

# ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ ВЫБОРА КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ГОРНЫХ И ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Р. Е. Леонов<sup>1</sup>, С. С. Патраков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия  
e-mail: lprep2011@mail.ru

**Аннотация:** При создании системы управления технологическими процессами и, в частности, процессами обогащения обязательным является анализ данных, характеризующих технологический процесс. Такой анализ необходим для выбора выходной величины, характеризующей процесс, управляющих величин, наиболее сильно связанных с выходной величиной. Зачастую отдельно производят анализ входных величин с целью выявления сильно взаимосвязанных величин. Это производится ввиду того, что обычно нет необходимости использовать для управления взаимосвязанные входные величины, достаточно одной. Чаще всего на практике для оценки взаимосвязи используют коэффициент парной корреляции. Использование коэффициента парной корреляции накладывает ограничения на анализируемые величины. Эти величины должны быть распределены нормально, и предполагается, что при оценке парной корреляции исключено влияние на анализируемые величины других величин. На практике обычно не проверяют нормальный закон распределения анализируемых величин и не всегда проверяют значимость коэффициента корреляции. В настоящей работе предложено при анализе объекта управления использовать частный коэффициент корреляции, который учитывает корректировку парного коэффициента корреляции, при условии, что исключено влияние других величин на анализируемые. Таким образом, предлагается при предварительном анализе технологического процесса с целью создания системы автоматического управления анализировать взаимосвязь входных величин со всеми выходными попарно, при исключении влияния на анализируемые величины каждой из всех остальных.

**Ключевые слова:** частный коэффициент корреляции, технологический процесс, обработка данных, расчет частного коэффициента корреляции в Matlab, математическая статистика, система автоматического регулирования, канал управления, статическая характеристика.

**Для цитирования:** Леонов Р. Е., Патраков С. С. Применение частного коэффициента корреляции для выбора канала управления горных и обогатительных процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1-1. – С. 48–58. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_011\_0\_48.

## Application of a partial correlation coefficient to select a control channel for mining and processing processes

R. E. Leonov<sup>1</sup>, S. S. Patrakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia, e-mail: lprep2011@mail.ru

**Abstract:** When creating a control system for technological processes and, in particular, enrichment processes, it is mandatory to analyze the data characterizing the technological process. Such an analysis is necessary to select the output value that characterizes the process, the control values that are most strongly associated with the output value. Often, input quantities are analyzed separately in order to identify strongly interconnected quantities. This is done due to the fact that there is usually no need to use interconnected input quantities to control, just one. Most often, in practice, the pair correlation coefficient is used to assess the relationship. The use of the pair correlation coefficient imposes restrictions on the analyzed values. These values should be distributed normally and it is assumed that when evaluating the pair correlation, the influence of other values on the analyzed values is excluded. In practice, they usually do not check the normal distribution law of the analyzed quantities and do not always check the significance of the correlation coefficient. In this paper, it is proposed to use a particular correlation coefficient in the analysis of the control object, which takes into account the correction of the paired correlation coefficient, provided that the influence of other values on the analyzed ones is excluded. Thus, it is proposed, during the preliminary analysis of the technological process, in order to create an automatic control system, to analyze the relationship of input quantities with all output quantities in pairs, while excluding the influence on the analyzed quantities, each of all the others.

**Key words:** private correlation coefficient, technological process, data processing, calculation of private correlation coefficient in Matlab, mathematical statistics, automatic control system, control channel, static characteristic.

**For citation:** Leonov R. E. , Patrakov S. S. Application of a partial correlation coefficient to select a control channel for mining and processing processes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1-1):48–58. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_011\_0\_48.

---

## Введение

Одной из наиболее важных производственных задач является исследование технологического процесса с точки зрения его автоматизации. С ростом обеспеченности горных и обогатительных предприятий контрольно-измерительной аппаратуры появляется возможность дополнительного контроля и управления процессами добычи и обогащения полезных ископаемых.

На предприятиях горной промышленности в службах контроля накапливается значительное количество информации. До сих пор анализ возможности интенсификации производственных процессов осуществляется не только по текущему их контролю, но и с учетом той статистической информации, которая имеется на предприятиях.

Следует отметить, что оптимизация технологических процессов на основе имеющихся статистических накоплен-

ных данных является одним из наиболее дешевых способов повышения эффективности производства.

В связи с этим возрастает роль накопленных данных для повышения эффективности горных и обогатительных процессов.

Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является исследование взаимосвязи и взаимного влияния технологических величин, в том числе на основе коэффициента корреляции. Особенно такая задача актуальна для опасных отраслей деятельности, в частности, горной промышленности [1].

Максимально возможное количество каналов управления при автоматизации рассчитывают как сумму задающих и возмущающих воздействий, помноженную на количество выходных величин. В реальных условиях количество задающих, возмущающих

и выходных величин может достигать десятков значений. Следовательно, теоретически количество каналов управления может быть достаточно высокого порядка [2]. Как показывает практика, не все каналы управления осуществимы или их реализация нецелесообразна по экономическим или техническим причинам. Критерии выбора канала управления можно обобщить следующим образом:

1) при выборе канала управления производят оценку статических и динамических свойств возможных каналов. По статическим и динамическим характеристикам отбирают претендентов;

2) при выборе канала управления выбирают такую входную величину регулирования, которая максимально влияет на выходную величину;

3) оценивают возможности контроля входных и выходных величин;

4) оценивают техническую возможность плавного изменения воздействий, возможность установки регулирующих органов (РО) на рассматриваемом канале.

Чаще всего при выборе управляющего воздействия, оказывающего максимальное влияние на регулируемую величину, используют статистические методы [3]. Это связано с тем, что эти методы обрабатывают результаты нормальной эксплуатации объекта, исключают активное вмешательство в работу объекта, тем самым не нарушая нормальный режим функционирования.

Одной из основных характеристик объекта управления является статическая характеристика. Статическая характеристика представляет собой взаимосвязь задающего воздействия и выходной величины в установившемся режиме работы системы. В графической интерпретации статическая характеристика представляет собой линейную функцию, которая описы-

вается в соответствии со следующей формулой [4, 5]:

$$\Delta y = k \Delta x, \quad (1)$$

где  $\Delta y$  – изменение выходного параметра системы автоматического регулирования;  $k$  – передаточный коэффициент системы автоматического регулирования;  $\Delta x$  – изменение входного параметра системы автоматического регулирования.

Передаточный коэффициент системы автоматического регулирования  $k$  отражает влияние изменения входного воздействия  $\Delta x$  на изменение выходного параметра  $\Delta y$  [4–6].

Выражая значение передаточного коэффициента системы автоматического регулирования в соответствии с (1), получим

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (2)$$

При создании системы управления технологическими процессами и, в частности, процессами обогащения обязательным является анализ данных, характеризующих технологический процесс [7–9]. Такой анализ необходим для выбора величины, характеризующей процесс, управляющих величин, наиболее сильно связанных с выходной величиной. Анализируя (2), видно, что максимальное изменение выходного параметра  $\Delta y$  при малом изменении входного параметра  $\Delta x$  будет достигаться при максимальном передаточном коэффициенте системы автоматического регулирования  $k$ . Исходя из вышесказанного, целесообразно выбирать канал управления при максимальном значении  $k$ .

В настоящее время помимо статической характеристики при выборе канала управления используют коэффициент парной корреляции, который характеризует связь между двумя вели-

чинами. В данном случае коэффициент парной корреляции характеризует связь между задающей величиной и выходным параметром.

На основе коэффициента парной корреляции можно не только установить эффективный канал управления выходной величиной. Анализ коэффициентов корреляции входных величин между собой позволяет исключить из числа управляющих воздействий те входные величины, для которых имеются экономически более предпочтительные и сильно связанные с ними и сильно влияющие на выходную регулируемую величину.

Таким образом, корреляционные исследования — существенная часть предварительного анализа при построении систем автоматизации. Чаще всего на практике используют коэффициент парной корреляции Пирсона.

### Методика исследования

Чаще всего на практике для оценки взаимосвязи используют коэффициент парной корреляции. Коэффициент парной корреляции [10–12] оценивает парную взаимосвязь двух величин:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - M_x)(y_i - M_y)}{N\sigma_x\sigma_y}, \quad (3)$$

где  $r$  — коэффициент корреляции;  $N$  — количество пар наблюдений  $x_i$  и  $y_i$ ;  $M_x$  и  $M_y$  — математические ожидания величин  $x$  и  $y$  соответственно;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — среднеквадратичные отклонения величин  $x$  и  $y$ .

При этом не учитывается, что на  $x$  и  $y$  могут оказывать влияние другие величины. Если это действительно имеет место, то оценка взаимосвязи с помощью  $r$  может оказаться как сильно завышенной, так и отсутствующей, несмотря на значительную вели-

чину  $r$ . Ввиду этого нами предложено при разработке системы автоматизаций использовать частный коэффициент корреляции [13–15]

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}}, \quad (4)$$

где  $r_{xy,z}$  — частный коэффициент корреляции параметров  $x$  и  $y$  при стабилизации параметра  $z$ ;  $r_{xz}$  — парный коэффициент корреляции для параметров  $x$  и  $z$ ;  $r_{yz}$  — парный коэффициент корреляции для параметров  $y$  и  $z$ ;  $r_{xy}$  — парный коэффициент корреляции для параметров  $x$  и  $y$ .

Частный коэффициент корреляции позволяет оценить взаимосвязь двух величин при условии, что некоторая третья величина, которая может оказывать влияние на анализируемые величины, стабилизирована [16, 17].

В то же время вычисление частного коэффициента корреляции достаточно трудоемкий процесс, так как приходится учитывать влияние каждой из оставшихся величин на обе анализируемые [14, 18]. Например, нами были проанализированы данные процесса измельчения железных руд. Данные были представлены в табличном виде. Данная таблица состояла из 7 столбцов и 101 строк. Ниже представлена матрица коэффициентов корреляции, полученная в MATLAB (табл. 1).

В исходных данных столбцы представляют собой измеряемые параметры: Proiz Q — производительность мельницы, т/ч; Feob — содержание железа, %; Femag — содержание магнитного железа, %; Сх+12, Сх+3, Сх+1.25, Сх-1.25 — содержание соответствующих классов крупности. Строки представляют значения этих параметров, измеренных в один и тот же момент времени.

Таблица 1

**Матрица парных коэффициентов корреляции процесса измельчения**  
**Matrix of paired correlation coefficients of the grinding process**

	Proiz Q	Feob	Femag	Cx+12	Cx+3	Cx+1.25	Cx-1.25
Proiz Q	1.0000	0.0124	0.0625	0.2708	0.2215	0.0522	-0.2715
Feob	0.0124	1.0000	0.7880	0.0386	-0.0746	-0.0183	-0.0192
Femag	0.0625	0.7880	1.0000	0.1662	-0.0075	-0.0901	-0.0732
Cx+12	0.2708	0.0386	0.1662	1.0000	0.4290	-0.1217	-0.7935
Cx+3	0.2215	-0.0746	-0.0075	0.4290	1.0000	-0.1418	-0.7149
Cx+1.25	0.0522	-0.0183	-0.0901	-0.1217	-0.1418	1.0000	0.0935
Cx-1.25	-0.2715	-0.0192	-0.0732	-0.7935	-0.7149	0.0935	1.0000

Из табл. 1 видно, что необходимо оценить влияние более двадцати оставшихся величин. Для вычисления частных коэффициентов корреляции нами использован алгоритм, который на псевдокоде может быть описан следующим образом.

1. Ввод исходных данных:

1.1 количество данных, по которым предварительно вычислялся коэффициент корреляции Пирсона —  $N$ ;

1.2 матрица коэффициентов корреляции Пирсона —  $A$ ;

1.3 размерность матрицы коэффициентов корреляции Пирсона —  $n$ ;

1.4 требуемый уровень значимости вычисляемых в дальнейшем частных коэффициентов корреляции.

2. Изменяя текущий номер строки матрицы  $A$  от единицы до  $n-1$ , изменить текущий номер столбца  $j$  от  $(i+1)$  до  $n$  для каждого номера столбца матрицы  $A$  и удостовериться, что текущий номер не совпадает ни с номером строки, ни с номером столбца матрицы  $A$ .

3. Если условие 2 выполняется, рассчитать частный коэффициент корреляции при текущем значении строки и столбца матрицы коэффициентов корреляции Пирсона.

4. Для всех комбинаций строк и столбцов, при которых выполняется условие 2 выполнить вывод рассчитанного частного коэффициента корреляции, оценить его значимость с помо-

щью стандартной программы оценки значимости MATLAB при числе степеней свободы  $N-3$  и заранее выбранного уровня значимости.

Программа автоматически, при вводе исходных табличных данных в систему MATLAB, получает матрицу коэффициентов корреляции (см. табл. 1) и для каждой комбинации двух факторов оценивает влияние на их взаимосвязь каждого третьего фактора. Кроме этого, программа подсчитывает величину  $t$ , на основании которой можно сделать вывод о значимости частного коэффициента корреляции. Требуемый уровень значимости в программу вводится. В наших экспериментах, как обычно в технических приложениях, используется уровень значимости, равный 5% [12, 19, 20]. Результат работы программы состоит из 105 строк, в которых представлены такие параметры, как  $i, j$  – комбинация двух факторов,  $k$  – фактор, влияние которого исключается,  $B$  – значение частного коэффициента корреляции,  $T$  – значение  $t$ -критерия Стьюдента,  $t$  – величина, необходимая для оценки значимости. Часть результата программы представлена на рисунке.

При анализе результатов программы можно увидеть, что значения парного коэффициента корреляции и частного коэффициента корреляции различаются. Это необходимо учитывать при

i=5	j=7	k=2	B=-0.718496	t=-10.226355
i=5	j=7	k=3	B=-0.717422	t=-10.194833
i=5	j=7	k=4	B=-0.681242	t=-9.212320
i=5	j=7	k=6	B=-0.711956	t=-10.036676
i=6	j=7	k=1	B=0.112015	t=1.115914
i=6	j=7	k=2	B=0.093165	t=0.926317
i=6	j=7	k=3	B=0.087480	t=0.869337
i=6	j=7	k=4	B=-0.005049	t=-0.049980
i=6	j=7	k=5	B=-0.011362	t=-0.112489

Проверка значимости  
Отберете значения B по модулю больше T=1.660551

*Результат работы программы для оценки силы взаимосвязи  
The result of the program for assessing the strength of the relationship*

оценке технологической зависимости данных параметров. Нами были отобраны те параметры, у которых значение частного коэффициента корреляции существенно отличается от парного — не менее чем на 20%, со значением  $t$ , по модулю, удовлетворяющему требованию. Эти параметры представлены в табл. 2.

Предложенные методика и программа могут быть использованы для отбора величин, при создании систем автоматического управления, для различных технологических процессов [21–23]. В частности, аналогичным образом были проанализированы данные технологического процесса подземного выщелачивания урановых руд из [24]. В цитируемой работе столбцы представляют собой следующие технологические параметры: концентрация урана в продуктивных растворах (X1); кислотность продуктивных растворов (X2); кислотность выщелачивающих растворов (X3); расход реагента пероксида водорода (X4); окислительно-восстановительный потенциал в выщелачивающих растворах (X5); содержание трехвалентного железа в выщелачивающих растворах (X6); добыча урана (X7). Матрица парных коэффициентов корреляции представлена в табл. 3.

При анализе результатов программы были выделены данные. Количество данных, удовлетворяющих требованиям, составляет порядка 30, часть из них представлена в табл. 4.

Частный коэффициент корреляции, разработанная нами компьютерная программа его вычисления, оценка его статистической достоверности на несколько порядков снижают трудоемкость выбора величин и обоснование структуры системы автоматического регулирования обогатительных процессов.

### **Выводы**

Рассмотрена возможность обоснования выбора канала управления технологического процесса на основе анализа эксплуатационных данных. В качестве примера были рассмотрены процесс подземного выщелачивания урановых руд и процесс измельчения железных руд. На предприятиях наиболее распространенный метод анализа данных — определение статистических характеристик с помощью передаточного коэффициента системы автоматического регулирования  $k$  и коэффициента парной корреляции  $r$ , выявляющего степень взаимосвязи между задающими и выходными параметрами системы. Однако коэффици-

Таблица 2

**Выборка связей параметров со значимыми частными коэффициентами корреляции**  
**Selection of parameter links with significant partial correlation coefficients**

<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>B</i>	<i>r</i>	<i>t</i>
1	4	6	0.199534	0.2708	2.015826
1	7	5	-0.166031	-0.2715	-1.666762
3	4	2	0.220698	0.1662	2.240031

Таблица 3

**Матрица парных коэффициентов корреляции**  
**Matrix of paired correlation coefficients**

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
X1	1.0000	0.7016	-0.1122	-0.0517	0.7652	0.5156	0.6006
X2	0.7016	1.0000	-0.1896	0.1540	0.3408	0.0743	0.5294
X3	-0.1122	-0.1896	1.0000	-0.7090	0.2246	0.3275	-0.0600
X4	-0.0517	0.1540	-0.7090	1.0000	-0.3782	-0.5681	0.0270
X5	0.7652	0.3408	0.2246	-0.3782	1.0000	0.7531	0.4537
X6	0.5156	0.0743	0.3275	-0.5681	0.7531	1.0000	0.2017
X7	0.6006	0.5294	-0.0600	0.0270	0.4537	0.2017	1.0000

Таблица 4

**Выборка связей параметров со значимыми частными коэффициентами корреляции для данных из [24]**

**Selection of parameter links with significant partial correlation coefficients for data from [24]**

<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>B</i>	<i>r</i>	<i>t</i>
1	2	7	0.565651	0.7016	5.040558
1	3	5	-0.452842	-0.1122	-3.732316
1	3	6	-0.347134	-0.1122	-2.720045
1	4	2	-0.226987	-0.0517	-1.712711
1	4	5	0.398750	-0.0517	3.195210
1	4	6	0.342001	-0.0517	2.674451
5	7	2	0.342659	0.4537	2.680284
6	7	4	0.263858	0.2017	2.010192

ент парной корреляции и исследование с его помощью статических характеристик каналов управления не учитывает влияние остальных величин.

Разработана компьютерная программа, позволяющая оценить попарную взаимосвязь всех технологических величин, регистрируемых на объекте, с учетом влияния каждого из сторонних параметров. Программа позволяет рассчитать статистическую значимость парной взаимосвязи двух любых вели-

чин, характеризующих технологический объект, с учетом влияния каждого из остальных параметров.

В результате проведенных нами и приведенных выше исследований выявлено, что неучтенные (сторонние) величины существенно изменяют рассчитанные значения коэффициентов взаимосвязи. Отклонение в расчетах между коэффициентом парной корреляции и частным коэффициентом корреляции может составлять более 20%.

Предлагается при разработке структуры систем автоматического регулирования процессов обогащения и при

обосновании выбора канала управления использовать частный коэффициент корреляции для анализа данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козин В. З., Комлев А. С. Расчет фундаментальной погрешности отбора проб // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11–1. — С. 265–275. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_265.

2. Марасанов В. М., Дылдин Г. П. Математическое описание процесса дробления в щековой дробилке // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2017. — № 8. — С. 82–91. DOI: 10.21440/0536-1028-2017-8-82-91.

3. Подкорытов В. Н., Мочалова Л. А. Анализ факторов, влияющих на рыночную капитализацию крупнейших нефтяных компаний России // Известия Уральского государственного горного университета. — 2021. — № 1 (61). — С. 142–149. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-1-142-149.

4. Музылева И. В., Языкова Л. Н., Мещеряков В. Н. Метод контрольного моделирования для проверки передаточной функции сложноструктурированной системы // Вестник кибернетики. — 2022. — № 2 (46). — С. 46–54. DOI: 10.34822/1999-7604-2022-2-46-54.

5. Wiśniewski J. The possibilities on the use of the spearman correlation coefficient // International Electronic Scientific and Practical Journal "WayScience". 2022, vol. 5, no. 1, pp. 151–162.

6. Слепцов В. В., Аблаева А. Е., Динь Ба Фыюнг. Повышение качества переходных процессов информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера в контурах управления координатами в горизонтальной плоскости // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. — 2022. — № 2. — С. 13–20. DOI: 10.21685/2307-5538-2022-2-2

7. Антипин Ю. Г., Рожков А. А., Барановский К. В. Обоснование параметров камерной системы разработки с оставлением неизвлекаемых целиков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2021. — № 4. — С. 15–23. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-15-23С.

8. Ступакова Е. В., Комлев А. С. Экспериментальная проверка формулы случайной погрешности сокращения проб // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2021. — № 4. — С. 37–44. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-37-44.

9. Русакова Ю. О., Плавник А. Г., Вашурина М. В., Храпцова А. Л. Анализ основных факторов, определяющих значение удельного дебита водозаборной скважины // Известия Уральского государственного горного университета. — 2023. — № 1 (69). — С. 78–87. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-1-78-87.

10. Li G., Zhang Q., Zhang A., Wu Di, Zhan Ch. Pearson Correlation Coefficient-Based Performance Enhancement of Broad Learning System for Stock Price Prediction // IEEE Transaction on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2022, vol. 69, no. 5, pp. 2413–2417. DOI: 10.1109/TCSII.2022.3160266.

11. Edelman D., Móri T. F., Székely G. J. On relationships between the Pearson and the distance correlation coefficients // Statistics and Probability Letters. 2021, vol. 169, 108960. DOI: 10.1016/J.SPL.2020.108960.

12. Abbood A. D., Adel A., Attea B. Pearson coefficient matrix for studying the correlation of community detection scores in multi-objective evolutionary algorithm // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2021, vol. 9, no. 3, pp. 796–807. DOI: 10.21533/pen.v9i3.2284.



13. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Серия: Современные методы в математике. Для инженеров и научных работников. — М.: Физмалит, 2006. — 816 с.

14. Хохряков А. В., Студенок Г. А., Фролов С. Г. Комплексный подход к решению горно-экологических задач на основе анализа внутренних и внешних факторов и оценки рисков // Известия Уральского государственного горного университета. — 2023. — №1 (69). — С. 114–121. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-1-114-121.

15. Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А., Цыпин Е. Ф. О нижних границах классов крупности при предварительном обогащении руды с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11–1. — С. 328–337. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_328.

16. Kundrata J., Fujimoto D., Hayashi Yu., Baric A. Comparison of Pearson correlation coefficient and distance correlation in Correlation Power Analysis on Digital Multiplier // Conference: 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO). 2020. DOI: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245325.

17. Цейтлин Е. М., Гребнева А. А. О преимуществах и недостатках статистических методов прогноза объема образования отходов предприятий минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11–1. — С. 80–94. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_111\_0\_80.

18. Гордеев В. А. Расчет статистических характеристик паспорта прочности горных пород // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2019. — № 4. — С. 33–42. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-33-42.

19. Лапин С. Э., Леонов Р. Е. Выделение значимых факторов при моделировании горных объектов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2019. — № 2. — С. 140–146. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-140-146.

20. Силачев В. В. Автоматическое управление процессами рудоподготовки с косвенным оцениванием возмущающих воздействий: Дисс. ... канд. техн. наук. — ГОУ ВПО «УГГУ», 2011. — 195 с.

21. Исламгалиев Д. В., Глазачев И. В. Оценка изменения осадки грунта под действием штампа с учетом физико-геометрических параметров среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11–2. — С. 16–24. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_112\_0\_16.

22. Валиев Н. Г., Голик В. И., Пропп В. Д., Болгова А. И., Овсянников М. С. Закономерности управления процессами охраны окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11–1. — С. 40–50. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_111\_0\_40.

23. Козин В. Э., Комлев А. С. Определение коэффициентов вариации массовой доли компонентов в продуктах обогащения // Обогащение руд. — 2019. — № 1. — С. 28–33. DOI: 10.17580/or.2019.01.04.

24. Юсупов Х. А., Алешин А. П., Башилова Е. С., Цой Б. В. Применение пероксида водорода для идентификации подземного выщелачивания // Обогащение руд. — 2021. — № 2. — С. 21–26. DOI: 10.17580/or.2021.02.04. **ПЛАБ**

## REFERENCES

1. Kozin V. Z., Komlev A. S. Calculation of fundamental sampling error. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11–1, pp. 265–275. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_265.

2. Marasanov V. M., Dyldin G. P. Mathematical description of the crushing process in a jaw crusher. *News of the Higher Institutions. Mining magazine.* 2017, no. 8, pp. 82–91. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2017-8-82-91.

3. Podkorytov V. N., Mochalova L. A. Analysis of factors affecting the market capitalization of Russia's largest oil companies. *News of the Ural State Mining University*. 2021, no. 1(61), pp. 142–149. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-1-142-149.
4. Muzyleva I. V., Zazykova L. N., Meshcheryakov V. N. Method of Control Modeling for Testing Transfer Function of a Highly Structured System. *Proceedings in Cybernetics*. 2022, no. 2 (46), pp. 46–54. [In Russ]. DOI: 10.34822/1999-7604-2022-2-46-54.
5. Wiśniewski J. The possibilities on the use of the spearman correlation coefficient. *International Electronic Scientific and Practical Journal "WayScience"*. 2022, vol. 5, no. 1, pp. 151–162.
6. Sleptsov V. V., Ablavaeva A. E., Dinh Ba Phuong. Improving transition quality of the informationmeasuring and control system of the quadcopter in the control circuits in the horizontal plane. *Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2022, no. 2, pp. 13–20. [In Russ]. DOI: 10.21685/2307-5538-2022-2-2.
7. Antipin Iu. G., Rozhkov A. A., Baranovskii K. V. Substantiation of the parameters of open stoping mining method with abandonment of unrecoverable pillars. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021, no. 4, pp. 15–23. [In Russ.]. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-15-23.
8. Stupakova E. V., Komlev A. S. Experimental test of the sample reduction random error formula. *News of the Ural State Mining University*. 2021, no. 4, pp. 37–44. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-37-44.
9. Rusakova Yu. O., Plavnik A. G., Vashurina M. V., Khramtsova A. L. Analysis of the main factors determining the value of the specific flow rate of a water intake well. *News of the Ural State Mining University*. 2023, no. 1 (69), pp. 78–87. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-1-78-87.
10. Li G., Zhang Q., Zhang A., Wu Di, Zhan Ch. Pearson Correlation Coefficient-Based Performance Enhancement of Broad Learning System for Stock Price Prediction. *IEEE Transaction on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2022, vol. 69, no. 5, pp. 2413–2417. DOI: 10.1109/TCSII.2022.3160266.
11. Edelman D., Móri T. F., Székely G. J. On relationships between the Pearson and the distance correlation coefficients. *Statistics and Probability Letters*. 2021, vol. 169, 108960. DOI: 10.1016/J.SPL.2020.108960.
12. Abbood A. D., Adel A., Attea B. Pearson coefficient matrix for studying the correlation of community detection scores in multi-objective evolutionary algorithm. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2021, vol. 9, no. 3, pp. 796–807. DOI: 10.21533/pen.v9i3.2284.
13. Kobzar A. I. Applied mathematical statistics. Series: Modern Methods in Mathematics. For engineers and scientific workers, Moscow, Fizmatlit, 2006, 816 p. [In Russ].
14. Khokhryakov A. V., Studenok G. A., Frolov S. G. An integrated approach to solving mining and environmental problems based on the analysis of internal and external factors and risk assessment. *News of the Ural State Mining University*. 2023, no. 1 (69), pp. 114–121. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-1-114-121.
15. Ovchinnikova T. Yu., Efremova T. A., Tsy-pin E. F. Lower size grade limits in ore pretreatment using X-ray fluorescent separation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11-1, pp. 328–337. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_328.
16. Kundrata J., Fujimoto D., Hayashi Yu., Baric A. Comparison of Pearson correlation coefficient and distance correlation in Correlation Power Analysis on Digital Multiplier. *Conference: 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*. 2020. DOI:10.23919/MIPRO48935.2020.9245325.
17. Tseytlin E. M., Grebneva A. A. On the advantages and disadvantages of the extrapolation method and of correlation and regression analysis for predicting the volume of waste generation of enterprises of the mineral resource complex. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11–1, pp. 80–94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_111\_0\_80.

18. Gordeev V. A. Calculation of statistical characteristics of rock strength certificate. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019, no. 4, pp. 33–42. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-33-42.

19. Lapin S. E., Leonov R. E. Selecting significant factors when simulating mining facilities. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019, no. 2, pp. 140–146. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-140-146.

20. Silachev V. V. Automatic control of ore preparation processes with indirect assessment of disturbing influences: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Yekaterinburg, URSMU, 2011, 195 p. [In Russ].

21. Islamgaliev D. V., Glazachev I. V. Assessment of change of ground subsidence under action of the stamp with considering the physical and geometric parameters of environment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11–2, pp. 16–24. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_112\_0\_16.

22. Valiev N. G., Golik V. I., Propp V. D., Bolgova A. I., Ovsyannikov M. S. Regularities of environmental protection process management. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11–1, pp. 40–50. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_111\_0\_40.

23. Kozin V. Z., Komlev A. S. Determination of coefficients of variation of the mass fraction of components in enrichment products. *Ore enrichment*. 2019, no. 1, pp. 28–33. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2019.01.04.

24. Yusupov H. A., Aleshin A. P., Bashilova E. S., Tsoi B. V. Application of hydrogen peroxide for identification of underground leaching. *Ore enrichment*. 2021, no. 2, pp. 21–26. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.02.04.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Леонов Рафаил Ефимович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры Автоматики и компьютерных технологий Уральского государственного горного университета, ID ORCID: 0000-0002-2531-8336, lprep2011@mail.ru, Россия, г. Екатеринбург (для контактов);

*Патраков Семен Сергеевич*<sup>1</sup> — аспирант по направлению подготовки 09.06.01 Информатика и вычислительная техника, направленность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, ID ORCID: 0009-0007-9173-6935, patrakov.sema@mail.ru, Россия, г. Екатеринбург;

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет (ФГБОУ «УГГУ»), Россия, 620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Leonov R. E.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Automation and Computer – Integrated Technologies, Ural State Mining University, lprep2011@mail.ru, Yekaterinburg, Russia. ORCID ID: 0000-0002-2531-8336 (corresponding author);

*Patrakov S. S.*<sup>1</sup>, postgraduate student in the field of training 09.06.01 Informatics and computer technology, focus 2.3.3. Automation and management of processes and production, patrakov.sema@mail.ru, Yekaterinburg, Russia. ID ORCID: 0009-0007-9173-6935;

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Ural State Mining University”, 30 Kuibyshev str., Yekaterinburg, Russia, 620144

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 11.09.2023; принята к печати 10.12.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 11.09.2023; accepted for printing 10.12.2023.

