УДК 622.33:550.4:552.57.58

С.А. Силютин

О МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВАХ УГЛЕЙ

В настоящее время не существует методов количественного разделения углей и других ТГИ на составляющие их органические и минеральные вещества с количественным извлечением в эти продукты МЭ, содержащихся в исходном образце. Наиболее распространено применение сепарация на фракции различной плотности, при которой чем меньше плотность и соответственно зольность фракции, тем выше содержание в ней органических веществ. Экспериментальные данные изучения бурого угля Нижне-Илийского месторождения (Казахстан) показали, что количества МЭ (Au, Ag, Re и др.) сосредоточенных в органических и минеральных веществах изменяются в широких пределах для проб угля, отобранных в различных точках одного месторождения. Например, концентраторами серебра по двум пробам следует считать наиболее тяжелую фракцию более 1,7 г/см^3 и так же по двум пробам средней плотности (1,4—1,7 г/см^3), а его носителями по четырем пробам фракции с плотностью 1,4—1,7 г/см^3 и по одной пробе с плотностью более 1,7 г/см^3. Не одинаковая приуроченность МЭ к органическим или минеральным веществам в различных пробах одного месторождения выявлена для всех изученных МЭ (Au, Re, Mo, Cd, Ag). Обоснованный вывод о количественном распределении МЭ в органических и минеральных веществах углей, может быть сделан даже для одного месторождения только по результатам изучения нескольких проб, отобранных в разных точках этого месторождения.

Ключевые слова: микроэлементы, распределение, органические, минеральные вещества, различное, месторождение.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-148-155

Величины количеств микроэлемента (его приуроченность) к органическим или минеральным веществам твердых горючих ископаемых (ТГИ) представляют значительный интерес как для выявления геохимических закономерностей накопления МЭ, так и для выбора технологий их переработки (обогащения, сжигания и др.) с целью сокращения поступления в окружающую среду потенциально токсичных микроэлементов (ПТЭ), либо получения попутных побочных продуктов с повышенным содержанием потенциально ценных элементов (ПЦЭ).

Для оценки распределения тех или иных микроэлементов между минеральными и органическими веществами ископаемых углей используют обычно разделение углей на фракции различной плотности. Подобная сепарация не позволяет полностью отделить минеральные вещества углей от органических [1, 2], но справедливо считается, что чем меньше зольность фракции, тем выше в нем содержание органических веществ.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 2. С. 148–155.
© С.А. Силютин. 2018.

Как известно, сепарация углей на фракции различной плотности используют в промышленном масштабе для получения концентрата, а также так называемого промежуточного продукта и наиболее тяжелой высокозольной фракции (отходов). Плотность концентрата составляет обычно от < 1,3 до 1,5 г/см^3, промпродукта 1,5—1,8 г/см^3, а отходов > 1,8 г/см^3.

Оценка приуроченности *i*-го элемента к той или иной *g*-фракции основывается на двух параметрах: приведенного (относительного) содержания *i*-го элемента в той или иной фракции (Y_i^g) и извлечение *i*-го элемента в *g*-ю фракцию (U_i^g), рассчитываемые по соотношениям (1) и (2):

$$Y_i^g = C_i^g / C_i^o \quad (1)$$

$$U_i^g = Y_i^g * \gamma^g \quad (2)$$

где C_i^o и C_i^g — содержание *i*-го элемента в исходном угле и в *g*-ой фракции угля; γ^g — выход *g*-ой фракции.

Относительное содержание МЭ в конкретной *g*-фракции (Y_i^g) обычно измеряется в относительных единицах, а извлечение МЭ в эту фракцию (U_i^g) в относительных единицах или % масс., в зависимости от единиц измерения выхода фракции (γ^g). Считается, что фракция является концентратором микроэлемента, если (Y_i^g) ≥ ≥ 1,0. При (U_i^g) ≥ 50% или ≥ 0,5 *g*-фракцию называют носителем рассматриваемого *i*-го микроэлемента [3].

Прямые методы определения содержаний органических ($M_{орг}$) или минеральных (M_{min}) веществ не разработаны. Очевидно, что сумма органических и минеральных веществ составляет всю массу изучаемого угля, т.е. ($M_{орг}$) + (M_{min}) = = 100. Для оценки величины ($M_{орг}$) можно применять соотношение (3) или с большей точностью (4):

$$(M_{орг}) = 100 - A^d \quad (3)$$

$$(M_{орг}) = 100 - f*A^d \quad (4)$$

где A^d — зольность образца на сухое состояние, % масс.; *f* — коэффициент, изменяющийся в пределах от 1,1 до 1,5 в зависимости о состава минеральных веществ.

Если в изучаемом образце в минеральном веществе преобладают минералы глин, применяют *f* = 1,13. В случаях неизвестного состава минеральных веществ используют *f* = 1,12. Отличия величин ($M_{орг}$) рассчитываемых по (3) или (4), очевидно, возрастают с увеличением значений зольности (A^d), и особенно существенны при (A^d) ≥ 50%.

Расчет извлечения в *g*-ю фракцию органических ($U_{орг}^g$) и минеральных (U_{min}^g) веществ по отношению к их количеству в исходном угле рассчитывается по соотношениям (5), (6) и (7):

$$U_{min}^g = A^d g * \gamma^g / M_{min}^o \quad (5)$$

$$U_{min}^g = f*A^d g * \gamma^g / M_{min}^o \quad (6)$$

$$U_{орг}^g = (100 - M_{min}^g) * \gamma^g / M_{орг}^o \quad (7)$$

где (M_{min}^o) и (M_{min}^g) — содержание минеральных веществ (% масс.), соответственно, в исходном угле и его *g*-ой фракции, равные по величине (A^d_g) или ($f*A^d_g$); ($M_{орг}^o$) и ($M_{орг}^g$) — содержание (% масс.), соответственно, органических веществ в исходном углей и его *g*-ой фракции по (3) или (4); (γ^g) — выход *g*-ой фракции (отн. ед.).

Результаты расчета содержания минеральных веществ в табл. 1 и табл. 3 и проводились по зависимости (6) и величине *f* = 1,12, а в табл. 5, табл. 6 и табл. 7 — по соотношению (5). Необходимо отметить, что содержание органических веществ по зависимости (6) и (7) по сравнению с соотношением (5) всегда меньше, но относительные ошибки для диапазона зольности от 13% до 40% изменяется в пределах от 2% до 8%, т.е. ниже погрешности определения Au, Ag, Cd, Mo и Re и др. МЭ, составляющих не менее ±10%.

Таблица 1

Распределение золота (Au) между фракциями различной плотности бурого угля Нижне-Илийского месторождения

Характеристики распределения золота по фракциям различной плотностям	Плотность фракций, г/см³										
	< 1,7	1,7—1,95	> 1,95	< 1,7	1,7—1,95	> 1,95	< 1,52	1,52—1,8	1,8—1,9	1,52—1,9	> 1,9
Содержание золота в пробе, г/т	0,172			0,0826			0,087			0,087	
Зольность (A^d) пробы, % масс.	36,0			40,6			36,9			36,9	
Содержание органических веществ в пробе ($M_{орг}^o$), % масс.	59,7			54,6			58,7			58,7	
Приведенное содержание золота (Y_g), отн. ед.	0,46	1,31	1,74	0,414	1,28	1,25	0,2	1,73	2,04	1,9	1,24
Извлечение золота в g-ю фракцию (U_g), % масс.	19,8	49,8	21,9	13,2	64,7	21,9	8,0	36,0	24,8	60,8	31,0
Выход g-ой фракции (γ_g), отн. ед.	0,43	0,381	0,16	0,322	0,504	0,174	0,422	0,207	0,12	0,327	0,252
Зольность g-ой фракции (A^d_g) пробы, % масс.	23,6	42,0	65,1	21,9	41,0	73,8	14,2	24,8	45,4	32,4	80,8
Извлечение органических веществ ($U_{орг}^g$) в g-ю фракцию (% масс.)	53	33,5	7,3	44,7	502	0,055	0,614	0,258	0,102	0,367	0,04

Таблица 2

Распределение серебра (Ag) между фракциями различной плотности бурого угля Нижне-Илийского месторождения

Характеристики распределения серебра по фракциям различной плотности	Плотность фракций, г/см³											
	< 1,4	1,4—1,7	> 1,7	< 1,48	1,48—1,7	> 1,7	< 1,6	1,6—1,7	> 1,7	< 1,45	1,45—1,7	> 1,7
Содержание серебра в пробе, г/т	8,9			31,6			20,1			51,9		
Приведенное содержание серебра (Y_g), в g-ой фракции отн. ед.	0,45	1,12	0,45	0,73	0,95	1,36	0,5	0,75	1,49	0,13	1,25	0,48
Извлечение серебра в g-ю фракцию (U_g), % масс.	2,0	91,6	6,0	5,0	77,0	0,18	1,0	47,0	53,0	1,0	88,0	11,0
Выход g-ой фракции (γ_g), отн. ед.	0,04	0,82	0,13	0,068	0,81	0,13	0,02	0,63	0,36	0,08	0,7	0,23
Извлечение органических веществ ($U_{орг}^g$) в g-ю фракцию (% масс.)	5,0	88,0	8,0	7,0	85,0	8,0	3,0	69,0	28,0	Н.д.	Н.д.	Н.д.
Извлечение минеральных веществ (U_{min}^g) в g-ую фракцию (% масс.)	3,0	54,0	43,0	3,0	59,0	38,0	1,0	45,0	54,0	Н.д.	Н.д.	Н.д.

Таблица 3

Распределение рения (Re) между фракциями различной плотности бурого угля Нижне-Илийского месторождения

Характеристики распределения рения по фракциям различной плотности	Плотность фракций, г/см^3													
	< 1,45	1,45—1,55	> 1,55	< 1,45	1,45—1,55	> 1,55	< 1,45	1,45—1,59	> 1,59	< 1,45	1,45—1,59	> 1,59	< 1,6	> 1,6
Содержание рения в пробе, г/т	3,52			40,6			4,75			16,7			1,67	
Приведенное содержание рения (Y_g), отн. ед.	0,38	0,99	1,43	0,59	1,17	0,81	0,89	1,16	0,95	1,11	1,2	0,61	2,9	0,87
Извлечение рения в g-ю фракцию (U_g), % масс.	12,0	40,0	48,0	4,0	67,0	29,0	24,0	27,0	49,0	12,5	64,0	24,0	18,0	82,0
Выход g-ой фракции (γ_g), отн. ед.	0,316	0,35	0,34	0,068	0,574	0,358	0,27	0,23	0,52	0,11	0,53	0,39	0,06	0,94
Извлечение органических веществ (U_{opr}^{g}) в g-ую фракцию (% масс.)	7,9	16,2	47,7	6,6	8,78	22,1	9,0	13,3	60,4	7,9	14,8	40,0	11,6	27,1
Извлечение минеральных веществ (U_{min}^{g}) в g-ую фракцию (% масс.)	38,6	38,4	21,2	7,4	60,8	31,6	41,2	33,3	28,6	10,0	62,8	29,5	5,4	92,6

Таблица 4

Распределение молибдена (Mo) между фракциями различной плотности бурого угля Нижне-Илийского месторождения

Характеристики распределения молибдена по фракциям различной плотности	Плотность фракций, г/см³											
	< 1,4	1,4—1,7	> 1,7	< 1,48	1,48—1,7	> 1,7	< 1,6	1,6—1,7	> 1,7	< 1,7	1,7—1,9	> 1,9
Содержание молибдена в пробе, г/т	201			1026			269			51		
Приведенное содержание молибдена (Y_g), отн. ед.	1,89	0,99	0,7	0,78	0,57	1,27	1,42	1,15	0,7	1,37	0,78	1,76
Извлечение молибдена в g-ю фракцию (U_g), % масс.	9,0	84,0	1,0	5,0	78,0	16,0	3,0	72,0	25,0	4,0	60,0	36,0
Выход g-ой фракции (γ_g), отн. ед.	0,05	0,91	0,01	0,06	0,8	0,13	0,02	0,63	0,36	0,03	0,77	0,2
Извлечение органических веществ ($M_{орг}^g$) в g-ую фракцию (% масс.)	5,0	88,0	7,0	7,0	85,0	8,0	3,0	69,0	28,0	4,0	81,0	15,0

Таблица 5

Распределение кадмия (Cd) между фракциями различной плотности бурого угля Нижне-Илийского месторождения

Характеристики распределения кадмия по фракциям различной плотности	Плотность фракций, г/см³											
	<1,48	1,48—1,7	>1,7	< 1,6	1,6—1,7	> 1,7	< 1,7	1,7—1,9	> 1,9	< 1,45	1,45—1,7	> 1,7
Содержание кадмия в пробе, г/т	5,5			13,1			5,2			21,5		
Приведенное содержание кадмия (Y_g), отн. ед.	0,5	0,9	1,81	0,76	1,14	0,76	1,33	0,76	1,52	0,7	0,79	1,77
Извлечение кадмия в g-ю фракцию (U_g), % масс.	4,0	73,0	24,0	2,0	71,0	27,0	4,0	52,0	44,0	5,0	55,0	40,0
Выход g-ой фракции (γ_g), отн. ед.	0,08	0,81	0,13	0,026	0,62	0,36	0,03	0,68	0,29	0,07	0,7	0,22

Установлено, что содержания МЭ могут существенно отличаться в пробах, отобранных из одного месторождения и даже из одного пласта [2—8]. В данной статье впервые предпринята попытка оценить приуроченность МЭ к органическим или минеральным веществам в различных пробах одного месторождения.

Распределения Au (табл. 1), Ag (табл. 2), Re (табл. 3), Mo (табл. 4), Cd (табл. 5) нижне-илийского угля (Казахстан) существенно отличаются в пробах, отобранных в различных точках этого месторождения. Так пробы, имевшие примерно одинаковую зольность (табл. 1), отобранные для изучения распределения золота в зависимости от плотности фракций, по качественным показателям были близки. Во всех пробах концентраторами Au были фракции с плотностью более 1,9 г/см^3 при Y_i = 1,25—1,74. Однако, количественно распределения Au во фракциях, отличающихся по плотности, неодинаковы. Так, при Y_i^g < 1, его извлечение (U_i^g) во фракции < 1,52 г/см^3 или 1,7 г/см^3 изменялись от 0,07 до 0,414.

В то же время, в угле этого месторождения распределение золота между органическими и минеральными веществами значительно отличается от такового для бурого угля Сибири [4], в котором его подавляющее количество (94%) сосредоточено в наиболее легких фракциях с наибольшим содержанием органических веществ (≥ 85%).

Показатели распределения других изученных МЭ в веществах различных проб нижне-илийского угля отличается не только количественно, но и качественно. Так, концентраторами серебра по двум пробам следует считать наиболее тяжелую фракцию более 1,7 г/см^3 при Y_i = 1,36—1,49, а так же по двум пробам средней плотности (1,4—1,7 г/см^3), имеющих Y_i = 1,12—1,25. В то же время, носителем серебра следует считать фракцию с плотностью 1,4—1,7 г/см^3 и U_i^g = 77—91,6%, и только по одной пробе с плотностью более 1,7 г/см^3 и U_i^g = 53% с извлечением в них органических веществ 69—88% (табл. 2).

Распределение рения во фракциях одной плотности так же не одинаково в различных пробах этого бурого угля. Его концентраторами по двум пробам является фракция с плотностью 1,45—1,59 г/см^3 при Y_i = 1,16—1,17, по двум пробам с плотностью более 1,55 г/см^3 при Y_i = 1,43 или даже менее 1,45 г/см^3 при Y_i = 1,11 и < 1,6 г/см^3 при Y_i = 2,9.

Для молибдена по трем пробам концентраторы — фракции с плотностью более 1,7 г/см^3 или даже < 1,6 г/см^3 (одна проба). Однако носителями следует считать фракции плотностью 1,4—1,7 г/см^3, или 1,7—1,9 г/см^3 (табл. 4).

Для кадмия так же по большинству изученных проб (табл. 5) концентраторами являются фракции с плотностью более 1,7 г/см^3, и только по одной пробе средние и легкие фракции менее 1,7 г/см^3.

Следовательно, достаточно обоснованный вывод о количественном распределении МЭ между фракциями различной плотности, т.е. по количественной оценке его сосредоточения в органических или минеральных веществах углей, может быть сделан даже для одного месторождения только по результатам изучения нескольких проб, отобранных в разных точках этого месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юровский А.З.*, Минеральные компоненты углей. — М.: Недра, 1968. — 214 с.

2. *Шпирт М.Я.*, *Клер В.Р.*, *Перциков И.З.* Неорганические компоненты твердых топлив. — М.: Химия, 1990. — 248 с.

3. *Шпирт М.Я.* Безотходная технология. Утилизация отходов добычи и переработки твердых горючих ископаемых. — М.: Недра, 1986. — 255 с.
4. *Арбузов С.И.*, *Ершов В.В.* Геохимия редких элементов в углях Сибири. — Томск, 2007. — 468 с.
5. *Xin Wang, Qiyan Feng, Ruoyu Sun, Guijian Liu.* Minerals. 2015. Vol. 5. P. 63.
6. *Vejahati F., Xu Z., Gupta R.* Trace elements in coal: Associations with coal and minerals and their behavior during coal utilization — A review. // Fuel. 2010. V. 89. Issue 4. P. 904.
7. *Xin Wang, Qiyan Feng, Ruoyu Sun, Guijian Liu.* Minerals. 2015. Vol. 5. P. 637.
8. *Nancy E., Lauer, James. Hower C., Ross K. and oth.* Environmental Science & Technology. 2015. Vol. 10. P. 1021. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Силютин Сергей Алексеевич — кандидат технических наук,
начальник отдела качества и обогащения углей АО «СУЭК»,
e-mail: silutinsa@suek.ru.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 2, pp. 148–155.

S.A. Silyutin

PROCEDURE FOR ESTIMATING DISTRIBUTION OF MICROELEMENTS IN ORGANIC AND MINERAL SUBSTANCES OF COAL

The information on distribution of microelements (ME) in organic and mineral substances of coal and other solid mineral fuels helps understanding general geochemical mechanisms of ME accumulation in the caustobioliths and selecting technologies for their integrated use at the minimized environmental impact. Currently there are no methods for the quantitative division of coal and other solid combustible minerals into organic and mineral substances with the quantitative recovery of ME contained in initial specimen. In this regards, the routine method is separation to different density fractions, and a fraction having less density and, accordingly, smaller ash content has higher content of organic substances. The quantitative estimation of ME distribution (belonging to an organic or a mineral substance) is based on two criteria: reduced content of an i-th element in a g-th fraction (Yig) and recovery of an i-th element in a g-th fraction (Uig) calculated from the relations: where Cio and Cig —contents of the i-th element in initial coal and in the g-th fraction; Ɣg—yield of the g-th fraction.

A fraction is an i-th ME concentrator in case when (Yig) ≥1.0. When (Uig) ≥ 50% or ≥ 0.5 g, the fraction is assumed the i-th ME carrier.

The experimental analysis of lignite from Low Ile deposit in Kazakhstan shows that the quantity of ME (Au, Ag, Re and other) in organic and mineral substances vary within wide ranges in coal specimens sampled at different points of the same deposit. For instance, a silver concentrator is assumed the heavier fraction out of two samples with the density more than 1.7 g/cm3 and out of two samples of medium density (1.4–1.7 g/cm3), and silver carriers are fractions with the density of 1.4–1.7 g/cm3 out of four samples and one sample with the density more than 1.7 g/cm3. Unequal content of ME in organic and mineral substances in the samples from the same deposit is revealed for all test ME (Au, Re, Mo, Cd, Ag). A reasoned conclusion of the quantitative distribution of ME in organic and mineral substances of coal even in terms of the same deposit can only be drawn based on the test data on a number of specimens sampled at different points of the deposit.

Key words: microelements, distribution, organic and mineral substances, difference, deposit.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-148-155

AUTHOR

Silyutin S.A., Candidate of Technical Sciences, Head of Department, e-mail: silutinsa@suek.ru, OJSC «Siberian Coal Energy Company» (SUEK), Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Yurovskiy A.Z. *Mineral'nye komponenty ugley* (Mineral components of coal), Moscow, Nedra, 1968, 214 p.
2. Shpirt M.Ya., Kler V.R., Pertsikov I.Z. *Neorganicheskie komponenty tverdykh topliv* (Inorganic components of solid fuels), Moscow, Khimiya, 1990, 248 p.
3. Shpirt M.Ya. *Bezotkhodnaya tekhnologiya. Utilizatsiya otkhodov dobychi i pererabotki tverdykh goryuchikh iskopaemykh* (Wasteless technology. Recycling of mining and processing waste of solid combustible minerals), Moscow, Nedra, 1986, 255 p.
4. Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* (Geochemistry of rare elements in Siberian coal), Tomsk, 2007, 468 p.
5. Xin Wang, Qiyan Feng, Ruoyu Sun, Guijian Liu. *Minerals*. 2015. Vol. 5. P. 63.
6. Vejahati F., Xu Z., Gupta R. Trace elements in coal: Associations with coal and minerals and their behavior during coal utilization A review. *Fuel*. 2010. V. 89. Issue 4. P. 904.
7. Xin Wang, Qiyan Feng, Ruoyu Sun, Guijian Liu. *Minerals*. 2015. Vol. 5. P. 637.
8. Nancy E., Lauer, James. Hower C., Ross K. *Environmental Science & Technology*. 2015. Vol. 10. P. 1021.

TABLES

Table 1. Distribution of gold (Au) in fractions of different density in Low Ile lignite.

Table 2. Distribution of silver (Ag) in fractions of different density in Low Ile lignite.

Table 3. Distribution of rhenium (Re) in fractions of different density in Low Ile lignite.

Table 4. Distribution of molybdenum (Mo) in fractions of different density in Low Ile lignite.

Table 5. Distribution of cadmium (Cd) in fractions of different density in Low Ile lignite.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

(2017, № 12, СВ 29, 56 с.)

Кубрин С.С., Решетняк С.Н., Дегтерёв В.В., Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю., Фащиленко В.Н., Копылов К.Н., Закоршменный И.М.

Рассмотрен ряд актуальных вопросов по повышению уровня безопасности за счет разработки датчиков пылеотложений для угольных шахт, повышению уровня эффективности работы угольной шахты за счет нормирования электропотребления угольных шахт, а также за счет разработки новых систем управления электроприводами органами резания горных машин. Разработка такой системы управления возможна при принудительном введении системы управления в резонансный режим работы. Данный способ позволит значительно снизить объем потребленной электроэнергии основным оборудованием, увеличить скорость бурения, тем самым повысить конкурентоспособность производимой продукции.

MODERN PROBLEMS OF SAFETY AND EFFICIENCY OF HIGH-PERFORMANCE MINING SITES OF COAL MINES

Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Degterev V.V., Plashchanskiy L.A., Reshetnyak M.Yu., Fashchilenko V.N., Kopylov K.N., Zakorshmennyy I.M.

Considered a number of topical issues on improvement of safety through the development of sensors biletlerini for coal mines, improve the efficiency of coal mines due to the rationing of electricity consumption by coal mines and by developing new systems of electric drive control bodies cutting mining machines. The development of such a control system is possible when the forced introduction of a control system in a resonant mode. This method will significantly reduce the amount of electricity consumed by the underlying hardware, to increase the drilling speed, thereby to improve the competitiveness of products.