

УДК 656.61

DOI: 10.37890/jwt.vi79.485

## **Анализ аварийности на морском транспорте с использованием метода байесовских сетей доверия**

**А.Н. Попов**<sup>1</sup>

*ORCID: 0000-0002-8630-3111*

**Г.А. Зеленков**<sup>1</sup>

*ORCID: 0000-0001-7912-9285*

**В.С. Плужник**<sup>1</sup>

*ORCID: 0009-0002-7435-8446*

**О.Е. Бородин**<sup>1</sup>

*ORCID: 0009-0004-9387-5021*

*<sup>1</sup>Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск, Россия*

**Аннотация.** Морские происшествия хоть и являются редким событием, но имеют огромное влияние как на мировую экономику, так и на окружающую среду. Улучшение практики морского судоходства всегда требует новых способов повышения безопасности, что неизменно предполагает извлечение уроков из прошлого опыта и ошибок. В этом контексте вероятностный анализ происшествий и связанных с ними последствий может сыграть очень важную роль в создании более безопасной и эффективной морской транспортной системы. Байесовские сети представляют собой класс вероятностных моделей, основанных на статистике, теории принятия решений и теории графов.

В представленной статье описан анализ статистики морских происшествий путём отбора влияющих на риск их возникновения вероятностных параметров. Важные параметры из этой базы данных группируются, и строится байесовская сеть, которая показывает взаимосвязь между ними, что, в свою очередь, даёт представление о зависимостях, существующих между параметрами в базе данных, и непосредственно основных причинах этих аварий. Данные для данного исследования основаны на базе данных происшествий Lloyds Register и ИМО с 1990 по 2022 год. Важные факторы из этой базы данных объединены, и построена байесовская сеть, отображающая взаимосвязь между соответствующими переменными, что в свою очередь даёт представление о вероятностных зависимостях между переменными в базе данных и основных причинах этих происшествий.

**Ключевые слова** Байесовская сеть доверия, анализ рисков, информационная байесовская модель, ациклические графы, база данных повреждений, предварительные знания, сетевой анализ, вероятностная сеть.

## **Analysis of accidents in maritime transport using the method of Bayesian trust networks**

**Anatoly N. Popov**<sup>1</sup>

*ORCID: 0000-0002-8630-3111*

**Gennadiy A. Zelenkov**<sup>1</sup>

*ORCID: 0000-0001-7912-9285*

**Valeriy S. Pluzhnik**<sup>1</sup>

*ORCID: 0009-0002-7435-8446*

**Oleg E. Borodin**<sup>1</sup>

*ORCID: 0009-0004-9387-5021*

*<sup>1</sup>Admiral Ushakov Maritime State University, Russia, Novorossiysk*

**Abstract.** Maritime incidents, though rare, have a significant impact on both the global economy and the environment. Improving maritime navigation practices always requires new ways to enhance safety, inevitably involving learning from past experiences and mistakes. In this context, probabilistic analysis of incidents and their associated consequences can play a crucial role in creating a safer and more efficient maritime transportation system. Bayesian networks constitute a class of probabilistic models based on statistics, decision theory, and graph theory.

This paper describes the analysis of maritime incident statistics by selecting probabilistic parameters influencing the risk of their occurrence. Important parameters from this database are grouped, and a Bayesian network is constructed to illustrate the relationships between them. This, in turn, provides insight into the dependencies existing among the variables in the database and the fundamental reasons for these accidents. The data for this study are based on the Lloyds Register and IMO incident databases from 1990 to 2022. Key factors from this database are grouped, and a Bayesian network is built to show the relationships between the corresponding variables, providing an understanding of the probabilistic dependencies among the variables in the database and the primary causes of these incidents.

**Keywords:** Bayesian trust network, risk analysis, information Bayesian model, acyclic graphs, damage database, prior knowledge, network analysis, probabilistic network.

### **Введение**

Морское судоходство или коммерческий морской транспорт всегда были основой мировой торговли на протяжении веков. Более 90% мировой торговли осуществляется морем, и за последние несколько десятилетий объем торговли динамично возрос из-за индустриализации и либерализации национальных экономик, что привело к свободной торговле и растущему спросу на потребительские товары.

Различного рода происшествия на море, могут оказывать огромное воздействие как на экономику, так и на окружающую среду. В постоянной практике судоходства всегда требуются новые способы улучшения безопасности морского судоходства с целью минимизации гибели людей, потерь транспортных компаний и вреда окружающей среде. Для этого необходимо извлекать уроки из прошлого опыта и анализировать ошибки. В этом отношении вероятностный анализ происшествий и связанных с ними последствий может сыграть важную роль в создании более надежной системы безопасности на морском транспорте.

**Целью исследования является** анализ морских происшествий с целью улучшения безопасности морского судоходства и минимизации вреда для окружающей среды.

**Объект исследования:** морские происшествия.

**Предмет исследования:** факторы, влияющие на возникновение и последствия морских происшествий, а также разработка методов и моделей для их анализа и прогнозирования.

**Методы исследования:** для достижения цели использовались методы вероятностного анализа, анализа данных, моделирования, статистического анализа, исследования зависимостей и анализа тенденций.

### **Методы вероятностного анализа статистики морских происшествий**

Байесовские сети, относящиеся к семейству вероятностных графических моделей, могут помочь в анализе морских происшествий [1,2]. Эти сети соответствуют структуре графических моделей, известной как направленный ациклический граф (DAG), который определяется множеством узлов (вероятностных параметров) и множеством направленных ребер (зависимостей) [3].

Основная формула, используемая в в байесовских сетях, вытекает из определения условной вероятности:

$$P(A | B) = \frac{P(B | A) \times P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

где:

$P(A)$  – априорная вероятность гипотезы  $A$

$P(A|B)$  – вероятность гипотезы  $A$  при наступлении события  $B$  (апостериорная вероятность)

$P(B|A)$  – вероятность наступления события  $B$  при истинности гипотезы  $A$

$P(B)$  – полная вероятность наступления события  $B$

Для дальнейших расчётов в качестве исходных данных используется анализ информации о прошлых инцидентах связанных с морскими судами [4,5,6].

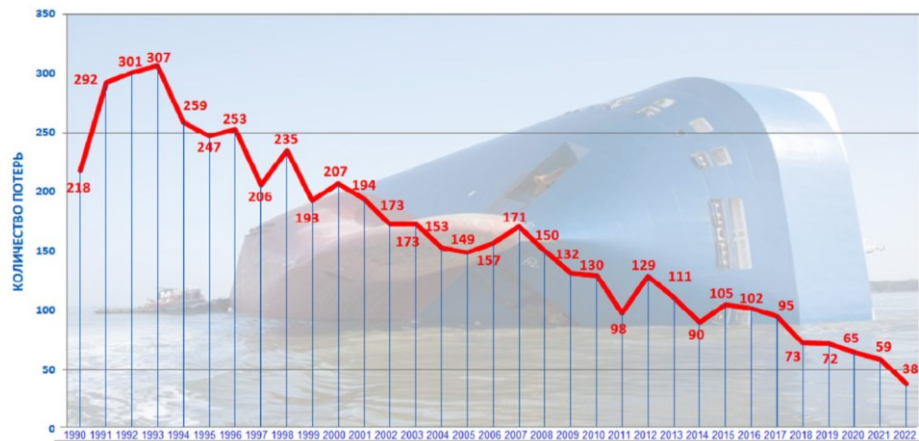


Рис. 1. Количество потерь в мировом флоте с 1990 по 2022 год

Существует различное программное обеспечение для проведения сетевого анализа, такое как Hugin, Graphical Network Interface (GeNIe) и другие. В данной работе сетевой анализ был проведен с использованием GeNIe, а также используется информационное моделирование, то есть выявление структуры байесовской сети из источника данных [3].

В подходе на основе ограничений направленный ациклический граф рассматривается как кодировка отношений зависимости и максимального числа независимостей в сети, которые можно вывести без применения числовых вычислений. Схожие по характеру данные были сгруппированы вместе, как показано в Таблице 2.



Рис. 2. Схема информационного моделирования

Анализ этих данных проводится с использованием информационного метода в программе GeNIe [3,7]. В ней доступны четыре метода обучения на основе данных:

Алгоритм PC представляет собой алгоритм на основе ограничений для изучения структуры байесовской сети.

Greedy thick thinning основано на алгоритме поиска и оценки.

Essential graph search начинается с графа, полученного путем применения алгоритма PC, и затем продолжается с поиска GTT.

Naive classifier - это простой вероятностный классификатор, основанный на применении теоремы Байеса с сильными предположениями о независимости

Все методы, кроме NAIVE, позволяют вводить предварительные знания, когда у пользователя есть предварительные знания о связях и направлении стрелок перед анализом и есть некоторый контроль над конечным графом. На рисунке 3 показаны графики, полученные с использованием этих методов [7,8].

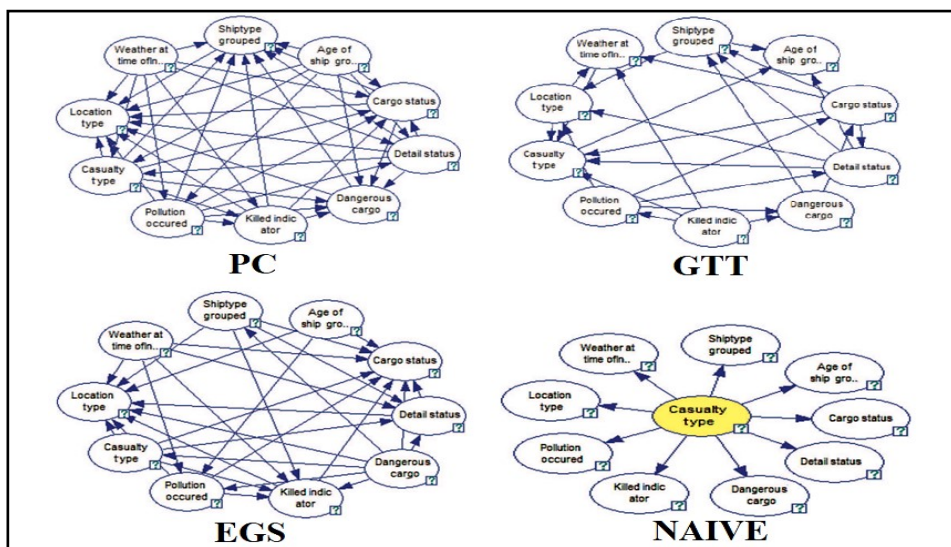


Рис. 3. Структура моделей вероятностной сети

Результаты исследования

Таблица 2

Предварительная обработка данных

Категория	Кол-во
Тип судна	
Сухогрузы	2153
Навалочные суда	1320
Химовозы/Продуктовозы	872
Другие	3143
Локация	
Море	3393
Порт, гавань или док	2037
Устье реки, река, стеснённые воды	1632
Другое	426
Опасный груз	
Нет	3546

Категория	Кол-во
Да	563
Неизвестно	3379
Тип происшествия	
Столкновение	3796
Кораблекрушение, посадка на мель	3692
Статус судна	
В рейсе	5264
Другое	2224
Есть ли убитые	
Да	122
Нет	7165
Неизвестно	201
Загрязнение морской среды	
Да	423
Нет	6064
Неизвестно	1004
Возраст судна	
Менее 10 лет	2006
10-20 лет	2148
20-30 лет	2141
30 и более лет	1193
Статус груза	
В грузу	3114
Другое	992
Неизвестно	3382
Состояние погоды	
Тяжёлые погодные условия	747
Другое	1279
Неизвестно	5462

В зависимости от предварительных данных мы получаем различные результаты. Для иллюстрации этого приведено следующее исследование на основе метода РС.

Целью проводимых расчётов является определение типа инцидента, индикатора загрязнения, числа пострадавших людей, местоположения и погодных условий при заданных данных о типе судна (грузовое судно), возрасте судна, статусе груза, детальном состоянии судна и наличии опасного груза.

Для судна с учетом пяти переменных существует 72 различных сценария, что означает, что для четырех типов судов, рассматриваемых в этой базе данных, возможно 288 сценариев. В качестве примера, в Таблице 3 приведены исследования по навалочным судам возрастом менее 10 лет.

Таблица 3

Результаты расчётов по методу РС для навалочных судов возрастом менее 10 лет

Дано	Груз	В грузу					
	Статус	В рейсе			Другое		
	Опасный груз	Нет	Неизв.	Да	Нет	Неизв.	Да
Погода	Сложные погодные условия	7%	6%	20%	13%	24%	70%
	Другое	7%	9%	27%	14%	6%	1%
	Неизвестно	86%	86%	53%	72%	70%	29%
Локация	Море	49%	38%	44%	13%	1%	16%
	Устье реки	37%	21%	40%	54%	6%	65%
	Порт/Гавань	11%	20%	8%	32%	92%	17%
	Другое	3%	21%	8%	1%	1%	2%
Происшествие	Столкновение	27%	23%	57%	46%	87%	83%
	Кораблекрушение/ Посадка на мель	73%	77%	43%	54%	13%	17%
Столкновение	Нет	87%	97%	43%	79%	65%	91%
	Неизвестно	9%	1%	28%	17%	5%	3%
	Да	4%	2%	28%	3%	30%	6%
Потери среди людей	Нет	98%	97%	91%	96%	98%	98%
	Неизвестно	0%	1%	6%	3%	1%	1%
	Да	2%	2%	3%	1%	1%	1%

*Продолжение таблицы 3*

Дано	Груз	Другое					
	Статус	В рейсе			Другое		
	Опасный груз	Нет	Неизв.	Да	Нет	Неизв.	Да
Погода	Сложные погодные условия	13%	7%	55%	39%	57%	34%
	Другое	11%	4%	28%	9%	2%	10%
	Неизвестно	77%	89%	18%	51%	42%	56%
Локация	Море	43%	37%	25%	9%	1%	25%
	Устье реки	47%	20%	25%	12%	24%	25%
	Порт/Гавань	10%	40%	25%	77%	46%	25%
	Другое	1%	3%	25%	2%	29%	25%
Происшествие	Столкновение	36%	78%	25%	74%	80%	82%
	Кораблекрушение/ Посадка на мель	64%	22%	75%	26%	20%	18%
Столкновение	Нет	95%	77%	64%	85%	95%	68%
	Неизвестно	0%	18%	4%	1%	2%	23%
	Да	5%	5%	32%	14%	3%	9%
Потери среди людей	Нет	99%	96%	72%	95%	96%	65%
	Неизвестно	1%	2%	14%	3%	2%	21%
	Да	0%	2%	14%	2%	2%	11%

Окончание Таблицы 3

Дано	Груз	Неизвестно					
	Статус	В рейсе			Другое		
	Опасный груз	Нет	Неизв.	Да	Нет	Неизв.	Да
Погода	Сложные погодные условия	18%	11%	36%	72%	1%	34%
	Другое	2%	4%	40%	17%	9%	40%
	Неизвестно	80%	84%	24%	11%	90%	27%
Локация	Море	50%	56%	25%	9%	2%	25%
	Устье реки	22%	21%	25%	9%	24%	25%
	Порт/Гавань	16%	12%	25%	72%	71%	25%
	Другое	12%	11%	25%	9%	3%	25%
Происшествие	Столкновение	52%	74%	33%	83%	80%	65%
	Кораблекрушение/ Посадка на мель	48%	26%	67%	17%	20%	35%
Столкновение	Нет	99%	89%	62%	78%	88%	52%
	Неизвестно	0%	9%	5%	4%	11%	23%
	Да	1%	2%	33%	28%	1%	25%
Потери среди людей	Нет	100%	99%	62%	96%	98%	34%
	Неизвестно	0%	1%	20%	1%	1%	12%
	Да	0%	0%	19%	3%	1%	55%

### Заключение

На базе данных было проведено исследование случая и показаны ориентированные ациклические графы, а также приведена таблица с результатами полученными по одному из представленных методов. Эти результаты показывают тенденции, скрытые в базе данных происшествий с судами.

Область применения данного анализа может быть дополнительно расширена путем включения экспертных оценок для количественной оценки неизвестных сведений в базе данных и включения структурных деталей судов, участвующих в происшествиях.

### Список литературы

1. Попов А.Н. Теоретико-методологические основы интеграции и отображения информации в морской эргатической системе : Дис. ... докт. физ. мат. наук: 05.22.19 / А.Н. Попов – Новороссийск, 2021 – 340 с
2. Probabilistic method of predicting ship collision damage// Brown AJ, Chen D.// Ocean Eng Int J. – 2002- 6(1)-P.54–65.
3. A tutorial on learning with Bayesian networks. // Heckerman D.// In: Jordan M. editor, Learning in graphical models. - Cambridge (MA): MIT Press - 1998 - P. 301–354.
4. International Maritime Organization (IMO): Maritime Facts and Figures
5. <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/Pages/MaritimeFactsFigures-Default.aspx>
6. [Дата обращения 18.10.2023]
7. Реконструкция различных навигационных сценариев судна «Ever Given», включая посадку на мель в Суэцком канале с использованием симулятора моста с современными электронными навигационными картами // Попов А.Н., Зеленков Г.А., Папулов Д.С. // Journal of Physics: Conference Series -2021 - 2061(1)

8. Lloyds Register: Maritime Casualty Incidents
9. <https://www.lloydslistintelligence.com/knowledge-hub/data-storytelling/maritime-casualty-incidents>
10. [Дата обращения 20.10.2023]
11. Effect of ship structure and size on grounding and collision damage distribution// Pedersen PT, Zhang S. // Ocean Eng. – 2000 – 27 – P. 1161–1179.
12. Causation, prediction, and search, adaptive computation and machine learning.// Spirtes P, Glymour C, Scheines R. // Cambridge (MA): MIT Press. 2nd ed.– 2000

#### References

1. Popov A.N. Theoretical and methodological foundations of the integration and display of information in the marine ergatic system : PhD thesis : 05.22.19 / Popov A.N. – Novorossiysk, 2021 – 340 p.
2. Probabilistic method of predicting ship collision damage// Brown AJ, Chen D.// Ocean Eng Int J. – 2002- 6(1)-P.54–65.
3. A tutorial on learning with Bayesian networks. // Heckerman D.// In: Jordan M. editor, Learning in graphical models. - Cambridge (MA): MIT Press - 1998 - P. 301–354.
4. International Maritime Organization (IMO): Maritime Facts and Figures
5. <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/Pages/MaritimeFactsFigures-Default.aspx>
6. [Date of reference 18.10.2023]
7. Reconstruction of various navigational scenarios of the «Ever Given» ship, including grounding in the Suez Canal using the bridge simulator with up-to-date electronic navigation charts // Popov, A.N., Zelenkov, G.A., Papulov, D.S. // Journal of Physics: Conference Series - 2021 - 2061(1)
8. Lloyds Register: Maritime Casualty Incidents
9. <https://www.lloydslistintelligence.com/knowledge-hub/data-storytelling/maritime-casualty-incidents>
10. [Date of reference 20.10.2023]
11. Effect of ship structure and size on grounding and collision damage distribution// Pedersen PT, Zhang S. // Ocean Eng. – 2000 – 27 – P. 1161–1179.
12. Causation, prediction, and search, adaptive computation and machine learning.// Spirtes P, Glymour C, Scheines R. // Cambridge (MA): MIT Press. 2nd ed.– 2000
- 13.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Попов Анатолий Николаевич** д.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация водного транспорта, судовождение», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск, e-mail: an.popov.mga@gmail.com

**Зеленков Геннадий Анатольевич** д.ф.-м.н., доцент кафедры «Системный анализ и управление процессами на водном транспорте», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск, e-mail: mathshell@mail.ru

**Плужник Валерий Сергеевич** Аспирант специальности « Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография», Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск, e-mail: pluzhnik2001@mail.ru

**Popov A.N.** PhD (technical science), Senior lecturer of the Department of « Operation of water transport, navigation» Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, e-mail: an.popov.mga@gmail.com

**Zelenkov G.A.** PhD ( physico-mathematical science), Senior lecturer of the Department of «System analysis and process management in water transport» Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, e-mail: mathshell@mail.ru

**Pluzhnik V.S.** Postgraduate student of «Operation of water transport, waterways and hydrography» Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, e-mail: pluzhnik2001@mail.ru



**Бородин Олег Евгеньевич** Аспирант специальности «Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография» ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», г. Новороссийск, e-mail: [elb999@mail.ru](mailto:elb999@mail.ru)

**Borodin O.E.** Postgraduate student of «Operation of water transport, waterways and hydrography» Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, e-mail: [elb999@mail.ru](mailto:elb999@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 30.12.2023; опубликована онлайн 20.06.2024.  
Received 30.12.2023; published online 20.06.2024.