

УРОВНИ СОДЕРЖАНИЙ ПРОМЫШЛЕННО ЦЕННЫХ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В УГЛЯХ

© 2019 г. В. И. Вялов^{1,2,3,*}, А. В. Наставкин^{3,**}

¹ ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского, 199106 Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991 Москва, Россия

³ ФГАОУ ВО Южный федеральный университет, 344006 Ростов-на-Дону, Россия

*e-mail: vladimir_vyalov@vsegei.ru

**e-mail: nastavkin@sfedu.ru

Поступила в редакцию 20.11.2018 г.

После доработки 04.02.2019 г.

Принята к публикации 03.06.2019 г.

Изучены уровни концентраций ценных (редких, редкоземельных, благородных, цветных, радиоактивных и др.) металлов в углях для предварительной оценки их возможной промышленной значимости. С учетом близости состава минеральной матрицы углей или угольной золы к макроэлементному составу промышленных типов руд (силикатных, сульфидных, россыпных) предложено использовать для указанной оценки микроэлементов углей минимальные промышленные содержания элементов в этих рудах.

Ключевые слова: уголь, микроэлементы, ценные металлы, попутные компоненты, концентрации, минимальные промышленные содержания

DOI: 10.1134/S0023117719050116

Известно [1], что ископаемые угли содержат различные микроэлементы (или малые элементы, элементы-примеси — редкие, редкоземельные, благородные, цветные, радиоактивные металлы и др.), иногда достигающие высоких концентраций в угольных месторождениях России и Мира, поэтому уголь следует рассматривать как экономический источник стратегически важных элементов, таких, как Ge, Ga, U, V, Se, лантаноиды, Y, Sc, Nb, Au, Ag, Re, а также Al и Mg. Извлечение и использование этих элементов из угля может дать ряд преимуществ, которые сделают этот источник экономически и экологически привлекательным вариантом для стран-потребителей угля: Китая, США, России, Индии и других стран [2]. Учитывая ценность целого ряда металлов для различных отраслей промышленности, их можно назвать, согласно [3, 4], потенциально ценными микроэлементами, поскольку в России из углей сейчас добывается только германий на Павловском месторождении в Приморье.

Оценка уровня концентраций в углях производится путем сравнения их с кларками в земной коре, а в последнее время — с так называемыми угольными кларками [1]. Сопоставление с угольными кларками позволяет сравнить концентрации тех или иных металлов изучаемых углей кон-

кретного угольного объекта в геохимическом аспекте и определить по выявленному набору элементов и их содержаниям ту или иную геохимическую специализацию углей регионов. Так, угли ряда месторождений Сибири отчетливо обогащены по сравнению с угольным кларком [1] литофильными элементами (Zr, Hf, Nb, Y, лантаноидами, Ba, Sr и Be) и некоторыми элементами сидерофилами (Sc, Fe, Cr, Ni, Co) [5]. Оценивая кларковыми концентрациями, невозможно установить, могут ли представлять содержания тех или иных ценных металлов в углях (бурых, каменных, антрацитах; углях разных технологических марок, групп и подгрупп, по [6]) промышленный интерес.

При геологоразведочных работах необходимо определить уровни промышленных концентраций ценных элементов (Ge, Ga, Sc, Y, Mo, V, U, Au, Ag, металлов платиновой группы и др.), для которых существуют технологии или патентные решения по их извлечению из углей или продуктов их переработки, и провести оценку их ресурсов. В методических рекомендациях Министерства природных ресурсов Российской Федерации отмечается, что попутные компоненты, к которым относят ценные металлы (германий, галлий, скандий, редкоземельные элементы, уран, вана-

Таблица. Уровни содержаний промышленноценных микроэлементов в углях, г/т

Микро-эле-мент	Уровни содержаний, г/т				Предлагаемые минимальные промышленные содержания элементов в углях или золах углей	
	по [9]		по [10]			по [11–22]
	уголь	уголь	зола	содержания в промышленных типах алюмосиликатных и других руд		
Be	50	5	20	BeO: 100–320 г/т и выше	BeO: 100 г/т, на Be – 36 г/т (в золе углей), 7.2 г/т в угле при зольности 20%	
Sc	–	10	50	Среднее в коренных месторождениях – 10.39 г/т (72.65 г/т – в бокситах, 0.15 г/т – в оловянных рудах); 4.63 г/м ³ – в циркон-рутил-ильменитовых россыпных рудах	5–10 г/т в угле	
Ti	–	1500	7500	Россыпные, кварцевые пески с титаном и цирконием – содержание диоксида титана 0.81 кг/м ³ , или 3240 г/т	Ti: 1944 г/т – в золе, 195–390 г/т – в угле при зольности 10–20%	
V	100	100	500	V ₂ O ₅ : 400–1200 г/т (в бокситах)	V ₂ O ₅ : 400 г/т в золе, на V – 224 г/т, в угле 22–45 г/т при зольности 10–20%	
Cu	100	100	500	100 г/т – в комплексных молибден-вольфрамовых типах, 400 г/т – в медно-молибденовых	100 г/т – в золе, 10–20 г/т в угле при зольности 10–20%	
Zn	100	400	2000	500 г/т – в оловянных типах руд, 1100 г/т – в молибденовых (в прочих комплексных)	500 г/т – в золе, 50–100 г/т в угле при зольности 10–20%	
Ga	20	20	100	19.08–24.45–53.16 г/т (нефелиновые–апатит-нефелиновые руды–бокситы); свинцово-цинковые – 6.95 г/т	50 г/т в золе, 5–10 г/т в угле при зольности 10–20%	
Ge	10	30	150	50 г/т – бортовое и минимальное промышленное, 124 г/т – среднее в германиеносных бурых углях Приморья	50 г/т в буром угле; возможно снижение до 10 г/т	
As	300	–	–	0.21% – в комплексных медно-колчеданных рудах	3 г/т – в коксующихся углях 210–420 г/т в угле при зольности 10–20%	
Se	50	1	5	От 0.59 г/т в свинцово-цинковых до 69.45 г/т в полиметаллических типах, в среднем 55.44 г/т по 57 месторождениям РФ	0.59–55.44 г/т в золе	
Rb	100	35	175	Rb ₂ O в апатит-нефелиновых рудах 91.9 г/т, в нефелиновых 78.1 г/т	Rb: 71.4 г/т в золе, 7 г/т в угле при зольности 10%	
Sr	1000	400	2000	Оксид стронция в лопаритовых рудах – 800 г/т	Sr: 675 г/т в золе, 67.5–132 г/т в угле при зольности 10–20%	
Y+ PЗЭ	500(сумма PЗЭ+Y+Sc)	–	–	ΣTR ₂ O ₃ : 400 г/т (песчаники лейкоксен-кварцевые нефтесодержащие)	ΣTR ₂ O ₃ : 400 г/т в золе, на TR ≈ 340 г/т; 34–68 г/т в угле при зольности 10–20%	
Zr	500	120	600	ZrO ₂ : 900 г/т – пироклоровые	ZrO ₂ : 900 г/т (в золе), на Zr – 670 г/т в золе; на уголь – 67–134 г/т при зольности 10–20%	
Nb	100	10	50	Nb ₂ O ₅ : 100–3700 (1700 в среднем) г/т	Nb ₂ O ₅ : 100 г/т, на Nb – 70 г/т в золе, в угле 7–14 г/т при зольности 10–20%	
Mo	100	6	30	100 г/т – штокверковые руды с попутным молибденом	100 г/т в золе, 10–20 г/т в угле при зольности 10–20%	
Ag	2	1	5	Комплексные серебросодержащие: медно-молибденовый тип руд 0.2 г/т; вольфрамовый 1.0 г/т; молибденовый 2.9 г/т и т.д.; медистые песчаники и сланцы – 10 г/т	0.2–10 г/т в золе	
Cd	10	1	5	В медно-колчеданных типах руд от 10 до 400 г/т, в среднем 50 г/т	10 г/т в золе, 1–2 г/т в угле при зольности 10–20%	
In	10	0.2	1	Россыпные оловянные: 0.1 г/м ³	0.04 г/т в золе	

Таблица. Окончание

Микроэлемент	Уровни содержаний, г/т				Предлагаемые минимальные промышленные содержания элементов в углях или золах углей
	по [9]	по [10]		по [11–22]	
	уголь	уголь	зола	содержания в промышленных типах алюмосиликатных и других руд	
Sn	50	20	100	0.02% в жилах и зонах редкометалльных амазонитовых гранитов	200 г/т в золе, 20–40 г/т в угле при зольности 10–20%
Sb	300	30	150	30 г/т (полиметаллические) сурьмяные – 3.68%	30 г/т в золе, 3–6 г/т угле при зольности 10–20%
Te	–	1	5	3.04 г/т в сульфидных медно-никелевых, 1.04 в ванадиево-железо-медных, разрабатываемых на другие компоненты	1 г/т в золе
Cs	100	30	150	Cs ₂ O: 0.9 г/т (апатит-нефелиновые), 22.84 г/т – среднее по разным типам руд. Среднее 2.46 г/т – в рудах, разрабатываемых на другие компоненты	Cs: 2.5 г/т в угле
Hf	–	5	25	Оксид гафния 67.14 г/т (циркон-рутил-ильменитовые россыпи в песках)	Hf: 23 г/т в золе, 2.3–4.6 г/т в угле при зольности 10–20%
W	50	30	150	WO ₃ : в россыпных месторождениях – 94.028 г/м ³ (75 г/м ³ на W)	W – 35 г/т в золе, 3,5 – 7 г/т в угле при зольности 10–20%
Re	1	0.1	0.5	0.045 г/т – разрабатываемые на другие компоненты (молибденовые), 0.008 г/т – нераспределенный фонд (молибденовые), 0.197 г/т – разведываемые	0.045 г/т в золе
Pt-Pd	–	0.005	0.025	0.029 г/м ³ (Au–Pt россыпи), 0.008 г/м ³ (золотоносные с платиной)	0.015 г/т в золе
Au	0.1	0.02	0.1	0.7 г/м ³ – россыпные для открытой разработки, дражный способ – 0.286 г/м ³ ; гидравлический – 0.253 г/м ³	0.1 г/т в золе
Hg	0.5–1	1	5	Комплексные Hg-содержащие 58–25 г/т (подготавливаемые к освоению). В медно-колчеданных 19.34 г/т, в медно-цинковых рудах 34.9 г/т, в серно-колчеданных 11.65 г/т, в медных вкрапленных рудах 2.8 г/т	0.28–0.56 г/т в угле, 2,8 – 5,6 г/т на золу при зольности 10–20%
Tl	10	1	5	8.26 г/т в медно-колчеданных рудах	1.7 г/т в угле при зольности 20%
Pb	50	240	1200	900 г/т в молибденовых	90–180 г/т в угле при зольности 10–20%
Bi	20	1	5	30 г/т в медно-колчеданных типах	30 г/т в золе, 3 – 6 г/т в угле при зольности 10–20%
U	–	–	1000	100 г/т (бортовое); от 390 до 1760 г/т. 93.95 г/м ³ – россыпные месторождения	100–390 г/т в золе. 10–39 г/т в угле при зольности 10%. Возможно до 50 г/т в золе.

дий, рений и др.), в углях могут иметь промышленное значение лишь в случае, если степень их концентрации в продуктах обогащения и других процессов переработки, а также технология последующей переработки данных продуктов обеспечивают извлечение этих компонентов по технико-экономическим показателям [7, 8]. Но уровни концентраций ценных элементов, при которых они должны изучаться и могут представлять промышленный интерес, в указанных мето-

дических рекомендациях не приводятся, за исключением германия.

Согласно [9], промышленное значение в углях имеют германий и уран. Запасы этих элементов при содержаниях, соответствующих кондициям, должны подсчитываться и утверждаться в установленном порядке. Одновременно при необходимости (при наличии и совместном извлечении с германием или ураном) должны подсчитываться запасы галлия, свинца, цинка, молибдена, се-

лена. Отмечено, что имеются предпосылки для выявления повышенных (потенциально пригодных для извлечения) концентраций золота, серебра и платиноидов, ванадия, хрома, никеля (в комплексе), вольфрама, бора, ртути. Эти элементы рассматриваются как потенциально ценные. Количественная оценка должна обязательно проводиться в углях (горючих сланцах) в пластах с рабочей мощностью, а при наличии положительных предпосылок в пластах с некондиционными (по мощности или качеству) параметрами, а также в углистых породах, которые при высоких концентрациях ценных компонентов могут иметь промышленное значение как комплексное сырье [9].

В [10] даны минимальные содержания малых элементов (в углях и золах углей, г/т), определяющие возможную промышленную значимость товарных энергетических углей и продуктов их обогащения как источников рудного сырья, а также представлены элементы и их содержания в углях и золах углей (см. таблицу).

В данной статье предлагается следующий подход и обоснование для предварительной промышленной оценки редких, цветных, благородных элементов в углях: если эти элементы имеют в углях концентрации, достигающие или превышающие так называемые минимальные промышленные содержания тех или иных элементов в специальных типах промышленных руд, тогда они должны учитываться, подлежать количественной оценке и, соответственно, их ресурсы должны быть обязательно оценены и учтены. Минимальные промышленные концентрации ценных металлов представлены в [11–22]. Минимальные промышленные содержания тех или иных элементов в промышленных рудах следует использовать с определенными ограничениями: учитывать только руды, которые близки по составу основным компонентам минеральной матрице углей (или основных окислов в золе углей), и, соответственно, уровни концентраций элементов, которые в них входят. Минеральная матрица углей, как известно, состоит в основном из глинистых минералов, кварца, карбонатов, сульфидов (и в очень малых количествах – рутила, монацита и др.) [6, 23]. В золах углей – это оксиды макроэлементов (Si, Al, Ca, Fe, Na, S...) – кварц, соединения алюминия, кальция, железа, натрия. Таким образом, следует рассматривать содержания микроэлементов в силикатных, алюмосиликатных рудах, сульфидных рудах (в углях часто отмечаются высокие содержания сульфидов), а также в россыпных осадочных рудах. Только в исключительных случаях можно привлечь данные по концентрациям металлов в иных типах промышленных руд. Таким образом, при выборе концентраций для предварительной оценки промышленной значимости микроэлементов в углях или

золах углей, надо ориентироваться на промышленный уровень концентраций, который обусловлен как технологически, так и экономически.

В статье акцентируется внимание на исключительно промышленной оценке микроэлементов в углях как ценных и потенциально ценных (полезных и необходимых) для отраслей промышленности, потому что для них существуют пороговые уровни минимальных промышленных концентраций в рудах и они из этих руд извлекаются. Добавлен уран, Hf, Te и даны их “критические” для промышленной оценки значения содержания в золах или углях; предложены оценочные концентрации по Sc, Y, Yb, As, Ti. Выведены из оценки Ba, B, Co, Cr, Li, Mn, Ni, Ta – их содержания в углях или золах значительно ниже минимальных промышленных концентраций в рудах, а также F и Ce (он учитывается в сумме редкоземельных элементов).

В качестве критерия предварительной количественной оценки и учета предлагаются существенно иные, в отличие от [9], уровни концентраций. В таблице представлены микроэлементы с минимальными промышленными содержаниями для предварительной оценки возможной промышленной значимости тех или иных ценных металлов в углях и их золах. В ряде случаев проведен пересчет концентраций из окисной в свободную форму элемента, а также из объемных концентраций с учетом удельного веса россыпных осадочных руд.

Следует отметить, что в [9] даются концентрации в угле, без указания зольности угля. В данной статье (таблица) приведена концентрация микроэлемента в угле при определенной зольности. Основным отличием данных таблицы от данных [9] является существенное уменьшение уровней критических промышленных значений концентраций элементов в углях для оценки. Для углей с 20%-ной зольностью концентрация Be уменьшена в 7 раз, V – 4.5, Bi – 3.3, W – 7, Ga – 4, Au – 5, Cd – 5, La – 5, Cu – 5, Mo – 5, Nb – 7, Rb – 7, Zr – 3.7, Hg – 2, Sr – 7.5, Se – 5, Tl – 6 раз; P3Э + Y – уменьшены в 7 раз. Для Cs эти концентрации уменьшены в 40 раз, для In в 200, для Re – в 100, а Sb – в 50. Следует отметить, что те низкие или крайне низкие цифры концентраций, приведенные по отдельным элементам, относятся преимущественно к комплексным рудам и рассеянным элементам. По Ge и Pb оценочные промышленные концентрации в углях, наоборот, увеличены до 5 и 3.5 раз соответственно. Для Ge это связано с принятым уровнем бортового содержания в бурых углях 50 г/т. Примерно совпадают с [9] только концентрации по Zn, Sn, Ag, и Ge в коксующихся углях (3 г/т), а с [10] – Au, Pt–Pd.

С помощью современных инструментальных методов, например, масс-спектрометрии и др. в рудах и твердых горючих ископаемых можно про-

водить точную количественную оценку комплекса ценных металлов, в том числе Pt, Pd, Re и многих других, и получать многочисленные новые количественные данные по концентрациям элементов.

Описанный методический подход к оценке промышленно ценных микроэлементов в углях использовался при исследовании металлонности и геолого-экономической оценке углей Дальневосточного федерального округа России и ресурсов заключенных в них ценных металлов [24–26]. В данной статье этот подход предлагается для дальнейшего применения в практике научных и геологоразведочных работ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-17-00004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. Екатеринбург: Наука УрО РАН, 2006. 538 с. ISBN 5-7691-1698-6.
2. Dai S., Finkelman R.B. // Intern. J. Coal Geology. 2018. V. 186. P. 155. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.06.005>
3. Шпирт М.Я. // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Днепропетровск: Изд-е “Частное предприятие Научно-производственная внедренческая компания Триакон”. 2012. № 1 (9). С. 42.
4. Шпирт М.Я., Рашевский В.В. Микроэлементы горючих ископаемых. М.: Изд-во “Кучково поле”. 2010. 383 с. (Библиотека горного инженера. Т. 5. Кн. 4). ISBN 978-5-9950009-1-4.
5. Арбузов С.И. // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2007. Т. 311. № 1. С. 77.
6. Вялов В.И., Волкова И.Б., Беленицкая Г.А., Петров О.В., Волков В.Н., Волкова Г.М., Голицын М.В., Гуревич А.Б., Богомазов В.М., Гинзбург А.И., Кизильштейн Л.Я., Гальчиков В.В., Золотов А.П., Игнатьев Г.А., Косинский В.А., Коломенская В.Г., Молозина Т.Н., Парпарова Г.М., Пронина Н.В., Соколова Г.В., Щербакова С.В. Петрологический атлас ископаемого органического вещества. С.-Пб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. 604 с. ISBN5-93761-089-X.
7. Методические рекомендации по комплексному изучению месторождений и подсчету запасов попутных полезных ископаемых и компонентов. М: ФГУ Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых (ФГУ ГКЗ), 2007. 15 с.
8. Методические рекомендации по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Угли и горючие сланцы. М.: ФГУ Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых (ФГУ ГКЗ), 2007. 34 с.
9. Инструкция по изучению и оценке попутных твердых полезных ископаемых и компонентов при разведке месторождений угля и горючих сланцев. М.: Изд-во Наука, 1987. 136 с.
10. Ценные и токсичные элементы в товарных углях России: Справочник / Жаров Ю.Н., Мейтов Е.С., Шарова И.Г. М.: Изд-во “Недра”, 1996. 238 с.
11. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 4. Ванадий. М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2006. 34 с.
12. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 15. Вольфрам. М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2006. 112 с.
13. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 29. Том VII. Часть 7. Золото. М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2006. 94 с.
14. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 16. Молибден. М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2006. 52 с.
15. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 31. Платиноиды. М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2006. 140 с.
16. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 28. Рассеянные элементы. М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2006. 414 с.
17. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 26. Редкоземельные металлы. М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2006. 38 с.
18. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 20. Ртуть. М.: 2006 ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2006. 30 с.
19. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 30. Серебро. М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2006. 264 с.
20. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 19. Сурьма. М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2006. 22 с.
21. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 25. Цирконий. М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2006. 42 с.
22. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 33. Уран. М.: ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 2008. 42 с.
23. Гамов М.И., Наставкин А.В., Вялов В.И. // Горный информ.-анал. бюл. 2016. № 1. С. 10.
24. Вялов В.И., Ларичев А.И., Кузеванова Е.В., Богомолов А.Х., Гамов М.И. // Региональная геология и металлогения. 2012. № 51. С. 96.
25. Неженский И.А., Вялов В.И., Мирхалевская Н.В., Чернышев А.А. // Региональная геология и металлогения. 2013. № 54. С. 98.
26. Вялов В.И., Неженский И.А., Балахонова А.С., Шишов Е.П. // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 18.