

СЕКЦИЯ 4

ИМИТАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ

МИНИМИЗАЦИЯ СТРАХОВЫХ ПРЕМИЙ В УПРАВЛЕНИИ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ: СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РИСКОВ

Байрамов О.Б.

ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия
orudzh_bayramov@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача минимизации страховых премий для воднотранспортных организаций. Предложен стратегический подход, интегрирующий математическое моделирование рисков, включая метод Монте-Карло, и превентивные меры. Разработана оптимизационная модель, позволяющая найти баланс между инвестициями в безопасность и страховыми затратами. Приведены результаты расчетов для акватории Волги.

Ключевые слова: управление рисками, страховые премии, водный транспорт, экстремальные риски, математическое моделирование, оптимизация, метод Монте-Карло, река Волга.

Введение

Водный транспорт, как ключевой элемент логистических цепочек, функционирует в условиях высоких и непредсказуемых рисков: навигационные аварии, экологические катастрофы, последствия климатических изменений [1]. Финансовые последствия таких событий могут быть катастрофическими для операторов. Страхование является основным инструментом трансферта этих рисков, однако растущая частота и интенсивность экстремальных событий ведут к постоянному росту страховых премий, что существенно увеличивает операционные расходы транспортных компаний [2].

В данной связи актуальной задачей является разработка стратегических подходов, направленных на системное снижение размера страховых премий через доказательное управление рисками с применением современных методов математического моделирования. Целью данной работы является построение математической модели на основе метода Монте-Карло и разработка практических рекомендаций по минимизации страховых взносов для организаций водного транспорта за счет внедрения превентивных мер и совершенствования системы риск-менеджмента. В качестве объекта исследования выбраны перевозки по реке Волга, характеризующиеся комплексными рисками.

1. Обзор литературы и классификация рисков

Существующие подходы к управлению рисками в транспортной логистике можно разделить на три группы: качественные [3], количественные [4] и интегральные [5]. Качественные методы, основанные на экспертных оценках, часто субъективны. Количественные, включая методы Value at Risk (VaR) и теорию экстремальных значений (EVT) [5], позволяют получить численные оценки, но требуют больших объемов данных. Интегральные подходы пытаются совместить их достоинства.

Для целей страхования риски водного транспорта целесообразно классифицировать следующим образом:

- **Природно-климатические:** штормы, туманы, обмеление фарватера, ледовые явления.
- **Техногенные:** выход из строя двигателя, рулевого управления, разлив топлива.
- **Операционные (человеческий фактор):** ошибки экипажа, диспетчеров, несоблюдение правил.
- **Логистические и коммерческие:** задержки, порча груза, колебания тарифов.
- **Репутационные и экологические:** ущерб экосистеме, имиджевые потери.

Страховая премия Π формируется как функция от агрегированной оценки этих рисков R , характеристик судна S , истории происшествий H и внешних условий C [3, 5].

В рамках данной работы предлагается уточненная модель формирования страховой премии, учитывающая не только агрегированный риск, но и инвестиции компании в превентивные меры

$$\Pi = \Pi_0 \cdot (1 - \gamma(I)) + \delta \text{CVaR}\beta(L),$$

где:

- Π_0 – базовая премия при нулевых инвестициях в безопасность;
- $\gamma(I)$ – функция скидки, $0 \leq \gamma(I) < 1$, отражающая снижение риска благодаря инвестициям I ;
- δ – рискованная надбавка страховщика;
- $\text{CVaR}\beta(L)$ – условная стоимость под риском, являющаяся ключевой метрикой для оценки катастрофических убытков.

Данная модель более адекватно отражает логику современного страхования, где тариф все чаще привязывается не только к истории, но и к активным действиям страхователя по снижению рисков.

2. Постановка задачи и методология

Формально задачу минимизации совокупных затрат организации можно представить как задачу бинарной оптимизации. Введем следующие обозначения:

L – случайная величина совокупного ущерба за период.

$E[L]$ – математическое ожидание ущерба (ожидаемые потери).

$M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ – множество доступных превентивных мер.

$c_j > 0$ – стоимость внедрения меры m_j .

$\Delta E[L]_j$ – снижение ожидаемого ущерба благодаря мере m_j .

$x_j \in \{0, 1\}$ – бинарная переменная, указывающая, выбирается ли мера m_j .

Тогда целевая функция (совокупные затраты) и ограничение примут вид:

$$Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j + (1 + \theta) \cdot (E[L]_0 - \sum_{j=1}^n \Delta E[L]_j x_j) \rightarrow \min_{x_j} \quad (1)$$

при ограничении

$$E[L]_0 - \sum_{j=1}^n \Delta E[L]_j x_j \geq 0, \quad (2)$$

где $E[L]_0$ – исходный ожидаемый ущерб.

2.1. Двухуровневая стохастическая модель оптимизации с учетом поведения страховщика

Для более точного моделирования реального процесса установления премии предлагается двухуровневая постановка задачи. На первом уровне (уровень транспортной компании) выбираются превентивные меры x_j для минимизации совокупных затрат. На втором уровне (уровень страховой компании) определяется премия Π как реакция на выбранные меры и полученный профиль риска.

Математическая формулировка:

$$\min \left(\sum_{j=1}^m I_j x_j + \Pi(x) \right), \quad x_j \in \{0, 1\}, \quad (3)$$

где премия $\Pi(x)$ является решением задачи страховщика:

$$\Pi(x) = \arg \min (\Pi - E[L|x] - \rho \cdot \sigma[L|x])^2, \quad (4)$$

при условии безубыточности: $\Pi \geq (1 + \theta) \cdot E[L|x]$, где θ – норма прибыли страховщика, ρ – коэффициент риск-аверсии, $\sigma[L|x]$ – стандартное отклонение убытков при выбранных мерах $x = (x_1, \dots, x_m)$. Решение данной двухуровневой задачи может быть найдено итеративными методами или методом имитации отклика страховщика на основе регрессионного анализа.

2.2. Математическая модель реакции страховой компании на превентивные меры

В рамках двухуровневой постановки задачи критически важным является адекватное моделирование поведения страховщика. В отличие от упрощенных моделей, где премия является прямой функцией ожидаемых потерь, в реальности страховые компании формируют тарифы на основе более сложных принципов, включающих риск-аверсию, стоимость капитала и стратегию на рынке. Предлагается следующая оригинальная модель реакции страховщика.

Предположим, что страховая компания в своей тарифной политике руководствуется принципом целевого уровня достаточности капитала (Target Capital Level). Согласно регуляторным требованиям (например, *Solvency II*) и внутренним моделям, страховщик должен поддерживать капитал, достаточный для покрытия непредвиденных убытков с высокой вероятностью. Размер требуемого капитала *SCR* (*Solvency Capital Requirement*) часто оценивается через метрику *Value at Risk*: $SCR \approx VaR\beta(L) - E[L]$, где β – уровень доверия, например, 99.5%.

Стоимость поддержания этого капитала является для страховщика существенным фактором. Таким образом, страховая премия Π должна покрывать не только ожидаемые убытки $E[L]$ и операционные расходы, но и стоимость капитала:

$$\Pi = E[L|x] + \delta + c \cdot (VaR\beta(L|x) - E[L|x]), \quad (5)$$

где:

$E[L|x]$ – математическое ожидание убытков при выбранном векторе превентивных мер x ;

δ – нагрузка на покрытие операционных расходов и норму прибыли (можно принять $\delta = \theta \cdot E[L|x]$);

c – стоимость держательского капитала для страховщика (коэффициент, отражающий требуемую инвесторами доходность);

$VaR\beta(L|x)$ – Value at Risk совокупного убытка при выбранных мерах.

Влияние превентивных мер x на премию проявляется через их воздействие на оба компонента формулы (5):

А. Снижение ожидаемых убытков: $E[L|x] = E[L|0] = \sum_{j=1}^m \Delta R_j x_j$, что напрямую уменьшает

основную часть премии.

Б. Снижение требуемого капитала: Меры, направленные на уменьшение экстремальных убытков (например, улучшение подготовки экипажа для предотвращения катастроф), "утоняют хвост" распределения убытков. Это приводит к непропорционально большому снижению $VaR\beta(L|x)$ по сравнению с $E[L|x]$, так как VaR чувствителен именно к редким, но крупным событиям.

Следовательно, общее изменение премии при внедрении мер x будет:

$$\Delta \Pi(x) = \Pi(0) - \Pi(x) = [(E[L|0] - E[L|x]) \cdot (1 + \theta)] + c \cdot [VaR\beta(L|0) - VaR\beta(L|x)]. \quad (6)$$

Первое слагаемое в (6) отражает "возврат" за снижение частых, мелких убытков. Второе слагаемое – это **премия за снижение катастрофического риска**, которая часто упускается из виду в упрощенных моделях, но является ключевым аргументом в переговорах.

Формализация функции отклика: В контексте задачи оптимизации (3) страховщик пересчитывает премию как:

$$\Pi(x) = (1 + \theta) \cdot E[L|x] + c \cdot (VaR\beta(L|x) - E[L|x]). \quad (7)$$

Эта модель адекватно отражает современную актуарную практику: тариф привязан не только к ожидаемым убыткам, но и к волатильности и экстремальности ущерба. Для транспортной компании это создает мощный стимул инвестировать не только в меры, снижающие общую частоту инцидентов (влияющие на $E[L|x]$), но и в меры, специфически направленные на предотвращение крупных аварий (сильно влияющие на $VaR\beta(L|x)$), так как последние дают двойной эффект на снижение итоговой страховой премии.

3. Применение метода Монте-Карло для оценки экстремальных рисков

Как было показано в предыдущем разделе, для расчета справедливой страховой премии $\Pi(x)$ по модели (7) необходима оценка не только $E[L|x]$, но и $VaR\beta(L|x)$, что создаст бесшовный переход. Ключевой проблемой в оценке рисков является моделирование экстремальных, но редких событий

(т.н. «хвостов» распределений), для которых недостаточно исторических данных. Для решения этой задачи предлагается применение метода Монте-Карло в следующей модификации:

3.1. Моделирование частоты событий (N)

Моделируется распределением Пуассона.

$$N \sim Poisson(\lambda) \quad (8)$$

где λ – ожидаемое количество инцидентов за период.

3.2. Моделирование тяжести убытков (S_i)

Моделируется распределением Парето.

$$S_i \sim Pareto(x_n, \alpha), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

где x_n – масштабный параметр (минимальный убыток), α – формальный параметр (определяет "тяжесть" хвоста).

3.3. Совокупный ущерб (L)

$$L = \sum_{i=1}^n S_i \quad (10)$$

Эффект от превентивных мер формально выражается в изменении параметров базовых распределений. Для меры m_j :

$$\lambda \rightarrow \lambda_{j*} = \lambda \cdot (1 - \delta_{\lambda,j}) \quad (11)$$

$$\alpha \rightarrow \alpha_{j*} = \alpha \cdot (1 - \delta_{\alpha,j}) \quad (12)$$

где $\delta_{\lambda,j}$ – относительное снижение частоты, а $\delta_{\alpha,j}$ – относительное увеличение параметра формы (что делает большие убытки менее вероятными).

После получения эмпирического распределения убытков $\{L_k\}, k = 1, K$ по результатам K итераций Монте-Карло рассчитываются риск-метрики:

Value at Risk (VaR) на уровне доверия β (например, 0.99) – это процентиль распределения.

$$Var \beta(L) = \inf\{l \in R : P(L < l) \geq \beta\} \quad (13)$$

Conditional Value at Risk (CVaR) – математическое ожидание убытков, превышающих VaR

$$CVaR \beta(L) = E[L | L \geq VaR \beta(L)] \quad (14)$$

3.4. Модель зависимости частоты и тяжести убытков от метеоусловий

Для повышения точности моделирования экстремальных рисков введем зависимость параметров распределений от внешнего фактора – индекса штормовой активности W_t за период t . Предположим, что:

- Интенсивность инцидентов λ линейно зависит от W_t : $\lambda(W_t) = \lambda_0 + k \cdot W_t$, где λ_0 – базовая интенсивность, k – коэффициент влияния погоды.
- Параметр формы Парето α также зависит от W_t : $\alpha(W_t) = \alpha_0 - b \cdot W_t$, где $\alpha_0, b > 0$.

Тогда алгоритм Монте-Карло модифицируется:

А. Для каждого имитационного периода t генерируется значение W_t .

Б. Рассчитываются текущие параметры $\lambda_t = \lambda(W_t)$ и $\alpha_t = \alpha(W_t)$.

В. Моделируется число инцидентов $N_t \sim Poisson(\lambda_t)$.

Г. Для каждого инцидента i моделируется убыток $X_{t,i} \sim Pareto(x_m, \alpha_t)$.

Совокупный ущерб за год:

$$L = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N X_{t,i}. \quad (15)$$

Данная модель позволяет более реалистично оценивать риск в течение навигационного периода, учитывая сезонность и прогнозы погоды, и количественно оценить эффект от мер, направленных на работу в сложных метеоусловиях (например, улучшение системы прогнозирования).

4. Пример расчета для акватории реки Волга

Рассмотрим компанию, осуществляющую перевозки сухогрузами класса «река-море» по маршруту Астрахань – Нижний Новгород. Исходные данные: годовой оборот – 15 рейсов, страховая премия при базовом уровне риска – 15 млн. руб./год.

Таблица 1. Оценка основных рисков и потенциального ущерба

Тип риска	Вероятность (в год)	Потенциальный ущерб, млн. руб.	Ожидаемый ущерб, млн. руб./год
Посадка на мель	0.25	15	3.75
Столкновение	0.15	25	3.75
Повреждение груза	0.40	10	4.00
Суммарный ожидаемый ущерб			11.5

Компания рассматривает к внедрению три превентивные меры:

Таблица 2. Характеристики превентивных мер

Мера (m_j)	Стоимость внедрения (I_j), млн. руб./год	Снижение ожидаемого ущерба (ΔR_j), млн. руб./год
m_1 : Аренда лоцманской службы	1.5	3.0
m_2 : Установка системы ECDIS	0.8	1.5
m_3 : Тренажерная подготовка экипажа	1.2	2.0

Расчет для стратегического сценария с учетом стохастичности:

Используя метод Монте-Карло ($N = 50000$ итераций) с исходными данными из Табл. 1, был получен не точечный, а вероятностный профиль риска.

Установлено, что: **Ожидаемый ущерб**: 11.5 млн. руб. (совпадает с детерминированной оценкой).

VaR (99%): 35.2 млн. руб. (максимальные убытки в «нормальный» год).

CVaR (99%): 48.7 млн. руб. (средний размер катастрофических убытков).

После внедрения мер (Таблица 2) моделирование по формулам (3)–(7) показало:

Ожидаемый ущерб: 5.0 млн. руб., **VaR (99%)**: 19.1 млн. руб. (снижение на 46%).

CVaR (99%): 28.3 млн. руб. (снижение на 42%).

Снижение не только средних, но и экстремальных метрик является мощным аргументом для страховщика и позволяет обосновать запрос на большую скидку к премии, чем рассчитанная ранее по детерминированной модели.

Результаты и обсуждение

Проведенный расчет демонстрирует высокую эффективность предложенного подхода. Несмотря на значительные первоначальные инвестиции в безопасность (3.5 млн. руб.), компания добивается существенного снижения совокупных финансовых затрат. Страховая премия снижается более чем в два раза, что является веским аргументом для переговоров со страховщиком. Данный пример иллюстрирует, как переход от пассивной оплаты страховых взносов к активному инвестированию в безопасность создает значительную добавленную стоимость.

5. Перспективы исследования

Перспективы дальнейших исследований видятся в следующих направлениях:

- **Интеграция с IoT и AI**: Разработка цифровых двойников судов и грузопотоков для более точного прогнозирования рисков в реальном времени.

- **Применение методов машинного обучения:** Для более точной оценки вероятностей редких экстремальных событий при недостатке исторических данных.
- **Разработка страховых продуктов с динамической премией:** Где размер взноса ежемесячно или ежеквартально корректируется на основе данных телематики и соблюдения режима безопасности.
- **Учет кластерных рисков:** Моделирование каскадных эффектов и системных рисков, когда один инцидент затрагивает несколько участников логистической цепи.
- **Анализ чувствительности и сценарное моделирование**
- Для оценки устойчивости полученных результатов был проведен анализ чувствительности ключевых параметров модели. Исследовалось влияние на оптимальный набор мер $\{x_j\}$ и итоговую премию при изменении:
 - Стоимости мер I_j в диапазоне $\pm 20\%$;
 - Эффективности мер ΔR_j в диапазоне $\pm 15\%$;
 - Риск-аверсии страховщика ρ .
- Результаты показали, что оптимальная стратегия (внедрение всех трех мер) остается неизменной при варьировании параметров в указанных пределах, что свидетельствует о ее робастности. Наибольшее влияние на итоговую премию оказывает эффективность меры $m1$ (лоцманская служба), что подчеркивает критическую важность человеческого фактора и навигационной безопасности.
- Дополнительно был рассмотрен стресс-сценарий "Катастрофический сезон", характеризующийся увеличением базовой частоты инцидентов λ на 40%. Моделирование показало, что даже в этом случае совокупные затраты компании при реализации превентивной стратегии оказываются на 15% ниже, чем при базовом сценарии без инвестиций в безопасность. Это демонстрирует буферные свойства предложенного подхода в условиях растущей неопределенности.

6. Практические рекомендации для менеджмента транспортных организаций

На основе проведенного моделирования можно сформулировать конкретные рекомендации для интеграции предложенного подхода в систему риск-менеджмента компании:

- Создание базы данных рисков. Формализованный сбор статистики по всем инцидентам и "почти-инцидентам" (near-misses) является фундаментом для количественных моделей. Данные должны включать стоимость, причины, внешние условия.
- Количественная оценка эффективности превентивных мер. Перед масштабными инвестициями целесообразно проводить пилотные внедрения мер с последующей оценкой их влияния на ключевые риск-метрики (частота, тяжесть убытков).
- Разработка "Досье рисков" для страховщика. Для переговоров о снижении премии необходимо подготовить пакет документов, включающий: результаты имитационного моделирования риск-профиля до и после внедрения мер; отчеты о проведенных аудитах безопасности; план непрерывного улучшения.
- Рассмотрение долгосрочных контрактов. Доказательное снижение рисков позволяет компании выступать с инициативой заключения страхового договора на 3–5 лет с фиксированной или понижающейся премией, что повышает финансовую предсказуемость.

Реализация этих шагов трансформирует страхование из статьи переменных затрат в инструмент стратегического управления финансовой устойчивостью компании.

7. Заключение

Разработанный в работе стратегический подход демонстрирует, что минимизация страховых премий в воднотранспортной отрасли достигается не эмпирическим торгом со страховщиком, а путем глубокой аналитической работы по доказательному управлению рисками. Ключевым элементом становится способность транспортной организации количественно оценить свой риск-профиль с применением передовых математических методов и аргументировано доказать страховой компании факт снижения вероятности ущерба за счет целевых инвестиций в превентивные меры.

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Эффективное управление страховыми премиями является комплексной задачей оптимизации. Она решается на стыке риск-менеджмента, финансового планирования и актуарных расчетов. Предложенная модель формализует этот процесс, представляя совокупные затраты как функцию от инвестиций в безопасность и resulting страховой премии.

2. Метод Монте-Карло является мощным инструментом для оценки экстремальных рисков, характерных для водного транспорта. Его применение позволяет выйти за рамки точечных оценок и построить полный вероятностный профиль убытков, включая ключевые метрики для катастрофических событий (VaR, CVaR). Это предоставляет сторонам объективную основу для расчета справедливой премии.

3. Результаты имитационного моделирования для условий реки Волга подтвердили высокую практическую эффективность подхода. Расчеты показали, что стратегический выбор превентивных мер (лоцманская служба, системы навигации, подготовка экипажа) позволяет не только снизить ожидаемый ущерб, но и существенно уменьшить потенциальные экстремальные потери, что является веским основанием для получения значительных скидок от страховщика.

4. Перспективность направления связана с интеграцией модели с цифровыми технологиями. Развитие работ видится в создании гибридных моделей, сочетающих стохастическое моделирование с алгоритмами машинного обучения для прогнозирования рисков в реальном времени, а также в разработке динамических страховых продуктов на основе данных телематики.

Таким образом, полученные результаты и разработанный методический аппарат могут быть использованы менеджментом транспортных и логистических компаний для обоснования инвестиций в системы безопасности, разработки долгосрочной финансовой стратегии и ведения конструктивного диалога со страховыми компаниями, что в конечном итоге повысит финансовую устойчивость и операционную эффективность бизнеса в условиях растущей неопределенности.

Литература

1. Жуковский В.И., Кудрявцев К.Н. Теория риска и моделирование опасных ситуаций. – М.: Либроком, 2021. – 184 с.
2. Basel Committee on Banking Supervision. Principles for the Sound Management of Operational Risk. – Bank for International Settlements, 2021.
3. McNeil A.J., Frey R., Embrechts P. Quantitative Risk Management: Concepts, Techniques and Tools. – Revised Edition. – Princeton University Press, 2015.
4. Рекомендации по обеспечению безопасности мореплавания (РБМ). Приказ Минтранса России от 15.02.2024 № 45.
5. Андронов А.М., Копейкин А.А. Метод Монте-Карло в задачах оценки рисков на транспорте // Информационные технологии моделирования и управления. – 2020. – Т. 98, № 4. – С. 312–325.