

УДК 622.013.3 © О.Ю. Козлова<sup>1</sup>, В.В. Агафонов<sup>2</sup>, В.В. Козлов<sup>3</sup>, 2026UDC 622.013.3 © O.Yu. Kozlova<sup>1</sup>, V.V. Agafonov<sup>2</sup>, V.V. Kozlov<sup>3</sup>, 2026<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,  
119454, г. Москва, Россия<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University,  
Moscow, 119454, Russian Federation<sup>2</sup> НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия<sup>2</sup> National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS),  
Moscow, 119049, Russian Federation<sup>3</sup> Тучковский филиал ФГАОУ ВО «Московский политехнический  
университет», 143130, п.г.т. Тучково, Россия<sup>3</sup> Tuchkovsky Branch of Moscow Polytechnic University,  
urban-type settlement Tuchkovo, 143130, Russian Federation

✉ e-mail: kozlova\_ou@mail.ru

✉ e-mail: kozlova\_ou@mail.ru

# Выявление «узких мест» в технологии угледобычи с использованием многомерного метода статистики

## Identification of “bottlenecks” in coal mining technology using a multidimensional statistical method

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-5-100-103>**КОЗЛОВА О.Ю.**

Канд. техн. наук,  
доцент кафедры «Высшая математика – 3»  
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский  
технологический университет»,  
119454, г. Москва, Россия,  
e-mail: kozlova\_ou@mail.ru

**АГАФОНОВ В.В.**

Профессор кафедры  
«Геотехнологии освоения недр»  
Горного института НИТУ МИСИС,  
119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: agafonovvv@yandex.ru

**КОЗЛОВ В.В.**

Доктор техн. наук, доцент,  
Тучковский филиал ФГАОУ ВО «Московский  
политехнический университет»,  
143130, п.г.т. Тучково, Россия  
e-mail: kozmaster@mail.ru

Для реализации процедуры выявления «узких мест», формирующихся в функциональных структурах угледобывающих предприятий с подземным способом добычи, предлагается использование многомерного метода статистики (факторный анализ). Исходя из опыта его реализации в угольной отрасли, чаще всего он задействовался в области ординации основных горно-геологических факторов и установления степени их влияния на технологические процессы и рабочие операции угледобычи. Анализ проведенных исследований в заявленной проблематичной области позволил выявить основной постулат, в основе которого заложена основная закономерность, связанная с тем, что исходный статистический массив с учетом существующих ограничений всегда несет неявную информацию о «скрытых», особенно в первой стадии, и практически никак не проявляющих себя диспропорциях в основных технологических звеньях шахт, причем для прямого их проявления требуется определенное время.

**Ключевые слова:** технологии угледобычи, многофакторный анализ, моделирование, угольная шахта, технологическая система, узкие места, алгоритм.

**Для цитирования:** Козлова О.Ю., Агафонов В.В., Козлов В.В. Выявление «узких мест» в технологии угледобычи с использованием многомерного метода статистики // Уголь. 2026;(5):100-103. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-5-100-103.

**Abstract**

To implement the procedure for identifying “bottlenecks” that form in the functional structures of coal mining enterprises with an underground mining method, it is proposed to use a multidimensional statistical method (factor analysis). Based on the experience of its implementation in the

coal industry, it was most often used in the field of ordination of the main mining and geological factors and determining the degree of their influence on the technological processes and operational operations of coal mining. The analysis of the conducted research in the declared problematic area made it possible to identify the main postulate, which is based on the basic pattern associated with the fact that the initial statistical array, taking into account existing limitations, always carries implicit information about "hidden", especially in the first stage and practically non-manifesting imbalances in the main technological links of mines, and for direct their manifestation takes a certain amount of time.

**Keywords**

Coal mining technologies, multifactorial analysis, modeling, coal mine, technological system, bottlenecks, algorithm.

**For citation**

Kozlova O.Yu., Agafonov V.V., Kozlov V.V. Identification of "bottlenecks" in coal mining technology using a multidimensional statistical method. *Ugol'*. 2026;(5):100-103. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-5-100-103.

**ВВЕДЕНИЕ**

Установить тенденцию ухудшения условий функционирования, снижения пропускных способностей можно путем анализа определенных корреляционных связей между выделенной совокупностью параметров, отклонения которых от нормы проявляются значительно раньше, нежели возникновение определенных диспропорций.

Данная процедура подразумевает построение матрицы статистических наблюдений  $X$ , в столбцы которой заносят

ся определенные количественные показатели, представленные в метрических шкалах ( $j = 1, 2, \dots, m$ ), а в строки вносится описание пространственно-временного тренда ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Целевое линейное преобразование матрицы  $X$  предусматривает ее редуцирование (сжатие) в матрицу  $F$  с меньшей размерностью  $p$  ( $m > p$ ) без существенной потери ее информационной содержательности (рис. 1).

**СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

Использование методологии факторного анализа в этих условиях предполагает формирование определенной совокупности статистических моделей, отображающих «скрытые» очаги формирования негативных тенденций, описываемые целевыми математическими функциями, и в качестве главенствующей составляющей заявляется значение среднего расстояния между сформированными факторными нагрузками.

Тенденция увеличения среднего расстояния однозначно интерпретируется как негативная составляющая нежелательных отклонений и приводящая к ухудшению функционирования угольных шахт.

В использовании данного подхода закладываются гипотеза Ч. Спирмена [1, 2, 3] (*common factors*), постулат подчинения исходных статистических данных нормальному закону распределения (тест «сферичности» Бартлетта), установление диагональности корреляционной матрицы. При уровне значимости более 5% (факт подтверждения случайности направленности главных осей) использование факторного анализа исключается.

Алгоритмическое обеспечение проведения расчетов выглядит следующим образом. Первоначальная процедура подразумевает преобразование матрицы  $X(l:p, l:n)$  в ковариационную (корреляционную) матрицу  $\Sigma(l:p, l:n)$ , где  $p$  – число параметров,  $n$  – число строк.

Процедура линейного преобразования:

$$X = QY + U \tag{1}$$

уменьшает размерность матрицы  $X(l:p)$  до уровня  $Y(l:p')$ , при этом  $p' \ll p$  [4]. При этом геометрическая близость точек в новом факторном пространстве подразумевает наличие стабильности состояния, а их смещение – неосозданное ухудшение этой стабильности.

Формирование последующей матрицы  $U(l:p', l:n)$  связано с наличием остаточных факторов (неувязок)  $x(i)$ . В случае, когда остаточные факторы  $U(l:p', l:n)$  представлены малыми значениями, то метод факторного анализа можно заменить методом главных компонент [5, 6] с проведением дополнительных вычислений.

В свою очередь это требует установления диагональности матрицы факторных нагрузок  $QTQ$ :

$$QTQ = \Sigma - V, \tag{2}$$

где  $V$  – ковариационная матрица  $U(l:p')$ , т.е.  $V = M(UU^T)$ .

Далее на основе сформированной матрицы факторных нагрузок  $Q(l:p, l:p')$  производят вычисление общих факторов с преобразованием уравнения:

$$Y_v = (Q^T V^{-1} Q)^{-1} Q^T V^{-1} X_v, \quad v = \overline{1, n} \tag{3}$$

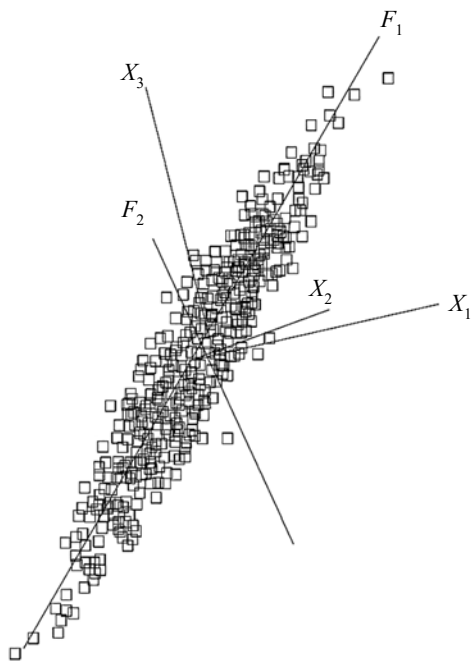


Рис. 1. Редуцирование признакового пространства в рамках многомерного статистического анализа  
Fig. 1. Reduction of the feature space in the framework of multidimensional statistical analysis

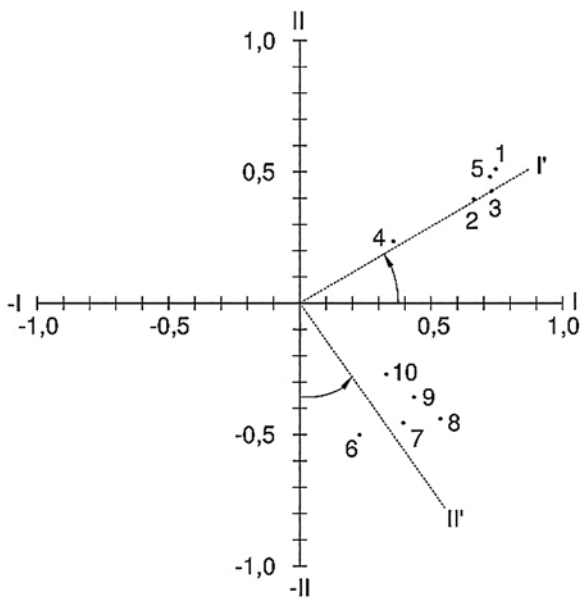


Рис. 2. Процедура вращения факторов Варимакс  
Fig. 2. Varimax factor rotation procedure

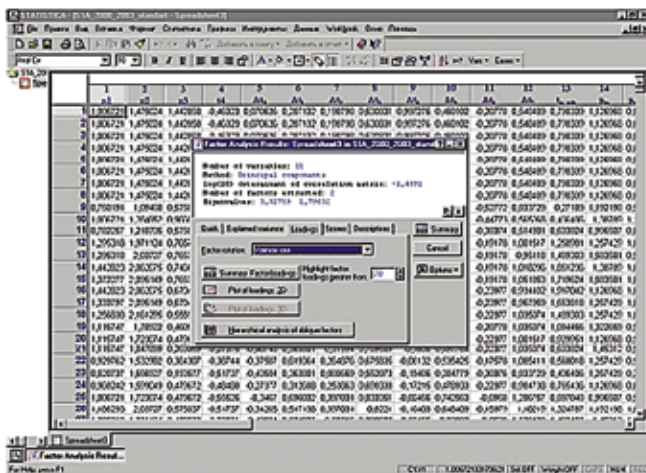


Рис. 3. Расчетный модуль пакета STATISTICA  
Fig. 3. Calculation module of the STATISTICA package

Таблица 1

**Предельные значения факторных нагрузок**  
Limit values of factor loads

Параметр	на $Y_1$	на $Y_2$
$t_1$	0,904467	0,185498
$t_2$	0,865497	-0,134976
$t_3$	0,904433	0,0040654
$t_4$	0,939675	-0,005347
$t_5$	0,849765	-0,118733
$t_6$	0,683365	0,439876
$t_7$	0,638765	0,306754
$t_8$	-0,006654	0,885434
$t_9$	0,284322	0,576545
$t_{10}$	-0,257434	0,849876

Применительно к статистическим данным угольных шахт рационально и целесообразно использование метода вращения *Варимакс*, в основе которого лежит процедура максимизации разброса квадратов факторных нагрузок на основе анализа дисперсии.

Адаптация и апробация предложенного методического подхода проведены для выявления «узких мест» в технологии угледобычи с использованием многомерного метода статистики в рамках реализации модуля программного обеспечения проведения расчетов пакета STATISTICA применительно к условиям шахты «Котинская» ОАО «СУЭК-Кузбасс», рис. 3.

24 производственно-технических параметра, отображенных в статистической отчетности были стандартизованы с использованием методики ISO 2314, – в конечном итоге сформирована матрица параметров  $X(1:24, 1:800)$ , которая выступала в качестве информационного массива.

Максимальные значения факторных нагрузок в рамках десяти параметров с наибольшими корреляционными связями с двумя выделенными общими факторами представлены в табл. 1.

Общие факторы были выделены в результате вычисления собственных чисел матрицы  $X(l:p, l:n)$ .

Основополагающей дальнейшей процедурой является вычленение факторов с малой «случайной» изменчивостью (критерий Кайзера с собственными значениями, превышающими 1). Довольно часто используется и критерий «каменистой осыпи» Кэттеля. В графическом представлении все сводится к отысканию участка с убыванием собственных значений факторных нагрузок слева направо с максимальным замедлением.

72% общей дисперсии, присущие двум факторам, позволили их выявить в качестве основополагающих для проведения факторного анализа.

Интерпретируя физический смысл заявленных параметров (см. табл. 1), фактор  $Y_1$  можно охарактеризовать как технологичность горно-геологических условий разработки, так как он связан с газообильностью, водообильностью и нарушенностью запасов с величинами приращений  $\Delta t$ ,  $Y_2$  – ассоциируется с производственно-техническим уровнем и связан с нагрузкой на очистной забой и эксплуатационными издержками.

В табл. 2 представлено изменение факторных нагрузок при шаге увеличения размера матрицы на 200 измерений (величины  $C_1$  и  $C_2$ ). Так, в рамках выборки 400 измерений факторная нагрузка  $C_2^{400}$  для параметра  $\Delta t_4$  уменьшается с 0,8364 до 0,3715. Та же самая тенденция присуща и факторной нагрузке  $C_1^{800}$  (нарушенность и водообильность).

Коэффициент конгруэнтности [-1, +1] используется в рамках установления причинно-следственных связей нагрузок и общих факторов [7]:

$$\Psi_{Y_1 Y_2} = \frac{\sum_{i=1}^n F_{Y_{1i}} F_{Y_{2i}}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n F_{Y_{1i}}^2\right) \left(\sum_{i=1}^n F_{Y_{2i}}^2\right)}} \quad (4)$$

где  $F_{Y_{1i}}$  – значение  $Y_1$  для  $i$ -го измерения,  $F_{Y_{2i}}$  – значение  $Y_2$ .

## Факторные нагрузки

## Factor loads

Параметр	$C_1^{200}$	$C_2^{200}$	$C_1^{400}$	$C_2^{400}$	$C_1^{600}$	$C_2^{600}$	$C_1^{800}$	$C_2^{800}$
$t_1$	0,889765	0,118834	0,896655	0,119954	0,905643	0,0385643	0,718543	0,001678
$t_2$	0,856743	-0,126633	0,876799	-0,119854	0,893455	0,005865	0,885495	0,04498
$t_3$	0,907632	0,005344	0,929943	-0,108977	0,908643	0,0638698	0,638677	0,14983
$t_4$	0,949966	-0,00643	0,904366	-0,184376	0,638845	-0,108745	0,686745	-0,11965
$t_5$	0,815433	-0,117733	0,854497	-0,148733	0,907745	-0,085676	0,886743	-0,11957
$t_6$	0,683498	0,384423	0,583486	0,583322	0,775699	0,143385	0,718433	0,21865
$t_7$	-0,001154	0,284487	0,727567	0,307734	0,506677	0,143398	0,484589	0,11956
$t_8$	0,343387	0,854497	-0,184387	0,806676	0,175434	0,286754	0,165433	0,33965
$t_9$	-0,182387	0,543389	0,018556	0,795477	0,485654	0,887643	-0,176593	0,84876
$t_{10}$	0,066545	0,775532	-0,218676	0,763326	-0,143376	0,887655	-0,186787	0,84967

## ВЫВОДЫ

Процедура сопоставления результатов статистических измерений показала прямую связь изменения расстояния между факторными нагрузками с параметрами  $\Delta t_3$ ,  $\Delta t_4$ ,  $\Delta t_5$  (приращения газообильности, нарушенности и водообильности), что оказалось невозможно проследить по данным статистической отчетности. Выявленное накопление факторных нагрузок, связанное с этими негативными компонентами рабочей среды, в обязательном порядке приведет к снижению технико-экономической эффективности, что полностью подтверждено ретроспективным анализом. Этот процесс характеризуется тенденцией возрастания расстояния между факторными нагрузками  $r_a$  от 0,25 до 0,75.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные методологические аспекты факторного анализа позволяют выявить зарождающиеся диспропорции («узкие места») в технологии угледобычи и ее различных технологических подсистем, которые практически невозможно проследить в рамках статистической отчетности наблюдений за определенными параметрами, так как нарушение корреляционных связей во временном тренде возникает гораздо раньше, чем происходит проявление диспропорций.

## Список литературы • References

1. Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.В. Классификация многомерных наблюдений. М.: Статистика, 1974. 238 с.
2. Рао С.Р. Линейные статистические методы и их приложения. М.: Наука, 1968. 548 с.
3. Андрукович И.Ф. Заметки о факторном анализе. Многомерный статистический анализ и вероятностное моделирование реальных процессов: ученые записки по статистике, Т. 54, Сб. научн. статей. М.: Наука, 1990. 296 с.
4. Факторный дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ./ Дж.О. Ким, Ч.У. Мьюлер, У.Р. Клекка и др.; под ред. И.С. Енюкова. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.

5. Харман Г. Современный факторный анализ. М.: Статистика, 1972. 420 с.
6. Боровиков В.П. STATISTICA, Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов, 2-е изд. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
7. Воропаева Е.В., Агафонов В.В. Выявление диспропорций в технологических системах угольных шахт на основе факторного анализа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018;2(9):8-12. Voropaeva E.V., Agafonov V.V. Identification of imbalances in technological systems of coal mines based on factor analysis. *Mining information and analytical bulletin*. 2018;2(9):8-12. (In Russ.).

## Authors Information

**Kozlova O.Yu.** – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Higher Mathematics – 3, MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: kozlova\_ou@mail.ru

**Agafonov V.V.** – Professor at the Department of Geotechnology of Subsurface Development at the Mining Institute of the National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: agafonovfv@yandex.ru

**Kozlov V.V.** – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Tuchkovsky Branch of Moscow Polytechnic University, urban-type settlement, Tuchkovo, 143130, Russian Federation, e-mail: kozmaster@mail.ru

## Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.02.2026

Поступила после рецензирования: 16.04.2026

Принята к публикации: 30.04.2026

## Paper info

Received February 19, 2026

Reviewed April 16, 2026

Accepted April 30, 2026