

УДК 624.145.8
Научная специальность: 3.2.6; 6.1.6

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2024

Модель определения вероятности возникновения затора в створе реки

Ткаченко Ю.А.,

Академия гражданской
защиты МЧС России,
141435, Россия, Московская
область, г. Химки,
мкр. Новогорск,
ул. Соколовская, стр. 1А

Аннотация

Имеющиеся сведения о значениях факторов образования затора в створе реки дают возможность оценить вероятность его возникновения. Регрессионный анализ вероятности и значений факторов позволяет построить зависимость между этими величинами, однако выполнить его привычными методами статистической обработки достаточно проблематично ввиду того, что зависимая переменная является дискретной, бинарной. В статье представлен подход к оценке вероятности возникновения затора с точки зрения классификации фактов возникновения затора и его отсутствия в зависимости от значений факторов образования заторов. В результате получена модель определения вероятности возникновения затора в створе реки, в основе которой находится метод логистического преобразования.

Ключевые слова: бинарная логистическая регрессия; затор; наводнение; инженерно-технические мероприятия; защита населения и территорий от наводнений.

Для цитирования: Ткаченко Ю.А. Модель определения вероятности возникновения затора в створе реки // Проблемы анализа риска. 2024. Т. 21. № 3. С. 42–48.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Model for Determining the Probability of Congestion in a River Formation

Yuliya A. Tkachenko,

Civil Defence Academy
of Emercom of Russia,
Sokolovskaya str., bld. 1A,
Moscow region, Khimki,
md. Novogorsk, 141435,
Russia

Abstract

The available information on the values of the factors of congestion formation in the river bed makes it possible to assess the probability of its occurrence. Regression analysis of probability and factor values allows you to build a relationship between these values, but it is quite problematic to perform it using the usual methods of statistical processing due to the fact that the dependent variable is discrete, binary. The article presents an approach to assessing the likelihood of congestion from the point of view of classifying the facts of congestion and its absence depending on the values of the factors of congestion formation. As a result, a model was obtained for determining the probability of congestion in the riverbed, which is based on the method of logistic transformation.

Keywords: binary logistic regression; congestion; flooding; engineering and technical measures; protection of the population and territories from floods.

For citation: Tkachenko Yu.A. Model for determining the probability of congestion in a river formation // Issues of Risk Analysis. 2024;21(3):42-48. (In Russ.).

The author declare no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Оценка вероятности возникновения затора в створе реки на основе бинарной логистической регрессии
2. Оценка вероятности возникновения затора в створе реки при проведенных инженерно-технических мероприятиях
3. Алгоритм определения вероятности возникновения затора в створе реки

Заключение

Список источников

Введение

Определение вероятности возникновения затора в створе реки является актуальной задачей различных органов управления, чья деятельность напрямую связана с защитой населения и территорий от наводнений. Заторные явления носят случайный характер. Причем зависимость этого случайного события является многофакторной, и зачастую учесть все факторы достаточно проблематично с точки зрения оперативности принятия решений на выполнение каких-либо мероприятий по защите населения и территорий от подобных явлений.

Факторы, влияющие на образование затора, укрупненно можно разделить на три группы: морфологические, гидрометеорологические, антропогенные. По отдельности влияние каждого фактора на возникновение затора достаточно хорошо изучено и описано в работах [1–4]. В работе [5] представлен подход к оценке вероятности возникновения затора, основанный на регрессионной зависимости возникновения затора и значений факторов, его вызывающих. Однако линейная регрессия обладает рядом недостатков, одним из которых является то, что прямое суммирование предикторов (значений факторов) принимает значения, выходящие за рамки понятия вероятности, что приводит к необходимости построения системы ограничений для предикторов [5]. Современные математические подходы классификации имеющегося набора данных позволяют избавиться от подобного рода недостатков линейной регрессии.

1. Оценка вероятности возникновения затора в створе реки на основе бинарной логистической регрессии

Бинарную логистическую регрессию можно отнести к задаче классификации, когда необходимо разделить строго на два класса имеющиеся значения зависимой переменной [6, 7].

Методика оценки имеющихся данных с помощью бинарной логистической регрессии применяется в случае необходимости получить сведения о вероятности наступления какого-либо события, если событие можно представить всего двумя переменными (0 или 1, т.е. наступило или не наступило событие). Пусть вероятность наступления события

(возникновение затора) $P(K)$ будет иметь зависимость от значений каких-либо факторов (n, g, a), причем влияние значений факторов на вероятность наступления события неодинаковое и представлено некоторыми коэффициентами — $\hat{\omega}$.

$$P(K) = \hat{\omega}_0 + \hat{\omega}_1^n n_1 + \dots + \hat{\omega}_u^n n_u + \hat{\omega}_1^g g_1 + \dots + \hat{\omega}_l^g g_l + \hat{\omega}_1^a a_1 + \dots + \hat{\omega}_p^a a_p. \quad (1)$$

При этом значение вероятности $P(K)$ (левая часть уравнения (1) должно укладываться в диапазон от 0 до 1 (единицы), а правая часть может принимать значения от $-\infty$ до $+\infty$, что недопустимо из определения вероятности. Устранить данное противоречие возможно логистическим преобразованием, если ввести дополнительную переменную $Odds$ — отношение вероятности наступления события $P(K)$ к его не наступлению $1 - P(K)$ (см. формулу 2).

$$Odds = \frac{P(K)}{1 - P(K)}, Odds \in [0; +\infty] \text{ при } P(K) \in [0, 1]. \quad (2)$$

Свойства $Odds$ — если его значения превышают 1, то значит, что вероятность наступления события больше вероятности его не наступления, и наоборот, при значениях $Odds$ меньше 1, вероятность наступления события меньше вероятности его не наступления. Если значение $Odds$ равно 1, то вероятность наступления события равно вероятности не наступления события. При очень больших значениях $Odds$ вероятность наступления события очень близка к 1. При очень маленьких значениях $Odds$ (близких к 0) — вероятность наступления события очень низка, близка к 0. Значения $Odds$ всегда будут принадлежать диапазону от 0 до $+\infty$ (рис. 1).

Прологарифмируем переменную $Odds$.

$$\ln(Odds) = \theta, \quad \theta = \omega_0 + \omega_1^n n_1 + \dots + \omega_u^n n_u + \omega_1^g g_1 + \dots + \omega_l^g g_l + \omega_1^a a_1 + \dots + \omega_p^a a_p, \quad (3)$$

$$\ln\left(\frac{P(K)}{1 - P(K)}\right) = \theta.$$

Получаем следующие свойства: при значениях $Odds$ меньше 1 логарифм $Odds$ будет отрицательным и наоборот, при значениях $Odds$ больше 1 логарифм $Odds$ будет положительным (рис. 2).

Из выражения (3), используя свойства логарифмов, выведем значение вероятности наступления события — вероятность возникновения затора.

$$\begin{aligned}
 \ln\left(\frac{P(K)}{1-P(K)}\right) &= \theta \\
 e^\theta &= \frac{P(K)}{1-P(K)} \\
 e^\theta(1-P(K)) &= P(K) \\
 e^\theta - e^\theta P(K) &= P(K) \\
 e^\theta &= P(K) + e^\theta P(K) \\
 e^\theta &= P(K)(1 + e^\theta P(K)) \\
 e^\theta &= P(K)(1 + e^\theta) \\
 P(K) &= \frac{e^\theta}{1 + e^\theta} \\
 P(K) &= \frac{e^\theta/e^\theta}{(1 + e^\theta)/e^\theta} \\
 P(K) &= \frac{1}{1 + e^{-\theta}} \\
 P(K) &= \frac{1}{1 + e^{-\left(\omega_0 + \omega_1^n n_1 + \dots + \omega_u^n n_u + \omega_1^g g_1 + \dots + \omega_l^g g_l + \omega_1^a a_1 + \dots + \omega_p^a a_p\right)}},
 \end{aligned} \tag{4}$$

или

$$P(K) = \ln(Odds). \tag{5}$$

В результате получаем зависимость (4) вероятности наступления события (затора) от значений факторов его образования.

Для наглядного представления зависимости вероятности возникновения затора можно построить график (рис. 3).

2. Оценка вероятности возникновения затора в створе реки при проведенных инженерно-технических мероприятиях

При выполнении инженерно-технических мероприятий значения факторов изменяются, следовательно, изменяется и значение вероятности возникновения затора. Поэтому, если в искомую функцию (4) вместо текущего значения фактора поставить новое значение, с учетом воздействия на него проведенных

(или планируемых к проведению) мероприятий, можно будет получить новое значение вероятности возникновения затора. В этом случае значение фактора будет иметь некоторую зависимость от объемов мероприятий с учетом особенностей конкретного участка реки.

На значения морфологических факторов образования затора можно влиять следующим образом: к текущим значениям фактора прибавляются значения, достигнутые объемом выполнения инженерно-технических мероприятий.

$$n'_q = n_q + \sum_{i=1}^u \alpha_i V_i^{\bar{N}}, \tag{6}$$

где:

n'_q — измененное значение морфологического фактора образования затора;

n_q — текущее значение морфологического фактора образования затора;

q — вид морфологического фактора образования затора;

u — количество морфологических факторов, изменяемых инженерно-техническими мероприятиями;

α_i — коэффициент влияния выполняемого объема инженерно-технического мероприятия;

$V_i^{\bar{N}}$ — объем инженерно-технического мероприятия по изменению q -го морфологического фактора.

На значения гидрометеорологических факторов образования затора можно влиять следующим образом:

$$g'_k = g_k + \sum_{j=1}^l \beta_j V_j^{\bar{G}}, \tag{7}$$

где:

g'_k — измененное значение k -го гидрометеорологического фактора образования затора;

g_k — текущее значение гидрометеорологического фактора образования затора;

k — вид гидрометеорологического фактора образования затора;

l — количество гидрометеорологических факторов, изменяемых инженерно-техническими мероприятиями;

β_j — коэффициент влияния выполняемого объема инженерно-технического мероприятия;

$V_j^{\bar{G}}$ — объем инженерно-технического мероприятия по изменению k -го гидрометеорологического фактора.

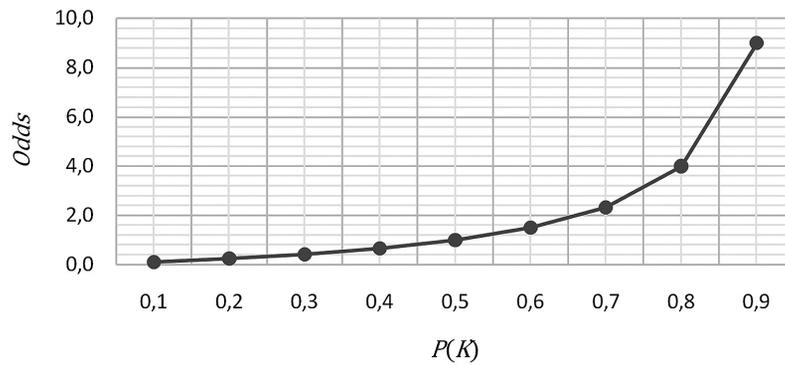


Рис. 1. Зависимость вероятности наступления события от Odds

Figure 1. Dependence of the probability of occurrence of an event on Odds

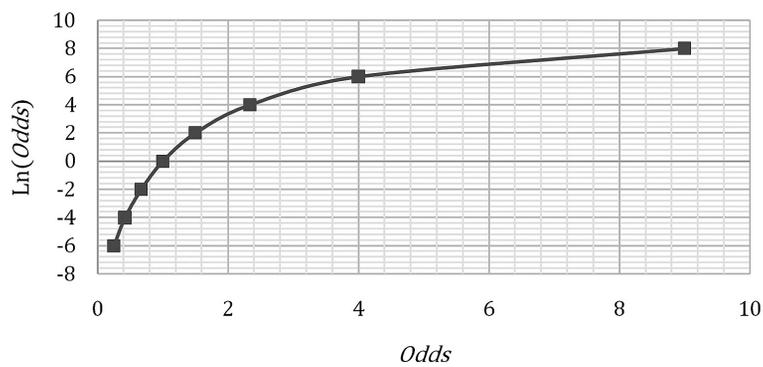


Рис. 2. Зависимость $\ln(Odds)$ от Odds

Figure 2. Dependence $\ln(Odds)$ on Odds

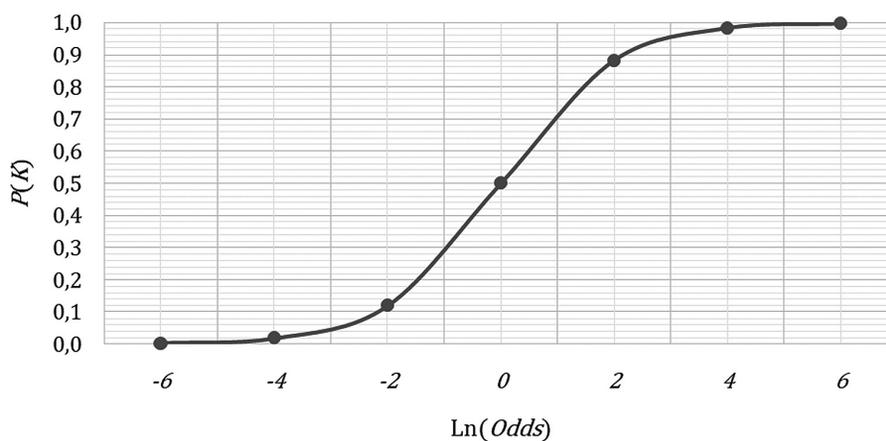


Рис. 3. Зависимость вероятности наступления события от $\ln(Odds)$

Figure 3. Dependence of the probability of occurrence of an event on $\ln(Odds)$

На значения антропогенных факторов образования затора можно влиять следующим образом:

$$a'_e = e_e + \sum_{c=1}^p \gamma_c V_c^{\bar{A}}, \quad (8)$$

где:

a'_e — измененное значение e -го антропогенного фактора образования затора;

a_e — текущее значение антропогенного фактора образования затора;

e — вид антропогенного фактора образования затора;

p — количество антропогенных факторов, изменяемых инженерно-техническими мероприятиями;

γ_c — коэффициент влияния выполняемого объема инженерно-технического мероприятия;

$V_c^{\bar{A}}$ — объем инженерно-технического мероприятия по изменению e -го антропогенного фактора.

Тогда вероятность возникновения заторов будет зависеть от измененных инженерно-техническими мероприятиями значений факторов образования заторов.

$$P'(K) = \frac{1}{1 + e^{-(\omega_0 + \omega_1^n n'_1 + \dots + \omega_1^n n'_n + \omega_1^g g'_1 + \dots + \omega_1^g g'_n + \omega_1^a a'_1 + \dots + \omega_p^a a'_p)}}. \quad (9)$$

3. Алгоритм определения вероятности возникновения затора в створе реки

Определение вероятности возникновения затора в створе реки проводится в несколько этапов:

1. Определение факторов, вызывающих затор: морфологических N , гидрометеорологических G , антропогенных A .

2. Сбор и подготовка к анализу значений факторов, вызывающих затор.

3. Выявление значимых факторов, влияющих на возникновение затора.

4. Регрессионный анализ вероятности возникновения затора и значений факторов, его вызывающих.

5. Построение зависимости вероятности возникновения затора от факторов, его вызывающих:

$$P(K) = \frac{1}{1 + e^{-f(N,G,A)}}$$

6. Определение мероприятий и объемов их проведения, с помощью которых возможно изменить значение факторов образования затора ($V_i^{\bar{N}}, V_j^{\bar{G}}, V_c^{\bar{A}}$).

7. Определение вероятности возникновения затора при измененных значениях факторов, влияющих на его образование $P'(K)$.

8. Сравнение вероятностей возникновения затора до измененных значений факторов и после.

Заключение

Имеющиеся сведения о значениях факторов образования заторов позволяют произвести статистическую обработку и выявить зависимость между значениями факторов и фактом образования затора. Несмотря на то, что факт возникновения затора является дискретной бинарной величиной и оценка вероятности возникновения затора достаточно проблематична, с помощью логистического преобразования в задаче классификации между фактом возникновения затора и его отсутствием возможно получение численного значения влияния значений факторов на факт образования затора. В результате строится модель определения вероятности возникновения затора в створе реки. Зная степень влияния проведенных инженерно-технических мероприятий на значения факторов образования заторов, можно оценить вероятность возникновения затора при измененных инженерно-техническими мероприятиями значений факторов образования затора.

Список источников [References]

1. Ткаченко Ю. А. Анализ гидрометеорологических факторов образования заторов на реках Томской области / Ю. А. Ткаченко, А. Н. Тедуриева, Е. Е. Остапчук // Совершенствование Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и гражданской обороны Российской Федерации на современном этапе: Сборник трудов секции № 1 XXXII Международной научно-практической конференции, Химки, 01 марта 2022 года. Химки: Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. С. 101–105. [Tkachenko Yu. A. Analysis of the hydrometeorological factors of formation of conflicts on the rivers of the Tomsk region / Yu. A. Tkachenko, A. N. Tedurieva, E. E. Ostapchuk // Improving the Unified

- State System of Emergency Prevention and Response and Civil Defense of the Russian Federation at the present stage: Proceedings of Section No. 1 of the XXXIII International Scientific and Practical Conference, Khimki, March 01, 2022. Khimki: Academy of Civil Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 2022. P. 101–105. (In Russ.)]
2. Козлов Д. В., Кулешов С. Л. Многомерный анализ данных при оценке факторов заторообразования в речных бассейнах // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 2. С. 132–141.
<https://doi.org/10.31857/S0321-0596462132-141>
[Kozlov D. V., Kuleshov S. L. Multidimensional data analysis of jamming factors in river basins // Vodnye resursy. 2019;46(2):132–141. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0321-0596462132-141>]
 3. Агафонова С. А., Беркович К. М., Рулева С. Н. [и др.] Современные особенности морфологии русла и процессов заторообразования на реке Томь // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 6. С. 21–33 [Agafonova S. A., Berkovich K. M., Ruleva S. N. [et al.] Present-day specific features of the channel morphology and ice-jam formation at the Tom river // Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2012;(6):21–33. (In Russ.)]
 4. Ткаченко Ю. А., Ткаченко П. Н., Тедуриева А. Н., Иванов Е. В. Анализ научно-методических подходов к прогнозированию заторных явлений в Томской области // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2022. № 2(53). С. 29–37 [Tkachenko Yu. A., Tkachenko P. N., Tedurieva A. N., Ivanov E. V. Analysis of scientific and methodological approaches to prediction of jam phenomena in the Tomsk region // Scientific and Educational Tasks of Civil Defence. 2022;(2):29–37. (In Russ.)]
 5. Ткаченко Ю. А., Ткаченко П. Н., Иванов Е. В. О подходе к решению задачи снижения вероятности возникновения заторов на участке реки // Проблемы анализа риска. 2024. Т. 21. № 1. С. 56–64. [Tkachenko Yu. A., Tkachenko P. N., Ivanov E. V. On the approach to solving the problem of reducing the likelihood of congestion on the river section // Issues of Risk Analysis. 2024;21(1):56–64. (In Russ.)]
 6. Пампел Ф., Груздев А., Цвиркун Д. Логистическая регрессия. М.: ДМК Пресс, 2023. 218 с. [Pampel F., Gruzdev A., Tsvirkun D. Logistic regression. M.: DMK Press, 2023. 218 p. (In Russ.)]
 7. Богданов Л. Ю. Оценка эффективности бинарных классификаторов на основе логистической регрессии методом ROC-анализа // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. Т. 4. № 2(50). С. 92–97 [Bogdanov L. Y. The evaluation of performance of binary classifiers based on logistic regression using ROC analysis // Bulletin of the Saratov State Technical University. 2010;4(2):92–97. (In Russ.)]

Сведения об авторе

Ткаченко Юлия Анатольевна: младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела (по проблемам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям) научно-исследовательского центра, Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика», ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России». Количество публикаций: 19

Область научных интересов: безопасность в чрезвычайных ситуациях, защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций.

ORCID: 0009-0003-2559-3391

SPIN-код: 2959-2816

Контактная информация

141435, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А
yu.tkachenko@agz.50.mchs.gov.ru

Статья поступила в редакцию: 08.03.2024

Одобрена после рецензирования: 28.03.2024

Принята к публикации: 29.03.2024

Дата публикации: 28.06.2024

The article was submitted: 08.03.2024

Approved after reviewing: 28.03.2024

Accepted for publication: 29.03.2024

Date of publication: 28.06.2024

**ФГБУ "Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России"
(федеральный центр науки и высоких технологий)**



МОНИТОРИНГ

НАУКА

ТЕХНОЛОГИЯ

БЕЗОПАСНОСТЬ

ИННОВАЦИИ

ЭКСПЕРТИЗА

СЕРТИФИКАЦИЯ