.47	1.92	2.85
ΣREY	38.17	121.98	49.34	50.50	65.27

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

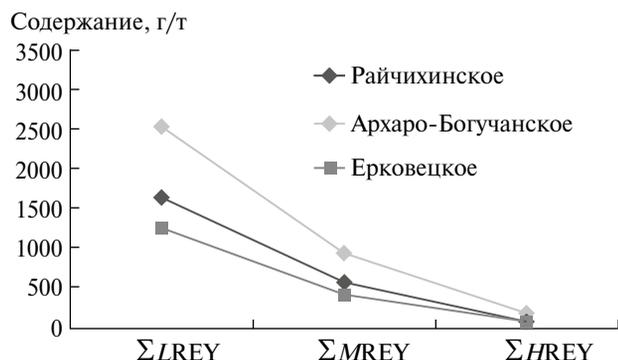


Рис. 4. Распределение REY в геохимических группах бурогольных месторождений Приамурья.

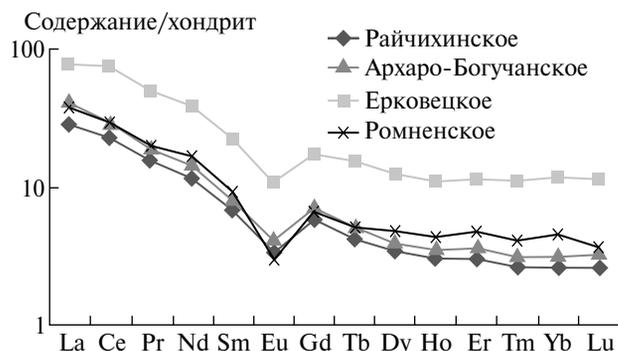


Рис. 5. Распределение нормализованных по хондриту REY в бурогольных месторождениях Приамурья.

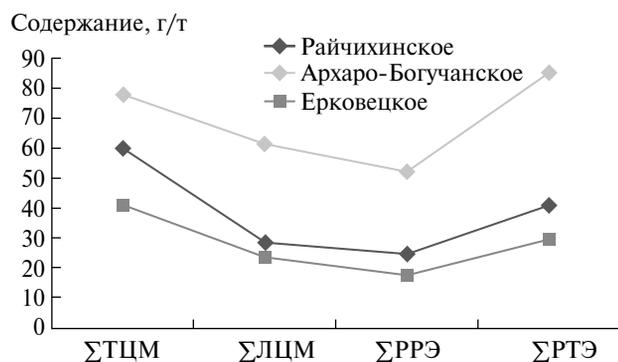


Рис. 6. Распределение цветных металлов и редких элементов в бурогольных месторождениях Приамурья.

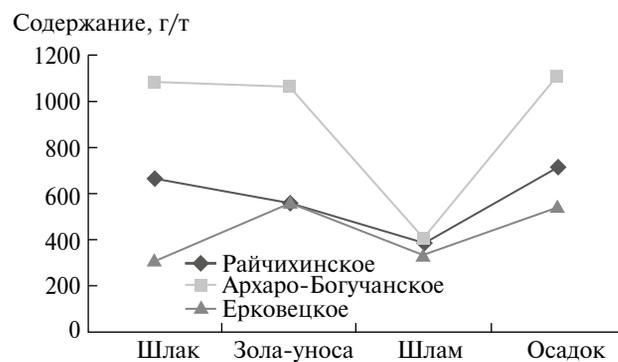


Рис. 8. Распределение REY в ПСУ бурогольных месторождений Приамурья.

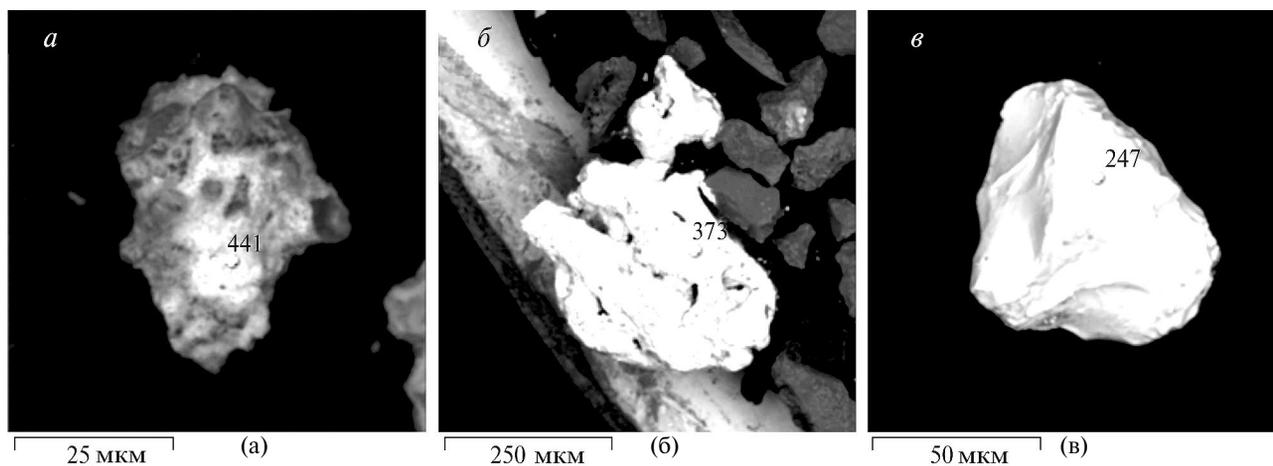


Рис. 7. Частица FeO с примесью Pb (а), Pb-Sn (б), касситерит (в) в шлаках Архаро-Богучанского месторождения.

повышенными концентрациями REY характеризуются угли и глины (42.42–148.71 г/т). График распределения REY в углях Архаро-Богучанского месторождения представлен в форме усеченной пирамиды, плоская вершина которой характеризует пласты Нижний-1 (пробы 1, 2) и Нижний-2 (пробы 4, 5, 6), разделенные глинами. В первом пласте содержание REY (г/т) 39.49 и 52.24, во втором – 146.93–215.72, а в глинах – 144.43. Распределение REY в углях и вмещающих породах Ерковецкого месторождения характеризуются более равномерным распределением REY. Лишь краевые ветви графика (пробы 1–2 и 10–12) фиксируют повышенные концентрации в углях (49.36–59.94 г/т) и глинах (84.64–86.40 г/т) с колебаниями в тонштейнах в середине пласта угля.

В геохимических группах (табл. 6, рис. 4) наиболее высокие значения REY, превышающие кларк, установлены в углях Архаро-Богучанского месторождения: в *LREY* максимальные их концентрации присущи La, Ce и Nd, в *MREY* – Y, Gd и Dy, в *HREY* – Er и Yb. Указанные аномалии характеризуют глины (проба 3) и угли (пробы 4–6) пластов Нижний 1 и 2. Повышенные содержания REY в углях Райчихинского, Ерковецкого месторождений и Ромненского углепроявления локализованы в интервалах максимумов Архаро-Богучанского месторождения: в *LREY* – La, Ce и Nb, в *MREY* – Y, Gd и Dy, в *HREY* – Er и Yb. В Райчихинском месторождении вышеперечисленные элементы с концентрациями, превышающими кларк, установлены в глинах кровли (проба 1) и почве (проба 25) пласта угля, а в Ерковецком – в глинах кровли (проба 1) (La, Ce, Nb и Sm) и подошве пласта угля (La, Ge, Y).

Распределение нормализованных REY в угленосных месторождениях Приамурья характерно для многих осадочных бассейнов России [32]. Соотношения Sm_N/Yb_N и $La_N/Yb_N > 1$ указывают на обогащение *LREY* и *MREY* по отношению к *HREY*, а также на возможное их формирование за счет кислых эффузивов. Для всех бурогольных месторождений характерна отрицательная европиевая аномалия (рис. 5), свидетельствующая о дополнительных питающих провинциях, связанных с интрузивными образованиями Туранского массива.

Концентрации редких элементов и цветных металлов рассмотрены по всем вышерассмотренным месторождениям (табл. 7).

Распределение минеральных комплексов (ТЦМ, ЛЦМ, РРЭ, РТЭ) в углях месторождений Приамурья (табл. 7, рис. 6) существенно отличается от REY (табл. 6). Отчетливо выделяется две области их локализации – с доминированием ТЦМ и РТЭ при пониженных концентрациях ЛЦМ и РРЭ.

2.3. *Породно-минеральные комплексы редких элементов и цветных металлов в продуктах сгорания углей (ПСУ) месторождений Приамурья.* Результаты минералогических исследований ПСУ во многом близки к полученным в первичных углях. Обломочный материал, породообразующие, аксессуарные и вторичные минералы также во многом отражают состав питающих провинций Туранского массива. Электронно-микронным анализом в шлаке Райчихинского месторождения выявлен широкий комплекс рудных минералов (шеелит, пиролюзит, браунит, золото и др.) размером 121 × 98 мкм. Отли-

Таблица 7. Содержание редких элементов и цветных металлов в бурогольных месторождениях Приамурья, г/т

Элемент	Месторождение			Кларк*
	Райчихинское	Архаро-Богучанское	Ерковецкое	
Тяжелые цветные металлы (ТЦМ)				
Co	4.34	5.00	4.14	4.20
Ni	5.18	13.70	8.70	9.00
Cu	9.20	12.75	4.32	15.00
Zn	27.48	28.79	14.68	18.00
Sn	1.34	1.31	0.83	0.79
Sb	0.45		0.24	0.84
Pb	11.93	16.24	7.74	6.60
Σ ТЦМ	59.92	77.78	40.66	54.43
Легкие цветные металлы (ЛЦМ)				
Li	8.21	11.10	10.73	10.00
Be	0.72	3.09	0.92	1.20
Rb	17.90	42.46	10.62	10.00
Cs	1.46	4.65	1.34	0.98
Σ ЛЦМ	28.28	61.30	23.61	22.18
Редкие рассеянные элементы (РРЭ)				
Sc	1.81	4.49	1.46	4.10
V	10.96	36.25	8.83	22.00
Ga	11.19	9.40	6.78	5.50
Ge	0.39	1.69	0.34	2.00
Σ РРЭ	24.36	51.84	17.40	33.60
Редкие тугоплавкие элементы (РТЭ)				
Cr	5.44	18.10	5.15	15.00
Zr	28.39	56.40	19.49	35.00
Nb	3.78	5.09	2.35	3.30
Mo	0.85	2.18	0.66	2.20
Hf	0.95	1.72	0.73	1.20
Ta	0.51	0.40	0.30	0.26
W	0.99	1.29	0.96	1.20
Σ РТЭ	40.92	85.18	29.64	58.16

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

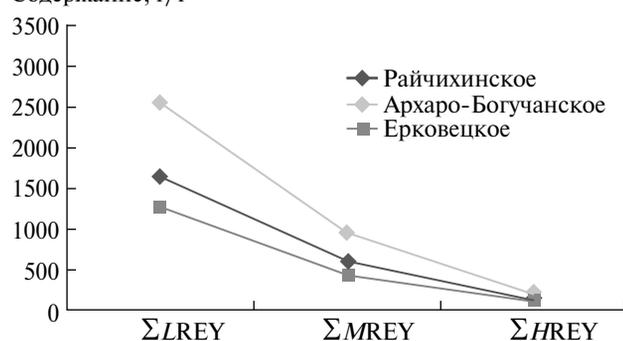
чительной особенностью минерального состава в золе-уноса этого месторождения является присутствие сплавов Zn и Cr, Pb и Sn, чешуек золота и микросфер Ag с включениями S, Br, Cu. В ранее изученных ПСУ Архаро-Богучанского месторождения наиболее полно исследованы благородные металлы (Au, Ag, Pt), представленные двумя разновидностями. Первая из них включает массивные, комковатые индивидуумы размером от 2.0×1.6 до 115.0×160.0 мкм с заметной обработкой в водной среде и наличием примесей Fe, Cu, Mg, S, Zn, вторая разновидность – рыхлые агрегаты, состоящие из зерен Au и Ag [33].

С помощью электронно-микронного анализа исследован процесс формирования в ПСУ различных фракций шлама: фильтра отстойника, осадка воды и конденсата насадки Архаро-Богучанского месторождения. В фильтре отстойника доминируют сплавы Pb, Fe, Cu (рис. 7, а), Pb, Sn, Cu (рис. 7, б). В осадке воды дополнительно установлены – касситерит, барит, пирит, тенорит и англезит, а также зерна Au и оксида железа с примесью бария и кальция (рис. 7, в). В шламе конденсата насадки, наряду с установленными выше металлами, обнаружен сплав Cu и Zn, зерна халькопирита и платины. Морфология минеральных образова-

Таблица 8. Распределение REY в ПСУ и геохимических группах буроугольных месторождений Приамурья, г/т

Геохимическая группа REY	Продукт сгорания углей				Сумма
	шлак	зола-уноса	шлам	осадок	
Райчихинское месторождение					
$\Sigma LREY$	467.00	404.72	275.23	502.01	1648.96
$\Sigma MREY$	166.77	129.92	95.83	185.63	578.15
$\Sigma HREY$	25.16	21.55	15.16	26.08	87.95
ΣREY	658.93	556.19	386.23	713.71	2315.06
Архаро-Богучанское месторождение					
$\Sigma LREY$	751.32	727.42	277.26	784.72	2540.72
$\Sigma MREY$	282.23	286.71	105.42	271.93	946.29
$\Sigma HREY$	51.29	49.06	17.33	51.05	168.73
ΣREY	1084.84	1063.19	400.01	1107.70	3655.75
Ерковецкое месторождение					
$\Sigma LREY$	230.26	409.89	237.32	390.47	1267.93
$\Sigma MREY$	75.94	131.66	79.38	132.55	419.53
$\Sigma HREY$	11.92	19.74	12.14	19.67	63.46
ΣREY	318.12	561.28	328.84	542.69	1750.92

Содержание, г/т

**Рис. 9.** Распределение REY в геохимических группах ПСУ буроугольных месторождений Приамурья.

ний в шламе весьма разнообразна: преобладают хорошо ограненные кристаллы, их обломки и зерна, иногда с частично обработанной поверхностью, чешуйки, агломерации и др. Размер их колеблется в среднем 40×100 мкм, с максимумом до 320 мкм и минимумом — 1×2 мкм.

Последующее изучение ПСУ месторождений Приамурья проведено по схеме, подобной для первичных углей, предусматривающей исследование содержания и распределения REY, в том

Таблица 9. Содержание цветных металлов и редких элементов REY по геохимическим группам в ПСУ буроугольных месторождений Приамурья, г/т

Элемент	Продукт сгорания углей				Сумма
	шлак	зола-уноса	шлам	осадок	
Райчихинское месторождение					
ΣTCM	1147.87	1667.47	2910.61	3628.10	9354.05
ΣLCM	58.03	56.63	31.78	28.72	175.15
ΣPPE	93.87	99.32	103.15	9.62	305.96
ΣRTE	192.93	311.36	292.19	31.68	828.17
$\Sigma CM, PE$	1492.70	2134.77	3337.73	3698.13	10663.33
Архаро-Богучанское месторождение					
	597.68	1600.71	1742.70	3272.64	7213.73
ΣLCM	134.33	90.47	34.13	88.79	347.71
ΣPPE	222.80	227.64	102.58	371.03	924.05
ΣRTE	532.83	506.77	261.46	578.77	1879.83
$\Sigma CM, PE$	1487.64	2425.59	2140.87	4311.23	10365.32
Ерковецкое месторождение					
ΣTCM	290.69	1583.51	2594.73	4683.70	9152.62
ΣLCM	70.58	56.69	26.46	30.10	183.82
ΣPPE	52.68	81.34	78.79	9.92	222.72
ΣRTE	204.41	441.03	278.83	25.22	949.49
$\Sigma CM, PE$	618.36	2162.56	2978.80	4748.93	10508.65

числе в нормализованных по хондриту, цветных металлов и редких элементов.

REY в ПСУ буроугольных месторождениях локализованы в двух фракциях: в шлаке, золе-уноса (1); шламе и осадке (2) (табл. 8, рис. 8). Наиболее высокие концентрации REY первой фракции установлены (г/т) в ПСУ Архаро-Богучанского месторождения (1063.19–1084.84), пониженные — в Ерковецком месторождении (561.28–318.12). Вторую фракцию повышенных значений REY формируют ПСУ Райчихинского (713.71) и Ерковецкого (542.69) месторождений. По геохимическим группам высокие значения REY характерны для LREY Архаро-Богучанского (2540.72), Райчихинского (1648.96) и пониженные — Ерковецкого (1267.93) месторождений (табл. 8, рис. 9). В MREY концентрации лантаноидов изменяются от 946.29 (Архаро-Богучанское месторождение) до 419.53 г/т (Ерковецкое месторождение), а в HREY соответственно — 168.73 г/т (Архаро-Богучанское месторождение) и 63.46 г/т (Ерковецкое месторождение). В составе LREY доминирует Ce, реже — Nd, в MREY — Y, а в HREY — Yb.

Соотношения REY в ПСУ в целом не отличаются от таковых в углях при отношениях Sm_N/Yb_N

Таблица 10. Распределение цветных металлов и редких элементов в ПСУ Райчихинского и Ерковецкого месторождений, г/т

Металл	Месторождение												Кларк*
	Райчихинское				Архаро-Богучанское				Ерковецкое				
	Продукт сгорания углей												
	шлак	зола-уноса	шлам	осадок	шлак	зола-уноса	шлам	осадок	шлак	зола-уноса	шлам	осадок	
Тяжелые цветные металлы													
Co	74.21	87.64	100.58	51.36	39.60	74.78	51.92	66.56	41.89	111.89	87.99	49.99	26.00
Ni	92.29	176.55	279.08	129.59	90.14	199.44	172.79	164.26	104.86	183.54	257.46	122.87	52.00
Cu	74.54	114.56	412.39	560.49	180.73	186.22	254.76	677.46	47.11	91.67	354.92	1147.15	74.00
Zn	269.81	666.86	751.50	2708.62	176.01	491.77	426.86	954.18	78.67	705.20	668.52	3276.19	110.00
Sn	25.87	0.77	0.35	0.22	4.31	1.44	2.98	14.30	3.19	7.12	3.12	0.51	4.70
Sb	391.23	15.58	18.53	0.04	8.44	17.88	16.57	50.88	1.73	15.11	19.24	0.62	5.00
Pb	219.93	605.51	1348.18	177.78	98.45	629.18	816.82	1345.00	13.26	468.97	1203.48	86.36	38.00
ΣТЦМ	1147.87	1667.47	2910.61	3628.10	597.68	1600.71	1742.70	3272.64	290.69	1583.51	2594.73	4683.70	309.70
Редкие тугоплавкие элементы													
Cr	8.76	156.25	173.33	20.88	203.15	212.21	122.43	151.30	28.49	208.66	144.79	17.91	82.00
Zr	151.14	107.18	82.49	7.66	262.25	210.49	89.79	285.48	150.74	173.45	97.81	5.41	190.00
Nb	8.28	13.01	5.04	0.37	18.28	14.08	6.98	20.99	9.93	13.82	6.41	0.42	18.00
Mo	13.73	25.56	25.07	1.66	32.95	55.02	34.61	92.40	4.60	24.88	22.98	0.55	15.00
Hf	4.93	3.52	2.48	0.42	7.18	5.50	2.26	8.17	4.60	5.23	2.64	0.39	7.50
Ta	0.34	0.93	0.23	0.00	1.34	0.88	0.33	1.19	0.56	0.89	0.38	0.05	1.40
W	5.75	4.92	3.56	0.69	7.68	8.58	5.06	19.24	5.50	14.10	3.82	0.50	6.00
ΣРТЭ	192.93	311.36	292.19	31.68	532.83	506.77	261.46	578.77	204.41	441.03	278.83	25.22	319.90

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

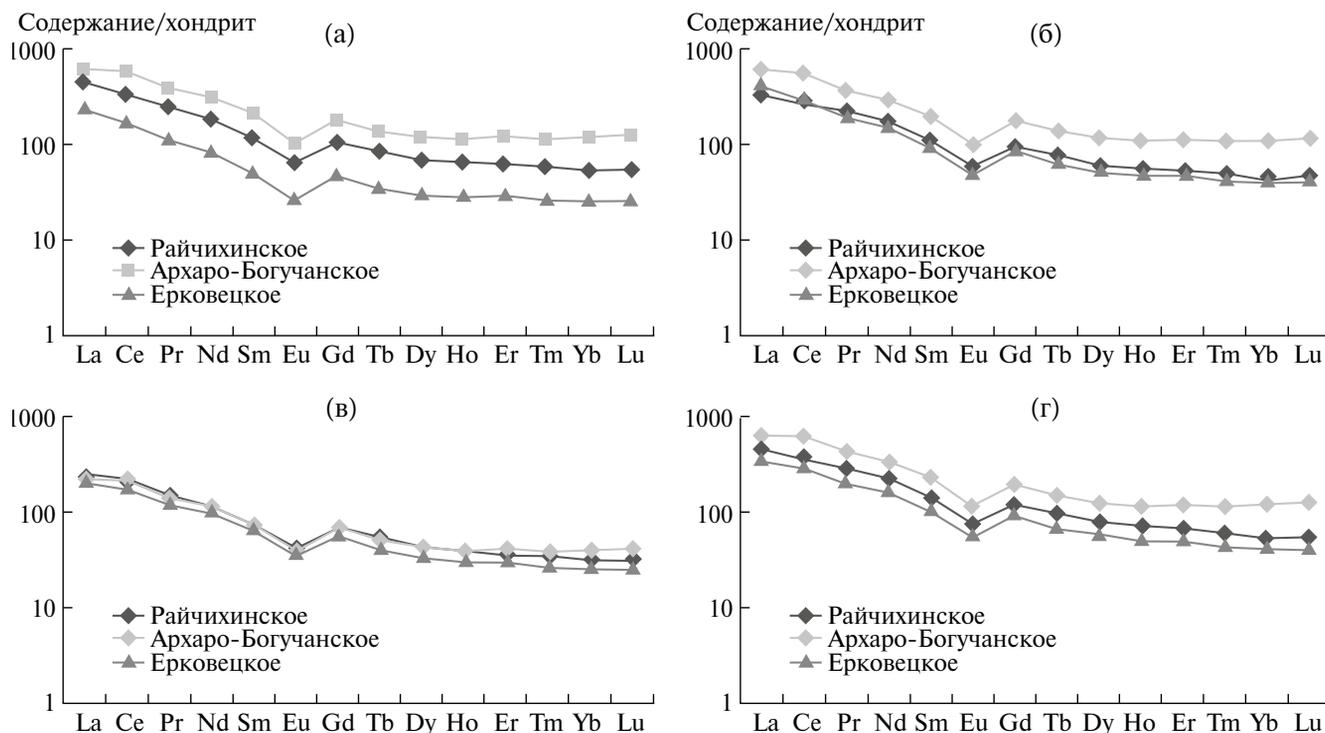


Рис. 10. Распределение нормализованных по хондриту REY в шлаке (а), золе-уноса (б), шламе (в), осадке (г) бурогольных месторождений Приамурья.

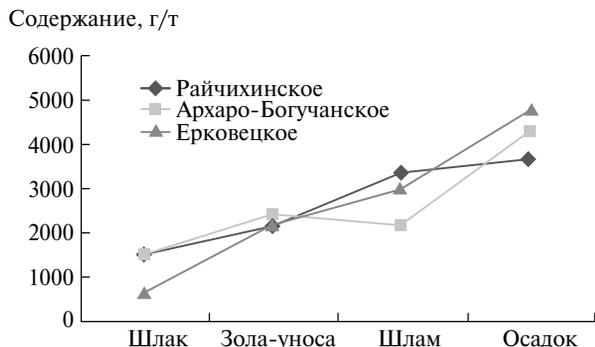


Рис. 11. Распределение цветных металлов и редких элементов в ПСУ бурогольных месторождений Приамурья.

и $La_N/Yb_N > 1$ и отрицательной европиевой аномалии (рис. 10).

Сопутствующие лантаноидам в ПСУ рудные комплексы представлены цветными тяжелыми и легкими металлами (ТЦМ и ЛЦМ), редкими рассеянными (РРЭ) и тугоплавкими (РРЭ) элементами (табл. 9, рис. 11). Среди них наиболее высокие их содержания (г/т) сосредоточены в группах ТЦМ Райчихинского (9354.05), Ерковецкого (9152.62) и Архаро-Богучанского (7213.73) месторождений, за которыми следуют ПСУ группы РТЭ в иной последовательности: Архаро-Богучанское (1879.83), Ерковецкое (9152.62) и Райчихинское (828.17). По

сравнению с приведенными данными пониженными концентрациями характеризуются группы РРЭ (222.72–924.05) и ЛЦМ (175.15–347.71) (табл. 9). ТЦМ и РТМ концентрируются преимущественно в шламе и осадке, ЛЦМ – в шлаке и золе-уноса (рис. 11). Среди ТЦМ Co, Ni, Cu, Zn, Sb и Pb многократно превышают кларки, а в составе РТЭ высокими содержаниями характеризуются Cr, Nb, Mo, W (табл. 10).

2.4. Критерии предварительной оценки углей и ПСУ месторождений Приамурья в качестве сырья для редкоземельных элементов. Среднее суммарное содержание лантаноидов в углях в мире оценивается в 68.5 г/т [31], что в 2.5 раза ниже, чем в породах верхней континентальной коры (УСС), при подобном значении в углях США 62.1 г/т, а Китая – 137.9 г/т [1]. В тоже время концентрации REY в угольной золе многих месторождений мира намного выше по сравнению с приведенными выше цифрами, что и определяет большее внимание к ее изучению. Критерии оценки угольной золы как сырьевой базы лантаноидов рассматриваются по сравнению с УСС с позиции обогащения REY трех типов [1]: легкого (L-тип), среднего (M-тип) и тяжелого (H-тип). L-тип распределения REY ($La_N/Lu_N > 1$) характерен для углей с высоким количеством золы (1–50%), мощностью пластов от 0.6 до 28.7 м, содержащими

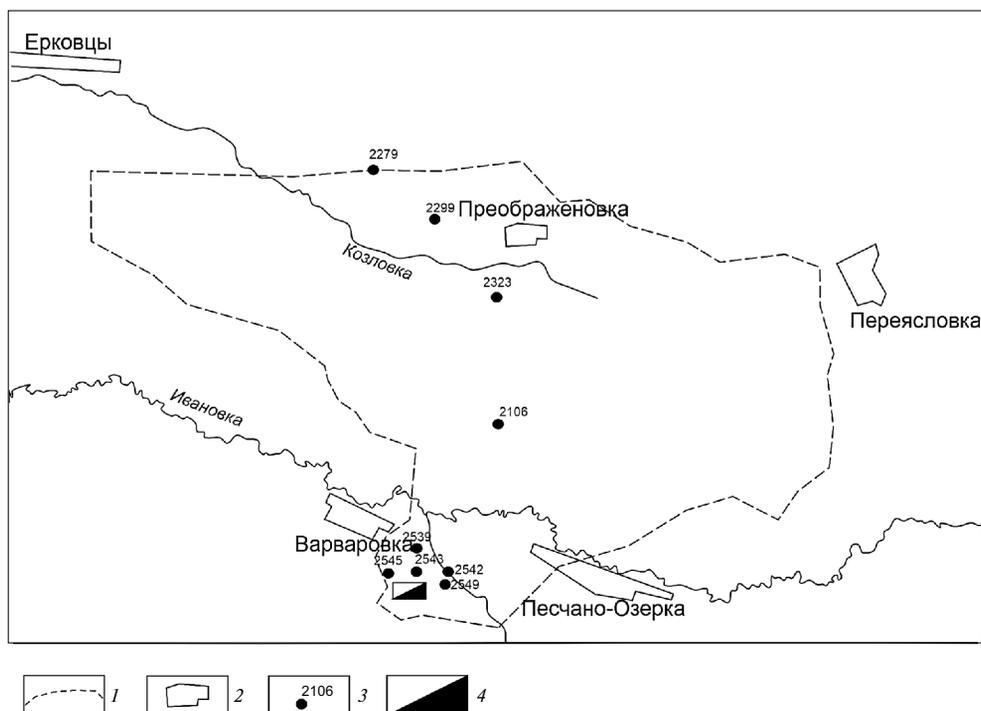


Рис. 12. Схема распределения скважин, опробованных на содержание гуминовых кислот в углях на Восточном участке Ерковецкого бурогольного месторождения: 1 – граница участка; 2 – населенные пункты; 3 – скважины и их номера; 4 – карьер Южный.

Таблица 11. Содержания REY в углях, угольной золе и ПСУ бурогольных месторождений Приамурья, г/т

Месторождение	Элемент	Содержание REY						
		уголь	угольная зола			продукт сгорания угля		
			максимум	минимум	среднее	шлак	зола-уноса	шлам
Райчихинское	La	4.92	116.23	42.38	38.82	112.67	86.86	77.04
	Ce	9.49	235.36	74.58	81.43	221.98	195.15	172.70
	Pr	0.98	25.51	7.80	8.96	23.07	21.87	18.76
	Nd	3.80	113.91	30.34	33.95	91.06	83.83	73.26
	Sm	0.76	26.38	5.25	7.23	18.22	17.01	14.76
	$\Sigma LREY$	19.96	517.39	160.35	170.39	467.00	404.72	356.52
	Y	4.50	239.13	26.10	30.76	121.50	89.44	91.17
	Eu	0.15	5.36	1.02	1.31	3.52	3.26	2.96
	Gd	0.91	34.06	6.10	7.71	21.68	19.58	17.77
	Tb	0.12	4.49	0.68	1.13	3.04	2.75	2.49
	Dy	0.71	27.10	3.90	7.09	17.03	14.90	13.63
	$\Sigma MREY$	6.38	310.14	37.80	48.01	166.77	129.92	128.02
	Ho	0.14	5.65	0.85	1.36	3.58	3.06	2.79
	Er	0.41	16.23	2.54	3.97	10.11	8.61	7.82
	Tm	0.05	2.03	0.34	0.57	1.45	1.25	1.09
	Yb	0.35	11.16	2.71	3.78	8.68	7.48	6.38
	Lu	0.05	1.59	0.34	0.54	1.35	1.15	0.98
	$\Sigma HREY$	1.01	36.66	6.78	10.22	25.16	21.55	19.07
	ΣREY	27.34	864.19	204.93	228.62	658.93	556.19	503.61
	Архаро-Богучанское	La	19.89	656.32	37.36	169.53	150.95	148.52
Ce		51.92	1647.24	87.46	487.14	379.48	365.62	211.19
Pr		5.20	146.92	9.60	48.38	37.57	36.58	20.75
Nd		19.61	562.48	35.25	167.24	150.85	145.67	84.66
Sm		3.68	111.73	5.98	31.14	32.46	31.03	18.05
$\Sigma LREY$		100.31	3124.69	175.65	903.43	751.32	727.42	418.40
Y		19.52	588.05	29.67	169.89	204.51	209.48	108.47
Eu		0.64	20.96	1.04	5.76	5.70	5.58	3.32
Gd		3.92	131.15	6.21	37.30	36.84	37.25	21.10
Tb		0.64	19.04	1.04	6.33	4.96	4.98	2.79
Dy		3.44	100.19	5.41	28.94	30.22	29.43	16.05
$\Sigma MREY$		28.17	859.39	43.37	248.22	282.23	286.71	151.73
Ho		0.65	20.77	0.98	5.74	6.31	6.06	3.30
Er		2.03	66.15	3.05	19.65	19.56	18.75	10.21
Tm		0.31	9.42	0.46	3.22	2.87	2.73	1.48
Yb		2.13	59.23	3.16	21.34	19.53	18.64	10.17
Lu		0.30	8.46	0.40	2.76	3.02	2.89	1.54
$\Sigma HREY$		5.42	164.03	8.05	52.71	51.29	49.06	26.71
ΣREY		133.89	4148.11	227.07	1204.36	1084.84	1063.19	596.84

ем REO от 0.11 до 23% и отношением La_N/Lu_N от 1.1 до 2.9. Обогащение лантаноидов *M*-типа ($La_N/Lu_N < 1$, $Gd_N/Lu_N > 1$) отмечается в золах (9–32%)

угольных пластов мощностью от 0.5 до 16 м с содержанием REO от 0.1 до 0.6%. И, наконец, распределение REY *H*-типа ($La_N/Lu_N < 1$) присуще

Таблица 11. Окончание

Месторождение	Элемент	Содержание REY						
		уголь	угольная зола			продукт сгорания угля		
			максимум	минимум	среднее	шлак	зола-уноса	шлам
Ерковецкое	La	9.78	175.05	94.91	158.70	60.25	105.00	60.64
	Ce	16.81	270.64	167.91	207.69	111.18	196.73	133.10
	Pr	1.68	23.77	17.93	18.85	10.70	18.95	13.43
	Nd	6.31	88.58	69.13	69.35	40.41	74.59	55.38
	Sm	1.13	13.94	12.41	11.26	7.72	14.60	11.19
	$\Sigma LREY$	35.71	571.98	362.29	465.85	230.26	409.89	273.75
	Y	6.89	132.34	91.89	78.61	55.87	94.94	64.85
	Eu	0.21	2.63	2.41	2.06	1.49	2.79	2.25
	Gd	1.42	20.70	16.21	14.90	9.75	18.30	13.39
	Tb	0.17	2.19	1.92	1.66	1.28	2.33	1.74
	Dy	0.96	11.40	10.95	8.99	7.55	13.29	9.79
	$\Sigma MREY$	9.64	169.26	123.38	106.23	75.94	131.66	92.03
	Ho	0.19	2.46	2.24	1.78	1.57	2.65	1.93
	Er	0.58	7.28	6.47	5.75	4.83	8.03	5.74
	Tm	0.08	0.88	0.78	0.78	0.66	1.09	0.76
	Yb	0.51	5.44	5.00	5.03	4.23	6.94	4.79
	Lu	0.08	0.79	0.78	0.77	0.62	1.02	0.70
	$\Sigma HREY$	1.43	16.85	15.27	14.11	11.92	19.74	13.93
	ΣREY	46.78	758.09	500.94	586.19	318.12	561.28	379.71

богатым REY угольным золам (1–45%) в пластах угля мощностью от 0.4 до 6 м с концентрацией лантаноидов от 0.1 до 1.0% и отношением La_N/Lu_N от 0.1 до 0.9.

Для бурогоугольных месторождений Приамурья рассчитано распределение REY в системе: уголь-угольная зола и ПСУ (табл. 11). Анализ этих материалов показывает, что содержание REY в угольной золе и ПСУ почти десятикратно превышает таковые в первичных углях, но существенно различаются по отдельным месторождениям (%): 0.02 (Райчихинское), 0.12 (Архаро-Богучанское) и 0.06 (Ерковецкое). Это позволяет рассматривать обогащение REY только в угольной золе Архаро-Богучанского месторождения, по легкому типу с максимальным (0.45) и средним (0.12) значениями, а также в ПСУ по шлаку (0.11), золе-уноса (0.11) и шламу (0.06). В первом случае отношение La_N/Lu_N равно 7.92, а содержание REY 0.14 во втором – соответственно 6.27 и 0.12. Оценивая другие бурогоугольные месторождения, следует отметить, что по своим показателям они близки и L-типу распределения с высокими отношениями La_N/Lu_N – 7.27–12.72 и REY – 0.23–

0.86% (Райчихинское месторождение); La_N/Lu_N (12.42–22.61) и REY – 0.05–0.70% (Ерковецкое месторождение).

Угли с L-типом распределения терригенного или туфогенного происхождения обогащаются на стадии первичного торфяника. В первом случае REY поступал из областей сноса в торфяники в коллоидной и ионной формах, во втором – обогащение торфяных болот происходило также за счет пирокластики кислого состава. Для некоторых месторождений механизм обогащения REY связан также с поступлением грунтовых вод во время раннего диагенеза [1].

Наряду REY в угольной золе бурых углей Приамурья также рассмотрено распределение ТЦМ и РТЭ с содержанием выше кларковых (табл. 12).

Приведенные в табл. 12 данные свидетельствуют о многократном возрастании в угольной золе содержания ТЦМ и РТЭ при значительных колебаниях в триаде (максимум, минимум, средняя величина). В ТЦМ по месторождениям они составляют (г/т): 455.26–803.17 (Райчихинское), 221.01–1294.76 (Арха-

Таблица 12. Содержание полезных компонентов в угле, угольной золе и ПСУ бурогольных месторождений Приамурья, г/т

Месторождение	Элемент	Содержание REY						
		уголь	угольная зола			продукт сгорания угля		
			максимум	минимум	среднее	шлак	зола-уноса	шлам
Райчихинское	Тяжелые цветные металлы							
	Co	4.89	178.98	79.32	36.43	74.21	87.64	82.94
	Ni	4.57	43.33	50.00	81.77	92.29	176.55	225.49
	Cu	5.98	140.14	93.73	50.77	74.54	114.56	465.48
	Zn	26.03	346.52	384.25	185.09	269.81	666.86	1453.02
	Sn	0.61	1.45	0.34	8.86	25.87	0.77	0.30
	Sb	0.30	3.04	1.53	2.07	391.23	15.58	11.90
	Pb	7.69	149.71	27.63	90.27	219.93	605.51	928.66
	ΣТЦМ	50.06	863.17	636.80	455.26	1147.87	1667.47	3167.79
	Редкие тугоплавкие элементы							
	Cr	2.02	59.85	21.19	15.19	8.76	156.25	118.68
	Zr	18.59	146.67	218.82	777.83	151.14	107.18	55.67
	Nb	1.66	5.07	18.14	78.71	8.28	13.01	3.36
	Mo	0.72	8.41	7.46	4.45	13.73	25.56	16.68
	Hf	0.58	4.64	5.09	23.71	4.93	3.52	1.74
	Ta	0.09	0.14	0.51	1.82	0.34	0.93	0.15
	W	0.36	8.26	5.09	2.42	5.75	4.92	2.53
ΣРТЭ	24.02	233.04	276.30	904.12	192.93	311.36	198.81	
Σсредних	86.15	1392.00	1003.27	1555.41	1492.70	2134.77	3466.91	
Архаро-Богучанское	Тяжелые цветные металлы							
	Co	4.64	105.57	17.54	39.61	39.60	74.78	55.99
	Ni	13.31	315.95	35.25	117.68	90.14	199.44	170.42
	Cu	11.89	269.03	13.28	131.68	180.73	186.22	372.32
	Zn	18.04	333.83	107.07	85.28	176.01	491.77	573.52
	Sn	0.72	13.85	1.15	6.02	4.31	1.44	6.13
	Sb	-	-	-	-	8.44	17.88	26.12
	Pb	13.87	256.53	46.75	115.79	98.45	629.18	963.72
	ΣТЦМ	62.47	1294.76	221.04	496.06	597.68	1600.71	2168.21
	Редкие тугоплавкие элементы							
	Cr	13.05	254.61	13.28	113.10	203.15	212.21	130.46
	Zr	29.96	601.90	100.51	227.21	262.25	210.49	144.21
	Nb	2.35	47.11	7.76	18.58	18.28	14.08	10.88
	Mo	2.53	82.30	1.38	29.70	32.95	55.02	50.68
	Hf	0.87	16.73	3.28	6.25	7.18	5.50	3.91
	Ta	0.19	3.46	0.58	1.46	1.34	0.88	0.57
	W	0.86	19.61	1.78	11.79	7.68	8.58	9.00
ΣРТЭ	49.80	1025.72	128.57	408.08	532.83	506.77	349.71	
Σсредних	180.79	3783.50	439.15	1493.68	1487.64	2425.59	2744.50	

Таблица 12. Окончание

Месторождение	Элемент	Содержание REY						
		уголь	угольная зола			продукт сгорания угля		
			максимум	минимум	среднее	шлак	зола-уноса	шлам
Ерковецкое	Тяжелые цветные металлы							
	Co	3.81	21.49	53.70	69.11	41.89	111.89	78.95
	Ni	5.27	35.26	56.63	85.70	104.86	183.54	225.44
	Cu	2.99	0.01	58.44	0.01	47.11	91.67	543.37
	Zn	12.89	43.06	125.08	116.87	78.67	705.20	1288.80
	Sn	0.27	0.88	1.21	6.17	3.19	7.12	2.50
	Sb	0.16	1.93	1.38	2.55	1.73	15.11	14.81
	Pb	5.04	29.38	44.91	71.56	13.26	468.97	937.75
	ΣТЦМ	30.42	132.01	341.35	351.97	290.69	1583.51	3091.62
	Редкие тугоплавкие элементы							
	Cr	2.26	17.89	38.01	21.85	28.49	208.66	114.61
	Zr	9.09	56.65	172.57	73.76	150.74	173.45	75.83
	Nb	0.74	3.24	7.50	6.93	9.93	13.82	4.98
	Mo	0.48	6.58	2.50	12.59	4.60	24.88	17.65
	Hf	0.33	2.46	5.26	3.07	4.60	5.23	2.10
	Ta	0.03	0.18	0.34	0.23	0.56	0.89	0.30
	W	0.64	2.19	8.45	8.60	5.50	14.10	3.03
	ΣРТЭ	13.56	89.19	234.63	127.02	204.41	441.03	218.51
	Σредких	57.40	337.93	705.20	596.55	618.36	2162.56	3399.85

ро-Богучанское), 132.01–351.97 (Ерковецкое). В ПСУ наиболее высокие значения ТЦМ сосредоточены соответственно (г/т): в золе-уноса (1667.47, 1600.70, 1583.31) и шламе (3167.79, 2168.21, 3091.31). При значительных колебаниях концентраций РТЭ в угольной золе локализация их происходит в золе-уноса (311.36, 506.71, 141.03) и шлаке (198.81, 349.71, 208.51). Таким образом, очевиден повышенный потенциал Архаро-Богучанского месторождения, в угольной золе которого установлены наиболее высокие содержания в ТЦМ (г/т) – Cu (269.03), Zn (333.83), а в РТЭ – Cr (251.61), Zr (601.90) и Mo (82.30).

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Образование металлоносных бурых углей Райчихинского, Архаро-Богучанского и Ерковецкого месторождений Приамурья в палеогене происходило в условиях высокой подвижности Туранского массива с локальным проявлением магматической, в том числе вулканической деятельности, с контрастными формами сопряжения с Нижнезейской впадиной. С учетом этого разработана модель формирования в углях REY,

РЭ и ЦМ, включающая три стадии: эрозию питающих провинций Туранского массива, перенос водными потоками рудных микрокомпонентов и последующее их накопление в платформенных прогибах Нижнезейской впадины. Эта история начиналась с размыва периферии массива широкими речными системами Ивановки и Белой с длительной транспортировкой материала по озерно-аллювиальной равнине с накоплением преимущественно в однопластовых торфяных залежах. На периферии активизированного Туранского массива реализация вышеприведенных процессов во многом определялась гидродинамическим режимом рр. Буряя и Архара: продолжительностью и глубиной боковой эрозии, частотой наводнений, в том числе катастрофических. Это создавало изменчивые условия аккумуляции с образованием в дельтах этих водотоков разнообразных по составу многопластовых торфяных залежей.

Среди изученных буроугольных месторождений Приамурья выделено два генетических типа обогащения REY: терригенный и терригенно-тугофогенный с поступлением REY, РЭ и ЦМ поверхностными водами рр. Белая, Ивановка, Буряя, Ар-

Таблица 13. Распределение гуминовых кислот в углях Восточного участка Ерковецкого бурогольного месторождения

Скважина / номер проб	Интервал опробования, м	Мощность пласта, м	Содержание гуминовых кислот, %		
			по интервалам опробования	среднее содержание	
Северная часть (Константиноградский прогиб)					
2106	/1	53.4–55.3		30.8	36.2
	/4	56.0–57.8	3.3	36.4	
	/6	57.9–58.5		41.6	
2323	/3	60.0–61.3		35.6	41.3
	/5	61.4–61.9	3.8	47.7	
	/7	62.0–63.9		36.2	
	/8a	63.9–64.0		45.6	
2299	/2	78.6–80.1		4.2	33.5
	/3	80.3–80.5	44.4		
	/4	80.7–82.2	36.2		
	/6	82.7–83.7	40.5		
2279	/2a. 2	98.6–99.9	4.9	35.6	35.0
	/3	105.3–106.5		42.6	
	/5	107.0–108.9		37.9	
	/6	109.0–110.8		24.5	
Южная часть (Песчаноозерский прогиб)					
2549	/2	21.1–22.0	1.6	57.0	61.1
	/4	22.1–22.8		65.2	
2543	/2	21.6–22.4	1.6	64.9	50.6
	/3	22.4–23.2		50.6	
2542	/2	22.0–23.0	2.0	37.0	38.4
	/3	23.0–24.0		39.8	
2545	/2	26.2–27.85	1.6	50.6	50.6
2539	/3	28.9–30.0	2.0	45.8	41.8
	/5	30.1–31.0		37.7	

хара и привносом пирокластического материала кислого состава преимущественно с Сунь-Малохинганского поднятия и Сихотэ-Алинского орогенного пояса [34]. Основные формы нахождения REY представлены органическими комплексами с гуминовыми кислотами. Доля лантаноидов, связанных с органическим веществом, карбонатами и моносульфидами, достигает 90%, а силикатной, дисульфидной и нерастворимой части – не превышает 7% [18]. Впервые появилась возможность проанализировать распределение гуминовых кислот по основному пласту угля в скважинах на Восточном участке Ерковецкого месторождения (рис. 12, табл. 13). В северной части месторождения среднее содержание гуминовых кислот по пластам угля колеблется в пределах 35.0–41.7%, а при поинтервальном опробовании – от 24.5 до 47.7%. На южной окраине месторождения эти

значения соответственно составляют 38.4–61.1% и 37.7–65.2%.

Обращают внимание существенные поинтервальные колебания концентрации гуминовых кислот, особенно отчетливые в северной части, и резко повышенные их значения на площади эксплуатационного карьера Южный. Сопоставление содержаний гуминовых кислот и лантаноидов в карьере свидетельствует о сходимости повышенных концентраций гуминовых кислот и высоких значений REY.

В изученных углях бурогольных месторождений Приамурья доминируют лантаноиды легкой геохимической группы (75–80%) при пониженных значениях средней (18–20%) и тяжелой (3–4%). В углях Архаро-Богучанского месторождения установлены высокие концентрации редкоземельных элементов, превышающих кларковые (La, Ce, Nb, Gd, Er, Yd), по которым они сопоставимы с таковыми Китая и Турции (табл. 14).

Показано, что органоминеральные комплексы (торф, уголь) характеризуются высоким потенциалом извлечения лантаноидов из водных растворов. Их связывание в угле протекает по механизму физической сорбции и ионообменных реакций с участием карбоксильных и гидроксильных групп, комплексообразования с вовлечением –ОН-, –СО- и –СООН-групп [24]. Обзор экспериментальных работ сорбции Be, Ga, PЗЭ, Mu, Cu, Zn, Co, Ni и Sr по торфу, гуминовым кислотам, ксилану, витрину и телениту показывает, что они сорбируются в одинаковых количествах [14]. Для большинства элементов рН-зависимая сорбция на торфе, гуминовых кислотах и ксилане возрастает лишь в интервале рН от 2 до 5.5. При этом установлено, что количество органического вещества увеличивается с возрастанием концентраций элементов в растворе. По существу, подтверждается высказанная ранее версия о прямой связи между содержанием гуминовых кислот и концентрацией в органическом веществе лантаноидов.

Продуктивность бурогольных месторождений Приамурья в качестве сырья для редкоземельных элементов рассмотрена по угольной золе. Положительно оценивается угольная зола Архаро-Богучанского месторождения, которая по среднему содержанию REY (0.12) и соотношению $La_N/Lu_N < 1$, соответствует L-типу обогащения. Близки к этому типу также золы Райчихинского

Таблица 14. Содержание редкоземельных элементов в углях различных стран, г/т

Элемент	Уголь				Месторождение Приамурья			Кларк*
	США [35]	Китай [36]	Кореи [37]	Турции [38]	Райчихинское	Архаро-Богучанское	Ерковецкое	
Y	8.5	18.2	7.2	12.76	4.97	16.88	6.55	8.6
La	12	22.5	14.5	21.12	7.17	18.81	10.30	10.0
Ce	21	46.7	27.2	39.24	14.48	47.48	18.24	22.0
Pr	2.4	6.42	2.9	4.71	1.46	4.75	1.84	3.5
Nd	9.5	22.3	11.1	16.85	5.45	18.02	6.86	11.0
Sm	1.7	4.07	2.3	3.18	1.04	3.43	1.23	1.9
Eu	0.4	0.84	0.5	0.76	0.19	0.61	0.22	0.5
Gd	1.8	4.65	1.4	3.0	1.18	3.48	1.46	2.6
Tb	0.3	0.62	0.3	0.45	0.15	0.56	0.18	0.32
Dy	1.9	3.74	2.0	2.42	0.86	3.08	0.99	2.0
Ho	0.35	0.96	0.4	0.47	0.16	0.59	0.19	0.5
Er	1.0	1.79	1.1	1.37	0.49	1.84	0.59	0.85
Tm	0.15	0.64	0.3	0.21	0.07	0.28	0.08	0.31
Yb	0.95	2.08	1.0	1.35	0.43	1.90	0.53	1.0
Lu	0.14	0.38	—	0.21	0.06	0.27	0.08	0.19
$\Sigma LREY$	46.60	101.99	58.00	85.10	29.60	92.49	38.47	48.40
$\Sigma MREY$	12.90	28.05	11.40	19.39	7.35	24.60	9.40	14.02
$\Sigma HREY$	2.59	5.85	2.80	3.61	1.22	4.89	1.47	2.85
ΣREY	62.09	135.89	72.20	108.10	38.17	121.98	49.34	65.27

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

и Ерковецкого месторождений. Это позволяет относить их к угольным бассейнам с терригенным и туфогенным типами обогащения REY.

С учетом приведенных материалов можно восстановить историю накопления рудных микрокомпонентов в углях Приамурья в условиях первичного торфонакопления и бурогоугольной стадии. При торфонакоплении различия в степени обогащения REY торфяной залежи связаны с периодичностью поступления высоко- и низкоминерализованных поверхностных вод из основных магистральных водотоков Приамурья. Первые из этих вод ответственны за повышенные концентрации рудных микрокомпонентов в аномальных по содержанию REY интервалах углей, а вторые – за рядовые их значения. Последующая – бурогоугольная стадия развития Райчихинского и Архаро-Богучанского, была ограничена ранним палеогеном, а Ерковецкого – продолжалась с перерывами до позднего миоцена с формированием в раннем и среднем миоцене второй угленосной формации. В эоцене Райчихинское и Архаро-Богучанское месторождения были вовлечены в поднятие с осушением угольных пластов. В отличие от них, Ерковецкое месторождение испытало этот процесс только в позднем миоцене. В связи с этим связь палеогеновых углей

Ерковецкого месторождения с поверхностными водами существовала в раннем и среднем миоцене, что способствовало повышению металлоносности этих углей. Это подтверждается наличием гидравлической связи водоносных комплексов палеоценовых и миоценовых отложений, гидрокарбонатным составом вод с минерализацией от 0.8 до 2.0 г/т.

Дальнейшие перспективы новых генетических типов обогащения REY в рассматриваемом угленосном бассейне связаны с изучением кор выветривания на интрузивных и эффузивных породах алюмосиликатного и щелочного ряда, широко распространенных на южной окраине Туранского массива и инфильтрационных систем [39–41]. К последним из них можно отнести исследования генетически разнородной рудной минерализации в углях Ерковецкого месторождения в карьере Южный [9]. Дифференцированный тип размещения ее по разрезу угленосной толщи рассмотрен авторами с позиций внедрения восходящих газово-жидких флюидов, которые транспортировали широкий ряд элементов литофильной, сульфидофильной и сидерофильной групп. Первыми выделялись литофилы, обогащая угли малоподвижными элементами (Th, PЗЭ, Nb, Y, Hf, Ta), а затем –

элементами с высокой летучестью (As, Sb, Hg, Se), а также Au, Ag, Pb, Sn, Pt. При этом Au с As и с другими элементами указывают на генетическую связь, характерную для низкотемпературных малосульфидных эпитеpmальных месторождений, что позволяет выделить в Приамурье инфильтрационный тип обогащения углей REY, связанный с низкотемпературными гидротермальными процессами (рис. 1). Проявление этого типа связано с нарушениями Намуэрхэ близширотного направления в узлах пересечения с разломами северо-восточного направления. Перспективы обнаружения подобного типа обогащения REY авторы связывают с северо-восточной окраиной Архаро-Богучанского бурогоугольного месторождения. На этой территории широко развиты кайнозойские эффузивы, контролируемые близширотными разрывными нарушениями [33, 39, 40].

ВЫВОДЫ

Бурея и Архара с эпизодическим привнесом пирокластического материала кислого состава. Распределение REY, РЭ и ЦМ в углях указанных генетических групп, неравномерное с локализацией их в кровле и почве (Райчихинское и Ерковецкое) или в середине (Архаро-Богучанское) пластов угля. В углях доминируют элементы легкой (70–80%) при сокращенных значениях средней (18–20%) и тяжелой (3–4%) генетических групп.

3. Основные формы нахождения лантаноидов в углях представлены органоминеральными комплексами с гуминовыми кислотами. Доля их, связанная с органическим веществом, карбонатами и моносulfидами, достигает 90%. На южной окраине Ерковецкого месторождения проанализировано содержание гуминовых кислот по пластам угля с распределением редкоземельных элементов. Установлено неравномерное содержание гуматов по разрезу пласта и сходимость высоких концентраций кислот с повышенными значениями лантаноидов.

4. Проблема обогащения REY рассмотрена в системе: уголь – угольная зола, ПСУ. Для

наиболее перспективного продукта – угольной золы Архаро-Богучанского месторождения – выполнены прогнозные критерии оценки с позиции обогащения REY трех типов распределения (*L*-тип, *M*-тип и *H*-тип). Положительно оценены REY указанного месторождения в качестве *L*-типа распределения терригенного и туфогенного происхождения на стадии формирования первичного торфяника.

5. Оценка перспектив сырьевой базы редкоземельных элементов палеогеновых угленосных месторождений рассмотрена с позиций рудного ресурсного потенциала Туранского массива, наличия кор выветривания химического типа, глубокого уровня эрозийного среза, сравнительного анализа с редкоземельными месторождениями Китая. С учетом этого Приамурье положительно оценивается на обнаружение новых видов месторождений редкоземельного сырья, туфогенного и инфильтрационного типов с наложенными низкотемпературными процессами.

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.

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, vol. 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, vol. 446, no. 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, vol. 11, no. 5, 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, vol. 15, no. 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: Дис. канд. геол.-минер. наук. Санкт-Петербург: ФГУП "ВСЕГЕИ", 2014. 133 с.*
12. *Arbuzov S.I., Mezhibor A.M., Penok S.S., Shaldybin M.V., Belaya E.V., Spears D.A.* // *Int. J. Coal Geology*. 2016. V. 153. P. 99.
13. *Arbuzov S.I., Penok S.S., Soktoev B.R., Chekryzhov I.Y., Popov N.Y., Spears D.A.* // *Ore Geology Reviews*. 2021. V. 139. P. 104537.
14. *Dai S., Hower J.C., Finkelman R.B., Graham I.T., French D., Ward C.R., Eskenazy G., Wei Q., and Zhao L.*, *Int. J. Coal. Geol.*, 2020, vol. 218, p. 103. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103347>
15. *Арбузов С.И., Финкельман Р.Б., Ильенко С.С., Маслов С.Г., Межибор А.М., Блохин М.Г.* // *ХТТ*. 2019. № 1. С. 3. [*Solid Fuel Chemistry*, 2019, vol. 53, no. 1, p. 1. <https://doi.org/10.3103/S0361521919010026>]. <https://doi.org/10.1134/S002311771901002X>
16. *Середин В.В.* // *Доклады Академии наук СССР*. 1991. Т. 320. № 6. С. 1446.
17. *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.
18. *Радомская В.И., Шумилова Л.П., Носкова Л.П., Сорокин А.П., Павлова Л.М., Дугин С.В., Соктоев Б.Р., Поселюжная А.В., Иванов В.В.* // *ХТТ*. 2023. № 1. С. 32. [*Solid Fuel Chemistry*, 2022, vol. 56, no. 1, p. 20. <https://doi.org/10.3103/S0361521923010068>]. <https://doi.org/10.31857/S0023117723010061>
19. *Чекрыжов И.Ю., Нечаев В.П., Трач Г.Н., Трач Д.А.* // *Горный журнал*. 2018. № 2. С. 35.
20. *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, vol. 54, no. 7, p. 671. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.06.003>].
21. *Сорокин А.П., Конюшок А.А., Кузьминых В.М., Артеменко Т.В., Попов А.А.* // *Геотектоника*. 2019. № 2. С. 33. [*Geotecton*, 2019, vol. 53, no. 2, p. 193. <https://doi.org/10.1134/S0016852119020092>]. <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019233-45>
22. *Sorokin A.P., Konyushok A.A., Kuz'minykh V.M., Dugin S.V.* // *Minerals*. 2021. V. 11. P. 682.
23. *Сорокин А.П., Агеев О.А.В., Дугин С.В., Попов А.А.* // *ХТТ*. 2023. № 1. С. 13. [*Solid Fuel Chemistry*, 2022, vol. 56, no. 1, p. 1. <https://doi.org/10.3103/S0361521923010093>]. <https://doi.org/10.31857/S0023117723010097>
24. *Павлова Л.М., Шумилова Л.П., Радомская В.И., Сорокин А.П., Иванов В.В., Носкова Л.П., Леусова Н.Ю.* // *ДАН*. 2023. Т. 512. № 2. С. 38. [*Doklady Earth Sciences*, 2023, <https://doi.org/202310.1134/S1028334X23601207>]. <https://doi.org/0.31857/S2686739723600923>
25. *White L.T., Lister G.S.* // *J. of Geodynamics*. 2012. V. 56–57. P. 7.
26. *Jagoutz O., Royden L., Holt A.F., Becker T.W.* // *Nature Geoscience*. 2015. V. 8. P. 475.
27. *Сорокин А.П., Малышев Ю.Ф., Каплун В.Б., Сорокина А.Т., Артеменко Т.В.* // *Тихоокеанская геология*. 2013. Т. 32. № 2. С. 3. [*Russian Journal of Pacific Geology*, 2013, vol. 15, no. 5, p. 417. <https://doi.org/10.1134/S1819714021050092>].
28. *Цао С.К., Кириллова Г.Л., Сорокин А.П., Каплун В.Б., Цао Х.С., Цю Ю., Чжан Ю.Дж.* // *Тихоокеанская геология*. 2013. Т. 32. № 6. С. 68. [*Russian Journal of Pacific Geology*, 2013, vol. 7, no. 6, p. 431. <https://doi.org/10.1134/S1819714013060055>].
29. *Волкова Ю.Р., Щадрин Н.И., Петрук Н.Н.* *Карта полезных ископаемых. 1:1000000. Лист М-52 (Благовещенск). Дальневосточная серия. СПб: Картф-ка "ВСЕГЕИ", 2012.*
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. Середин В.В. // ДАН. 2001. Т. 377. № 2. С. 239. [Doklady Earth Sciences, 2012, vol. 377, p. 250].
33. Сорокин А.П., Чантурия В.А., Агеев О.А., Дугин С.В. // ХТТ. 2020. № 4. С. 8. [Solid Fuel Chemistry, 2020, vol. 54, no. 4, p. 196.
https://doi.org/10.3103/S0361521920040072].
https://doi.org/10.31857/S0023117720040076
34. Сорокин А.П., Сорокин А.А. // ДАН 2017. Т. 474. № 5. С. 617. [Doklady Earth Sciences, 2017, vol. 474, no. 2, p. 684.
https://doi.org/10.1134/S1028334X17060150].
https://doi.org/10.7868/S086956521705019X
35. Finkelman R.B. Trace and minor elements in coal. In Organic Geochemistry. Eds. Engel M.H., Macko S.A. New York: Plenum Press, 1993. P. 593.
36. Dai S., Ren D., Chou C.-L., Finkelman R.B., Seredin V.V., Zhou Y. // Intern. J. Coal Geology. 2012. V. 94. P. 3.
37. Hu J., Zheng B., Finkelman R.B., Wang B., Wang M., Li S., Wu D. // Fuel. 2006. V. 85. P. 679.
38. Karayigit A.I., Gayer R.A., Querol X., Onacak T. // Intern. J. Coal Geology. 2000. V. 44. P. 169.
39. Сорокин А.П. Карта полезных ископаемых СССР. 1:200 000. Лист М-52-XXIX. Хингано-Буреинская серия / Ред. Е.К. Дацко. Л.: Аэрогеология, 1970.
40. Осипова Н.К. Карта полезных ископаемых СССР. 1:200 000. Лист М-52-XXIII (Архара). Хингано-Буреинская серия / Ред. Л.Б. Кривицкий. Л.: Аэрогеология, 1975.
41. Сорокин А.П. Молодые платформы восточной окраины Евразии (глубинное строение, условия формирования и металлогения). Владивосток: Дальнаука, 2013. 366 с.

Rare Elements and Non-Ferrous Metals in the Paleogene Brown-Coal Deposits of the Zeya-Bureya Sedimentary Basin (Amur Region, Far East): Accumulation Models, Enrichment Conditions and Criteria for Assessment of Resource Potential (a Review)

A. P. Sorokin*, S. V. Dugin**

Institute of Geology and Nature Management, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, 675000 Russia

*e-mail: sorokinap@ignm.ru

**e-mail: duservad@gmail.com

A model has been developed for deposition of rare earth elements with yttrium, trace elements, and non-ferrous metals in platform and activated structures of the Upper Amur region. Genetic types of lanthanide enrichment are considered; lanthanides are shown to concentrate non-uniformly in coal seams and in coal combustion products. Light rare earth elements predominate in coals. The capacity of peat and coal for metal extraction from aqueous solutions was proven. Criteria for a preliminary assessment of coal as a raw material for lanthanides were considered and prospects for their identification were analyzed.

Keywords: sedimentary basin, mountain range, brown coal deposits, coal, coal ash, coal combustion products, transfer and concentration of ore microcomponents, rare earth elements, trace elements, non-ferrous metals, humic acids, deposit potential