

## ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-6-29-36

УДК 330.4

### КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДАХ КУЗНЕЦКИХ УГЛЕЙ

### CLUSTER ANALYSIS OF THE CONTENT OF IMPURITIES IN ASH AND SLAG WASTE OF KUZNETSK COAL

**Маркидонов Артем Владимирович<sup>1,2</sup>**,

доктор ф.-м. наук, доцент, e-mail: markidonov\_artem@mail.ru

**Artem V. Markidonov<sup>1,2</sup>**,

Dr. Sc. in Physics and Mathematics, Associate Professor, e-mail: markidonov\_artem@mail.ru

**Салихов Валерий Албертович<sup>1</sup>**,

канд. техн. наук, доцент, e-mail: salihov-va@yandex.ru

**Valeriy A. Salikhov<sup>1</sup>**,

C. Sc. in Engineering, Associate Professor, e-mail: salihov-va@yandex.ru

**Лубяной Дмитрий Анатольевич<sup>1</sup>**,

канд. техн. наук, e-mail: lubjanoy@yandex.ru

**Dmitriy A. Lubyanoy<sup>1</sup>**,

C. Sc. in Engineering, e-mail: lubjanoy@yandex.ru

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>1</sup>T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

<sup>2</sup> Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета, 654041, Россия, г. Новокузнецк, ул. Циолковского, д. 6

Novokuznetsk Branch-Institute of Kemerovo State University, 6 street Tsiolkovsky, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation

#### **Аннотация:**

Дана характеристика минеральной части золошлаковых отходов углей. Кратко рассмотрены особенности металлоносности углей Сибири, и более подробно – Кузнецкого бассейна. Приведены данные по содержанию железа, цветных и редких металлов в углях Кузнецкого бассейна и их золошлаковых отходах (ЗШО). Оценены перспективы использования углей и их ЗШО для извлечения из них дефицитных и востребованных металлов. ЗШО определены как наиболее перспективные объекты для их извлечения. Для этого применялся иерархический кластерный анализ, выполненный с помощью программы IBM SPSS Statistics, в результате которого были построены дендрограммы, что позволило определить наиболее перспективные кластеры (металлоносные угленосные свиты). В качестве основного метода кластеризации использовался метод Уорда. Для проверки выполненной кластеризации дополнительно применялась центроидная и медианная кластеризация. Таким образом, с помощью математических методов выявлены угленосные свиты Кузбасса, угли и, особенно, ЗШО углей которых экономически целесообразно разрабатывать для получения железа, а также ряда цветных и редких металлов. Приведены основные положения методики геолого-экономической оценки угольных пластов и золоотвалов энергетических предприятий, а также методики оценки экономической целесообразности извлечения металлов из наиболее перспективного объекта для разработки – ЗШО углей.

**Ключевые слова:** золошлаковые отходы углей, металлы, угленосная свита, кластерный анализ, геолого-экономическая оценка, экономическая целесообразность.

**Abstract:**

*The characteristic of the mineral part of coal ash and slag was given. Briefly considered are the features of metalliferous coal of Siberia, and in more detail - of the Kuznetsk basin. The data on the content of iron, non-ferrous and rare metals in the coals of the Kuznetsk basin and their ash and slag waste (ASW) are presented. The prospects of using coal and their ash and slag for extraction of scarce and sought-after metals from them are estimated. ASW are identified as the most promising objects for their extraction. To do this, we used hierarchical cluster analysis performed using the IBM SPSS Statistics program, as a result of which dendrograms were built, which made it possible to determine the most promising clusters (metalliferous coal bearing formations). The Ward method was used as the main clustering method. To verify the clustering performed, centroid and median clustering was additionally used. Thus, using the mathematical methods, the Kuzbass coal-bearing formations, coals, and, especially, coal ash-and-ore deposits of which it is economically feasible to develop to produce iron, as well as a number of non-ferrous and rare metals, have been identified. The main provisions of the methodology for geological and economic evaluation of coal seams and ash dumps of energy enterprises, as well as the methodology for assessing the economic feasibility of extracting metals from the most promising object for development – ASW coal.*

**Key words:** *ash and slag waste of coal, metals, coal-bearing formation, cluster analysis, geological and economic assessment, economic feasibility.*

Одним из древнейших видов топлива является уголь, доля которого в производстве электроэнергии на территории России составляет около 19%. В процессе сгорания угля образуются золошлаковые отходы (ЗШО). Свойства ЗШО зависят как от характеристик минеральной составляющей исходного топлива, так и от способов сжигания. Минеральная часть топлива на 85-95% состоит из глинистых минералов, аргиллитов, алевролитов, и прочих осадочных пород, а оставшаяся часть представляет собой соединения железа, кальция и микроэлементов. При этом в результате сжигания минеральные компоненты преобразуются в твердые продукты сгорания, складываемые в золоотвалах энергетических предприятий, масса которых в настоящее время просто огромна. По физико-химическому составу ЗШО являются уникальным материалом, имеющим возможность применения в различных отраслях.

Следует отметить, что по потреблению стратегически важных металлов (таких, как литий, бериллий, ниобий, тантал, цирконий, германий, рений, скандий) Россия значительно отстает от развитых стран. При этом намечающийся рост производства в РФ подтверждает остроту и актуальность проблемы снабжения промышленности дефицитными металлами и предполагает увеличение мероприятий по эксплуатации техногенных месторождений. Следует учитывать и огромное количество накапливаемых ЗШО. Так на территории Кемеровской области ежегодно накапливается около 3 млн. т. золошлаков, а общее количество накопленных ЗШО составляет 100 млн. т. Поэтому, промышленное применение золошлаковых отходов приведет к значительному экологическому эффекту [1].

Угли Сибири и, в первую очередь, угли Кузнецкого бассейна содержат многие ценные цветные и редкие металлы. С учетом определения

средних и средневзвешенных значений в них отмечены повышенные содержания тантала, ниобия, германия, циркония, гафния и многих других редких и редкоземельных металлов [2]. При этом проявляется геохимическая специализация первого рода и второго рода. Геохимическая специализация первого рода – это коэффициент концентрации металла в исследуемом геологическом блоке по отношению к кларку этого металла в земной коре. Геохимическая специализация второго рода – это вовлечение металлов в последующее перераспределение и концентрирование [2].

Для кузнецких углей характерна следующая геохимическая концентрация второго рода. Многие исследователи отмечают повышенное содержание в углях цветных и редких металлов, аномальные концентрации которых связаны с зонами тектонических нарушений, а также наблюдаются вблизи внедрения в угленосную толщу интрузивов. Оценка содержания ценных металлов позволяет спрогнозировать их количество, переходящее при промышленном сжигании углей в золошлаковые отходы, поэтому были разработаны соответствующие методики [3-5]. Очевидно, что содержание различных металлов в углях представляет неподдельный интерес для добывающих и коммерческих предприятий, что обуславливает актуальность данного направления исследования.

В качестве объектов исследования углей на металлоносность в пределах угольного бассейна, в первую очередь, используются угленосные свиты. Угленосная свита – это единица местной стратиграфической шкалы; представляет весь разрез или часть разреза угленосной формации, заключающей пласты угля. Первоначальной целью данной работы является выявление угленосных свит Кузбасса, угли и ЗШО углей которых являются наиболее перспективными с точки зрения извлечения из них различных

Таблица 1. Содержания ряда цветных и редких металлов в углях и золе углей Кузбасса  
 Table 1. The contents of a number of non-ferrous and rare metals in coal and coal ash Kuzbass

Металл	Среднее и максимальное содержание в углях, г/т	Концентрации, рекомендуемые к оценке, г/т	Среднее и максимальное содержание в золе, г/т	Кондиции для руд, %
Титан	100 - 500	500	1100 - 5600	10 - 15
Цирконий	100 - 500	500	2296 - 3000	3
Медь	5 - 15	100	95,2 - 3700	0,5
Свинец	5 - 25	50	250 - 4800	2
Цинк	10 - 300	100	272 - 16000	1
Барий	50 - 200	1000	500 - 5800	1
Ванадий	10 - 50	100	154 - 5000	1
Вольфрам	1 - 3	100	45 - 1500	0,5 - 1
Стронций	100 - 500	1000	2294 - 2300	5
Ниобий	1 - 3	100	115 - 3000	0,1
Галлий	1 - 3	20	38,6 - 3000	0,04
Германий	0,5 - 1	10	14,1 - 2700	0,1

металлов. При этом наиболее перспективным объектом являются золошлаковые отходы углей, где содержания металлов в несколько раз выше, чем в углях (таблица 1) [3].

В связи с этим, анализировалось содержание металлов в следующих угленосных свитах: Тайлуганская, Грамотеинская, Ленинская, Ускатская, Казанково-Маркинская, Кемеровская, Ишановская, Промежуточная, Алыкаевская и Мазуровская свита. Информация о распределении различных металлов в ЗШО углей этих свит бралась из [6] (см. табл.2). Обработка имеющихся данных осуществлялась при помощи кластерного анализа с использованием программы IBM SPSS Statistics («Statistical Package for the Social Science»). Из возможных методов кластерного анализа использовался иерархический метод, основным достоинством которого является наглядность. Результатом иерархического кластерного анализа является дендрограмма, описывающая близость отдельных кластеров друг к другу. В программе SPSS реализован агломеративный метод, характеризующийся последовательным объединением исходных элементов и соответствующим уменьшением

числа кластеров.

Кластерный анализ предполагает разбиение множества исследуемых объектов и признаков на однородные группы или кластеры [7-10]. Пусть множество  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$  состоит из  $n$  объектов (индивидов), принадлежащих, некоторой популяции  $\pi$ . Предположим также, что существует некоторое множество наблюдаемых показателей или атрибутов  $C = (C_1, C_2, \dots, C_2)^T$ , которыми обладает каждый индивид из  $I$ . Для множества индивидов  $I$  исследователь располагает множеством векторов измерений (переменных)  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , которые описывают множество  $I$ . Пусть  $m$  – целое число, меньшее, чем  $n$ . Задача кластерного анализа заключается в том, чтобы на основании данных, содержащихся во множестве  $X$ , разбить множество объектов  $I$  на  $m$  кластеров (подмножеств)  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m$  так, чтобы каждый объект  $I_b$  принадлежал одному и только одному подмножеству разбиения и чтобы объекты, принадлежащие одному и тому же кластеру, были сходными, в то время как объекты, принадлежащие разным кластерам, были разнородными. Решением задачи кластерного анализа является разбиение, удовлетворяющее некоторому критерию

Таблица 2. Показатели содержаний (г/т) некоторых цветных металлов в ЗШО кузнецких углей [6]  
 Table 2. Content indices (gram/ton) of some non-ferrous metals in the ash dump of the Kuznetsk coal [6]

Свита	Ti	V	Cu	Zn	Zr	Nb	Ga	Ge	Pb
Тайлуганская	12510	133	65	113	2187	80	35	5	46
Грамотеинская	20958	270	75	120	2395	60	21	н/д	64
Ленинская	21133	221	95	634	3774	153	59	54	88
Ускатская	14196	229	115	368	3500	136	48	17	74
Казанково-Маркинская	14996	198	80	239	2221	102	42	10	83
Кемеровская	10874	153	97	289	2402	134	37	19	77
Ишановская	13793	162	109	387	2607	108	43	12	87
Промежуточная	10911	136	83	251	1928	75	40	9	69
Алыкаевская	6582	103	83	106	697	101	32	9	33
Мазуровская	5682	99	105	н/д	767	57	28	11	23

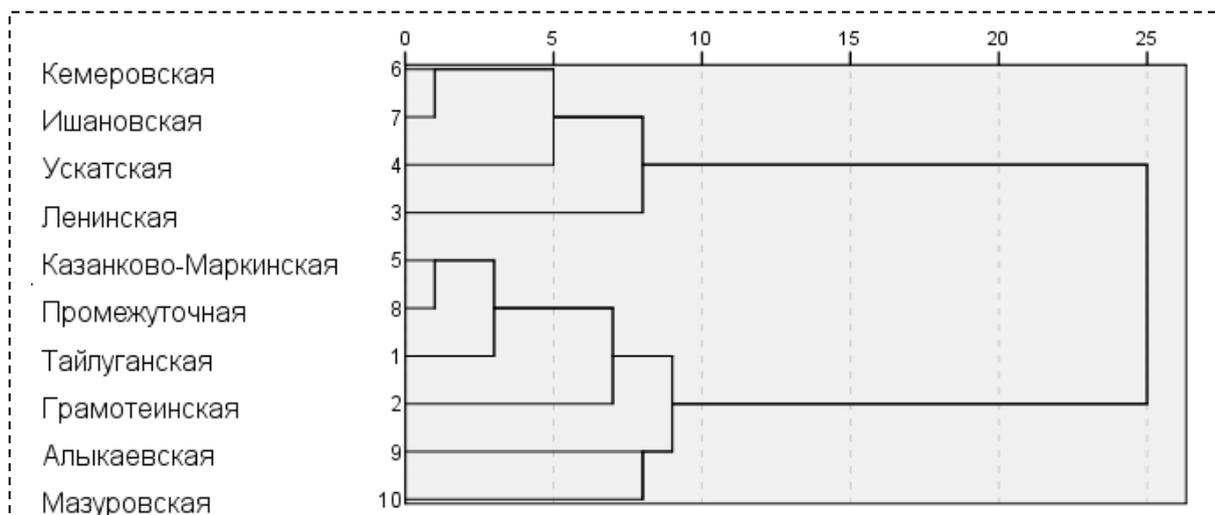


Рис.1. Кластеризация свит по распределению химических элементов в ЗШО кузнецких углей  
 Fig.1. Clusterization of suites by the distribution of chemical elements in the ash and slag of Kuznetsk coal

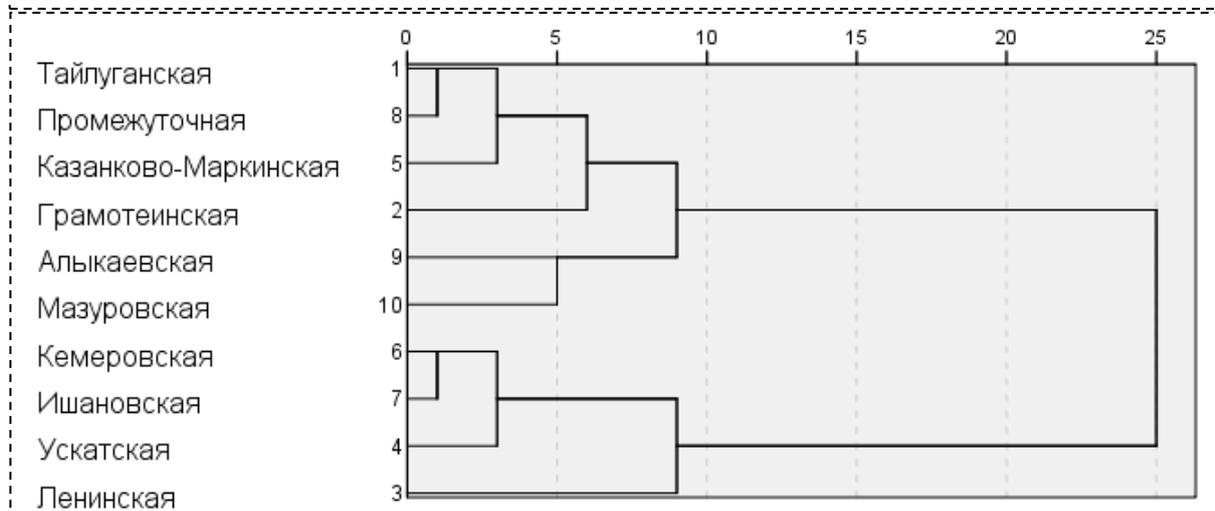


Рис.2. Кластеризация свит по распределению редких элементов в ЗШО кузнецких углей  
 Fig.2. Clusterization of suites according to the distribution of rare elements in the ash and slag of Kuznetsk coal

оптимальности. Этот критерий может представлять собой некоторый функционал, выражающий уровни желательности различных разбиений и группировок [11]. Мерой сходства, близости объектов между собой по всей совокупности используемых признаков является расстояние между объектами или метрика в  $m$ -мерном пространстве признаков. В качестве такого расстояния был выбран квадрат евклидова расстояния:

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2,$$

где  $d_{ij}$  – расстояние между  $i$ -ым и  $j$ -ым объектами,  $x_{ik}$  и  $x_{jk}$  – значения  $k$ -ой переменной у  $i$ -го и  $j$ -го объекта соответственно.

В качестве основного метода кластеризации использовался метод Уорда, по которому для всех имеющихся наблюдений производится расчет средних значений отдельных переменных (по отдельным кластерам), а затем вычисляются

квадраты евклидовых расстояний от отдельных наблюдений каждого кластера до вычисленного среднего значения и суммируются:

$$\sigma_k = \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{x}_{jk})^2,$$

где  $k$  – номер кластера,  $i$  – номер объекта,  $j$  – номер признака,  $p$  – количество признаков, характеризующих каждый объект,  $n_k$  – количество кластеров в  $k$ -кластере. В новый кластер объединяются кластеры, дающие наименьший прирост общей суммы расстояний [12].

Для того чтобы привести значения переменных к единому диапазону значений использовалась стандартизация путем  $z$ -преобразования.

На первом этапе был выполнен анализ распределения в ЗШО кузнецких углей следующих химических элементов: B, F, P, S Cl, Ga, Ge, As, Sn, Pb, Bi, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, La, Hf, Ta, Au и Hg. Полученная

дендрограмма (см. рис. 1) свидетельствует о возможном выделении двух кластеров. В первый кластер были объединены Кемеровская, Ишановская, Ускальская и Ленинская свиты. Учитывая, что Ленинская свита характеризуется наибольшей среди прочих свит концентрацией рассматриваемых элементов, то можно сделать вывод, что первый кластер может представлять наибольший интерес потенциальным предприятиям отрасли.

Так как Ленинская свита была включена в первый кластер только на седьмом этапе процесса агломерации, было принято решение выполнить проверку качества кластеризации путем выполнения аналогичных расчетов, но с использованием методов центроидной и медианной кластеризации [13, 14]. Оба метода продемонстрировали наиболее позднее включение Ленинской свиты в кластеры. Кроме того, метод медианной кластеризации показал близкую связь между Ленинской и Ускальской свитой. Сделанные расчеты свидетельствуют в целом о справедливости проведенной кластеризации.

Выполненный анализ учитывал распределение большого числа химических элементов. Несомненный интерес представляют свиты, содержащие редкие металлы, включенные в список стратегических видов минерального сырья, утвержденный распоряжением Правительства РФ №50 от 16.01.1996 г. Среди вышеперечисленных элементов к таковым относятся: Ge, Mo, Nb, Sc, Ta, Ti и Zr. Ленинская свита также характеризуется наибольшей концентрацией редких элементов. Как свидетельствует построенная на следующем этапе анализа дендрограмма (см. рис. 2) в единый кластер с Ленинской объединяются Ускальская, Кемеровская и Ишановская свита, т.е. те же что и на первом этапе. Дополнительный анализ с помощью методов центроидной и медианной

кластеризации подтвердил близкую связь Ленинской и Ускальской свит.

Одним из главных золообразователей в углях является железо, присутствующее в форме полутормого оксида  $Fe_2O_3$ , что делает ЗШО углей возможным источником железорудного сырья. В качестве технологии получения железного концентрата в данном случае можно использовать, например, метод магнитной сепарации [15]. Кроме того, зола может являться сырьем для производства глинозема. Это особенно важно, учитывая, что потребность промышленности России в природных материалах для его получения покрывается собственными ресурсами только на 60%. Поэтому на заключительном этапе был выполнен кластерный анализ свит по долям цветных и редких металлов, а также  $Al_2O_3$  и  $Fe_2O_3$  в ЗШО кузнецких углей. Построенная дендрограмма представлена на рис.3.

Наибольшая концентрация  $Al_2O_3$  и  $Fe_2O_3$  (бралось среднее значение из данных, представленных в [6]) наблюдается в ЗШО углей Кемеровской свиты. Наиболее близкая связь наблюдается между Кемеровской и Промежуточной свитой (см. рис. 3). Далее в единый кластер включаются также Ленинская и Ускальская свита. Дополнительный анализ с применением методов центроидной и медианной кластеризации подтвердили полученные результаты.

Таким образом, проведенный кластерный анализ показал, что ЗШО углей Ленинской и Ускальской свиты обладают наиболее интересной комбинацией химических элементов с позиции рассмотрения их в качестве источника получения сырья для черной и цветной металлургии Кузбасса. Шлам, образующийся после извлечения из золы металлов, может использоваться в качестве сырья для производства строительных материалов, так

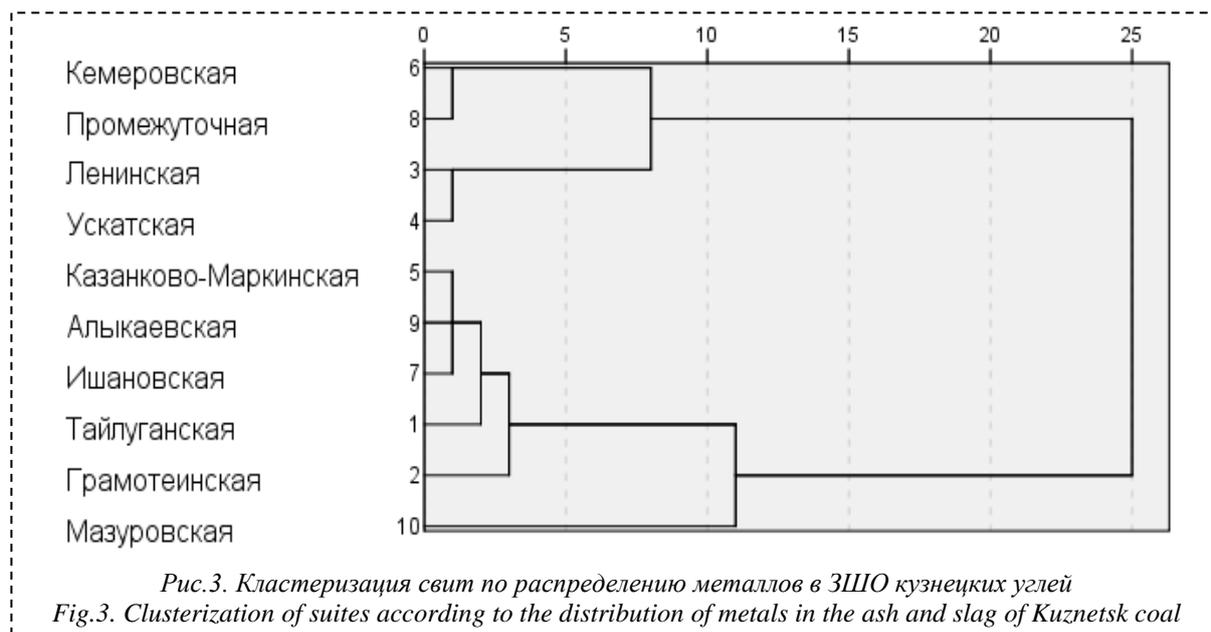


Рис.3. Кластеризация свит по распределению металлов в ЗШО кузнецких углей  
 Fig.3. Clusterization of suites according to the distribution of metals in the ash and slag of Kuznetsk coal

как он обладает меньшими абразивными свойствами и радиоактивностью [15].

После выявления перспективного кластера (угленосной свиты), определяется содержание металлов в углях по пластам и в золоотвалах энергетических предприятий Кемеровской области. Как видно из данных, приведенных в таблице 1, наиболее перспективным объектом являются золошлаковые отходы углей. При этом, коммерческий интерес могут также представлять участки угольных пластов с ураганным содержанием одного или нескольких ценных металлов, что предполагает селективную добычу обогащенного дефицитными и легко ликвидными металлами угля. Геолого-экономическая оценка золоотвалов и, в ряде случаев, угольных пластов с высоким содержанием этих металлов должна проводиться по трем параметрам: 1) геологический параметр – оценка запасов/ресурсов стратегически важных и других дефицитных металлов; 2) технологический параметр – наличие промышленных, высокорентабельных, инновационных технологий по извлечению этих металлов; 3) экономический параметр – анализ рынков данного вида минеральной продукции [4].

Положительная оценка по всем трем параметрам позволяет оценить исследуемые объекты как экономически эффективные, а по двум – как перспективные для разработки техногенные месторождения. Следует учитывать, что многие цветные и редкие металлы востребованы и дефицитны. Имеются техногенные объекты, представляющие интерес в плане извлечения этих металлов. Поэтому, основная проблема – это разработка инновационных технологий, позволяющих экономически эффективно и экологически безопасно извлекать железо, цветные и редкие металлы из техногенных месторождений.

Запасы ( $Q$ ) каждого металла в золоотвалах определяются:

$$Q = (S \times m \times C \times v) / 100 \%,$$

где  $S$  – площадь техногенного месторождения, км<sup>2</sup>;  $m$  – мощность техногенного месторождения,

$C$  – содержание металла, %;  $v$  – удельный вес металла, т/м<sup>3</sup>.

При наличии опытных технологий дальнейшая оценка экономической целесообразности извлечения металлов из ЗШО углей проводится следующим образом [3]. Рассчитывается объем производства металла ( $V_m$ ):

$$V_m = C_m \times V_z \times K,$$

где  $C_m$  – содержание металла в золоотвалах, г/т;  $V_z$  – объемы золоотвалов, т;  $K$  – коэффициент извлечения металла из золы.

Выручка от реализации металлов ( $R_m$ ) определяется:

$$R_m = \sum S_{mi} \times V_{mi},$$

где  $S_{mi}$  – цена  $i$ -го получаемого металла, руб./т или руб./кг;  $V_{mi}$  – объем производства  $i$ -того получаемого металла, т или кг.

Прибыль от реализации металлов ( $P_m$ ):

$$P_m = (V_m - Z_m),$$

где  $Z_m$  – затраты на производство и реализацию металлов, руб.

В заключение отметим, что одним из возможных направлений дальнейших исследований может являться изучение влияния металлов, присутствующих в виде окислов в золе кокса, на процесс легирования чугуна. Так, например, при производстве природнолегированного чугуна на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» было установлено, что в случае, если содержание титана и ванадия в золе сопоставимо с их концентрацией в железосодержащей шихте для доменной плавки (Ковдорский концентрат, окатыши Качарского ГОКа), то данные элементы будут присутствовать в полученном чугуне даже без использования в шихте, например, окатышей.

Таким образом, сочетание методов математической статистики и экономики позволит выделить наиболее перспективные массивы накапливаемых ЗШО, что в свою очередь позволит проводить технико-экономическое обоснование проектов по разработке перспективных объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самусева, М.Н. Золошлаковые материалы – альтернатива природным материалам / М.Н. Самусева, Т.И. Шишелова // *Фундаментальные исследования*, 2009. – № 2. – С.75-76.
2. Арбузов, С.И. Геохимия редких элементов в углях Сибири // *Известия Томского политехнического университета*, 2007. – Т. 311. – № 1 – С.77-83.
3. Салихов, В.А. Специфические особенности экономической оценки цветных и редких металлов, содержащихся в техногенных месторождениях / В.А. Салихов, О.С. Краснов // *Разведка и охрана недр*, 2016. – № 6. – С.42-46.
4. Салихов, В.А. Некоторые аспекты экономической оценки техногенных месторождений как перспективного сырья для металлургической промышленности / В.А. Салихов, Н.И. Новиков // *Вестник Томского государственного университета. Экономика*, 2016. – № 1(33). – С.38-53.
5. Скурский, М.Д. Недра Земли. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2006. – 880 с.

6. Угли Кузбасса: химические элементы-примеси и технологии их извлечения при комплексном освоении месторождений / Б.Ф. Нифантов, В.П. Потапов, Б.А. Анферов, Л.В. Кузнецова. – Кемерово: ИУ СО РАН, 2011. – 310 с.
7. Day, W.H.E. Efficient algorithms for agglomerative hierarchical clustering methods / W.H.E. Day, H. Edelsbrunner // *Journal of Classification* December, 1984. – Vol. 1. –No 1. – Pp.7–24.
8. Akume D. Cluster algorithms: theory and methods // *Вычислительные технологии*, 2002. – Т. 7. – № 1. – С.15-27.
9. Omrana, M.G.H. An overview of clustering methods / M.G.H. Omrana, A.P. Engelbrechtb, A. Salmanc // *Intelligent Data Analysis*, 2007. – Vol. 11. – Pp.583–605.
10. Francetic, M. Hierarchical clustering with concave data sets / M. Francetic, M. Nagode, B. Nastav // *Metodoloski zvezki*, 2005. – Vol. 2. – No. 2. – Pp.173-193.
11. Рабинович, Б.И. Кластерный анализ детализаций телефонных переговоров // *Системы и средства информатики*, 2007. – Т. 17. – № 1. – С.52-78.
12. Мандель, И.Д. Кластерный анализ. – Москва: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
13. Murray, A.T. Spatial analysis using clustering methods: Evaluating central point and median approaches // *Journal of Geographical Systems*, 1999. – Vol. 1. – No. 4. – Pp.367–383.
14. Pietrzykowskia, M. Local regression algorithms based on centroid clustering methods // *Procedia Computer Science*, 2017. – Vol. 112. – Pp.2363-2371.
15. Ежова, Н.Н. Золошлаковые отходы тепловых электростанций – ценный сырьевой ресурс для черной и цветной металлургии / Н.Н. Ежова, А.С. Власов, С.В. Сударева, Л.М. Делицын // *Экология промышленного производства*, 2010. – № 2. – С.45-52.

## REFERENCES

1. Samuseva M.N., Shishelova T.I. Zoloshlavkovyye materialy – al'ternativa prirod-nym mate-rialam [Ash and slag materials – an alternative to natural materials] // *Fundamen-tal'nyye issledovaniya* [Basic Research]. 2009. No.2. Pp.75-76. (rus)
2. Arbuzov S.I. Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri [Geochemistry of rare elements in the coals of Siberia] // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 2007. Vol.311. No.1 Pp.77-83. (rus)
3. Salikhov V.A., Krasnov O.S. Spetsificheskiye osobennosti ekonomicheskoy otsenki tsvetnykh i redkikh metallov, sodержashchikhsya v tekhnogennykh mestorozhdeni-yakh [Specific features of the economic evaluation of non-ferrous and rare metals contained in technogenic deposits] // *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of mineral re-sources]. 2016. No. 6. Pp.42-46. (rus)
4. Salikhov V.A., Novikov N.I. Nekotoryye aspekty ekonomicheskoy otsenki tekhnogennykh mestorozhdeniy kak perspektivnogo syr'ya dlya metallurgicheskoy promysh-lennosti [Some aspects of the economic assessment of technogenic deposits as a promising raw material for the metallurgical industry] // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika* [Bulletin of Tomsk State University. Economics]. 2016. No. 1(33). Pp.38-53. (rus)
5. Skurskiy, M.D. Nedra Zemli [Bowels of the earth]. – Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2006. – 880 p. (rus)
6. Nifantov B.F., Potapov V.P., Anferov B.A., Kuznetsova L.V. Ugli Kuzbassa: khimicheskiye elementy-primesi i tekhnologii ikh izvlecheniya pri kompleksnom osvoyenii mestorozhdeniy [Coals of Kuzbass: chemical elements-impurities and technologies for their extraction in the integrated development of deposits]. – Kemerovo: ИУ СО РАН, 2011. – 310 p. (rus)
7. Day W.H.E., Edelsbrunner H. Efficient algorithms for agglomerative hierarchical clustering methods // *Journal of Classification* December. 1984. Vol. 1. No 1. Pp.7–24.
8. Akume D. Cluster algorithms: theory and methods // *Vychislitel'nyye tekhnologii* [Computing technology]. 2002. Vol. 7. No. 1. Pp.15-27.
9. Omrana M.G.H., Engelbrechtb A.P., Salmanc A. An overview of clustering meth-ods // *Intelligent Data Analysis*. 2007. Vol. 11. Pp.583–605.
10. Francetic M., Nagode M., Nastav B. Hierarchical clustering with concave data sets // *Metodoloski zvezki*. 2005. Vol. 2. No. 2. Pp.173-193.
11. Rabinovich, B.I. Klasternyy analiz detalizatsiy telefonnykh peregovorov [Cluster analysis of details of telephone conversations] // *Sistemy i sredstva informatiki* [Systems and means of informatics]. 2007. Vol. 17. No. 1. Pp.52-78. (rus)
12. Mandel' I.D. Klasternyy analiz [Cluster analysis]. – Moscow: Finance and Statis-tics, 1988. – 176 p.
13. Murray, A.T. Spatial analysis using clustering methods: Evaluating central point and median approaches // *Journal of Geographical Systems*. 1999. Vol.1. No.4. Pp.367–383.
14. Pietrzykowskia, M. Local regression algorithms based on centroid clustering methods // *Procedia*

Computer Science. 2017. Vol.112. Pp.2363-2371. (rus)

15. Yezhova N.N., Vlasov A.S., Sudareva S.V., Delitsyn L.M. Zoloshlakovyye ot-khody teplovykh elektrostantsiy – tsennyy syr'evoy resurs dlya chernoy i tsvetnoy metallurgii [Ash and slag waste of thermal power plants - a valuable raw material resource for ferrous and non-ferrous metallurgy] // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva [Ecology of industrial production]. 2010. No. 2. Pp.45-52. (rus)

Поступило в редакцию 18.12.2019

Received 18 December 2019