

Научная статья

УДК 519.237.5

EDN KZJARJ

DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(4).417-424

**Ю.М. Краковский***Иркутский государственный университет путей сообщения,  
г. Иркутск, Российская Федерация***Г.Н. Крамынина***Иркутский государственный университет путей сообщения,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

## Исследование сценариев прогнозирования грузооборота на железной дороге с учетом экспертной информации

**Аннотация.** Рассматривается сценарный подход с учетом экспертной информации для разработки прогнозных моделей на примере эксплуатационных показателей Восточно-Сибирской железной дороги. При создании сценариев использованы статистические данные, а также точечные экспертные оценки. Экспертные оценки предложены по двум вариантам. Итоговой моделью прогнозирования базового показателя, которым является грузооборот, является линейная свертка частных моделей. Число частных моделей равно трем. Вычисление весовых коэффициентов предложено осуществлять с помощью метода анализа иерархий. Особенностью этого метода является создание экспертами матрицы суждений, которые можно проверить на непротиворечивость. Предложено три сценария развития перевозочного процесса, которые обработаны до получения результатов. Показано, что сценарный подход дает хорошие результаты даже в условиях неопределенности перевозочного процесса.

**Ключевые слова.** Сценарный подход, прогнозирование, трендовые модели, экспертные оценки, метод анализа иерархий.

**Информация о статье.** Дата поступления: 23 октября 2023 г.; дата принятия к публикации: 20 ноября 2023 г.; дата онлайн-размещения: 12 декабря 2023 г.

Original article

**Yu.M. Krakovsky***Irkutsk State Transport University,  
Irkutsk, Russian Federation***G.N. Kramynina***Irkutsk State Transport University,  
Irkutsk, Russian Federation*

## Study of Scenarios for Forecasting Freight Turnover on the Railway Considering Account Expert Information

**Abstract.** A scenario approach is considered, taking into account expert information for the development of forecast models using the example of operational indicators of the East Siberian Railway. When creating scenarios, statistical data, as well as point expert estimates, were used. Expert assessments are proposed for two options. The final model for forecasting the basic indicator, which is freight turnover, is a linear convolution of partial models. The number of private models is three. It is proposed to calculate weight coefficients using the hierarchy analysis method. A special

feature of this method is the creation by experts of a matrix of judgments that can be checked for consistency. Three scenarios for the development of the transportation process were proposed, which were processed until results were obtained. It is shown that the scenario approach gives good results even under conditions of uncertainty in the transportation process.

**Keywords.** Scenario approach, forecasting, trend models, expert assessments, hierarchy analysis method.

**Article info.** Received 23 October, 2023; Accepted 20 November, 2023; Available online 12 December, 2023.

Перевозки грузов железнодорожным транспортом во многих странах определяют развитие их экономик. Это относится и к РФ, так как исторически этот вид транспорта в грузовых перевозках у нее занимает существенное место. В связи с этим, прогнозирование показателей перевозочного процесса имеет важное значение при принятии управленческих решений. В условиях неопределенности этого процесса — это достаточно нетривиальная задача, требующая привлечения новых подходов. Так, например, в работе [1] рассматривается способ точечного и интервального прогнозирования по регрессионным моделям и регрессии Деминга, который минимизирует среднюю абсолютную ошибку прогноза на экзаменуемой выборке.

Перевозочный процесс железнодорожным транспортом оценивается достаточно большим числом факторов, по которым имеются статистические данные за последние годы. Эти факторы связаны между собой статистической связью, что позволяет выделить существенные из них. Какие-то факторы рассматриваются как базовые показатели, например, эксплуатационный грузооборот. В различных работах показано, что число влияющих факторов на базовые показатели можно существенно сократить [2; 3].

Данная работа является развитием работ авторов [4; 5], где отобраны значимые факторы, влияющие существенно на эксплуатационный грузооборот ( $y$ , млн ткм). Этими факторами являются:  $q$  — средний вес грузового поезда (т),  $v$  — техническая скорость (км/час). Приведем двухфакторную прогнозную модель из работы [5]

$$y = -1136,83 + 0,57q - 11,75v. \quad (1)$$

Трендовые модели для значимых факторов ( $q$ ) и ( $v$ ), а также для грузооборота ( $p$ ), приведем из работы [6]

$$q = 0,02t + 3,48; v = -0,31t + 54,38; p = 17,72t + 204,44. \quad (2)$$

Целью работы является создание и апробация технологии прогнозирования базового показателя на примере грузооборота с учетом сценариев развития перевозочного процесса и дополнительной экспертной информации.

Для этого на первом этапе при создании прогнозных моделей типа (1) и (2) к статистической информации добавлены точечные оценки практиков-экспертов и авторов работы по двум вариантам (В): вариант (1) предполагает увеличение значений прогнозируемых показателей относительно последнего года; вариант (2) предполагает уменьшение этих значений по сравнению с последним годом (табл. 1).

Итоговой моделью прогнозирования значений базового показателя, которым является грузооборот, является линейная свертка значений частных моделей. Этими частными моделями являются:  $g_1$  — многофакторная модель, зависящая от значимых факторов;  $g_2$  — трендовая модель;  $g_3$  — экспертное значение.

Таблица 1

**Значения точечных экспертных оценок**

В	$y$	$q$	$v$
1	585,0	3 900,0	47,0
2	570,0	3 700,0	44,0

Используя статистические данные по грузообороту и значимым факторам, а также экспертные оценки (табл. 1), созданы новые трендовые модели:

а) модели при варианте (1) имеют следующий вид

$$p = 17,62t + 204,19; \quad (3)$$

$$q = 0,02t + 3,49; \quad (4)$$

$$v = -0,32t + 54,43; \quad (5)$$

б) модели при варианте (2) имеют следующий вид

$$p = 17,45t + 205,56; \quad (6)$$

$$q = 0,02t + 3,51; \quad (7)$$

$$v = -0,35t + 54,7. \quad (8)$$

В табл. 2 приведены рекомендованные экспертами и авторами сценарии развития перевозочного процесса (1, 2, 3) применительно к Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД).

Таблица 2

**Сценарии развития перевозочного процесса**

Сценарии	$g_1$	$g_2$	$g_3$
1	Ст	Ст	585,0
2	Ст + В1	Ст + В1	585,0
3	Ст + В2	Ст + В2	570,0

В первом сценарии (1) используются только статистические данные (Ст), поэтому при вычислении значений грузооборота  $g_1$  используется модель (1), значения факторов ( $q$ ,  $v$ ) определяются по трендовым моделям (2). Значение грузооборота  $g_2$  вычисляется по трендовой модели (2). Для показателя  $g_3$  экспертами принято значение 585,0 млн ткм.

Во втором сценарии (2) используются статистические данные и экспертные оценки по варианту 1 (табл. 1) (Ст+В1). В этом сценарии при вычислении значения грузооборота  $g_1$  используется модель (1), но значения факторов ( $q$ ,  $v$ ) определяются по моделям (4) и (5). Значение грузооборота  $g_2$  вычисляется по модели (3). Для показателя  $g_3$  экспертами принято значение 585,0 млн ткм.

В третьем сценарии (3) используются статистические данные и экспертные оценки по варианту 2 (табл. 1) (Ст+В2). В этом сценарии при вычислении значения грузооборота  $g_1$  используется модель (1), но значения факторов ( $q$ ,  $v$ ) определяются по моделям (7) и (8). Значение грузооборота  $g_2$  вычисляется по модели (6). Для показателя  $g_3$  экспертами принято значение 570,0 млн ткм.

Итоговое прогнозное значение для каждого сценария определяется по формуле

$$g_c(t + 1) = \sum_{j=1}^3 w_j \cdot g_j(t + 1), \quad (9)$$

где  $g_c$  — итоговое прогнозное значение грузооборота;  $g_j$  — частное прогнозное значение по  $j$ -й модели;  $w_j$  — весовой коэффициент, учитывающий значимость  $j$ -й прогнозной модели;  $t$  — номер последнего года в исходном временном ряду; 1 означает, что прогноз осуществляется на следующий год.

Вычисление весовых коэффициентов предложено определять с помощью метода анализа иерархий [6]. Особенностью этого метода является создание экспертами матрицы суждений  $A(a_{ij})$ ,  $i, j = 1, n$ . Суждения  $a_{ij}$  можно проверить на непротиворечивость, что является положительной стороной данного метода.

Матрица суждений является обратно-симметричной, а диагональные элементы  $a_{ij}$  равны 1. Суждения определяются в соответствии с предложенной шкалой [6]. В нашем случае объектами являются частные модели вычисления грузооборота:  $g_1$ , когда используется двухфакторная модель;  $g_2$ , когда используется трендовая модель;  $g_3$ , когда используется прогнозное экспертное значение.

Для определения весовых коэффициентов экспертами и авторами предложена матрица суждений, приведенная в табл. 3.

Размерность матрицы суждений ( $n$ ) равна 3.

Обработку этой матрицы проведем приближенным методом, описанном в работе [7]. В соответствии с этими рекомендациями весовые коэффициенты равны

Таблица 3

## Матрица суждений

M	$g_1$	$g_2$	$g_3$
$g_1$	1	4	2,5
$g_2$	0,25	1	1/3
$g_3$	0,4	3	1

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

В формуле (10) находятся произведения элементов матрицы суждений по строкам. Далее из этого произведения извлекается корень. Весовые коэффициенты являются долями от общей суммы. Используя формулу (10) и значения табл. 3, получим следующие значения весовых коэффициентов

$$w_1 = 0,59; w_2 = 0,12; w_3 = 0,29. \quad (11)$$

Сумма коэффициентов (11) равна 1. Непротиворечивость суждений проверим с помощью отношения согласованности

$$OS = IS / SI(n), \quad (12)$$

где  $SI(n)$  — случайный индекс, который определяется из табл. [6]; в нашем случае  $SI(3) = 0,58$ ;  $IS$  — индекс согласованности, который равен

$$IS = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (13)$$

где  $\lambda_{\max}$  — максимальное собственное значение, соответствующее собственному вектору матрицы суждений. Это значение можно приближенно определить так

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n w_i B_i, \quad (14)$$

где  $w_i$  — весовые коэффициенты (11), а  $B_i$  — суммы элементов матрицы суждений по столбцам. Отношение согласованности (12) оказалось равным 0,03, что меньше критического значения 0,1. Это позволило сделать вывод, что матрица суждений не противоречива и весовым коэффициентам (11) можно доверять.

В табл. 4 приведены результаты расчетов по рекомендованным сценариям. Напомним, что 22 — это номер года, на который делался прогноз. В правой колонке приведены значения относительной погрешности итогового прогнозного значения грузооборота относительно фактического значения в процентах ( $e$ ).

Таблица 4

**Результаты апробации обобщенного прогнозирования грузооборота**

Сценарии	$g_1(22)$	$g_1(22)$	$g_1(22)$	$g_1(22)$	$e, \%$
1	586,00	594,28	585,00	586,71	4,03
2	577,74	591,83	585,00	581,53	3,11
3	562,97	589,46	570,00	568,19	0,75

В настоящий момент известно, что грузооборот в прогнозном году на ВСЖД равен 563,98 млн ткм, он уменьшился по сравнению с предыдущим годом; участковая скорость равна 43,1 км/час, она уменьшилась по сравнению с предыдущим годом; средний вес грузового поезда равен 3842 тонн, он уменьшился по сравнению с предыдущим годом. Таким образом, на фактических значениях подтверждается неопределенность перевозочного процесса железнодорожным транспортом.

В соответствии с результатами, приведенными в табл. 4, наиболее близко к фактическому значению итоговое значение по третьему сценарию: фактическое значение 563,98 млн ткм, а прогнозное значение 568,19 млн ткм. Тем самым на реальных данных показано, что даже в условиях неопределенности перевозочного процесса сценарный подход с учетом экспертной информации дает хорошие результаты.

**Список использованной литературы**

1. Базилевский М.П. Прогнозирование грузооборота железнодорожного транспорта по регрессионным моделям с детерминированными и стохастическими объясняющими переменными / М.П. Базилевский. — DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-1-117-129. — EDN SRUXLT // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. — 2019. — Т. 46, № 1. — С. 117–129.
2. Давааням Т. Модели многофакторного оценивания основных показателей перевозки грузов / Т. Давааням, Е.А. Михайлова, А.С. Яхина. — EDN VPEJUF // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2015. — № 12 (127). — С. 80–86.
3. Краковский Ю.М. Прогнозирование базовых показателей перевозочного процесса на основе сценарного подхода / Ю.М. Краковский, А.Н. Лузгин. — EDN WCFINO // Прикладная информатика. — 2017. — Т. 12, № 2 (68). — С. 29–36.
4. Крамынина Г.Н. Разработка многофакторной модели для прогнозирования грузооборота на Восточно-Сибирской железной дороге / Г.Н. Крамынина. — DOI 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2022\_3\_38. — EDN JEZLRA // Математические методы в технологиях и технике. — 2022. — № 3. — С. 38–41.
5. Краковский Ю.М. Прогнозирование показателя грузооборота на Восточно-Сибирской железной дороге с учётом трендовых моделей / Ю.М. Краковский, Г.Н. Крамынина. — EDN EZWTMU // Образование — наука — производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием), Чита, 18 нояб. 2022 г. : в 2 т. — Чита, 2022. — Т. 2. — С. 77–83.
6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. — Москва : Радио и связь, 1993. — 314 с.

7. Микони С.В. Теория и практика рационального выбора / С.В. Микони. — Москва : Маршрут, 2004. — 463 с. — EDN QQGCWH.

## References

1. Bazilevskiy M.P. Prediction of Freight Turnover of Railway Transport Using Regression Models with Deterministic and Stochastic Explanatory Variables. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika = Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Computer Science*, 2019, vol. 46, no. 1, pp. 117–129. (In Russian). EDN: SRUXLT. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-1-117-129.

2. Davaanyam T., Mikhailova E., Ykhkina A. Models of Multiple-Factor Estimation of the Main of Indicators of Goods" Transportation. *Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Transbaikal State University Journal*, 2015, no. 12, pp. 80–86. (In Russian). EDN: VPEJUF.

3. Krakovsky Y., Luzgin A. Forecasting of Base Indicators of Transportation Process Based on a Scenario Approach. *Prikladnaya informatika = Journal of Applied Informatics*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 29–36. (In Russian). EDN: WCFIHO.

4. Kramynina G.N. Development of a Multi-Factory Model for Forecasting Cargo Turnover on the East Siberian Railway. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike = Mathematical Methods in Technologies and Technics*, 2022, no. 3, pp. 38–41. (In Russian). EDN: JEZLRA. DOI: 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2022\_3\_38.

5. Krakovskii Yu.M., Kramynina G.N. Forecasting the freight turnover indicator on the East Siberian Railway taking into account trend models. *Education — Science — Production. Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference (with International Participation). Chita, November 18, 2022. Chita, 2022. Vol. 2*, pp. 77–83. (In Russian). EDN: EZWTMU.

6. Saaty T.L. *Decision Making for Leaders : the Analytical Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. Pittsburgh, University of Pittsburgh, 1988. 291 p. (Russ. ed.: Saaty T.L. *Decision-Making. Method of Hierarchy Analysis*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 314 p.).

7. Mikoni S.V. *Theory and practice of rational choice*. Moscow, Marshrut Publ., 2004. 463 p.

## Информация об авторах

**Краковский Юрий Мечеславович** — доктор технических наук, профессор кафедры Информационные системы и защита информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: 79149267772@yandex.ru.

**Крамынина Галина Николаевна** — аспирант, кафедра Информационные системы и защита информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: kramynina.gala@yandex.ru.

## Information about the Authors

**Yuri M. Krakovsky** — D.Sc. in Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems and Security Information, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: 79149267772@yandex.ru.

**Galina N. Kramynina** — PhD Student, Department of Information Systems and Security Information, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: kramynina.gala@yandex.ru.

### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Contribution of the Authors**

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

### **Для цитирования**

Краковский Ю.М. Исследование сценариев прогнозирования грузооборота на железной дороге с учетом экспертной информации / Ю.М. Краковский, Г.Н. Крамынина. — DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(4).417-424. — EDN KZJARJ // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2023. — Т. 5, № 4. — С. 417–424.

### **For Citation**

Krakovsky Yu.M., Kramynina G.N. Study of Scenarios for Forecasting Freight Turnover on the Railway Considering Account Expert Information. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 417–424. (In Russian). EDN: KZJARJ. DOI: 10.17150/2713-1734.2023.5(4).417-424.