

Применение системного анализа для оптимизации решений при бункеровке судов в условиях неопределенности

Д. А. Первухин¹, И. М. Новожилов², С. К. Нейрус¹✉

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ samneyrus3@gmail.com

Аннотация. Целью исследований, отраженных в данной статье, служит разработка и применение методов системного анализа и стохастических методов для оптимизации бункеровки судов в условиях неопределенности. При исследовании использованы методы имитационного моделирования, стохастической оптимизации и сценарного анализа. Разработана модель управления запасами топлива, учитывающая стохастический характер спроса и баланс затрат на хранение и дефицит. Результаты эксперимента показывают снижение ожидаемых издержек по сравнению с детерминированными подходами. Сделан вывод, что применение методов системного анализа и вероятностных методов обеспечивает более обоснованное планирование логистических процессов, что подтверждается снижением издержек и повышением устойчивости решений.

Ключевые слова: бункеровка, моделирование, управление запасами, логистика, оптимизация решений

Для цитирования: Первухин Д. А., Новожилов И. М., Нейрус С. К. Применение системного анализа для оптимизации решений при бункеровке судов в условиях неопределенности // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 9. С. 79–86. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-9-79-86.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Application of System Analysis for Optimization of Bunkering Decisions Under Uncertainty Conditions

D. A. Pervukhin¹, I. M. Novozhilov², S. K. Neyrus¹✉

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ samneyrus3@gmail.com

Abstract. The purpose of this paper is to develop and apply system analysis and stochastic methods to optimize ship bunkering under uncertainty. Simulation modeling, stochastic optimization and scenario analysis methods are used in the study. The model of fuel stock management, which takes into account the stochastic nature of demand and the balance of storage and shortage costs, is developed. Experimental results show the reduction of expected costs compared to deterministic approaches. It is concluded that the application of system analysis and probabilistic methods provides more reasonable planning of logistics processes, which is confirmed by the reduction of costs and increased stability of decisions.

Keywords: bunkering, modelling, inventory management, logistics, decision optimization

For citation: Pervukhin D. A., Novozhilov I. M., Neyrus S. K. Application of system analysis for optimization of bunkering decisions under uncertainty condition // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 9. P. 79–86. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-9-79-86.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Современные логистические процессы в нефтегазовом секторе, в частности бункеровка судов топливом, сопряжены со сложным взаимодействием факторов – запасами топлива, расписанием прибытия судов, транспортными расходами и т. д. Эффективная организация таких процессов требует целостного подхода к моделированию системы и учета неопределенности. Системный анализ предоставляет методологию решения крупных задач на основе системной концепции, в центре которой – количественное сравнение альтернатив. В логистике это означает анализ совокупности элементов (топливных складов, транспортных ресурсов, заказов судов) и их взаимосвязей при поиске оптимальных решений. Широко признано, что системный подход применяется во многих областях, включая экономические и логистические системы. Для логистических систем разрабатываются методы и модели выбора эффективных решений с учетом неопределенности задач управления запасами. Практика бункеровки подтверждает значимость учета стохастических факторов. Группа авторов статьи [1] отмечает, что неопределенность времени ожидания на заправке судов и колебания цен на топливо формируют важный компромисс – дешевый порт с долгим временем ожидания может оказаться менее выгодным при риск-ориентированном подходе.

Постановка задачи. В рамках данного исследования ставятся следующие задачи:

- оценка современных методов системного анализа, применимых при стохастической неопределенности решения задачи;
- разработка математической модели, демонстрирующей применение методов системного анализа для оптимизации решений при бункеровке судов;
- проведение вычислительного эксперимента и представление его результатов (представленные как данные из практики без указания конкретных компаний) с оформлением иллюстраций в виде таблиц и графиков.

Ряд последних публикаций посвящен учету неопределенности в задачах топливного снабжения судов. Например, группа авторов статьи [2] предлагает стохастическую программную модель, объединяющую тактические (закупка топлива) и операционные (маршрутизация и скорость судов) решения по бункеровке с целью минимизации ожидаемых затрат на топливо при контроле финансового риска. В общем случае современные подходы рекомендуют интегрировать неопреде-

ленность непосредственно в модель: имитационные методы и стохастическая оптимизация помогают получить более устойчивые решения. Так, обзоры показывают, что для логистических систем широко применяются методы Монте-Карло, робастной оптимизации и сценарного анализа, позволяющие формализовать неопределенности (спроса, времени в пути, цен и др.) и оценивать их влияние на ключевые показатели. В дальнейшем будут подробно рассмотрены эти методологические подходы и показано, как они могут быть использованы для принятия оптимальных логистических решений при бункеровке судов.

Среди методов системного анализа, применимых при стохастической неопределенности, можно выделить следующие:

1. Метод Монте-Карло – имитационный подход, при котором генерируются случайные выборки значений неопределенных параметров и по ним моделируется поведение системы. Это позволяет оценить распределение итоговых показателей (затрат, запасов, уровня сервиса) и учесть изменчивость системы [3].

2. Робастная оптимизация – метод поиска решений, устойчивых ко многим сценариям неопределенности. Вместо оптимизации по одному усредненному сценарию, задачи ставятся так, чтобы полученные решения работали удовлетворительно во множестве возможных условий. Такой подход полезен, когда точные распределения случайных параметров неизвестны [4].

3. Сценарный анализ – построение и сравнение гипотетических сценариев развития событий. Выбираются несколько правдоподобных сценариев (например, «высокий спрос/низкая цена», «низкий спрос/высокая цена» и т. д.) с разными степенями вероятности, и для каждого оцениваются ключевые показатели [5]. Это помогает оценить риски и преимущества различных решений.

4. Стохастическое программирование – формализация оптимизации с учетом распределений случайных параметров. В такой модели (например, двух- или многостадийной) оптимизируются решения с учетом всех возможных исходов неопределенности. Результатом становится стратегия, минимизирующая, к примеру, математическое ожидание затрат или другого критерия устойчивости.

5. Имитационное моделирование (дискретно-событийная симуляция, системная динамика) – построение компьютерной модели логистической цепочки (учет прибытия судов, загрузки, разгрузки и т. п.) с генерацией случайных событий [6]. Это

позволяет исследовать динамику системы, узкие места и эффективно проводить анализ «что-если».

Все перечисленные методы в той или иной степени помогают включить неопределенность в анализ системы и добиться более надежных решений. Они дополняют классические статистические и оптимизационные подходы, делая систему принятия решений в цепочке поставок более устойчивой к рискам.

Цифровые технологии проникают во многие сферы, в том числе в нефтегазовую отрасль. Для повышения эффективности управления бизнес-процессами необходима цифровизация, особенно в нефтегазовом секторе [7]. Таким образом, моделирование и цифровизация становятся неотъемлемой частью современных технологических решений, позволяя лучше понимать и управлять процессами в различных отраслях.

Современные технологии тесно взаимодействуют с моделированием, что позволяет получить представление о будущих событиях и процессах. Математическое моделирование – это мощный инструмент, способный описывать самые разные явления, в том числе и геофизические процессы [8], [9]. Она становится неотъемлемой частью технологического процесса, позволяющей, например, визуализировать распределение твердых тел в гетерогенных потоках и оценивать эффективность операций [10], [11]. Однако при построении таких моделей возникает проблема баланса между учетом множества данных и факторов и реализуемостью модели [12]–[14].

Методология исследования. Для моделирования процесса бункеровки в условиях неопределенности рассмотрим упрощенную задачу управления запасом топлива. Предположим, что в некоторый момент времени планируется закупка топлива объемом Q , а совокупный спрос со стороны судов за период описывается случайной величиной D с известной функцией распределения $f_D(d)$ (например, нормальным распределением). Затраты при этом складываются из двух составляющих: стоимость хранения избыточного топлива и штрафа за недопоставку (дефицит). Обозначим c_h – удельные расходы хранения избыточного топлива (в условных денежных единицах за тонну), и c_s – удельные расходы или потери от дефицита топлива (упущенная выгода или штраф за тонну). Тогда ожидаемая суммарная стоимость $E[C(Q)]$ при принятом решении Q может быть выражена как

$$E[C(Q)] = c_h E[\max(Q - D, 0)] + c_s E[\max(D - Q, 0)].$$

Эти математические ожидания можно разложить по следующим формулам:

$$E[\max(Q - D, 0)] = \int_0^Q (Q - d) f_D(d) dd;$$

$$E[\max(D - Q, 0)] = \int_Q^\infty (d - Q) f_D(d) dd,$$

где d – возможное значение случайной величины спроса D , $f_D(d)$ – функция плотности распределения спроса. Минимизация $E[C(Q)]$ по Q дает условие оптимальности в виде критического фрагмента:

$$F_D(Q^*) = \frac{c_s}{c_s + c_h}, \text{ где } F_D(Q^*) \text{ – кумулятивная}$$

функция распределения случайной величины D . Используется функция распределения, так как условие оптимальности выражается через вероятность того, что спрос D не превысит заказ Q .

Иными словами, оптимальное значение Q – это значение кумулятивной функции распределения спроса, соответствующее отношению затрат на дефицит к сумме затрат на дефицит и хранение. При нормальном распределении это приводит к смещению Q^* относительно среднего спроса на z -коэффициент уровня сервисной вероятности.

Шаги моделирования:

1. Задать распределение спроса D (например, нормальное с параметрами $E[D]$ и σ^2) и значения c_s , c_h .

2. Записать функцию ожидаемой общей стоимости $E[C(Q)]$ как сумму c_h - и c_s -частей.

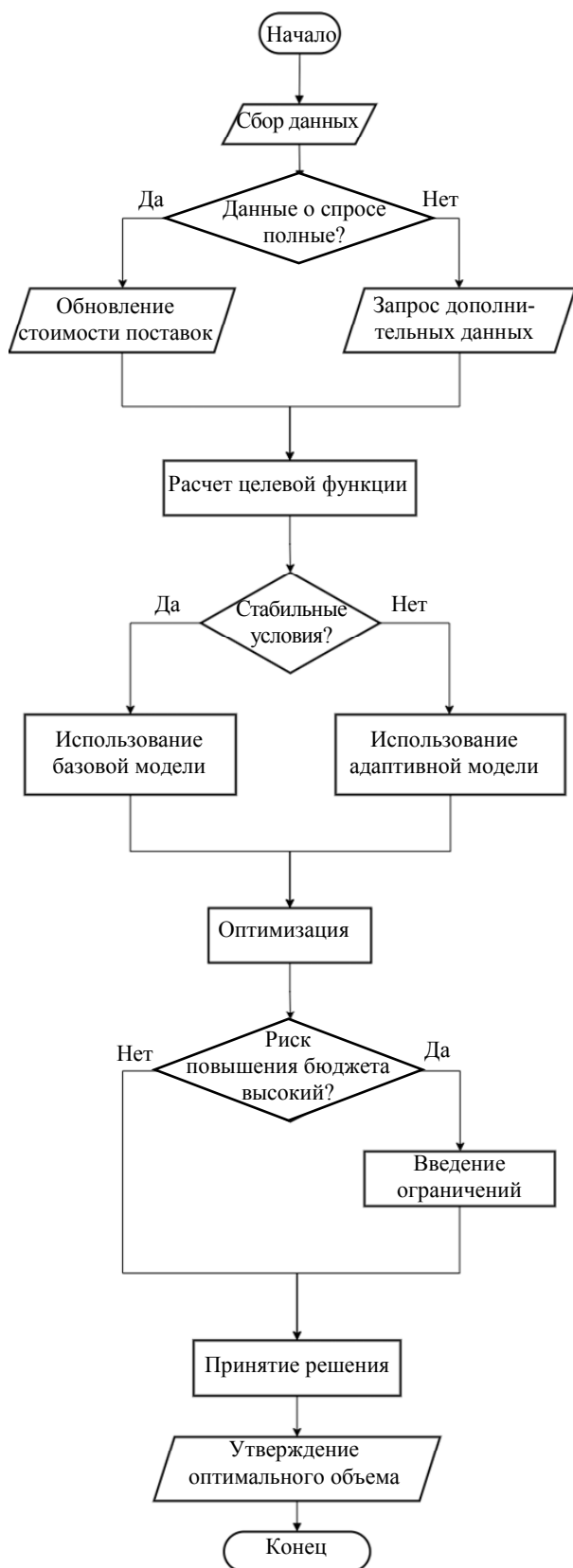
3. Решить оптимизационную задачу $\min_Q E[C(Q)]$, получив оптимальное Q^* через формулу фрагмента.

4. Провести численный расчет Q^* и оценить оставшиеся характеристики (ожидаемый излишек топлива и недопоставку).

Важно отметить, что предложенная модель упрощена для иллюстрации принципов системного анализа. Среди допущений:

– рассматривается одноэтапная закупка (один период) без учета динамики во времени и повторных заказов;

– цена топлива считается постоянной (нет динамики цен или скидок при больших объемах);



Блок-схема процесса принятия решений при бункеровке судов в условиях неопределенности
Flowchart of the decision-making process for ship bunkering under uncertainty

– игнорируются реальные ограничения емкости резервуара или частота доставки;

– не учитывается корреляция спроса и других факторов (например, сезонность или зависимость от погоды).

Эти ограничения означают, что в реальной практике требуются более сложные модели (много-периодные, с учетом транспортных ограничений, регламента работы порта и т. д.). Тем не менее, даже простая стохастическая модель дает ценное понимание влияния неопределенности на решения.

Процесс принятия решений в условиях неопределенности включает несколько этапов, начиная от сбора данных и заканчивая выбором оптимального решения [15]–[17]. Для наглядного представления структуры процесса была разработана блок-схема, иллюстрирующая основные этапы и возможные варианты развития событий, как показано на рисунке.

Результаты расчетов. Рассмотрим численный пример, отражающий реальную практику бункеровки. Предположим, что общий спрос топлива D в течение периода (дня) нормально распределен с математическим ожиданием $E[D] = 100$ т и стандартным отклонением $\sigma = 20$ т. Установим затраты: $c_h = 5$ у. е. за тонну неиспользованного топлива и $c_s = 20$ у. е. за тонну недопоставки. Тогда критический фрагмент равен $20/(5 + 20) = 0.8$, что для нормального распределения соответствует квантилю 0.8. Из таблиц нормального распределения следует $Q^* \approx 100 + 0.84 \times 20 \approx 117$ т.

Далее оценим ожидаемые остаток и дефицит топлива при различных стратегиях заказа. Результаты представлены в таблице.

Результаты моделирования
Experimental results

Показатель	$Q = 100$	$Q = 117$ (оптимум)	$Q = 130$ (завышено)
Ожидаемый излишек топлива, т	7.98	19.20	30.59
Ожидаемый дефицит топлива, т	7.98	2.20	0.59
Суммарные ожидаемые затраты, у. е.	199.47	139.99	164.65

Таблица показывает, что при заказе по детерминированному правилу $Q = 100$ (на уровне среднего спроса) ожидаемые затраты составляют ≈ 199.5 у. е. Вариант $Q = 117$, рассчитанный по

стохастической модели, снижает эти затраты до ≈ 140 у. е. (примерно на 30 % экономии). При значительном завышении $Q = 130$ затраты возрастают из-за перерасхода ресурсов, хотя дефицит практически отсутствует. Таким образом, в данном примере оптимальный объем заказа $Q^* = 117$ позволяет сбалансировать хранение и риск недопоставки.

Обсуждение результатов. Проведенный эксперимент подтверждает эффективность системного анализа и стохастического подхода при принятии решений о бункеровке. Учет неопределенности спроса позволил существенно снизить ожидаемые издержки по сравнению с наивным правилом «заказывать по среднему спросу». Оптимальная стратегия $Q^* = 117$ уменьшила ожидаемый дефицит и одновременно не привела к чрезмерному запасу. Это демонстрирует преимущество стохастической модели: она балансирует расход на хранение и стоимость дефицита, делая решения более устойчивыми к вариативности. Применение модели Монте-Карло (например, симуляции большого числа сценариев спроса) показало бы схожий выигрыш, а анализ альтернатив (сценариев) позволяет менеджерам оценивать риски разных стратегий.

В рамках сравнения методов можно отметить, что традиционный детерминированный подход игнорирует распределение спроса и упускает возможность оптимизировать с учетом риска. С другой стороны, робастные методы могли бы предлагать более консервативный объем Q (с учетом worst-case), но часто приводят к избыточным запасам. Предложенная же стохастическая модель учитывает конкретные вероятностные характеристики спроса, что делает ее применимой в практических задачах бункеровки. Однако следует иметь в виду, что модель не учитывает ограничения емкости, затрат на транспортировку и многопериодный характер операций. В реальных условиях может потребоваться многократное задание параметров (сезонность спроса, динамика цен и т. д.) и использование расширенных методов оптимизации.

Тем не менее, рассматриваемые результаты ясно показывают, что подходы системного анализа в сочетании со стохастическими моделями способны повысить качество решений в логистике бункеровки судов. При должном учете параметров и своевременной калибровке моделей подобные методологии дают основание для разработки адаптивных систем поддержки решений в условиях неопределенности.

Заключение. В статье рассмотрено применение системного анализа к оптимизации принятия решений при бункеровке судов на примере логистического предприятия нефтегазового сектора. Выполнен обзор современных методов системного анализа (имитационного моделирования, стохастических оптимизационных моделей, робастной оптимизации, сценарного анализа и др.), применимых в условиях стохастической неопределенности. Разработана стохастическая модель управления запасом топлива, описывающая баланс затрат на хранение и дефицит. На вычислительном примере показано, что учет неопределенности спроса позволяет найти оптимальный объем заказа топлива, существенно снижающий ожидаемые затраты по сравнению с простыми детерминированными правилами. Полученные результаты подчеркивают, что системный подход в сочетании с вероятностными методами обеспечивает более обоснованное планирование в логистических цепочках. Это дает возможность логистическому менеджеру учитывать риски и достигать большей эффективности при бункеровке судов. В дальнейшем целесообразно расширять модель, вводя многопериодные стратегии, динамическое ценообразование и более подробную модель транспортировки, чтобы повысить точность практических рекомендаций. Системный анализ и стохастические методы позволяют оптимизировать процессы принятия решений при бункеровке судов, учитывая неопределенность внешних факторов, что подтверждается снижением ожидаемых затрат в моделируемом примере.

Список литературы

1. Fuentes G., Wallace S. W., Adland R. The effects of waiting times on the bunkering decision for tramp ships // Maritime Transport Research. 2024. Vol. 6. P. 100106. doi: 10.1016/j.martra.2024.100106.

2. Gu Y., Wallace S. W., Wang X. Integrated maritime fuel management with stochastic fuel prices and new emission regulations // J. of the Operational Research Soc. 2019. Vol. 70, no. 5. P. 707–725. doi: 10.1080/01605682.2018.1489359.

3. Алдобаев В., Артемьева А., Масликов А. Исследование поведения классических критериев множественных сравнений на ненормальных неоднородных распределениях методом Монте-Карло // Вестн. ВГУ. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 3. С. 72–80. doi: 10.17308/sait.2021.3/3737.

4. Баденова Ж. Р., Ердыбаева Н. К., Акаев А. М. Разработка и оптимизация интеллектуальных систем управления тепловыми сетями на основе алгоритмов машинного обучения // Вестн. Торайгыров ун-та. Энергетическая серия. 2025. № 1. С. 15–26. doi: 10.48081/CEEI7110.

5. Балташевич В. Э. Системный анализ экспертных систем // Тенденции развития науки и образования. 2021. Т. 73, № 3. Р. 162–164. doi: 10.18411/lj-05-2021-124.

6. Шевченко Н. А. Методы оптимизации мультимодальных перевозок в международной логистике // Экономика и предпринимательство. 2024. Т. 172, № 11. С. 321–327. doi: 10.34925/EIP.2024.172.11.056.

7. Martirosyan A. V., Kukharova T. V., Fedorov M. S. Research of the hydrogeological objects' connection peculiarities // 4th Int. Conf. on Control in Techn. Syst. (CTS 2021). SPb.: IEEE, 2021. Р. 34–38. doi: 10.1109/CTS53513.2021.9562910.

8. Watanabe E., Shibasaki R. Extraction of bunkering services from automatic identification system data and their international comparisons // Sustainability. 2023. Vol. 15, no. 24. Art. no. 16711. doi: 10.3390/su152416711.

9. Modeling of distributed control system for network of mineral water wells / I. M. Pershin, E. G. Papush, T. V. Kukharova, V. A. Utkin // Water. 2023. Vol. 15, no. 12. Art. no. 2289. doi: 10.3390/w15122289.

10. Scenario modeling of sustainable development of energy supply in the Arctic / Y. Zhukovskiy, P. Tsvetkov, A. Buldysko, Y. Malkova, A. Stoianova, A. Koshenkova //

Resources. 2021. Vol. 10, no. 12. Art. no. 124. doi: 10.3390/resources10120124.

11. Liu B., Li Z.-C., Wang Y. A branch-and-price heuristic algorithm for the bunkering operation problem of a liquefied natural gas bunkering station in the inland waterways // Transportation Research Part B: Methodol. 2023. Vol. 167, no. 3. P. 145–170. doi: 10.1016/j.trb.2022.11.011.

12. El Noshokaty S. Shipping optimisation systems for liner: en-route bunkering, port late arrival, and tide restricted sailing // Int. J. of Shipping and Transport Logistics. 2023. Vol. 16, no. 1/2. P. 154. doi: 10.1504/IJSTL.2023.128573.

13. Razmanova S. V., Andrukhova O. V. Oilfield service companies as part of economy digitalization: assessment of the prospects for innovative development // J. of Mining Institute, 2020. Vol. 244. P. 482–492. doi: 10.31897/pmi.2020.4.11.

14. Yurak V. V., Dushin A. V., Mochalova L. A. Vs sustainable development: scenarios for the future // J. of Mining Institute. 2020. Vol. 242. P. 242–247. doi: 10.31897/pmi.2020.2.242.

15. Afanaseva O. V., Tulyakov T. F. Comparative analysis of image segmentation methods in power line monitoring systems // Int. J. of Engin., Transact. A: Basics. 2026. Vol. 39, no. 1. P. 1–11. doi: 10.5829/ije.2026.39.01a.01.

16. Fetisov V. G., Nikolaev A. K., Lykov Y. V. Aggregative simulation method for implementing mathematical models for gas transmission systems // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci. 2018. Vol. 327, no. 2. Art. 022033. doi: 10.1088/1757-899X/327/2/022033.

17. Fetisov V. Analysis of numerical modeling of steady-state modes of methane–hydrogen mixture transportation through a compressor station to reduce CO₂ emissions // Sci. Reports. 2024. Vol. 14. Art. no. 10605. doi: 10.1038/s41598-024-61361-3.

Информация об авторах

Первухин Дмитрий Анатольевич – д-р техн. наук, профессор кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, 21-я линия В. О., д. 2, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: pervukhin_da@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Нейрус Семен Константинович – аспирант кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, 21-я линия В. О., д. 2, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: samneyrus3@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7530-1332>

References

1. Fuentes G., Wallace S. W., Adland R. The effects of waiting times on the bunkering decision for tramp ships // *Maritime Transport Research*. 2024. Vol. 6. P. 100106. doi: 10.1016/j.martra.2024.100106.
2. Gu Y., Wallace S. W., Wang X. Integrated maritime fuel management with stochastic fuel prices and new emission regulations // *J. of the Operational Research Soc.* 2019. Vol. 70, no. 5. P. 707–725. doi: 10.1080/01605682.2018.1489359.
3. Aldobaev V., Artem'eva A., Maslikov A. Issledovanie povedeniya klassicheskikh kriteriev mnozhestvennykh sravneniy na nenormal'nykh neodnorodnykh raspredeleniyah metodom Monte-Karlo // *Vestn. VGU. Ser.: Sistemnyy analiz i informacionnye tehnologii*. 2021. № 3. S. 72–80. doi: 10.17308/sait.2021.3/3737. (In Russ.).
4. Badenova Zh. R., Erdybaeva N. K., Akaev A. M. Razrabotka i optimizatsiya intellektual'nykh sistem upravleniya teplovymi setyami na osnove algoritmov mashin-nogo obuchenija // *Vestn. Torajgyrov un-ta. Jenergeticheskaya seriya*. 2025. № 1. S. 15–26. doi: 10.48081/CEEI7110. (In Russ.).
5. Baltashevich V. Je. Sistemnyy analiz jekspertnykh sistem // *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2021. T. 73, № 3. P. 162–164. doi: 10.18411/lj-05-2021-124. (In Russ.).
6. Shevchenko N. A. Metody optimizatsii mul'timodal'nykh perevozok v mezhdunarodnoj logistike // *Jekonomika i predprinimatel'stvo*. 2024. T. 172, №11. S. 321–327. doi: 10.34925/EIP.2024.172.11.056. (In Russ.).
7. Martirosyan A. V., Kukharova T. V., Fedorov M. S. Research of the hydrogeological objects' connection peculiarities // *4th Int. Conf. on Control in Techn. Syst. (CTS 2021)*. SPb.: IEEE, 2021. P. 34–38. doi: 10.1109/CTS53513.2021.9562910.
8. Watanabe E., Shibasaki R. Extraction of bunkering services from automatic identification system data and their international comparisons // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 24. Art. no. 16711. doi: 10.3390/su152416711.
9. Modeling of distributed control system for network of mineral water wells / I. M. Pershin, E. G. Papush, T. V. Kukharova, V. A. Utkin // *Water*. 2023. Vol. 15, no. 12. Art. no. 2289. doi: 10.3390/w15122289.
10. Scenario modeling of sustainable development of energy supply in the Arctic / Y. Zhukovskiy, P. Tsvetkov, A. Buldysko, Y. Malkova, A. Stoianova, A. Koshenkova // *Resources*. 2021. Vol. 10, no. 12. Art. no. 124. doi: 10.3390/resources10120124.
11. Liu B., Li Z.-C., Wang Y. A branch-and-price heuristic algorithm for the bunkering operation problem of a liquefied natural gas bunkering station in the inland waterways // *Transportation Research Part B: Methodol.* 2023. Vol. 167, no. 3. P. 145–170. doi: 10.1016/j.trb.2022.11.011.
12. El Noshokaty S. Shipping optimisation systems for liner: enroute bunkering, port late arrival, and tide restricted sailing // *Int. J. of Shipping and Transport Logistics*. 2023. Vol. 16, no. 1/2. P. 154. doi: 10.1504/IJSTL.2023.128573.
13. Razmanova S. V., Andrukhova O. V. Oilfield service companies as part of economy digitalization: assessment of the prospects for innovative development // *J. of Mining Institute*, 2020. Vol. 244. P. 482–492. doi: 10.31897/pmi.2020.4.11.
14. Yurak V. V., Dushin A. V., Mochalova L. A. Vs sustainable development: scenarios for the future // *J. of Mining Institute*. 2020. Vol. 242. P. 242–247. doi: 10.31897/pmi.2020.2.242.
15. Afanaseva O. V., Tulyakov T. F. Comparative analysis of image segmentation methods in power line monitoring systems // *Int. J. of Engin., Transact. A: Basics*. 2026. Vol. 39, no. 1. P. 1–11. doi: 10.5829/ije.2026.39.01a.01.
16. Fetisov V. G., Nikolaev A. K., Lykov Y. V. Aggregative simulation method for implementing mathematical models for gas transmission systems // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci.* 2018. Vol. 327, no. 2. Art. 022033. doi: 10.1088/1757-899X/327/2/022033.
17. Fetisov V. Analysis of numerical modeling of steady-state modes of methane–hydrogen mixture transportation through a compressor station to reduce CO₂ emissions // *Sci. Reports*. 2024. Vol. 14. Art. no. 10605. doi: 10.1038/s41598-024-61361-3.

Information about the authors

Dmitriy A. Pervukhin – Dr Sci. (Eng.), professor of the Department of System Analysis and Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21st line V. O., 2, St. Petersburg, 199106, Russia.
E-mail: pervukhin_da@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: novozhilovim@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Semyon K. Neyrus – postgraduate student of the Department of System Analysis and Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21st line V. O., 2, St. Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: samneyrus3@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7530-1332>

Статья поступила в редакцию 02.07.2025; принята к публикации после рецензирования 16.09.2025; опубликована онлайн 28.11.2025.

Submitted 02.07.2025; accepted 16.09.2025; published online 28.11.2025.
