

УДК 330.4

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-2

## Оценивание параметров кластерной кусочно-линейной регрессионной функции риска

С. И. Носков<sup>1</sup>, С. В. Беляев<sup>2</sup>, А. Р. Чекалова<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия<sup>1</sup>sergey.noskov.57@mail.ru, <sup>2</sup>bsv2001@list.ru, <sup>3</sup>chekalova49@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Кластерные регрессионные модели весьма эффективны при исследовании различных аспектов функционирования анализируемых объектов, в том числе связанных с риском. В частности, рассмотрены проблемы анализа: странового риска, риска программного проекта, риска отказов для городской трубопроводной сети, риска загрязнения грунтовых вод, пожарного риска зданий, риска наводнений, риска дефолта в кредитовании. Цель – разработка алгоритмического способа идентификации параметров кластерной кусочно-линейной функции риска. *Материалы и методы.* Использованы статистические данные за 2023 г. по 10 субъектам Сибирского федерального округа. Применен алгоритмический способ, основанный на сведении задачи оценивания параметров кластерной кусочно-линейной функции риска к задаче линейно-булева программирования. Функция потерь задана в виде суммы модулей ошибок аппроксимации. *Результаты.* Построена кластерная кусочно-линейная функция риска для цен на жилье в субъектах Сибирского федерального округа. В качестве независимых переменных задействованы цены на кирпич, цемент и обрезную доску. Модель обладает высоким качеством аппроксимации – средняя процентная ошибка составляет 0,4. *Выводы.* Задача оценивания неизвестных параметров кластерной кусочно-линейной функции риска при задании функции потерь в виде суммы модулей ошибок аппроксимации сведена к задаче линейно-булева программирования.

**Ключевые слова:** кластерная кусочно-линейная функция риска, оценивание параметров, задача линейно-булева программирования, индексное множество, цены на жилье

**Для цитирования:** Носков С. И., Беляев С. В., Чекалова А. Р. Оценивание параметров кластерной кусочно-линейной регрессионной функции риска // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 17–25. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-2

## Estimation of parameters for a cluster-based piecewise linear risk regression function

S.I. Noskov<sup>1</sup>, S.V. Belyaev<sup>2</sup>, A.R. Chekalova<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia<sup>1</sup>sergey.noskov.57@mail.ru, <sup>2</sup>bsv2001@list.ru, <sup>3</sup>chekalova49@gmail.com

**Abstract.** *Background.* The article notes that cluster regression models are highly effective in studying various aspects of the analyzed objects' functioning, including those related to risk. In particular, the following risk analysis problems are considered: country risk, software project risk, failure risk in urban pipeline networks, groundwater contamination risk, building fire risk, flood risk, and loan default risk. The objective of this work is to develop an algorithmic method for identifying the parameters of a cluster-based piecewise linear

risk function. *Results*. A cluster-based piecewise linear risk function has been constructed for housing prices in the regions of the Siberian Federal District. Independent variables include the prices of bricks, cement, and edged boards. The model demonstrates high approximation accuracy, with an average percentage error of 0.4. *Conclusions*. The problem of estimating unknown parameters of a cluster-based piecewise linear risk function, with the loss function defined as the sum of absolute approximation errors, has been reduced to a linear Boolean programming problem.

**Keywords:** cluster-based piecewise linear risk function, parameter estimation, linear Boolean programming problem, index set, housing prices

**For citation:** Noskov S.I., Belyaev S.V., Chekalova A.R. Estimation of parameters for a cluster-based piecewise linear risk regression function. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2025;(3):17–25. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-2

## Введение

Кластерные регрессионные модели эффективны при исследовании аспектов функционирования анализируемых объектов, связанных с риском. Так, в работе [1] рассматривается применение гибридных нейронных сетей, в частности иерархического кластерного анализа, для анализа странового риска, что может быть весьма интересно для политиков и других лиц, занимающихся разработкой систем раннего оповещения. В статье [2] кластерный анализ применяется для оценки риска программного проекта. Изучение измерений риска на всех уровнях показало, что даже проекты с низким риском реализации могут иметь высокий уровень риска сложности. Было изучено влияние объема проекта, методов поиска и стратегической ориентации на совокупный риск проекта. В публикации [3] предлагается метод, основанный на кластеризации и статистическом тесте, для оценки состояния риска отказов для городской трубопроводной сети с помощью небольшого объема статистической информации. Результаты показывают, что кластер трубопроводов с самым высоким риском имеет в 7 раз более высокий уровень аварийности, чем кластер с самым низким риском. Данный метод может помочь в принятии решений относительно плановых проверок и восстановления трубопроводных сетей. Исследование [4] посвящено разработке статистической кластерной модели риска, которая классифицирует безопасные и небезопасные районы в отношении геогенного загрязнения мышьяком грунтовых вод в Китае. В работе [5] представлена модель анализа пожарного риска здания на основе сценарных кластеров и ее применение в управлении. С помощью подобных моделей можно принимать меры по управлению пожарным риском для улучшения оценки пожарной безопасности зданий, снижения уровней пожарного риска и причиненного ущерба.

В публикации [6] проведено исследование бизнес-моделей 1237 банков в период с 2011 по 2017 г. с применением кластерного анализа на основе отчетов о прибылях и убытках. Выявлено, что эффективная банковская бизнес-модель должна быть основана на различных эндогенных факторах (статьи финансовой отчетности банка и операционная стратегия) и может быть связана с экзогенными факторами (финансовые кризисы, политика центральных банков и т.д.). В работе [7] изучается динамическая модель оценки риска наводнений, построенная на принципе кластеризации и индексах риска исходя из всей структуры системы. Применяется подход нечеткой аналитической

иерархии для определения весов индексов, а будущее значение каждого индекса моделируется с помощью улучшенного алгоритма нейронной сети обратного распространения. В статье [8] предлагается интегрированная методология оценки риска наводнений, основанная на использовании улучшенного метода энтропийного веса и кластерного алгоритма k-средних. Для проверки применимости предлагаемого подхода выбран регион Хайкоу в Китае. Метод обучения на основе адаптивной кластеризации с использованием ансамбля с несколькими представлениями, образованными градиентными деревьями решений, для прогнозирования риска дефолта в кредитовании рассматривается в [9]. В исследовании [10] разрабатывается комплексная причинно-следственная модель морских инцидентов с использованием методов кластерного анализа и причинно-следственной связи для выявления и классификации основных факторов, способствующих морским авариям. Этот подход позволяет систематически изучать взаимосвязи между различными факторами, обеспечивая целостное понимание причин инцидентов. В статье [11] применяются неконтролируемые алгоритмы кластеризации машинного обучения для поиска групп инвесторов, которые ведут себя схожим образом. Показано, что информация о поле, регионе проживания и семейном положении не объясняет поведение клиентов, тогда как восемь переменных частоты обращений, объема торговли и транзакций являются наиболее информативными.

Цель исследования – разработка алгоритмического способа идентификации параметров кластерной кусочно-линейной функции риска, основанного на сведении этой задачи к задаче линейно-булева программирования.

### **Сведение задачи идентификации параметров кластерной кусочно-линейной функции риска к задаче линейно-булева программирования**

При анализе сложных социально-экономических и технических систем весьма эффективным бывает применение кусочно-линейной регрессионной функции риска [12, 13]:

$$y_k = \max\{\alpha_1 x_{k1}, \alpha_2 x_{k2}, \dots, \alpha_m x_{km}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

здесь  $y$  – зависимая переменная;  $x_i, i = \overline{1, m}$  – независимые переменные;  $k$  – номер наблюдения;  $n$  – число наблюдений;  $\alpha_i, i = \overline{1, m}$  – оцениваемые параметры;  $\varepsilon_k, k = \overline{1, n}$  – ошибки аппроксимации. Все переменные в модели (1) детерминированы.

Функция риска была разработана для анализа взаимовлияния негативных факторов (рисков) функционирования различных технических и экономических объектов. Отличительным свойством функции риска является то, что, как следует из модели (1), значение выходной переменной в каждом наблюдении равно максимальному значению независимой переменной с некоторым коэффициентом, и никакое снижение значений остальных переменных не приведет к его уменьшению.

В работе [14] введена кластерная кусочно-линейная регрессионная функция риска вида

$$y_k = \alpha_0^j + \max\{\alpha_1^j x_{k1}, \alpha_2^j x_{k2}, \dots, \alpha_m^j x_{km}\} + \varepsilon_k^j, \quad j = \overline{1, r}, \quad k \in P^j, \quad (2)$$

здесь  $r$  – заранее заданное число кластеров;  $\alpha_i^j, j = \overline{1, r}, i = \overline{0, m}$  – подлежащие определению оценки параметров, индексные множества  $P^j \subset \{1, 2, \dots, n\}, j = \overline{1, r}$  фиксируют номера входящих в соответствующие кластеры наблюдений;  $\varepsilon_k^j, j = \overline{1, r}, k = \overline{1, n}$  – ошибки аппроксимации.

Составы индексных множеств  $P^j, j = \overline{1, r}$ , как и оценки параметров  $\alpha_i^j, j = \overline{1, r}, i = \overline{0, m}$ , также следует вычислить. Эти множества не должны пересекаться, а их объединение – совпадать с множеством номеров наблюдений исходной выборки данных:

$$\bigcup_{j=1}^r P^j = \{1, 2, \dots, n\}, P^i \cap P^j = \emptyset, i \neq j.$$

Введем обозначения [14]:

$$A = \|\alpha_i^j\|, j = \overline{1, r}, i = \overline{0, m}, \Xi = \|\sigma_{kj}\|, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, r},$$

где

$$\sigma_{kj} = \begin{cases} 1, & k \in P^j, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Тогда, если в качестве расстояния между вычисленными по кусочно-линейной модели (2) и заданными в выборке значениями выходной переменной принято городское расстояние, вычисление оценок параметров и составов индексных множеств  $P^j, j = \overline{1, r}$ , уравнения (2) осуществляется посредством решения следующей задачи оптимизации:

$$G(A, \Xi) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^r \sigma_{kj} |\varepsilon_k^j| \rightarrow \min. \quad (3)$$

Решение задачи (3) будем искать с применением вычислительных приемов, использованных в работах [15, 16].

Введем обозначения:

$$s_{kij} = \begin{cases} 1, & a_i^j x_{ki} = \max_{s=1, m} \{a_s^j x_{ks}\}, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad v_{kj} = \max_{i=1, m} \{a_i^j x_{ki}\}, \quad k = \overline{1, n}, j = \overline{1, r}.$$

Тогда задача минимизации функции (3) может быть сведена к следующей задаче линейно-булева программирования (ЛБП):

$$v_{kj} \geq a_i^j x_{ki}, \quad k = \overline{1, n}, j = \overline{1, r}, i = \overline{1, m}, \quad (4)$$

$$a_i^j x_{ki} - v_{kj} \geq (s_{kij} - 1)M_i, \quad k = \overline{1, n}, j = \overline{1, r}, i = \overline{1, m}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m s_{kij} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, r}, \quad (6)$$

$$\alpha_0^j + v_{kj} - \bar{M}\sigma_{kj} + u_k \geq y_k - \bar{M}, \quad j = \overline{1, r}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (7)$$

$$\alpha_0^j + v_{kj} + \bar{M}\sigma_{kj} - u_k \leq y_k + \bar{M}, \quad j = \overline{1, r}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^r \sigma_{kj} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad (9)$$

$$s_{kij} \in \{0, 1\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, r}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (10)$$

$$\sigma_{kj} \in \{0, 1\}, \quad j = \overline{1, r}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (11)$$

$$u_k \geq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (12)$$

$$v_{kj} \geq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, r}, \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n u_k - \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^m \delta_{ij} a_i^j \rightarrow \min. \quad (14)$$

Здесь  $\delta_{ij}$ ,  $j = \overline{1, r}$ ,  $i = \overline{1, m}$  – заданные малые числа;  $\bar{M}$  и  $M_i, i = \overline{1, m}$  – большие положительные числа.

Обратим внимание на одно важное обстоятельство – перед решением задачи ЛБП (4)–(14) исходные данные полезно пронормировать с помощью использования одного из многочисленных приемов для существенного сокращения времени счета и недопущения возможного заикливания. Для численного решения этой задачи на реальных данных могут быть задействованы соответствующие эффективные программные средства (см., в частности, [17–20]).

#### **Построение кластерной кусочно-линейной функции риска для цен на жилье в субъектах Сибирского федерального округа**

Применим описанный выше алгоритмический способ для построения кластерной кусочно-линейной функции риска для цен на жилье в территориальных образованиях Сибирского федерального округа (СФО). Введем следующие обозначения:  $y$  – средние цены на первичном рынке жилья, руб./м<sup>2</sup>;  $x_1$  – цена на кирпич красный, руб./1000 шт.;  $x_2$  – цена на цемент тарированный, руб./50 кг;  $x_3$  – цена на доску обрезную, руб./м<sup>3</sup>.

В качестве информационной базы моделирования используем статистическую информацию за 2023 г. [21, 22] (табл. 1).

Таким образом,  $n = 10$ ,  $m = 3$ . Примем  $r = 2$ . В результате решения задачи ЛБП (4)–(14) получим модель:

$$y_k = -446917 + \max\{23,9x_{k1}; 945,3x_{k2}; 28,4x_{k3}\} + \varepsilon_k^1, \quad k = \overline{1, 10}, \quad (15)$$

$$P^1 = \{1, 3, 8, 9\},$$

$$y_k = 25965 + \max\{3, 3x_{k1}; 136, 8x_{k2}; 4, 28x_{k3}\} + \varepsilon_k^2, \quad k = \overline{1, 10}, \quad (16)$$

$$P^2 = \{2, 4, 5, 6, 7, 10\}, \quad G = 4140, \quad E = 0, 4 \%.$$

Здесь  $E$  – средняя процентная ошибка.

Таблица 1

## Исходная информация

| Субъект                  | $y$    | $x_1$    | $x_2$  | $x_3$    |
|--------------------------|--------|----------|--------|----------|
| 1. Республика Алтай      | 133287 | 23427,05 | 509,72 | 20463,92 |
| 2. Республика Тыва       | 117904 | 22594,65 | 672,06 | 17368,82 |
| 3. Республика Хакасия    | 92936  | 16719,11 | 571,06 | 16067,83 |
| 4. Алтайский край        | 106555 | 17417,82 | 501,45 | 18817,07 |
| 5. Красноярский край     | 115189 | 25313,24 | 682,04 | 20050,65 |
| 6. Иркутская область     | 112677 | 26058,72 | 631,83 | 16710,5  |
| 7. Кемеровская область   | 103206 | 20911,98 | 564,62 | 15599,33 |
| 8. Новосибирская область | 120304 | 16907,27 | 600,01 | 16306,09 |
| 9. Омская область        | 105812 | 23105,13 | 508,07 | 13783,64 |
| 10. Томская область      | 113830 | 20474,51 | 641,84 | 15365,89 |

Анализ частных регрессий (15) и (16) указывает на значительное расхождение значений оценок их параметров, что может свидетельствовать о существенном несовпадении тенденций в характере влияния независимых переменных на выходной фактор, разумеется, в классе кластерных кусочно-линейных функций риска. При этом в первый кластер (соответствующий индексному множеству  $P^1$ ) вошли Республики Алтай и Хакасия, Новосибирская и Омская области, а во второй (соответствующий  $P^2$ ) – Республика Тыва, Алтайский и Красноярский края, Иркутская, Кемеровская и Томская области.

Кластерная кусочно-линейная функция риска (15), (16) может быть успешно применена для решения различных аналитических задач.

### Заключение

Разработан алгоритмический способ оценивания неизвестных параметров кластерной кусочно-линейной регрессионной функции риска. При этом, если в качестве расстояния между расчетными и реальными значениями зависимой переменной модели определено городское расстояние, данный способ сводится к задаче линейно-булева программирования. Построена кластерная кусочно-линейная функция риска для цен на жилье в субъектах Сибирского федерального округа.

### Список литературы

1. Yim J., Mitchell H. Comparison of country risk models: hybrid neural networks, logit models, discriminant analysis and cluster techniques // Expert Systems with Applications. 2005. Vol. 28, № 1. P. 137–148.
2. Wallace L., Keil M., Rai A. Understanding software project risk: a cluster analysis // Information & Management. 2004. Vol. 42, № 1. P. 115–125.

3. Wang Z., Li S. Data-driven risk assessment on urban pipeline network based on a cluster model // *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 196. Art. 106781.
4. Li Y., Wang D., Liu Y., Zheng Q., Sun G. A predictive risk model of groundwater arsenic contamination in China applied to the Huai River Basin, with a focus on the region's cluster of elevated cancer mortalities // *Applied Geochemistry*. 2017. Vol. 77. P. 178–183.
5. Xin J., Huang C. Fire risk analysis of residential buildings based on scenario clusters and its application in fire risk management // *Fire Safety Journal*. 2013. Vol. 62, Part A. P. 72–78.
6. Lagasio V., Quaranta A. G. Cluster analysis of bank business models: The connection with performance, efficiency and risk // *Finance Research Letters*. 2022. Vol. 47, Part A. Art. 102640.
7. Zhao J., Jin J., Guo Q., Liu L., Chen Y., Pan M. Dynamic risk assessment model for flood disaster on a projection pursuit cluster and its application // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2014. Vol. 28. P. 2175–2183.
8. Xu H., Ma C., Lian J., Xu K., Chaima E. Urban flooding risk assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 563. P. 975–986.
9. Song Y., Wang Y., Ye X., Wang D., Yin Y., Wang Y. Multi-view ensemble learning based on distance-to-model and adaptive clustering for imbalanced credit risk assessment in P2P lending // *Information Sciences*. 2020. Vol. 525. P. 182–204.
10. Melnyk O., Petrov I., Melenchuk T., Zaporozhets A., Bugaeva S., Rossomakha O. Maritime Systems, Transport and Logistics // *Proceedings of the International Conference*. Springer, 2025. P. 89–105.
11. Thompson J. R. J., Feng L., Reesor R. M., Grace C. Know Your Clients' Behaviours: A Cluster Analysis of Financial Transactions // *Journal of Risk and Financial Management*. 2021. Vol. 14, № 2. Art. 50.
12. Носков С. И. Идентификация параметров кусочно-линейной функции риска // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона*. 2017. Т. 1. С. 417–421.
13. Носков С. И., Хоняков А. А. Применение функции риска для моделирования экономических систем // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2020. № 5 (33). С. 85–92.
14. Носков С. И. Некоторые формы кластерных кусочно-линейных регрессий // *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами*. 2024. № 4 (24). С. 41–44.
15. Носков С. И. Идентификация параметров комбинированной кусочно-линейной регрессионной модели // *Вестник Югорского государственного университета*. 2022. № 4 (67). С. 115–119.
16. Носков С. И., Беляев С. В. Оценка непротиворечивости кластерной линейной регрессионной модели // *Вестник Технологического университета*. 2025. Т. 28, № 2. С. 88–91.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612409. Программа решения задач целочисленного линейного программирования с булевыми переменными / Д. О. Есиков, А. Н. Ивутин, Е. В. Ларкин, А. С. Новиков ; заявитель ФГБОУ ВПО «Тулский государственный университет». № 2014664144 ; заявл. 30.12.2014 ; опублик. 18.02.2015.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613846. Программа решения задачи целочисленного линейного программирования / Н. А. Егоров ; заявитель АО «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей». № 2024612585 ; заявл. 09.02.2024 ; опублик. 16.02.2024.
19. Шипицына Р. Е., Витвицкий Е. Е. Сравнение удобства использования программных продуктов при решении транспортной задачи линейного программирования: LPsolve IDE и Microsoft Excel // *Образование. Транспорт. Инновации. Строительство* : сб. тр. V Нац. науч.-практ. конф. Омск, 2022. С. 250–254.
20. Волошинов В. В., Смирнов С. А. Оценка производительности крупноблочного алгоритма метода ветвей и границ в вычислительной среде EVEREST // *Программные системы: теория и приложения*. 2017. Т. 8, № 1 (32). С. 105–119.

21. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 03.04.2025).
22. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <https://www.fedstat.ru/> (дата обращения: 03.04.2025).

### References

1. Yim J., Mitchell H. Comparison of country risk models: hybrid neural networks, logit models, discriminant analysis and cluster techniques. *Expert Systems with Applications*. 2005;28(1):137–148.
2. Wallace L., Keil M., Rai A. Understanding software project risk: a cluster analysis. *Information & Management*. 2004;42(1):115–125.
3. Wang Z., Li S. Data-driven risk assessment on urban pipeline network based on a cluster model. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020;196:106781.
4. Li Y., Wang D., Liu Y., Zheng Q., Sun G. A predictive risk model of groundwater arsenic contamination in China applied to the Huai River Basin, with a focus on the region's cluster of elevated cancer mortalities. *Applied Geochemistry*. 2017;77:178–183.
5. Xin J., Huang C. Fire risk analysis of residential buildings based on scenario clusters and its application in fire risk management. *Fire Safety Journal*. 2013;62(A):72–78.
6. Lagasio V., Quaranta A.G. Cluster analysis of bank business models: The connection with performance, efficiency and risk. *Finance Research Letters*. 2022;47(A):102640.
7. Zhao J., Jin J., Guo Q., Liu L., Chen Y., Pan M. Dynamic risk assessment model for flood disaster on a projection pursuit cluster and its application. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2014;28:2175–2183.
8. Xu H., Ma C., Lian J., Xu K., Chaima E. Urban flooding risk assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China. *Journal of Hydrology*. 2018;563:975–986.
9. Song Y., Wang Y., Ye X., Wang D., Yin Y., Wang Y. Multi-view ensemble learning based on distance-to-model and adaptive clustering for imbalanced credit risk assessment in P2P lending. *Information Sciences*. 2020;525:182–204.
10. Melnyk O., Petrov I., Melenchuk T., Zaporozhets A., Bugaeva S., Rossomakha O. Maritime Systems, Transport and Logistics. *Proceedings of the International Conference*. Springer, 2025:89–105.
11. Thompson J.R.J., Feng L., Reesor R.M., Grace C. Know Your Clients' Behaviours: A Cluster Analysis of Financial Transactions. *Journal of Risk and Financial Management*. 2021;14(2):50.
12. Noskov S.I. Identification of parameters of a piecewise linear risk function. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona = Transport infrastructure of the Siberian region*. 2017;1:417–421. (In Russ.)
13. Noskov S.I., Khonyakov A.A. Application of the risk function to modeling economic systems. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik = South Siberian Scientific Bulletin*. 2020;(5):85–92. (In Russ.)
14. Noskov S.I. Some forms of cluster piecewise linear regression. *In-formatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami = Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems*. 2024;(4):41–44. (In Russ.)
15. Noskov S.I. Identification of parameters of a combined piecewise linear regression model. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Yugra State University*. 2022;(4):115–119. (In Russ.)
16. Noskov S.I., Belyaev S.V. Evaluation of the consistency of a cluster linear regression model. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2025;28(2):88–91. (In Russ.)
17. Certificate of state registration of computer programs № 2015612409. *Programma resheniya zadach tselochislennogo lineynogo program-mirovaniya s bulevymi peremennymi = A program for solving integer linear programming problems with Bool-*



- ean variables*. D.O. Esikov, A.N. Ivutin, E.V. Larkin, A.S. Novikov; applicant FGBOU VPO «Tul'skiy gosudarstvennyy universitet». № 2014664144: appl. 30.12.2014: publ. 18.02.2015. (In Russ.)
18. Certificate of state registration of computer programs № 2024613846. *Programma resheniya zadachi tselochislennogo lineynogo programmirovaniya = A program for solving integer linear programming problems*. N.A. Egorov; applicant AO «Kontsern vozdušno-kosmicheskoy oborony «Almaz – Antey». № 2024612585: appl. 09.02.2024: publ. 16.02.2024. (In Russ.)
19. Shipitsyna R.E., Vitvitskiy E.E. Comparison of the usability of software products for solving the transport linear programming problem: LPSolve IDE and Microsoft Excel. *Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo: sb. tr. V Nats. nauch.-prakt. konf. = Education. Transport. Innovation. Construction: proceedings of the 5<sup>th</sup> National scientific and practical conference*. Omsk, 2022:250–254. (In Russ.)
20. Voloshinov V.V., Smirnov S.A. Performance evaluation of the coarse-grained branch-and-bound algorithm in the EVEREST computing environment. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya = Software systems: theory and applications*. 2017;8(1):105–119. (In Russ.)
21. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki = Federal State Statistics Service*. (In Russ.) Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 03.04.2025).
22. *Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema (EMISS) = Unified Interdepartmental Information and Statistical System*. (In Russ.). Available at: <https://www.fedstat.ru/> (accessed 03.04.2025).

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### **Сергей Иванович Носков**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры информационных  
систем и защиты информации,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения (Россия, г. Иркутск,  
ул. Чернышевского, 15)

E-mail: [sergey.noskov.57@mail.ru](mailto:sergey.noskov.57@mail.ru)

##### **Sergey I. Noskov**

Doctor of engineering sciences, professor,  
professor of the sub-department  
of information systems and information  
security, Irkutsk State Transport  
University (15 Chernyshevskogo street,  
Irkutsk, Russia)

##### **Сергей Вячеславович Беляев**

магистрант, Иркутский государственный  
университет путей сообщения (Россия,  
г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

E-mail: [bsv2001@list.ru](mailto:bsv2001@list.ru)

##### **Sergey V. Belyaev**

Master's degree student, Irkutsk State  
Transport University (15 Chernyshevskogo  
street, Irkutsk, Russia)

##### **Александра Романовна Чекалова**

магистрант, Иркутский государственный  
университет путей сообщения (Россия,  
г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

E-mail: [chekalova49@gmail.com](mailto:chekalova49@gmail.com)

##### **Aleksandra R. Chekalova**

Master's degree student, Irkutsk State  
Transport University (15 Chernyshevskogo  
street, Irkutsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 22.04.2025**

**Поступила после рецензирования и доработки / Revised 24.06.2025**

**Принята к публикации / Accepted 28.08.2025**