

УДК 553.96:550.4

ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В УГЛЯХ МУГУНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ИРКУТСКИЙ УГОЛЬНЫЙ БАССЕЙН)

© 2021 г. Н. Р. Джумаян^{1,*}, Т. Г. Шумилова^{2,**}, С. А. Светов^{3,***}

¹ АО “ВНИГРИуголь”, 344090 Ростов-на-Дону, Россия

² Институт геологии Коми УРО РАН, 167000 Сыктывкар, Россия

³ Институт геологии КарНЦ РАН, 185910 Петрозаводск, Россия

* e-mail: narinedzhumayan@mail.ru

**e-mail: shumilova@geo.komisc.ru

*** e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 02.04.2021 г.

После доработки 25.05.2021 г.

Принята к публикации 02.06.2021 г.

Представлены данные о содержании элементов-примесей в углях и золах углей I и II продуктивных пластов Мугунского месторождения (Иркутский угольный бассейн). Приведен минеральный состав изученных проб. Установлено, что концентрации Sc, Ti и Sr достигают минимальных промышленных содержаний. Предложены минералы-носители микроэлементов.

Ключевые слова: уголь, Иркутский угольный бассейн, Мугунское месторождение, элементы-примеси, минеральные включения в углях

DOI: 10.31857/S0023117721060049

ВВЕДЕНИЕ

В “Энергетической стратегии России на период до 2030 года”, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-Р, основными задачами развития угольной отрасли являются комплексное использование угля, отходов переработки и сопутствующих ресурсов. Ключевыми требованиями в стратегии являются ограничение нагрузки топливно-энергетического комплекса на окружающую среду, а также переход от продажи первичных энергетических ресурсов к продаже продукции их глубокой переработки. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью поиска новых источников ценных микроэлементов, оценкой влияния токсичных элементов на окружающую среду при разработке Иркутского угольного бассейна. В данной работе рассматриваются результаты изучения вещественного состава углей Мугунского месторождения.

Мугунское месторождение, разрабатываемое с 1990 г. в качестве источника твердого топлива, до сих пор недостаточно исследовано в отношении содержания и формы нахождения ценных и токсичных элементов-примесей (за исключением редких случаев [1, 2]). Поиски попутных компонентов в углях Мугунского месторождения проводили в период детальной разведки 1960–1965 гг.

В единичных пробах методом полуколичественного спектрального анализа были обнаружены повышенные содержания галлия, скандия, титана, кобальта и бериллия. Другие элементы, отмеченные в золе углей, практического интереса не представляли.

В период доразведки площади первоочередной отработки разреза “Мугунский” Мугунского месторождения в 1983–1991 гг. сотрудниками “ВНИГРИуголь” методом полуколичественного спектрального анализа были изучены содержания марганца, никеля, кобальта, хрома, ванадия, свинца, кадмия, бериллия и фосфора, химическими анализами определены содержания мышьяка (ГОСТ 10478-75) и серы (ГОСТ 8606-72) в 17 пробах. В результате проведенных работ было установлено, что изученные токсичные элементы характеризуются очень низкими содержаниями и не будут представлять опасности для окружающей среды при энергетическом использовании углей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе проанализированы содержания микроэлементов в пробах углей пласта I, 1-й и 2-й пачек пласта II Мугунского месторождения, в образцах зольных отходов мугунских углей с ТЭЦ с. Алгатуй (Тулунский район Иркутской об-

ласти). Опробование угольных пластов проводили в карьерах бороздовым методом вкрест простирания пород по макроскопически выделяемым слоям – угольным литотипам согласно ГОСТ 9815-75. Критериями для пробоотбора были блеск, текстурные и структурные особенности, излом и трещиноватость углей. Мощность пластово-дифференциальных проб варьировала от 0.1 до 0.3 м. Содержания элементов-примесей изучены в 30 пробах угля и 22 пробах зольных отходов, микронзондовые исследования проведены по восьми штуфам-брикетам.

Содержания редких и редкоземельных элементов в углях и в золах углей определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в ЦКП “Аналитический центр” ИГ КарНЦ РАН (аналитик А.С. Парамонов) на квадрупольном масс-спектрометре (*X-SERIES 2 ThermoScientific*) по методике [3]. Концентрации изученных элементов-примесей были сопоставлены с угольными и зольными кларками для бурых углей, вычисленными М.П. Кетрис и Я.Э. Юдовичем [4], и фоновыми содержаниями микроэлементов в углях [7].

Морфологические и химические особенности минералов-включений в углях изучались в аншлиф-брикетах, изготовленных по ГОСТ Р 55662-2-2013 (ИСО 7404-3:2009). Микроскопические исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа *VEGA Tescan LMU II* с системами энергодисперсионного микроанализа *INCA ENERGY 450/XT* с беззотным детектором *X-Act ADD* и волнодисперсионного микроанализа *INCA WAVE 700 OXFORD Instrument Analytical* (ЦКП “Геонаука”, Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, аналитик Е.М. Тропников). Зольность угольных проб определяли по ГОСТ Р 55661-2013.

Геологическая характеристика района и месторождения. Район Мугунского месторождения угля находится в пределах северо-западной части Иркутского угленосного бассейна, занимает южную часть Тулунского бассейна. Основная площадь месторождения (центральная и западная части) приурочена к крупной неправильной эрозионно-тектонической котловине в палеозойских осадочных породах, вытянутой в северо-восточном направлении (рис. 1). Месторождение характеризуется весьма простым геологическим строением, пологим залеганием угольных слоев [2].

Наряду с осадочными породами доюрского возраста в районе Мугунского месторождения широко распространены изверженные породы триасового возраста, представленные траппами долеритов, залегающими в виде силлов. Мощность трапповых тел достигает 250 м [6].

Промышленная угленосность Мугунского месторождения связана с “горизонтом рабочих пла-

стов” черемховской свиты нижней-средней юры, которая включает все пласты, имеющие промышленное значение [2]. Наиболее перспективным и обрабатываемым на данный момент является пласт I – самый мощный и выдержанный рабочий пласт Мугунского месторождения. Глубина его залегания колеблется от 1.0 до 78.4 м, средняя мощность составляет 16.0 м. Пласт II – второй по выдержанности, его средняя мощность достигает 2.8 м. Угли месторождения сложены преимущественно мацералами группы витринита, по вещественно-петрографической классификации, относятся к гелитам [7].

Угли низкосернистые, содержания общей серы варьируют от 0.54 до 1.30%, сравнительно небольшие площади содержат угли с повышенной сернистостью (более 3%). По своим генетическим и технологическим параметрам угли месторождения относятся к бурым, подгруппы ЗБВ [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Зольность изученных образцов в сухом состоянии топлива (A^d) изменяется от 2.9 до 43.0 вес. %.

Состав минеральной компоненты углей пласта I представлен карбонатными минералами, сульфатами Са, редко встречаются циркон, халькопирит, барит (рис. 2). Барит в качестве примесей содержит до 2.16% Sr.

Для минеральной составляющей углей 1-й пачки пласта II характерно преобладание каолинита, слюды. Акцессорные минералы представлены апатитом, монацитом, цирконом, пиритом, сфалеритом и рутилом. Монацит является концентратом РЗЭ и содержит (%): La – от 0.39 до 7.32; Се – от 0.62 до 12.72; Nd – от 0.23 до 3.54 (по данным четырех изученных проб). Кристаллы циркона имеют размеры до 20 мкм, характеризуются хорошо выраженными гранями, содержат в качестве примеси Hf (от 0.24 до 1.18%). Аналогичный по форме и составу циркон обнаружен в тонштейне и в золе углей Азейского месторождения (Иркутский угольный бассейн) [8]. Достаточная распространенность цирконов в природно-окисленном угле ранее была отмечена Z. Yan, G. Liu и др. [9].

Помимо широко распространенного пирита сульфидная минерализация углей Мугунского месторождения представлена также халькопиритом и сфалеритом, присутствие которых явно указывает на эпигенетический гидротермальный тип минерализации [10]. Пирит представлен разнообразной, чаще неправильной, формой, имеет размеры от 5 до 100 мкм, иногда замещает зерна кварца, содержит до 3.84% примеси Cu. В составе сфалерита (по данным семи включений) в качестве примесей присутствует Fe, содержания кото-

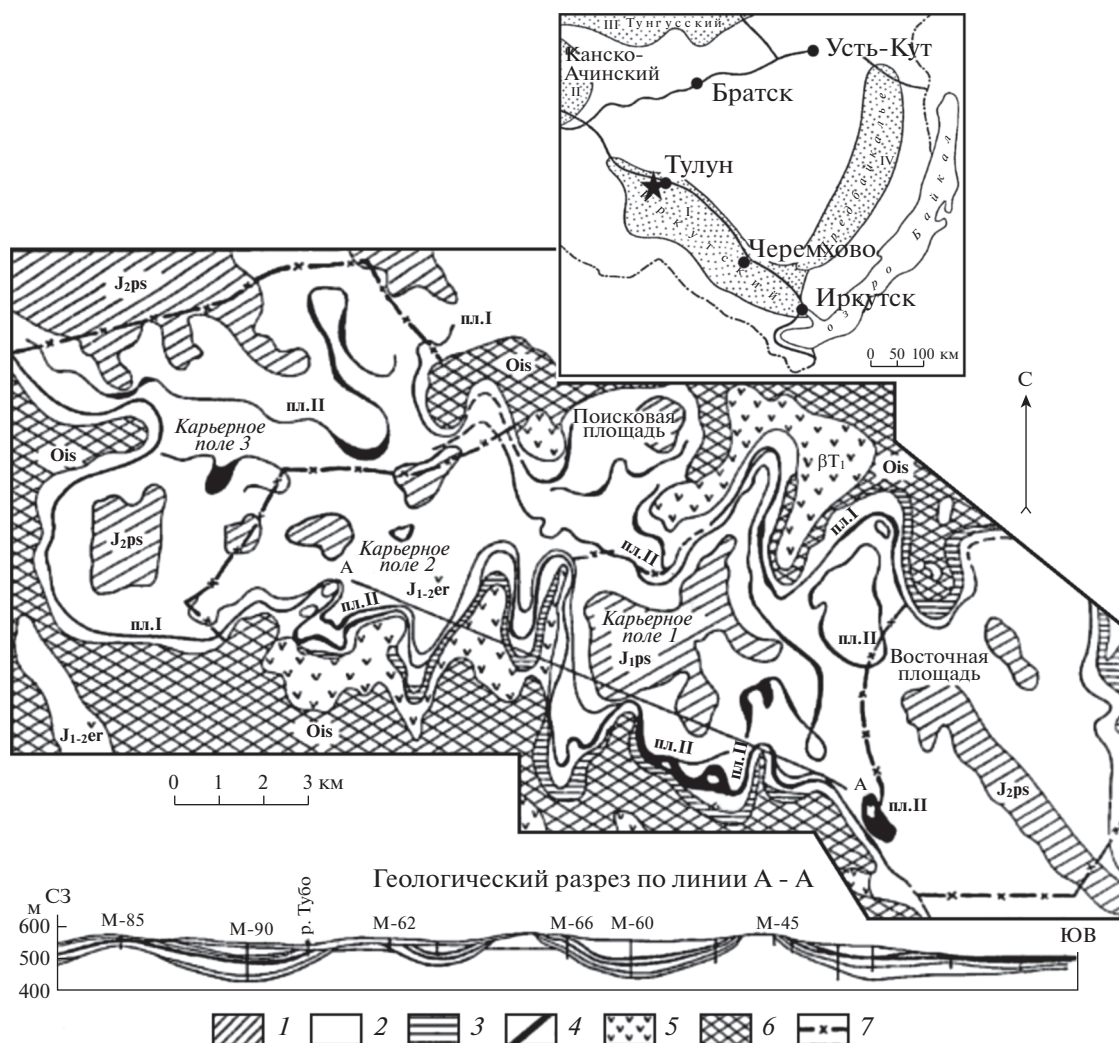


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Мугунского месторождения [2]: 1 – присаянская свита (J_{2ps}) – сложена аркозовыми песчаниками, конгломератами, алевролитами; 2 – черемховская свита (J_{1-2cr}) – доминируют песчаники, в меньшей мере алевролиты, аргиллиты и угли; 3 – заларинская свита (J_{1z1}) – сложена комплексом делювиально-пролювиальных отложений (глинами, песчаниками, брекчиями, редко конгломератами); 4 – угольные пласты; 5 – траппы ($v\beta T_1 k$) – долериты; 6 – ордовикские отложения (O_{is}) – песчаники, алевролиты, аргиллиты; 7 – граница карьерных полей; звездочкой обозначено местоположение района.

рого лежат в пределах от 0.66 до 1.32%, для единичных зерен характерно до 0.5% Pb и 0.6% Cd.

Состав минеральной компоненты углей пласта II пачки 2 представлен преимущественно карбонатами, редко преобладает кварц, в меньшей степени присутствуют пирит, оксигидроксиды Fe, Al. Встречены ильменит (одно включение) и рутил (четыре включения), размеры минералов достигают 5 мкм, зерна их обычно округлой, угловатой формы. В виде изоморфных примесей в рутиле присутствуют Mn – 0.37% и Fe – 0.35%.

Содержания элементов-примесей в изученных образцах углей и золы приведены в сравнении с угольными и зольными кларками для бурых углей [4] и фоновыми содержаниями элементов-примесей в углях [5] (табл. 1).

Катионогенные элементы-литофилы представлены Li, Rb, Cs, Tl, Sr, Ba. Средние содержания Li в углях более чем в 4 раза превосходят угольный кларк. Угли Мугунского месторождения обеднены Rb, Cs, Ba, Tl. Содержания Sr колеблются от 77 до 172 г/т, при средних значениях 112 г/т. Среднее содержание стронция в золе составляет 966 г/т, что в 1.4 раза превышает предложенное в [11] минимальное промышленное содержание элемента в золе.

Катионо- и анионообразующие литофилы с постоянной валентностью представлены Be, Sc, R3Э, Ga. Содержания Be и Ga незначительно превышают угольный кларк, что подтверждает данные, полученные в период детальной разведки в 1960–1965 гг. Однако содержания скандия в

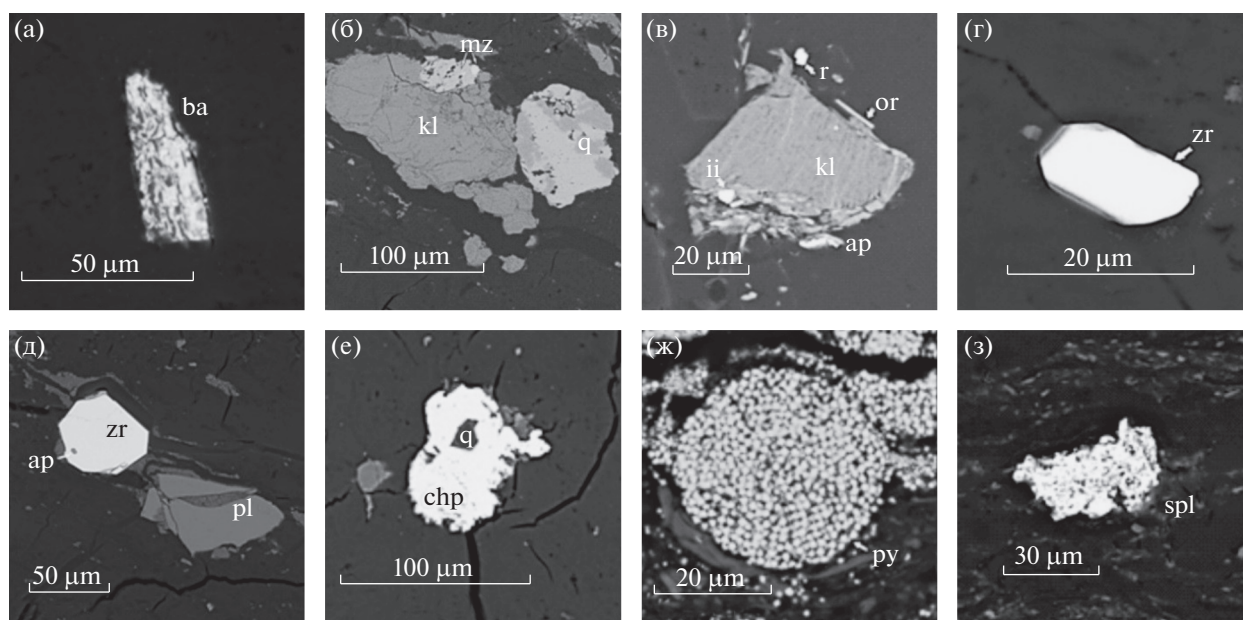


Рис. 2. Минеральные включения в углях Мугунского месторождения, изображения в режиме упруго-отраженных электронов (BSE): а – барит (пласт I); б – зерна монацита в глинистом веществе (1 пачка пласта II); в – ильменит, рутил (2 пачка пласта II); г – циркон (пласт I), д – циркон, плагиоклаз (1 пачка пласта II); е – халькопирит с включением кварца (пласт I); ж – “фрамбоиды” пирита (1 пачка пласта II); з – сфалерит (1 пачка пласта II). Условные обозначения: ба – барит; мз – монацит; кл – каолинит; q – кварц; ил – ильменит; r – рутил; og – ортоклаз; ap – апатит; zr – циркон; pl – плагиоклаз; chr – халькопирит, py – пирит, spl – сфалерит.

углях сопоставимы со средними содержаниями этого элемента в коренных месторождениях и достигают минимальных промышленных содержаний [11]. Концентрация Be, Sc и Ga в золах углей на околосларковом уровне.

Тяжелые лантаноиды представлены Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. Средние содержания Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Yb, Lu не превышают угольный кларк. Исключение составляют угли 1-й пачки II пласта, в которых содержания тяжелых лантаноидов в 2–3 раза превосходят угольный кларк.

Легкие лантаноиды представлены La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu. Средние содержания легких лантаноидов в углях пласта I близки, либо незначительно превышают угольный кларк. Для углей 1-й и 2-й пачек II пласта характерны повышенные концентрации La, Ce и Nd. Схожие результаты приведены И.М. Щадовым [1], который сообщает о содержании La в количестве 5 г/т в угольных разрезах “Азейский” и “Мугунский”. Наиболее обогащены РЗЭ элементами угли 1 пачки II пласта, а также высокзолная проба ($A^d = 43.0\%$) I пласта. Концентрации La и Y в золе незначительно превосходят зольный кларк.

Катионо- и анионообразующие элементы-литофилы с переменной валентностью представлены Ti, Zr, Hf, Th, Sn, V, Nb, Ta, Mo, W, U. Околосларковые содержания характерны для W, U, V, Mo, Nb. Концентрации Ti в углях и золах углей достигают минимальных промышленных содер-

жаний, предложенных [11]. Установлены повышенные средние содержания Zr, Hf, Th, Sn и Ta в исследуемых углях. В углях I пласта содержания Zr достигают 145 г/т (при угольном кларке 35 г/т), Hf – 3.9 г/т (при угольном кларке 1.2 г/т), Th – 25.7 г/т (при угольном кларке 3.3 г/т), Sn содержится до 8.70 г/т (при угольном кларке 0.79 г/т), Ta – 1.71 г/т (при угольном кларке 0.26 г/т).

Неметаллы-сульфофилы представлены As, Sb, Te. Содержания перечисленных элементов в углях и золе угля ниже кларка.

Элементы-сидерофилы представлены Cr, Mn, Co, Ni. Для Cr и Mn характерны околосларковые содержания в углях. Концентрации Co в углях пласта II более чем в 2 раза превышающие угольный кларк. Концентрации Mn в золах углей превышают зольный кларк более чем в 2 раза.

Значимый линейный коэффициент корреляции Пирсона – r (при $P = 0.95$, $n = 30$), выявлен между содержанием W, Cs, Mo в углях и зольностью (r составляет 0.78, 0.78 и 0.80 соответственно).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что образование ценных компонентов, связанных с угленосными формациями, может быть сингенетическим или эпигенетическим. Во время образования Иркутской угленосной формации основными сингенетическими источ-

Таблица 1. Средние, минимальные, максимальные содержания элементов-примесей в изученных углях и золах углей, сопоставленные с угольными и зольными кларками для бурых углей [4] и фоновыми содержаниями в углях [5]

Элемент	Содержание в угле, г/т от-до ср.	Содержание в золе, г/т от-до ср.	Угольный кларк в бурых углях [4], г/т	Зольный кларк в золах бурых углей [4], г/т	Фоновые содержания в углях [5], г/т	Элемент	Содержание в угле, г/т мин.-макс. ср.	Содержание в золе, г/т мин.-макс. ср.	Угольный кларк в бурых углях [4], г/т	Зольный кларк в золах бурых углей [4], г/т	Фоновые содержания в углях [5], г/т
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Катионогенные элементы-литофилы											
Li	$\frac{5-169}{44}$	$\frac{147-152}{149}$	10	49	6	Ti	$\frac{27-1708}{499}$	$\frac{1994-2059}{2019}$	720	4000	1600
Rb	$\frac{\leq 1-4}{2}$	$\frac{9-11}{10}$	10	50	17	Zr	$\frac{2-145}{45}$	$\frac{235-268}{249}$	35	190	50
Cs	$\frac{0.02-0.26}{0.16}$	$\frac{0.79-1.01}{0.91}$	0.98	5.7	1.5	Hf	$\frac{0.1-3.9}{1.3}$	$\frac{6.6-7.1}{6.8}$	1.2	7.5	—
Tl	$\frac{0.09-0.56}{0.17}$	$\frac{0.14-0.18}{0.16}$	0.68	5.1	0.5	Th	$\frac{0.1-25.7}{7.0}$	$\frac{30.3-34.7}{33.3}$	3.3	19	—
Sr	$\frac{77-172}{112}$	$\frac{880-1015}{966}$	120	740	80	Sn	$\frac{0.40-8.70}{2.02}$	$\frac{4.23-4.56}{4.40}$	0.79	4.7	1
Ba	$\frac{17-57}{37}$	$\frac{160-201}{185}$	120	890	150	V	$\frac{1-44}{23}$	$\frac{103-108}{105}$	22	140	30
Катионо- и анионообразующие элементы-литофилы с постоянной валентностью											
Be	$\frac{0.8-6.8}{2.2}$	$\frac{6.0-6.4}{6.2}$	1.2	6.7	2.5	Nb	$\frac{0.1-15.6}{5.5}$	$\frac{17.7-18.8}{18.3}$	3.3	18	1.2
Sc	$\frac{3.8-9.5}{6.7}$	$\frac{21.2-25.2}{23.8}$	4.1	23	1.8	Ta	$\frac{0.02-1.71}{0.42}$	$\frac{1.44-1.54}{1.50}$	0.26	1.4	0.2
Ga	$\frac{1.4-16.6}{6.7}$	$\frac{12.4-13.7}{13.2}$	5.5	29	10	W	$\frac{0.6-2.0}{1.3}$	$\frac{4.7-4.8}{4.7}$	1.2	6.0	1.5
Легкие лантаноиды											
La	$\frac{2-19}{11}$	$\frac{77-90}{84}$	10	61	1.5	Mo	$\frac{0.6-2.1}{1.4}$	$\frac{7.3-7.8}{7.5}$	2.1	14	2
Анионообразующие литофилы											
Ce	$\frac{4-35}{23}$	$\frac{160-185}{175}$	22	120	—	P	$\leq \frac{PO-102}{30}$	$\frac{302-309}{306}$	200	1200	—
Pr	$\frac{0.4-3.8}{2.5}$	$\frac{16.8-19.6}{18.2}$	3.5	13	-	Металлы-сульфофилы					

Таблица 1. Окончание

Элемент	Содержание в угле, г/т от-до ср.	Содержание в золе, г/т от-до ср.	Угольный кларк в бурых углях [4], г/т	Зольный кларк в золах бурых углей [4], г/т	Фоновые содержания в углях [5], г/т	Элемент	Содержание в угле, г/т мин.-макс. ср.	Содержание в золе, г/т мин.-макс. ср.	Угольный кларк в бурых углях [4], г/т	Зольный кларк в золах бурых углей [4], г/т	Фоновые содержания в углях [5], г/т
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Nd	2-17 11	67-80 75	11	58	-	Cu	11-21 17	89-94 91	15	92	10
Sm	0.7-3.7 2.4	14.7-17.8 16.5	1.9	11	-	Zn	8-78 37	29-30 29	18	110	35
Eu	0.1-0.6 0.4	2.4-2.9 2.7	0.50	2.3	-	Ag	<PO* 0.03	<PO* 0.04	0.09	0.59	0.1
Тяжелые лантаноиды											
Y	4.5-21.6 14.8	73.7-87.9 81.9	8.6	44	-	Cd	0.01-0.19 0.12	0.25-0.29 0.27	0.24	1.10	10
Gd	1.1-3.7 2.3	13.5-16.3 15.1	2.6	16	-	Bi	0.06-0.92 0.24	0.07-0.08 0.07	0.84	4.3	0.2
Tb	0.15-0.63 0.37	2.14-2.55 2.38	0.32	2.0	-	Pb	0.8-31.6 9.5	4.1-4.9 4.6	6.6	38	15
Неметаллы-сульфофилы											
Dy	0.9-3.9 2.3	12.8-15.1 14.1	2.0	12	-	As	<PO* 1.8	<PO* 2.6	7.6	48	25
Ho	0.18-0.85 0.49	2.55-3.02 2.85	0.50	3.1	-	Sb	0.15-2.22 0.54	0.47-0.58 0.54	0.84	5.0	2
Er	0.50-2.54 1.49	7.69-9.17 8.51	0.85	4.6	-	Te	<PO* 0.07	<PO* 0.31	0.01	-	-
Элементы-сидерофилы											
Tm	0.07-0.39 0.21	1.10-1.32 1.22	0.31	1.8	-	Cr	4-24 15	74-78 76	15	82	18
Yb	0.48-2.67 0.42	7.43-8.80 8.21	1.00	5.5	0.9	Mn	29-171 81	955-1062 1019	100	550	150
Lu	0.07-0.42 0.22	1.12-1.33 1.24	0.19	1.1	-	Co	1.1-14.6 8.5	31.2-32.9 32.3	4.2	26	5
						Ni	9-27 19	66-67 67	9.0	53	10

* Содержание ниже пределов обнаружения элемента.

никами поступления материала выступали Восточный Саян, Верхоленская древняя возвышенность и Прибалтийское нагорье [12]. Эпигенетическое накопление элементов-примесей в углях происходит за счет концентрации элементов на восстановительных, окислительных и сорбционных барьерах, а также за счет гидротермальной деятельности [5].

Носителем лития, скорее всего, выступали глинистые минералы, также вероятными источниками элемента могли служить литийсодержащие рассолы Иркутского артезианского бассейна [13]. Y. Sun, J. Yang, C. Zhao [14] предложили в качестве минимально промышленного содержания Li в угле принять 80 г/т, экономически рентабельного – 120 г/т. В изученном высокозольном образце концентрации Li достигают 169 г/т.

Наиболее обогащены Tl, Sr, Ba угли пласта I, что, вероятно, связано с преобладающим карбонатным и сульфатным составом их минеральной части. Кроме того, в составе барита (пласта I) отмечено 2.56% оксида стронция. Согласно [15], минеральной формой скандия в углях, концентрации которого в изученных пробах значительно превышают угольный кларк, могут выступать циркон, фосфаты, карбонаты и глинистое вещество, а также элемент может концентрироваться в ОВ угля.

Вероятными носителями лантаноидов в углях выступают акцессорные минералы (монацит, циркон), глинистые минералы и органическое вещество [15]. Для углей Мугунского месторождения характерны минеральные включения циркона, апатита. В образцах 1-й пачки II пласта обнаружен монацит, который содержит до 12.72% Се, 7.32% La, 3.54% Nd. Можно предположить, что он выступает вероятным источником легких РЗЭ. В углях Азейского месторождения (Иркутский угольный бассейн), согласно С.С. Ильенку и С.И. Арбузову [16], РЗЭ склонны концентрироваться в пирокластическом материале.

Титан, вероятнее всего, концентрируется в ильмените и рутиле. В единичных пробах концентрации U в 3 раза превышают угольный кларк; локальные промышленно значимые концентрации урана ранее были отмечены в Черемховском месторождении Иркутского угольного бассейна [17]. Повышенные содержания Zr, Hf, Th, Sn и Ta в углях явно связаны с минеральным веществом в углях. Так, в углях I и II пластов обнаружили в качестве акцессорных минералов циркон и апатит. Кроме того, в Иркутской области находится ряд перспективных месторождений редких металлов [13]. Согласно карте геохимического районирования Иркутской области, изучаемая область относится к Восточно-сибирской литофильно-халькофильной геохимиче-

ской провинции, Предсаянской литофильной области [18].

Минералами-концентраторами Cu, Zn, Pb выступают сульфиды, причем помимо широко распространенного в углях пирита присутствуют халькопирит и сфалерит.

К токсичным при сжигании твердого топлива элементам для атмосферы, воды и почвы относятся сера, ртуть, мышьяк, бериллий и фтор при концентрациях 1–0.5; 300; 50 и 500 г/т в угле соответственно [19]. D.J. Swaine [20] предлагает к токсичным также относить селен и кадмий. Потенциально опасными считаются свинец, ванадий, никель, хром и марганец при концентрациях 50; 100; 100; 100 и 1000 г/т в угле соответственно [19]. Согласно полученным данным исследованных интервалов промышленных пластов углей, ни в одной из проанализированных проб количество определенных токсичных и потенциально токсичных элементов не достигает опасных концентраций.

На основании изложенных данных можно сделать выводы относительно концентраций и некоторых генетических особенностей элементов-примесей в углях Мугунского месторождения: минимально промышленного содержания, предложенных в [11], достигают Sr, Sc и Ti в углях и Sr, Ti в золах углей; литий аккумулируется в неорганическом веществе углей; его источником, вероятно, выступают глинистые минералы, содержания Li в углях и золе достигают минимально промышленных содержаний, предложенных в [14]. Угли 1-й пачки пласта II обогащены РЗЭ, но сумма La, Y, Yb, Ce и Sc не превышает 80.7 г/т. РЗЭ концентрируются в минералах-фосфатах (апатит, монацит) и силикатах. Высокие концентрации элементов-литофилов с переменной валентностью (Zr до 144 г/т, Th до 25 г/т, Ta до 2 г/т,) вероятнее всего, связаны с циркониевой минерализацией. Содержания Zn, Ag и Pb до 6 раз превышают кларковые значения; перечисленные металлы-сульфофилы концентрируются в сульфидах.

Таким образом, в связи с низкими содержаниями токсичных элементов угли не представляют экологической опасности для окружающей среды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования проведены в рамках государственного задания ИГ ФИЦКомИнЦУрО РАН и КарНЦ РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.В. Наставкину за ценные советы, Е.М. Тропникову, А.С. Парамонову, С.И. Исаенку за помощь в проведении аналитических

работ, Н.С. Ковальчук за консультации по статистической обработке геохимических данных, Г.А. Панфиловой за трудоемкое изготовление аншлифов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Щадов И.М.* // Изв. вузов. Горный журнал. 2010. № 5. С. 14.
2. Угольная база России. Том III. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири (южная часть) / Под ред. *В.Ф. Череповского*. М.: ООО "Геоинформцентр", 2002. 488 с.
3. *Светов С.А., Степанова А.В., Чаженгина С.Ю., Светова Е.Н., Михайлова А.И., Рыбникова З.П., Парамонов А.С., Утицина В.Л., Колодей В.С., Эхова М.В.* // Тр. КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 54. <https://doi.org/10.17076/geo140>
4. *Ketris M.P., Yudovich Y.E.* // Intern. J. Coal Geology. 2009. V. 78. P. 135. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>
5. Инструкция по изучению и оценке попутных твердых полезных ископаемых и компонентов при разведке месторождений угля и горючих сланцев. М.: Наука, 1987. 136 с.
6. Объяснительная записка к Государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1:1000000, Серия Ангаро-Енисейская, Лист N—48. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 574 с.
7. *Джумаян Н.Р., Наставкин А.В.* // ХТТ. 2019. № 4. С. 3. [SolidFuelChemistry, 2019. V. 53. № 4. P. 197. <https://doi.org/10.3103/S0361521919040050>]. <https://doi.org/10.1134/S0023117718040035>
8. *Ильенок С.С., Арбузов С.И.* // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 2. С. 6.
9. *Yan Z., Liu G., Sun R., Wu D., Wu B., Zhou C., Tang Q., Chen J.* // Geochem. J. 2014. V. 48. P. 331. <https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0309>
10. *Кизильштейн Л.Я.* Генезис серы в углях. Ростов н/Д: Изд-во Рост. гос. ун-та, 1975. 200 с.
11. *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>
12. *Тимофеев П.П.* Юрская угленосная формация Южной Сибири и условия ее образования. М.: Наука, 1970. 207 с.
13. *Быховский Л.З., Потанин Д.С., Чеботарева О.С.* // Минеральные ресурсы России. 2017. № 4. С. 28.
14. *Sun Y., Yang J., Zhao C.* // Energy exploration & Exploitation. 2012. V. 30. № 2. P. 167. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.30.2.167>
15. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Ценные элементы-примеси в углях. Екатеринбург: УрО РАН. 2006. 538 с.
16. *Ильенок С.С., Арбузов С.И.* // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 8. С. 132.
17. *Арбузов С.И., Рихванов Л.П., Ершов В.В.* // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2001. Т. 304. Вып 1. С. 130.
18. *Нечаева Е.Г.* Эколого-ландшафтно-геохимическое районирование // Атлас Иркутской области / Гл. ред. *А.Н. Антипов*. Иркутск: Ин-т географии СО РАН: Роскартография, 2004. С. 53.
19. Инструкция по изучению токсичных компонентов при разведке угольных и сланцевых месторождений. М.: 1982 г. 84 с.
20. *Swaine D.J.* // Fuel Proc. Technol. 2000. V. 65–66. P. 21. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(99\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(99)00073-9)