ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(5):140-147
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.765-52 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-140-147

МЕТОД ТИПИЗАЦИИ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ РУД СЛОЖНОГО СОСТАВА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

Т.Н. Александрова[1], Е.К. Ушаков[1], А.В. Орлова[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: s195065@stud.spmi.ru

Аннотация: Рассмотрен вопрос о вариативности перерабатываемого сырья на обогатительной фабрике. В настоящее время существенное значение имеет классификация перерабатываемой руды. Неоднородность поступающего на обогатительную фабрику сырья оказывает влияние на процесс переработки. Установлено, что применение классических регрессионных моделей не обеспечивает необходимый уровень достоверности взаимовлияния пар факторов вследствие многофакторности и нелинейности исследуемого объекта флотационного обогащения. Проведен анализ геолого-минералогических особенностей руды посредством применения элементов нейросетевого моделирования. Объектом исследования являлась руда медно-цинкового месторождения. Для решения вопроса о многофакторности перерабатываемой руды была разработана нейросетевая модель Кохонена. На основании данной нейросетевой модели было выделено шесть основных кластеров. Для каждого кластера характерны схожие значения выходов. По полученным данным были построены самоорганизующиеся карты Кохонена для наглядной интерпретации полученных результатов. Показана зависимость технологических показателей переработки от типа шихты и необходимость разработки высокоавтоматизированной технологии флотационного обогащения, которая будет обеспечивать более высокое извлечение металлов.

Ключевые слова: нейронные сети, извлечение металлов, флотация, моделирование, типизация сырья.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00096).

Для цитирования: *Александрова Т.Н., Ушаков Е.К., Орлова А.В.* Метод типизации медно-цинковых руд сложного состава с применением нейросетевых моделей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 5. – С. 140–147. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-140-147.

Method of complex copper–zinc ore typification using neural network models

T.N. Aleksandrova[1], E.K. Ushakov[1], A.V. Orlova[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: s195065@stud.spmi.ru

Abstract: The article discusses variability of feed stock of a processing plant. Currently it is essential to classify ore meant for treatment. Heterogeneity of the processing feed stock affects the process of beneficiation. It is found that classical regression models fail to provide

© Т.Н. Александрова, Е.К. Ушаков, А.В. Орлова. 2020.

the wanted reliability of cross impact in pairs of factors due to the multi-factor and nonlinear nature of the flotation object. The geological and mineralogical features of test ore are analyzed using neural network modeling. The test subject was copper–zinc ore. The multi-factor nature of the test ore was analyzed on a model developed using a Kohonen neural network. The neural network model revealed six basic clusters. Each class features similar values of yield. Using the obtained data, the Kohonen self-organizing maps were constructed for the visual interpretation of the results. The technological performance dependence on the type of feed batch is demonstrated. It is required to develop a high-automated flotation technology to ensure enhanced recovery of metals.

Key words: neural networks, metal recovery, flotation, modeling, raw material typification.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-17-00096).

For citation: Aleksandrova T. N., Ushakov E. K., Orlova A. V. Method of complex copper–zinc ore typification using neural network models. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(5):140-147. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-140-147.

Введение

В пределах одного месторождения или группы месторождений может находиться как близкая, так и неоднородная по своим технологическим показателям, составу, свойствам руда.

Неоднородность, которая выражается вариативностью измельчаемости, содержания полезного компонента, минерального состава, а также поверхностных характеристик, и является одним из основных факторов, влияющих на операции рудоподготовки, флотационного обогащения и обезвоживания.

Для решения проблемы, вызванной разнородностью руды, важно выявить закономерные связи между качественными показателями исходного сырья, отклонением от среднего содержания металла в руде и показателями получаемых конечных продуктов [1 — 8].

С развитием техники и технологии появляется возможность более детального изучения перерабатываемой руды. В настоящее время стало возможным учитывать множество факторов постоянно меняющейся руды, подаваемой на фабрику.

Материалы и методы

В данной статье проведен анализ геолого-минералогических особенностей медно-цинкового месторождения. Ввиду многофакторности и нелинейности флотационного объекта, взятого для исследования, обосновывается целесообразность применения нейронных сетей Кохонена [9 — 11] с целью составления карты технологической изменчивости перерабатываемой руды. Согласно разработанной модели выделено шесть основных технологических типов перерабатываемой шихты. Показана существенная зависимость технологических показателей от свойств исходного сырья, чем обуславливается необходимость разработки высокоавтоматизированной технологии флотации с целью обеспечения значительного прироста извлечения металлов.

Результаты и обсуждение

На основе имеющихся данных, полученных в ходе наблюдения в течение месяца, сформирован часовой статистический массив по работе межцикловой флотации при переработке медно-цинковых руд. Статистический массив включает 302 наблюдения. В табл. 1 представлены статистические оценки исследуемых параметров.

С учетом реальной работы межцикловой флотации, обеспечивающей по-

Таблица 1

Статистические оценки исследуемых параметров
Statistical estimates of the studied parameters

Параметр	Условные обозначения	Среднее	Минимум	Максимум	Стд.откл.
Крупность пузырей в пенном слое	*d*	41	16	59	7,99
Скорость схода пенного слоя	*V*	40	21	57	7,42
Содержание Fe в руде, %	αFe	39,0	34,8	40,8	0,78
Содержание Cu в руде, %	αCu	0,96	0,63	1,23	0,12
Содержание Zn в руде, %	αZn	4,07	2,60	5,86	0,59
Содержание Fe в концентрате, %	βFe	34,8	28,1	41,6	2,07
Содержание Cu в концентрате, %	βCu	20,1	13,0	23,7	1,87
Содержание Zn в концентрате, %	βZn	3,0	1,8	5,1	0,67
Содержание Fe в хвостах, %	ϑFe	39,0	35	44	1,06
Содержание Cu в хвостах, %	ϑCu	0,17	0,12	0,27	0,02
Содержание Zn в хвостах, %	ϑZn	3,56	2,57	4,95	0,53
Нагрузка на секцию, т/ч	*G*	352	265	374	13,85
Расход воздуха, м3/мин	*W*	7,8	4,4	10,3	0,97
Уровень пульпы	*H*	–128	–499	–110	35,95
Отношение содержания Cu в руде к содержанию Cu в хвостах	αCu/ϑCu	5,80	3,65	9,14	1,10
Отношение содержания Zn в руде к содержанию Zn в хвостах	αZn/ϑZn	1,15	0,89	1,47	0,09

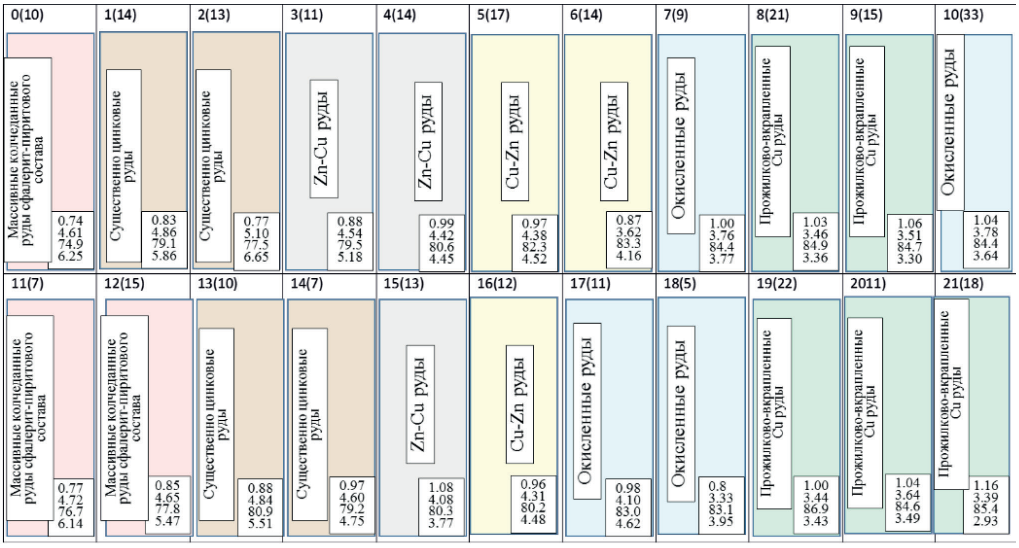

Рис. 1. Топологическая карта Кохонена
Fig. 1. Topological map of Kohonen

лучение «медной головки» с минимальными потерями цинка, выполнена технологическая типизация перерабатываемой шихты. На рис. 1 представлена топологическая карта нейросетевой модели Кохонена СОКК 10:10 — 22:1 формата 11*2.

Для всех элементов решетки Кохонена, представленных на рис. 1, найдены средние значения переменных и выделены цветом элементы, которые относятся к выявленным типам перерабатываемой шихты. Классификация типов руды осуществлена методом факторного анализа.

Полученная компонентная матрица при факторном анализе [12 — 15] найденных средних значений элементов решетки Кохонена представлена в табл. 2. Технологическая интерпретация при работе межцикловой флотации выделенных математических компонент сделана в соответствии со значениями нагрузок исходных признаков на выделенные компоненты.

На рис. 2 показана плоскость F1-F2, выделенная из проекций многофакторного пространства. На данной плоскости нанесены изолинии извлечения меди. Около каждой точки проставлены номера элементов решетки Кохонена. Для наглядности, согласно данным табл. 2, на плоскостях нанесены физические векторы исходных признаков в соответствии с их нагрузками на математические векторы.

При интерпретации решетки Кохонена (рис. 1) все 22 наблюдения объединены в 6 кластеров. Согласно табл. 2 в направлении повышения сфалеритовой

Таблица 2

Матрица компонентных нагрузок
Component Load Matrix

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Крупность пузырей в пенном слое, *d*	–0,871	–0,034	0,071	–0,076
Выход пенного слоя, *V*	0,222	–0,555	0,215	0,681
Содержание Fe в руде, % αFe	0,057	–0,146	–0,923	0,036
Содержание Cu в руде, % αCu	–0,676	–0,549	–0,233	0,192
Содержание Zn в руде, % αZn	0,842	0,102	0,449	0,105
Содержание Fe в концентрате, % βFe	0,953	0,059	–0,043	–0,053
Содержание Zn в концентрате, % βFe	0,551	–0,109	0,777	0,016
Нагрузка на секцию, т/ч, *G*	–0,095	0,163	–0,104	0,897
Отношение αCu/υCu	–0,931	0,020	–0,249	0,026
Отношение αZn/υZn	0,103	0,845	0,081	0,104
Общая дисперсия	4,075	1,399	1,843	1,338
Доля общей дисперсии	0,407	0,140	0,184	0,134
Технологическая интерпретация	↑ Цинковый фактор ↓ Медный фактор	↑ Фактор окисления ↓ Сульфидный фактор	↑ Сфалеритовый фактор ↓ Колчеданность	↑ Нагрузка на секцию

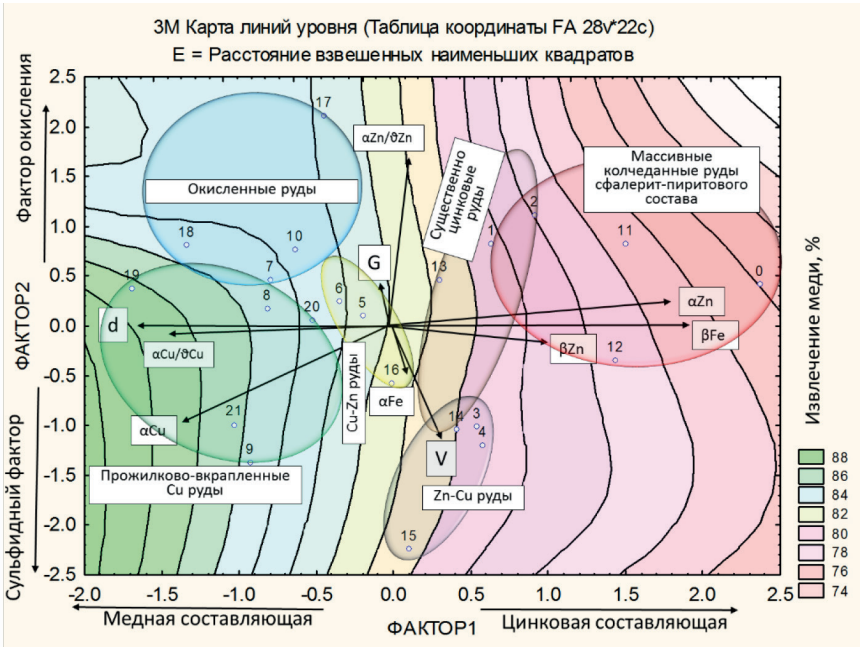

Рис. 2. Проекция многофакторного пространства на плоскость компонент F1-F2
Fig. 2. The projection of multifactorial space onto the plane of the components F1-F2

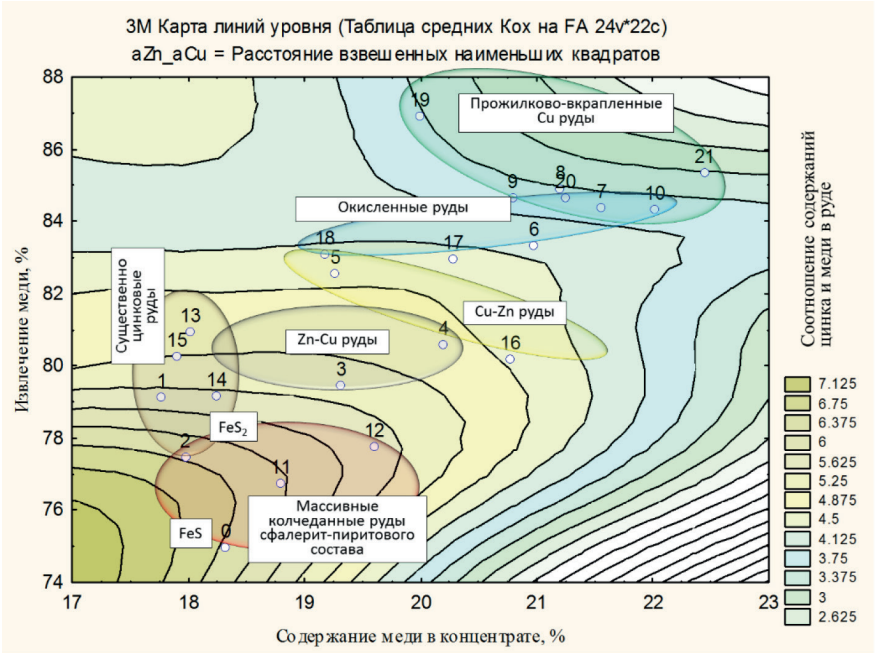

Рис. 3. Наблюдения элементов решетки Кохонена на плоскости «ε – β» с нанесением на нее изолиний соотношения содержания цинка и меди в шихте

Fig. 3. Observations of the elements of the Kohonen lattice on the plane «ε – β» with the application of isolines on the ratio of the content of zinc and copper in the charge

составляющей компоненты F3 располагаются руды с повышенным содержанием сфалерита по отношению к медьсодержащим минералам. Фактор 4 указывает возрастание доли влияния нагрузки на секцию при переработке руды на технологические показатели.

В направлении повышения цинковой составляющей компоненты F1 располагаются технологические типы руды с повышенным содержанием цинка в исходном сырье по отношению к содержанию в нем меди: массивные колчеданные руды сфалерит-пиритового состава, существенно цинковые руды и цинково-медные руды (рис. 2). Согласно нанесенным изолиниям извлечения меди на этих типах руды наблюдается пониженное извлечение данного металла. Для кластера медно-цинковых руд наблюдается наименьшая дисперсия всех рассматриваемых признаков в рудной массе. В направлении повышения медной составляющей компоненты F1 располагаются руды с пониженным содержанием цинка в руде по отношению к содержанию в ней меди: легкообогатимые прожилково-вкрапленные руды и окисленные руды. Компонента F2, в которой со сравнительно большей нагрузкой проявляется параметр $\alpha Zn/\vartheta Zn$, обеспечивает дифференциальность диагностики.

Для наглядности на рис. 3 представлены соотношения содержания цинка и меди в перерабатываемой шихте с технологическими показателями в медном цикле, наблюдения элементов решетки Кохонена размещены на плоскости в координатах «$\varepsilon - \beta$». Согласно кривой обогатимости по меди предел достигается при переработке прожилково-вкрапленных руд, в которых цинковый фактор по отношению к другим кластерам имеет наименьшее значение. С увеличением цинкового фактора заметно ухудшение технологических показателей. Самые низкие показатели по извлечению меди и качеству концентрата наблюдаются при переработке массивных колчеданных руд сфалерит-пиритового состава. Совместный анализ исходных данных методами нейросетевого моделирования и факторного анализа обуславливает достигнутые результаты при разработке технологической типизации руд. Представленная на рис. 1 топологическая карта наглядно демонстрирует главное свойство сетей Кохонена: ассоциативная память и возможность устанавливать близость классов.

Заключение

Данное исследование доказывает сложность и нестационарность свойств перерабатываемых руд Cu-Zn месторождения. Обоснована эффективность применения нейронных сетей Кохонена для выявления технологических особенностей рудной массы.

Также методы нейросетевого моделирования могут быть положены в основу автоматизации технологического процесса на фабрике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ломоносов Г. Г., Турыгина Н. А.* Влияние вещественного состава руд на показатели переработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 2. — С. 314 — 320.

2. *Bicak O.* A technique to determine ore variability in a sulphide ore // Minerals Engineering. 2019. Vol. 142, Article 105927. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105927.

3. *Lvov V., Sishchuk J., Chitalov L.* Intensification of Bond ball mill work index test through various methods // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO SGEM. 2017. Vol. 17, Issue 11, pp. 857 — 864. DOI: 10.5593/sgem2017/11/S04.109.

4. *Sadeghi M., Hodouin D., Bazin C.* Mineral processing plant data reconciliation including mineral mass balance constraints // Minerals Engineering. 2018. Vol. 123, Pp. 117—127. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.04.023.

5. *Бериашвили А. Т., Пикулина В. М.* Новый подход к решению проблемы вариабельности извлечения меди на примере Жезказганского рудного поля // Обогащение руд. — 2018. — № 5. — С. 40—44.

6. *Taguta J., McFadzean B., O`Connor C.* The relationship between the flotation behaviour of a mineral and its surface energy properties using calorimetry // Minerals Engineering. 2019. Vol. 143, Article 105954. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105954.

7. *Liu J., Long H., Corin K. C.* A study of the effect of grinding environment on the flotation of two copper sulphide ores // Minerals Engineering. 2018. Vol. 122, Pp. 339—345. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.03.031.

8. *Романенко С. А., Ушаков Е. К.* Разработка технологической типизации медно-цинковых колчеданных пирротинсодержащих руд на примере Приорского месторождения / Материалы XXIV международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», 9—12 апреля 2019 г. — Екатеринбург, 2019. — С. 66—71.

9. *Александрова Т. Н., Арустамян К. М., Романенко С. А.* Применение математических методов анализа при оценке мировой практики селективной флотации медно-цинковых и колчеданно-полиметаллических руд // Обогащение руд. — 2017. — № 5 (371). — С. 21—27.

10. *Хеиккинен С., Машевский Г. Н.* Алгоритмическая база для управления процессом флотации // Обогащение руд. — 2005. — № 6. — С. 32—37.

11. *Aleksandrova T., Romanenko S., Arastumian K.* Electrochemistry research of preparation slurry before intermediate flotation for sulphide-polimetallic ores // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO SGEM. 2017. Vol. 17. No 11. Pp. 841—848.

12. *Кохонен Т.* Ассоциативная память / пер. с англ. изд. В.К. Быховского. — М.: Мир, 1980. — 239 с.

13. *Кохонен Т.* Самоорганизующиеся карты: Адаптивные и интеллектуальные системы / пер. 3-го англ. изд. В.Н. Агеева; под ред. Ю.В. Тюменцева. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. — 655 с.

14. *Романенко С. А.* Эффективность применения мультисенсорных систем ионометрии и методов нейросетевого моделирования процесса флотации в лабораторных исследованиях // Обогащение руд. — 2013. — № 1. — С. 18—22.

15. Электронный учебник по статистике / StatSoft [электронный ресурс]. URL: http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm (дата обращения 20.07.2018). ГИАБ

REFERENCES

1. Lomonosov G. G., Turygina N. A. Influence of the material composition of ores on processing indicators. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2010, no 2, pp. 314—320.

2. Bicak O. A technique to determine ore variability in a sulphide ore. *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 142, Article 105927. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105927.

3. Lvov V., Sishchuk J., Chitalov L. Intensification of Bond ball mill work index test through various methods. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO SGEM*. 2017. Vol. 17, Issue 11, pp. 857—864. DOI: 10.5593/sgem2017/11/S04.109.

4. Sadeghi M., Hodouin D., Bazin C. Mineral processing plant data reconciliation including mineral mass balance constraints. *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 123, Pp. 117—127. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.04.023.

5. Beriashvili A. T., Pikulina V. M. A new approach to solving the problem of variable copper recovery on the example of the Zhezkazgan ore field. *Obogashchenie rud*. 2018, no 5, pp. 40—44.

6. Taguta J., McFadzean B., O`Connor C. The relationship between the flotation behaviour of a mineral and its surface energy properties using calorimetry. *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 143, Article 105954. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105954.

7. Liu J., Long H., Corin K. C. A study of the effect of grinding environment on the flotation of two copper sulphide ores. *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 122, Pp. 339 — 345. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.03.031.

8. Romanenko S.A., Ushakov E. K. Development of classification ore for copper-zink pyrite-pirrotite priorskoe deposit. *Materialy XXIV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya»*, 9 — 12 aprelya 2019 g. [Proceedings of the XXIV international scientific and technical conference "Scientific bases and practice of processing ores and technogenic raw materials" April 9 — 12, 2019. Ekaterinburg, 2019, pp. 66 — 71.

9. Aleksandrova T. N., Arustamyan K. M., Romanenko S. A. The mathematical analysis methods application in estimation of the international practice of copper-zinc and pyritic-polymetallic ores selective flotation. *Obogashchenie rud*. 2017, no 5 (371), pp. 21 — 27.

10. Kheikkinen S., Mashevskiy G. N. Algorithmic framework for the control of the flotation process. *Obogashchenie rud*. 2005, no 6, pp. 32 — 37.

11. Aleksandrova T., Romanenko S., Arastumian K. Electrochemistry research of preparation slurry before intermediate flotation for sulphide-polimetallic ores. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO SGEM*. 2017. Vol. 17. No 11. Pp. 841 — 848.

12. Kokhonen T. *Assotsiativnaya pamyat'* [Associative memory], Moscow, Mir, 1980. 239 p.

13. Kokhonen T. S*amoorganizuyushchiesya karty: Adaptivnye i intellektual'nye sistemy* [Self-organizing maps: Adaptive and intelligent systems], Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2010. 655 p.

14. Romanenko S.A. Effectiveness of multi-sensor ionometry systems and neural network modeling methods application in flotation processes laboratory studies. *Obogashchenie rud*. 2013, no 1, pp. 18 — 22.

15. *Elektronnyy uchebnik po statistike* [Electronic textbook on statistics] / StatSoft, available at: http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm (accessed 20.07.2018). [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александрова Татьяна Николаевна[1] — д-р техн. наук,
профессор, зав. кафедрой,
Ушаков Егор Константинович[1] — аспирант,
Орлова Анна Вячеславовна[1] — аспирант,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Ушаков Е.К., e-mail: s195065@stud.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

T.N. Aleksandrova[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Chair,
E.K. Ushakov[1], Graduate Student,
A.V. Orlova[1], Graduate Student,
[1] Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: E.K. Ushakov, e-mail: s195065@stud.spmi.ru.

Получена редакцией 02.02.2020; получена после рецензии 28.02.2020; принята к печати 20.04.2020.
Received by the editors 02.02.2020; received after the review 28.02.2020; accepted for printing 20.04.2020.