

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-959-970

STATISTICAL ANALYSIS OF OIL AND OIL PRODUCT SPILLS AT SEA

D. V. Alekseev, A. A. Lentarev

Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

The influence of oil and its derivatives transportation processes, especially against the background of positive dynamics of their production, on the probability of environmental pollution is considered in the paper. It is noted that in such conditions it is very important to ensure timely preparedness for response and the ability to choose the most effective strategies, mainly using preventive measures to ensure emergency preparedness. The basis for the necessary set of measures is a forecast of the potential volume of a spill, allowing only the necessary number of technical or other assets to be planned for each area. It is emphasised that such a forecast is possible if the type of distribution by which it is described is understood. The type of distribution that best describes the behaviour of the oil spill volume as a random variable is defined in the paper. Statistical analysis methods have been used to examine the data presented in various databases. It is found that none of the common distributions that could theoretically describe the spill volume behaviour fulfil the accuracy condition. The observed chi-square (Pearson) criterion of agreement absolutely for all types of distributions exceeds the critical one many times, and it is obvious that the lognormal distribution law describes the behaviour of the considered random variable in the best way, which is visually confirmed by the frequency polygon and the smallest observed Pearson criterion. Using modern methods of hybridisation of distributions, it is proposed to conduct a study aimed at creating a universal distribution, presumably based on the lognormal distribution, which would accurately describe the behaviour of the random variable of oil spill volume. In addition, an approximate step function with a very high confidence coefficient can be used to predict the volume in each specific area.

Keywords: marine transport, oil spills, data bases, oil spills statistics, oil spill probability, trend line, hybridization of distributions.

For citation:

Alekseev, Dmitrii V., and Alexander A. Lentarev. "Statistical analysis of oil and oil product spills at sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 959–970. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-959-970.

УДК 629.123+51.74

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА МОРЕ

Д. В. Алексеев, А. А. Лентарёв

МГУ им. адм. Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

В статье рассмотрено влияние процессов транспортировки нефти и ее производных, особенно на фоне положительной динамики их добычи, на вероятность загрязнения окружающей среды. Отмечается, что в таких условиях очень важно обеспечить своевременную готовность к реагированию и возможность выбора наиболее эффективных стратегий, преимущественно с использованием превентивных мер, позволяющих обеспечить готовность к аварийной ситуации. Основой необходимого комплекса мер является прогноз возможного объема разлива, позволяющий запланировать для каждого района только необходимое количество технических или иных средств. Подчеркивается, что составление подобного прогноза возможно при понимании вида распределения, при помощи которого он описывается. В данной работе выполнено определение вида распределения, который оптимальным образом описывает поведение объема аварийного разлива нефти как случайной величины. Для исследования данных, представленных в различных базах, использованы методы статистического анализа. Путем проведенного анализа было установлено, что ни один из общих видов распределения, которые теоретически могли бы описывать поведение объема при разливе, не выполняют условия точности. Наблюдаемый критерий согласия хи-квадрат (Пирсона) абсолютно для всех видов распределений многократно превышает критический, при этом очевидно, что наилучшим образом

поведение рассматриваемой случайной величины описывает логнормальный закон распределения, что визуально подтверждается полигоном частот и наименьшим наблюдаемым критерием Пирсона. Используя современные методы гибридизации распределений, предлагается провести исследование, направленное на создание универсального распределения, предположительно на базе логнормального, которое предельно точно описывает поведение случайной величины объема при разливе нефти. Кроме того, для прогнозирования объема в каждой конкретной зоне допускается использование степенной функции, полученной методом аппроксимации и обладающей весьма высоким коэффициентом достоверности.

Ключевые слова: морской транспорт, разливы нефти, базы данных, статистика разливов, вероятность разливов, линия тренда, гибридизация распределений.

Для цитирования:

Алексеев Д. В. Статистический анализ разливов нефти и нефтепродуктов на море / Д. В. Алексеев, А. А. Лентарёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 959–970. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-959-970.

Введение (Introduction)

В настоящее время активное применение нефти и нефтепродуктов в различных отраслях промышленности имеет большое значение для мировой экономики. Несмотря на активные исследования в области альтернативных источников энергии нефть остается основным сырьем для производства синтетических материалов и различных видов топлива, а также является неотъемлемой частью многих промышленных процессов, играя ключевую роль в развитии различных отраслей экономики. При этом использование нефти сопряжено с определенным риском для окружающей среды, который возрастает с увеличением объемов добычи и потребления нефти и нефтепродуктов. Согласно статистическому обзору мировой энергетики, опубликованному Energy Institute в 2023 г., мировое производство нефти в 2022 г. практически приблизилось к показателям 2019 г. (до пандемии COVID-19), составив 4407,2 млн т [1]. Более того, согласно докладу «Перспективы мирового рынка нефти», опубликованному Организацией стран — экспортеров нефти (ОПЕК), к 2045 г. ожидается увеличение спроса на 12,9 млн барр./сут, что составит по сравнению с 2021 г. 109,8 млн барр./сут [2]. Такая тенденция обусловлена ростом потребностей развивающихся стран, что приведет к еще большим объемам транспортировки нефти и нефтепродуктов морским транспортом.

К сожалению, вследствие износа технических сооружений, аварий, неконтролируемых сбросов и утечек в ходе различных технологических процессов, часть нефти и нефтепродуктов попадает в окружающую среду. В таких условиях очень важно обеспечить своевременную готовность к реагированию и возможность выбора наиболее эффективных стратегий. Использованию превентивных мер при этом отводится не меньшая роль, поскольку реализация мероприятий, направленных на предотвращение разливов нефти и нефтепродуктов (РН), является ключевым положением, прописанным в ряде международных и национальных нормативно-правовых документов. Основой такого планирования является *прогноз разливов*, определяющий достаточность и обоснованность предусмотренных мер.

Особое значение прогнозирование приобретает при оценке номенклатуры и состава, предназначенных для борьбы с РН технических и иных средств. Правильный прогноз РН, т. е. оценка вероятности размеров и частоты разливов для каждого района, позволяет запланировать для него только необходимое количество средств. Составление такого прогноза возможно при понимании вида распределения объема РН. Все это в совокупности определяет актуальность и значение данного исследования для возможности прогнозирования вероятного объема РН в каждой конкретной ситуации.

Целью исследования является определение вида распределения объема РН на море. Для этого необходимо решить следующие задачи: выполнить анализ статистических данных по РН баз данных различных классификаций; определить возможность использования известных непрерывных распределений применительно к объему РН и выбрать распределение, оптимальным образом соответствующее эмпирическим данным.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В терминах теории оценки и управления рисками РН следует рассматривать как инцидент (происшествие), который является последним этапом в цепочке «*потенциальная опасность – реальная опасность – реализованная опасность*». В ноксологии эта последовательность в общем виде формализует некий процесс, называемый *развитием опасности* [3]. Этот процесс имеет вероятностный характер, а его результат является случайным событием, для описания которого применяются методы теории вероятностей. Следовательно, РН — случайное событие, возможность возникновения которого определяется его вероятностью $P_{РН}$. Анализ доступных библиографических источников, документов и материалов показывает, что для оценки $P_{РН}$ используется ряд методов, которые можно определить как аналитические, вероятностные, статистические и индексные.

Аналитические методы. Процесс развития опасности, результатом которого является РН, может быть представлен в виде некоторой имитационной модели, которая независимо от ее вида (физическая, динамическая, кинематическая и др.) описывается рядом переменных параметров: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Тогда $P_{РН}$ будет функцией этих переменных: $P_{РН} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. Например, вероятность РН с танкера зависит от района плавания и плотности движения, конструкции и размерения судна, погодных условий, а также вида аварии судна. В общем случае при анализе РН в результате аварий, произошедших с судами, могут быть использованы аналитические модели, обзор которых дан в монографии [4]. С этой целью в данные модели могут быть внесены коэффициенты, учитывающие долю танкеров в общем составе судопотока и долю навигационных аварий, сопровождающихся РН с аварийных судов. Причем такие коэффициенты могут быть как постоянными параметрами, так и функциями других переменных (например, объем перевезенных нефти и нефтепродуктов, длительность плавания, размерения судна).

Вероятностные методы. Последовательные разливы, по сути, формируют поток случайных событий, имеющих случайную природу. Такой поток событий получил название *простейшего*, или *стационарного пуассоновского потока*, промежутки времени между событиями в котором имеют экспоненциальный характер [5]. Тогда, если последовательность РН в каком-либо районе рассматривать как простейший поток, то вероятность $P_{РН}(m)$ того, что за конкретный промежуток времени в этом районе произойдет m РН, рассчитывается по формуле Пуассона:

$$P_m = \frac{\alpha^m}{m!} e^{-\alpha} \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

где α — среднее количество РН за выбранный период времени;

$m!$ — факториал числа m ;

$e \approx 2,7182\dots$ — основание натурального логарифма.

Следовательно, вероятность того, что в течение выбранного периода времени произойдет один РН, составляет $P_{РН}(1) = \alpha e^{-\alpha}$. В принципе, последовательность РН может не обладать качествами простейшего потока. Тогда можно воспользоваться другим распределением, которое в большей степени отвечает реальной ситуации. Например, параметр α пуассоновского распределения с течением времени может изменяться. В этом случае последовательность РН может быть описана отрицательным биномиальным распределением, которое является одной из разновидностей распределения Паскаля. Следует отметить, что такие методы оценки $P_{РН}$, являясь по своей природе вероятностными, все же обладают также аналитическими признаками (законы распределения выражаются в виде формул) и статистическими элементами (например, коэффициенты и параметры в формулах распределения обычно рассчитываются с использованием статистических данных).

Статистические методы. Сущность этих методов основана на том, что РН представляет собой достаточно редкое событие, вероятность которого может быть оценена статистической частотой появления такого события в анализируемой области (портовые воды, район моря, компания, отрасль и т. д.). Применительно к РН статистическая частота n может быть соотнесена с каким-либо показателем N , характеризующим эксплуатационную деятельность в этой области. Тогда вероятность РН определяется в виде $P_{РН} = n/N$, где в качестве параметра N могут быть использованы такие

показатели, как количество судопроходов, общее количество танкеров или их доля в составе судопотока, объем движения (общая регистрационная вместимость всех судов), объем перевезенной нефти и нефтепродуктов. Обоснованность применения статистических методов оценки вероятности РН зависит от объема информации о реальных инцидентах. Для этого используются различные базы данных о РН, которые рассмотрены в разделе «Результаты».

Индексные методы. В таких методах диапазон изменения вероятности инцидента разбивается на несколько уровней, имеющих вербальное описание. Иногда каждому уровню присваивается количественный показатель (весовой коэффициент, или индекс частоты). Подразделение на уровни вероятности и выбор количественных показателей выполняются на основе экспертной оценки, поэтому такие методы можно назвать также *экспертными*.

Индексные методы оценки вероятности инцидентов используются в том случае, если риск измеряется в матричной форме. В самом простом варианте шкала вероятностей разбивается на три уровня: низкий, средний и высокий. Такая система оценки применяется, например, в ГОСТе Р 12.0.10–2009 «Системы управления охраной труда. Определение опасностей и рисков»¹.

В «Руководстве по формализованной оценке безопасности» [6], рекомендуемом ИМО к использованию при анализе рисков судовых операций, предлагается четырехуровневая индексная шкала оценки безопасности: «часто», «вполне вероятно», «маловероятно» и «крайне маловероятно». Индексные методы оценки вероятности РН часто встроены в процедуры оценки и управления рисками, особенно при разработке планов по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти. В этом случае применяются до семи уровней оценки вероятности. Так, в Национальном плане по ликвидации разливов нефти на море Австралии использовано пять уровней оценки вероятности (как и риска) РН: «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий» и «экстремальный».

Иногда границы уровней оценки вероятности происшествий определяются на основе конкретных количественных показателей, полученных на основе статистических методов. Так, в РД 03–418–01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов» определены пять уровней вероятности возникновения опасных происшествий: «частые события», «вероятные события», «возможные события», «редкие события» и «практически невероятные события». Указанные уровни охватывают диапазон вероятностей происшествий от 1 и более за год до 10^{-6} и менее и разделяются значениями, кратными 10^{-2} .

Помимо оценки вероятности РН для эффективной работы системы предупреждения и ликвидации РН необходимо выполнять анализ возможных объемов РН, который позволяет определить количество и состав необходимых ресурсов. В планах предупреждения и ликвидации РН любого уровня, от объектового до регионального, обязательным является раздел, в котором определяются прогнозируемые зоны распространения нефти и нефтепродуктов. Размеры этих зон в основном зависят от объема разлитой нефти или нефтепродукта. В настоящее время прогноз зон распространения выполняется для максимально возможных разливов, объемы которых устанавливаются нормативно в зависимости от характеристик объекта. В то же время правомерным является и другой подход, когда количество и состав сил и средств ликвидации РН для первоначального реагирования могут быть определены исходя из среднего или наиболее вероятного объема РН. Для этого необходимо определить вид и параметры функции распределения разливов по их объему. Наличие такой функции, записанной в аналитическом виде, позволяет вычислять объем разлива нефти с любой заданной степенью вероятности.

Для анализа распределения РН по объему можно воспользоваться информацией, полученной из существующих статистических баз данных, которые в работе [7] классифицированы по различным признакам. Для этих целей было выбрано несколько баз данных из категорий международных, национальных и корпоративных баз, содержащих информацию только по РН на море. Обработка данных выполнялась на основе стандартных методов статистического анализа: по данным базы

¹ ГОСТ Р 12.0.010–2009. Системы управления охраной труда. Определение опасностей и рисков: национальный стандарт Российской Федерации: дата введ. 2009-12-10 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Изд. офиц. М.: Стандартинформ, 2009. 20 с.

составлялись гистограммы распределения РН по объему, выдвигались и проверялись гипотезы распределения генеральной совокупности, методом наименьших квадратов находилась функция, наилучшим образом приближающая эмпирические данные.

Одной из прикладных задач математической статистики является установление теоретического закона распределения случайной величины, характеризующей изучаемый признак по эмпирическому распределению, которое представляет вариационный ряд. Первый этап, заключающийся в предположении возможного вида закона распределения, можно выполнить на основе визуального анализа полигона или диаграммы. Таким образом, необходимо проанализировать информацию, представленную в базе данных Береговой охраны США, где за период 1973–2023 гг. представлены данные о количестве и объеме РН, среднем, медианном и максимальном объемах РН, произошедших в территориальных водах [8]. Следует отметить, что в течение всего времени наблюдений количество разливов в диапазоне 1–100 галлонов составило более 88,6 % от общего числа разливов, и тенденция увеличения доли таких разливов при уменьшении их среднего объема наблюдается до настоящего времени. Для наглядности визуализации рассмотрим статистические данные за 1974 г. по разливам нефти (рис. 1). В целях упрощения восприятия графических данных и учитывая, что всего 0,6 % всех разливов в течение анализируемого года превысило 10,000 галлонов, при построении диаграммы такие разливы не учитывались.

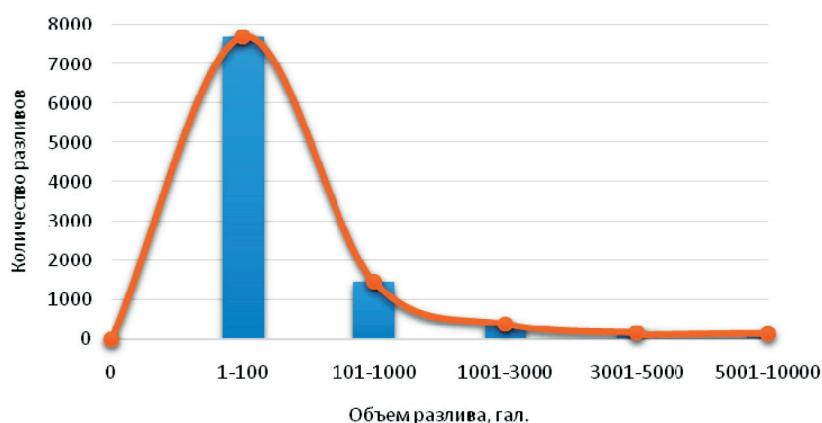


Рис. 1. Распределение разливов нефти по объему за 1974 г., произошедших в территориальных водах США (база данных Береговой охраны США)

Выполним анализ построенной кривой распределения объема РН. Из графика видно, что наблюдается явная асимметрия и положительная правосторонняя «скошенность», означающая обычно, что большее расстояние от математического ожидания соответствует более низкой вероятности. На основе визуального анализа можно сделать предположение о том, что описывать распределение объема РН могут такие виды распределения, как логнормальное, Вейбулла и гамма-распределение. Как известно, на объем РН в результате аварии оказывает влияние множество случайных и независимых факторов, таких как месторасположение повреждения, его глубина, особенности конструкции и состояние корпуса судна, свойства перевозимой нефти и др. Поэтому вторым этапом после визуального анализа является установление теоретического закона распределения посредством влияния этого множества факторов на случайную величину. С этой целью было сформулировано четыре основных фактора, имеющих непосредственное отношение к проводимому исследованию.

1. *Влияние множества случайных и независимых факторов на объем РН происходит одновременно и независимо друг от друга.* Результатом такого одновременного воздействия на процесс большого количества независимых случайных факторов является случайная величина, имеющая нормальный закон распределения. Такой вид распределения, который характеризуется непрерывным распределением вероятностей с пиком в центре и симметричными боковыми сторонами, в одномерном случае задается функцией плотности вероятности, совпадающей с функцией Гаусса:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2},$$

где μ — математическое ожидание (среднее значение), медиана и мода распределения;

σ — среднеквадратичное отклонение;

σ^2 — дисперсия распределения.

2. *Перемножение воздействий каждого из случайных и независимых факторов, т. е. мультипликативный характер взаимодействия.* В данном случае можно выдвинуть гипотезу о том, что случайная величина объема РН имеет логнормальный закон распределения, функция плотности распределения вероятности которого имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2},$$

где μ и σ — параметры логнормального распределения.

3. *Воздействие одного или нескольких случайных и независимых факторов из большого их числа, влияющего на случайную величину объема разлива, значительно превосходит по силе воздействия все остальные факторы.* Распределение такой случайной величины приобретает положительную асимметрию и называется *гамма-распределением*. Плотность вероятности такого распределения выражена формулой

$$f(x) = x^{k-1} \frac{e^{-x/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)}, x \geq 0,$$

где k — параметр формы;

θ — параметр масштаба;

$\Gamma(k)$ — гамма-функция Эйлера.

Популярность рассматриваемого распределения обусловлена гибкостью и многообразием параметров, применимых к тому или иному набору исходных данных.

4. *Случайное событие разлива нефти как следствие последовательных взаимозависимых случайных событий.* Цепочку этих событий в общем виде можно записать следующим образом: *неисправность (отказ) → обнаружение утечки → принятие мер по устранению утечки → объем разлива*. Для описания отказов таких многокомпонентных систем используют экспоненциальное распределение или более общее — распределение Вейбулла. При этом закон распределения случайных событий, составляющих цепочку, может быть каким угодно [9]. Учитывая, что график распределения РН по объему имеет правостороннюю скошенность с максимумом функции, т. е. параметр формы распределения $k > 0$, экспоненциальное распределение, при котором $k = 1$, не подходит для цели настоящего исследования. Таким образом, для аппроксимации статистических данных о разливах нефти можно выбрать распределение Вейбулла, функция плотности вероятности которого имеет вид:

$$f(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, x \geq 0,$$

где λ — параметр масштаба распределения, характеризующий растянутость кривых вдоль оси x ;

k — параметр формы распределения.

Универсальность распределения обусловлена возможностью варьирования этих двух параметров, что позволяет весьма гибко моделировать различные функции.

Результаты (Results)

Для целей настоящего исследования были выбраны две базы данных, в которых наиболее полно отражена статистическая информация и которые являются весьма интересными с приклад-

ной точки зрения. Первой является база данных компании ВР (до мая 2001 г. British Petroleum), в которой собрана корпоративная информация о разливах нефти, произошедших на объектах компании, в основном на нефтяных платформах и буровых вышках [10], вторая база данных относится к Национальному управлению океанических и атмосферных исследований, которое является высоконаучным учреждением при Министерстве торговли США [11]. Необходимо отметить, что Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA) применяет самые передовые технологии и методы для контроля за РН. С помощью спутников организация непрерывно сканирует поверхность планеты, собирая все необходимые данные, после сложной алгоритмической обработки которых происходит создание визуального представления путем наложения этих данных на экологические карты.

Перед началом исследования по подтверждению или опровержению гипотезы о том или ином виде распределения были заданы следующие условия:

- 1) значение объема разлива может принимать только неотрицательные значения;
- 2) нулевому значению объема разлива свойственна нулевая вероятность, поскольку разлив считается достоверным событием;
- 3) разливы объемом свыше 5000 л для базы данных ВР и 200 тыс. галл. для базы данных NOAA не были учтены, так как их частота минимальна (имеет небольшой вес в генеральной совокупности выборки).

Кроме того, при группировке данных использовалось *правило Стерджеса* для определения оптимального количества интервалов, на которые разбивается наблюдаемый диапазон изменения случайной величины при построении гистограммы плотности распределения. Длины интервалов при этом были определены как равные. На рис. 2 приведены графики полигонов эмпирического и теоретического распределения, выполненные на основе статистических данных ВР.

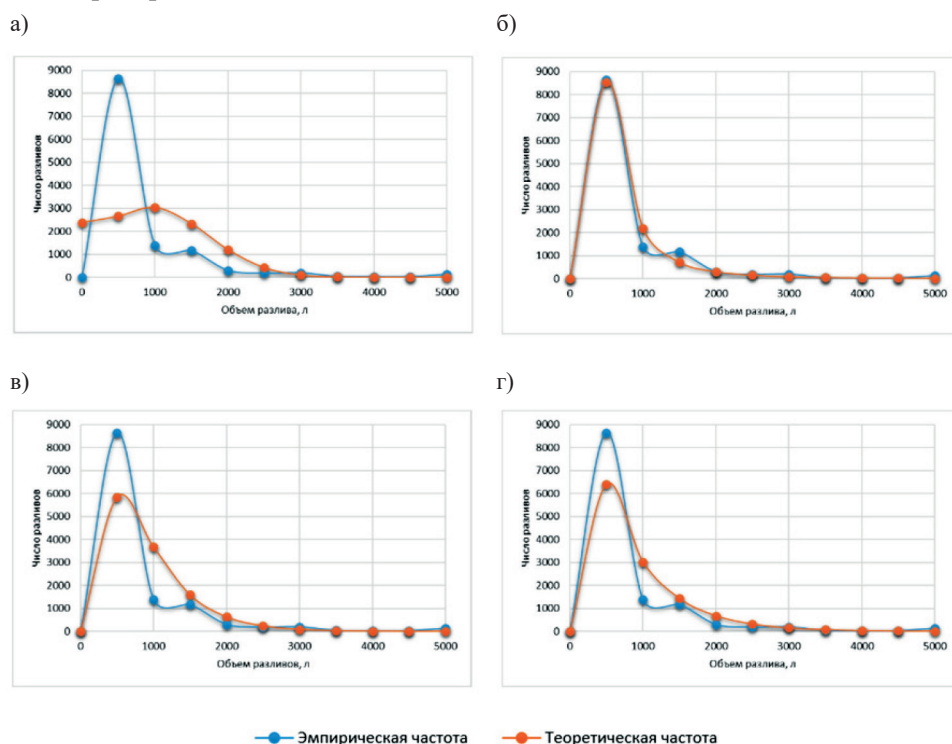


Рис. 2. Полигоны частот для вероятных видов распределения (база данных ВР):
а — нормальное распределение; б — логнормальное распределение;
в — гамма-распределение; г — распределение Вейбулла

На рис. 3 на графиках показаны полигоны эмпирического и теоретического распределения, выполненные на основе статистических данных NOAA.

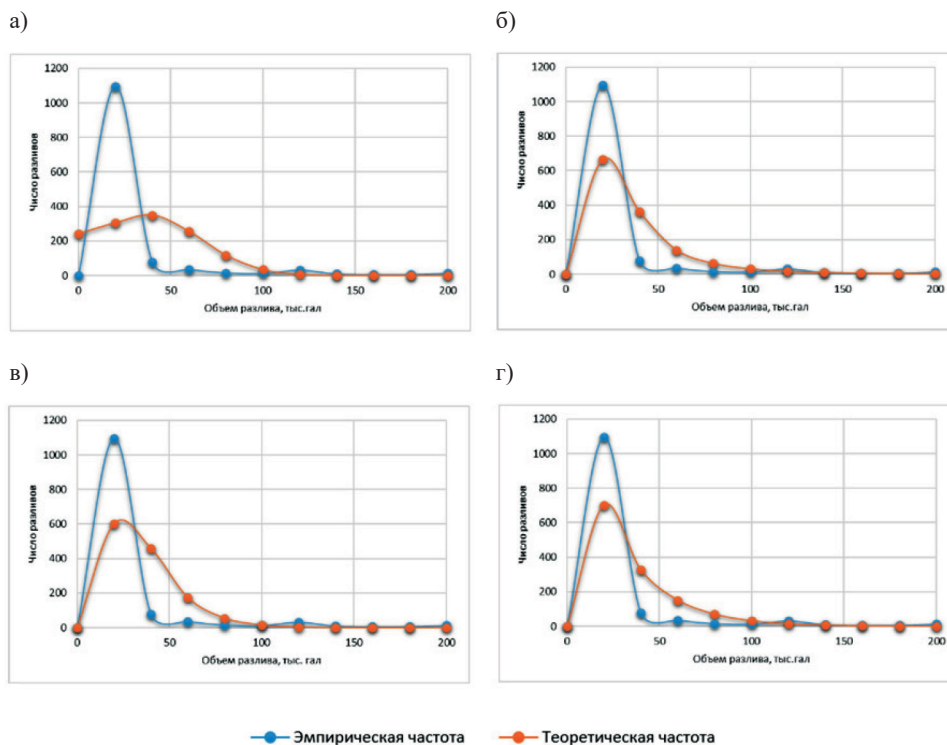


Рис. 3. Полигоны частот для вероятных видов распределения (база данных NOAA):
а — нормальное распределение; б — логнормальное распределение;
в — гамма-распределение; г — распределение Вейбулла

Дальнейшая задача заключается в оценке точности описания экспериментальных данных выбранным теоретическим законом распределения. Для решения данной задачи при большом объеме выборки ($n > 100$) используется критерий согласия — хи-квадрат (Пирсона), позволяющий оценить значимость различий между эмпирическим количеством исходов, попадающих в каждую категорию, и теоретическим количеством, которое можно ожидать в изучаемых группах при справедливости нулевой гипотезы. Результаты такой оценки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка соответствия эмпирических данных теоретическим по критерию Пирсона

Название базы данных	Предполагаемый вид распределения	Критерий χ^2 наблюдаемый	Критерий χ^2 критический	P -value
BP	Нормальное	21384,9	14,1	0
	Гамма	7281,4	14,1	0
	Вейбулла	5873,84	14,1	0
	Логнормальное	4481,6	14,1	0
NOAA	Нормальное	3341,7	14,1	0
	Гамма	1505,5	14,1	0
	Вейбулла	1007,0	14,1	0
	Логнормальное	669,4	14,1	0

Кроме определения вида распределения, характерного для всех статистических баз данных, правомерно выполнение прогнозирования путем выявления общей тенденции на основе имеющихся статистических данных для каждой конкретной базы данных. Такой прогноз может быть осуществлен в Excel в графическом виде. В его основу заложен метод наименьших квадратов с использованием аппроксимирующей кривой — линии тренда. Подбирая линию тренда, программа автоматически выполняет расчет значения величины коэффициента аппроксимации R^2 , характеризующего ее достоверность. В итоге чем ближе значение R^2 к единице, тем надежнее линия тренда линеализирует исследуемый процесс. Результаты такой аппроксимации для баз данных ВР, Береговой Охраны США и NOAA приведены в табл. 2.

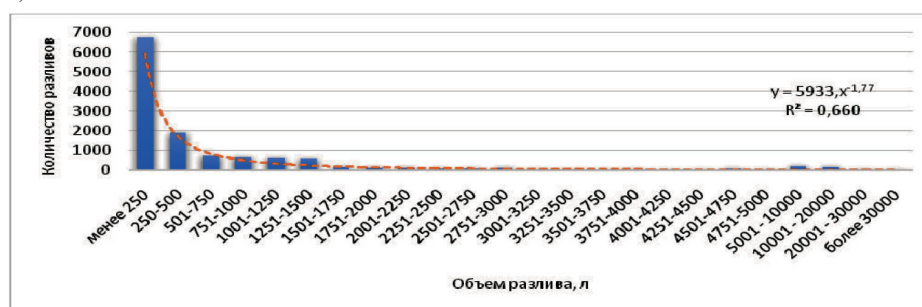
Таблица 2

Результаты аппроксимации рассматриваемых статистических данных

Вид линии тренда	Пределы изменения R^2	Качественная характеристика достоверности
Линейная	0,2607–0,3561	Слабая
Экспоненциальная	0,5717–0,9009	Заметная, высокая
Логарифмическая	0,5755–0,6190	Заметная
Степенная	0,9944–1,000	Весьма высокая, абсолютная

Степенная аппроксимация, приведенная на рис. 4, показала наиболее высокий коэффициент достоверности по всем анализируемым базам данных.

а)



б)



в)

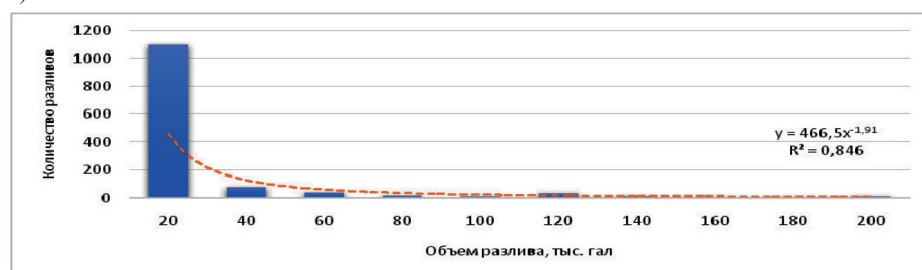


Рис. 4. Степенная линия тренда для гистограмм баз данных:
а — компания ВР; б — Береговая охрана США; в — NOAA

Обсуждение (Discussion)

Полученные в ходе настоящего исследования результаты свидетельствуют о том, что ни один из общих видов распределения точно не описывает распределение случайного объема РН. Необходимо отметить, что для обеих рассматриваемых баз данных наблюдается один и тот же результат. Выводы, опубликованные в работе [8] о том, что случайная величина объема РН при транспортировке имеет нормальный закон распределения, не подтверждаются. Известно, что для подтверждения или опровержения нулевых гипотез существуют косвенные, графические и расчетные методы. Если гипотеза отвергается хотя бы по одному из косвенных методов, то отвергается и нулевая гипотеза. Так, например, в теории вероятности доказано, что каждому закону распределения свойственно определенное соотношение между коэффициентами асимметрии и эксцесса. Для нормального закона распределения абсолютная величина показателей асимметрии и эксцесса должна быть меньше их стандартных ошибок в три и более раза. В данном случае наблюдается диаметрально противоположная ситуация: стандартные ошибки асимметрии и эксцесса больше их абсолютных значений в десятки раз, поэтому гипотеза о нормальном распределении отвергается.

Наблюдаемый критерий согласия для всех видов распределений многократно превышает критический, свидетельствуя о неслучайном и значимом отличии эмпирических и теоретических частот. При этом очевидно, что логнормальный закон распределения среди всех остальных наилучшим образом описывает поведение рассматриваемой случайной величины, что визуально подтверждается полигоном частот и наименьшим наблюдаемым критерием Пирсона.

Преимущество использования основных законов распределения состоит в их детальной изученности и наличии возможности получения непротиворечивых, несмещенных и относительно высокоэффективных оценок параметров. Несмотря на это рассмотренные законы распределения не обладают необходимыми гибкостью и разнообразием форм, поэтому их применение не обеспечивает необходимой общности представления случайной величины объема при аварийном РН.

С учетом того, что наличие аналитической функции, описывающей вероятный объем РН, имеет большое значение для эффективного планирования состава сил и средств ликвидации РН, предлагается использовать методы, позволяющие генерировать более гибкие распределения. Так, в работе [12] рассматривается один из таких методов генерации семейств непрерывных распределений. Суть его заключается в том, что случайная величина X , являясь своеобразным «трансформатором», используется для преобразования другой случайной величины T . Полученное семейство распределений $T-X$ имеет связь с интенсивностью отказов, и каждое найденное при этом распределение рассматривается как взвешенная функция интенсивности отказов случайной величины X . Метод получил развитие во многих работах. Например, в работе [13] была разработана и исследована схема обобщения семейства $T-X$, получившая название $T-R-Y$. Суть схемы заключается в том, что T , R и Y , являясь различными распределениями, используются для образования распределения с большей гибкостью X , обладающего всеми преимуществами T , R и Y .

Используя данный подход, предлагается провести исследование, направленное на создание такого универсального распределения, предположительно на базе логнормального, которое предельно точно могло описать поведение случайной величины объема при РН. Кроме того, для прогнозирования объема в каждой конкретном районе допускается использование степенной функции, полученной методом аппроксимации и обладающей весьма высоким коэффициентом достоверности.

Заключение (Conclusion)

В результате проведенного исследования, направленного на определение вида распределения объема РН на море, можно сделать следующие выводы:

1. Ни одно из таких распределений, как нормальное, логнормальное, Гаусса и Вейбулла точно не описывает распределение случайной величины объема РН.
2. Среди всех рассмотренных типовых видов распределений логнормальный закон наилучшим образом описывает поведение случайной величины объема РН, что визуально подтверждается полигоном частот и наименьшим наблюдаемым критерием Пирсона.

3. Типовые законы распределения не обладают необходимыми гибкостью и разнообразием форм, поэтому их применение не обеспечивает необходимой общности представления случайной величины объема при аварийном РН.

4. Для прогнозирования объема РН в каждом конкретном районе допускается использование степенной функции, полученной методом аппроксимации и обладающей весьма высоким коэффициентом достоверности.

5. С учетом того, что наличие аналитической функции, описывающей вероятный объем РН, имеет большое значение для эффективного планирования состава сил и средств ликвидации РН, предлагается провести дальнейшее исследование, направленное на создание универсального распределения. Такая модель распределения, созданная на базе логнормального с использованием методом гибридизации, позволит точно описать поведение случайной величины объема при разливе нефти.

6. Дальнейшие исследования в указанном направлении могут содействовать уменьшению числа РН, а, соответственно, снижению негативного воздействия на морскую среду и обеспечению устойчивости развития морской транспортной и нефтегазовой отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Energy Institute: Официальный сайт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.energyinst.org/statistical-review/> (дата обращения: 07.09.2023).

2. Официальный сайт Организации стран — экспортеров нефти [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm/ (дата обращения: 07.09.2023).

3. Белов С. В. Ноксология: учебник и практикум для вузов / С. В. Белов, Е. Н. Симакова; под общей редакцией С. В. Белова. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2023. — 451 с.

4. Лентарев А. А. Основы теории управления движением судов: монография / А. А. Лентарев. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2018. — 197 с.

5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник / Е. С. Вентцель. — 11-е изд., стер. — М.: КНОРУС, 2010. — 664 с.

6. Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2. 9 April 2018. — London: IMO, 2019. — 74 p.

7. Алексеев Д. В. Сравнительный анализ баз данных по разливам нефти и нефтепродуктов с морских судов / Д. В. Алексеев, А. А. Лентарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 891–904. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-891-904.

8. Polluting Incidents In and Around U. S. Waters. A Spill/Release Compendium: 1969–2011. — Washington DC: United States Coast Guard, 2013.

9. Этин В. Л. Стохастическая оценка массы разливов нефти с судов и объектов внутреннего водного транспорта / В. Л. Этин, С. В. Васькин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2011. — № 29. — С. 152–161.

10. Лентарев А. А. Проблемы прогнозирования риска разливов нефти на море. Монография / А. А. Лентарев, С. Ю. Монинцев. — Владивосток: Гос. морской ун-т им. адмирала Г. И. Невельского, 2006. — 122 с.

11. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): Официальный сайт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/oil-spills/> (дата обращения: 08.07.2023).

12. Alzaatreh A. A new method for generating families of continuous distributions / A. Alzaatreh, C. Lee, F. Famoye // Metron. — 2013. — Vol. 71. — Is. 1. — Pp. 63–79. DOI: 10.1007/s40300-013-0007-y.

13. Aljarrah M. A. On generating TX family of distributions using quantile functions / M. A. Aljarrah, C. Lee, F. Famoye // Journal of Statistical Distributions and Applications. — 2014. — Vol. 1. — Pp. 1–17. DOI: 10.1186/2195-5832-1-2.

REFERENCES

1. Energy Institute: Official website. Web. 7 Sept. 2023 <<https://www.energyinst.org/statistical-review/>>.
2. Organization of the Petroleum Exporting Countries: Official website. Web. 7 Sept. 2023 <https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm/>.
3. Belov, S. V., and E. N. Simakova. *Noksologiya: uchebnik i praktikum dlya vuzov*. Edited by S. V. Belov. 3d edition. M.: Izdatel'stvo Yurait, 2023.
4. Lentarev, A. A. *Osnovy teorii upravleniya dvizheniem sudov: monografiya*. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2018.
5. Venttsel', E. S. *Teoriya veroyatnostei*. 11th edition. M.: KNORUS, 2010.
6. *Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process*. MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2. 9 April 2018. London: IMO, 2019.
7. Alekseev, Dmitrii V. and Alexander A. Lentarev. "Comparative analysis of databases on oil and petroleum products spills from ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 891–904. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-891-904.
8. *Polluting Incidents In and Around U. S. Waters. A Spill/Release Compendium: 1969–2011*. Washington DC: United States Coast Guard, 2013.
9. Etin, V. L., and S. V. Vas'kin. "Stochastic estimation of weight spills of oil from courts and objects internal sailing charter." *Bulletin of VSAWT* 29 (2011): 152–161.
10. Lentarev, A. A., and S. Yu. Moninets. *Problemy prognozirovaniya riska razlivov nefti na more*. Vladivostok: Gos. morskoi un-t im. admirala G. I. Nevel'skogo, 2006.
11. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): Official website. Web. 8 Jul. 2023 <<https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/oil-spills/>>.
12. Alzaatreh, Ayman, Carl Lee, and Felix Famoye. "A new method for generating families of continuous distributions." *Metron* 71.1 (2013): 63–79. DOI: 10.1007/s40300-013-0007-y
13. Aljarrah, Mohammad A., Carl Lee, and Felix Famoye. "On generating TX family of distributions using quantile functions." *Journal of Statistical Distributions and Applications* 1 (2014): 1–17. DOI: 10.1186/2195-5832-1-2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексеев Дмитрий Валерьевич — аспирант
Научный руководитель:
Лентарёв Александр Андреевич
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация,
Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: alexeevdmityy97@mail.ru
Лентарёв Александр Андреевич —
доктор технических наук, профессор
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация,
Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: lentarev@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alekseev, Dmitrii V. — Postgraduate
Supervisor:
Lentarev, Alexander A.
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: alexeevdmityy97@mail.ru
Lentarev, Alexander A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok,
690003, Russian Federation
e-mail: lentarev@msun.ru

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2023 г.
Received: September 21, 2023.