Модели нечеткой многоцелевой оптимизации для поддержки выдачи рекомендаций для персонализированных туристических траекторий

И. Ю. Коцюба, И. С. Блинов

Национальный исследовательский университет ИТМО

Аннотация: В работе рассматриваются инновационные методы улучшения туристического опыта через персонализированные рекомендации. Особое внимание уделено анализу проблематики предметной области, на основе которого сформированы результаты исследования. Предложен программно-математический комплекс с использованием многокритериальной оптимизации и нечеткой логики, повышающий точность рекомендаций для индивидуальных запросов.

В качестве индивидуального алгоритма предложен метод введения онтологических иерархических типов связей, которые фиксируют родовидовые и объектно-ориентированные отношения категорий туризма, характеризующие влияние на туристические объекты. Помимо этого, для учета гибких, слабо формализованных запросов пользователя, вводятся механизмы нечеткой логики за счет внедрения нечетких оценочных шкал. Диаграмма классов подробно описывает структуру онтологической иерархической модели, представленной в работе. Предусмотрена гибкая настройка критериев рекомендаций, обеспечивающая адаптацию системы к индивидуальным интересам пользователей.

На основе предоставленных результатов исследования произведена апробация эффективности алгоритма путем проведения тестовых расчётов.

Результаты проведенного исследования способствуют повышению качества туристического опыта, направленного на индивидуализацию образовательных пользовательских запросов.

Ключевые слова: туризм, оптимизация туризма, рекомендательная система, нечеткая логика, нечеткое моделирование, многокритериальная оптимизация, мобильная разработка, мобильное приложение, языковая модель, семантический анализ.

Введение

На сегодняшний день туризм является одной из самых быстрорастущих отраслей мировой экономики. Пандемия COVID-19 стала настоящим вызовом для мирового туристического сектора. Согласно данным UNWTO, весной 2020 г. объём международных прибытий сократился практически на 100%, что говорит о фактически полной остановке туристической активности по некоторым международным направлениям [1]. Пандемия стала катализатором фундаментальных изменений в исследовательских парадигмах туризма [2].

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

Однако, на сегодняшний день мировой туризм практически вернулся к допандемийному состоянию [3].

В Российской Федерации ведется активная работа по развитию внутреннего и внешнего туризма. В 2019 г. правительством была принята новая Стратегия развития туризма до 2035 г. В августе 2022 г. сформированы и приняты мероприятия для реализации данной стратегии.

Глобальный рынок мобильных приложений стремительно развивается. По данным Sensor Tower, к 2025 году число скачиваний мобильных приложений достигнет отметки в 8,8 млрд, а общий доход отрасли приблизится к триллиону долларов.

Мобильные приложения позволяют получить доступ ко всей необходимой информации в рамках путешествий, способствуя улучшению туристического опыта. Помимо этого, они способствуют повышению спроса на туристические услуги. Современные информационные системы в туризме делают процессы планирования и бронирования путешествий более удобными, быстрыми и эффективными. Автоматизация позволяет туристическим компаниям оперативно реагировать на спрос, улучшать обслуживание и эффективно управлять информацией о поездках.

Таким образом, актуальность работы обусловлена технологической значимостью данной темы в рамках взаимосвязанного роста и влияния друг на друга рынка мобильных приложений и туристических услуг, что требует разработки новых проблемно-ориентированных решений, направленных на учет специфики объектов предметной области, требующих особых подходов к формализованному представлению в программных системах.

2. Материалы и методы

В рамках работы за основу был взят подход, представленный авторами в работе [4]. Однако современные исследования и опросы показывают, что взгляд туристов не ограничивается лишь субъективной оценкой при выборе

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

того или иного места для отдыха. Согласно анализу литературы [5-7], факторы и критерии, оказывающие влияние на принятие решения сильно разнятся и, порой, конфликтуют между собой. Это подчеркивает важность комплексного и широкого рассмотрения процесса поддержки принятия решений в сфере туризма.

В текущем исследовании задача рекомендаций рассматривается на основании многокритериальной оптимизации: набор туристических мест трактуется как множество потенциальных решений, а “идеальным” решением считается объект, удовлетворяющий всем критериям наилучшим образом.

В статье [8] авторы подчеркивают, что повышенное внимание к критерию расстояния в виде учета пешеходной доступности при проектировании городских пространств существенно повышает качество жизни населения, проживающего в городе.

Авторами статьи [9] подчеркивается, что рейтинг туристического места является одним из ключевых критериев, формирующих поток новых туристов. В исследовании [10] подтверждается, что при повышении рейтинга места – возрастает приток новых клиентов, что в свою очередь способствует росту выручки.

В работе [11] представлена рекомендательная система, создающая туристические маршруты для пользователей. Важнейшим критерием при их формировании является критерий расстояния. Он является универсальным атрибутом любого маршрута и обязателен к рассмотрению и учету.

На основании изученных источников в предметной области, ключевыми критериями оптимизации выбраны:

- критерий рейтинга;
- критерий расстояния;
- критерий релевантности.

Для каждого из критериев задаются целевые функции:

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

- $f_1(x) \rightarrow \max$(наиболее релевантные туристические места)
- $f_2(x) \rightarrow \max$(места, с наиболее высоким рейтингом)
- $f_3(x) \rightarrow \min$(близлежащие места)

В качестве целевого параметра оптимизации используются нечеткие шкалы. Для критерия расстояния были сформированы следующие нечеткие шкалы:

“близко”:

$$\mu_{\text{близко}}(d) = \begin{cases} 1, & d \leq a \\ \dfrac{b-d}{b-a}, & a < d \leq b \\ 0, & d > b \end{cases},$$

где d – расстояние от пользователя до туристического места, выраженное в метрах, a и b – границы расстояний, воспринимаемого как "близко", выраженные в метрах;

“средне”:

$$\mu_{\text{средне}}(d) = \begin{cases} 1, & d \leq a \\ \dfrac{d-c}{d_1-c}, & c < d \leq d_1 \\ \dfrac{d_1-d}{d_2-d_1}, & d_1 < d \leq d_2 \\ 0, & d > d_2 \end{cases},$$

где d – расстояние от пользователя до туристического места, выраженное в метрах, c, d_1 и d_2 - границы расстояний, воспринимаемые как «средне», выраженное в метрах;

“далеко”:

$$\mu_{\text{далеко}}(d) = \begin{cases} 0, & d \leq e \\ \dfrac{d-e}{f-e}, & e < d \leq f \\ 1, & d > f \end{cases},$$

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

где d – расстояние от пользователя до туристического места, выраженное в метрах, e, и f – границы расстояний, воспринимаемого как "далеко", выраженное в метрах.

Целевая функция рейтинга максимизирует близость к туристическому объекту, т.е. минимизирует расстояние от пользователя (точка А) до туристического места (точка Б).

Согласно исследованиям, которые проводятся в рамках предметной области [8, 12] заданы границы расстояний:

$$\mathrm{a} = 0 \text{ метров},$$
$$\mathrm{b} = 400 \text{ метров},$$
$$\mathrm{c} = 300 \text{ метров},$$
$$\mathrm{d}_1 = 800 \text{ метров},$$
$$\mathrm{d}_2 = 1500 \text{ метров},$$
$$\mathrm{e} = 1300 \text{ метров},$$
$$\mathrm{f} = 2000 \text{ метров}.$$

Для расчёта фактического расстояния используется формула (1), позволяющая вычислять расстояние между двумя точками на сфере на основе их широты и долготы:

$$d = 2r\ acrsin(\sqrt{sin^2\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\ sin^2(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2})}). \quad (1)$$

Для рейтингового критерия были сформированы следующие функции принадлежности:

“плохой рейтинг”:

$$\mu_{\text{плохой}}(r) = \begin{cases} 1, & r \leq 2 \\ 3 - r, & 2 < d < 3 \\ 0, & d \geq 3 \end{cases},$$

“удовлетворительный рейтинг”:

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

$$\mu_{\text{удовлетворительный}}(r) = \begin{cases} 0, & r \leq 2 \mid \mid r \geq 4 \\ r-2, & 2 < r \leq 3 \\ 4-r, & 3 < r < 4 \end{cases},$$

“хороший рейтинг”:

$$\mu_{\text{хороший}}(r) = \begin{cases} 0, & r \leq 3 \mid \mid r \geq 5 \\ r-3, & 3 < r \leq 4 \\ 5-r, & 4 < r < 5 \end{cases},$$

“отличный рейтинг”:

$$\mu_{\text{отличный}}(r) = \begin{cases} 0, & r \leq 4 \\ r-4, & 4 < r \leq 5 \\ 1, & r \geq 5 \end{cases},$$

где r – рейтинг туристического места по шкале от 1 до 5.

В зависимости от рейтинга функция принадлежности рассчитывает туристическое место как «место с отличным рейтингом», «место с хорошим рейтингом», «место с удовлетворительным рейтингом», «место с плохим рейтингом»

Целевая функция расчета рейтинга максимизирует полученные результаты от удовлетворительного до отличного.

Для критерия релевантности используется онтологическая иерархическая модель, сформированная по принципу снизу-вверх. Исходными данными является набор туристических объектов из датасета OpenStreetMap с тегами, описывающими их свойства, и присвоенными рейтингами из открытых источников.

На первом этапе определены подклассы туристических объектов, агрегирующие объекты по отраслевой принадлежности и схожести свойств. Затем формируются классы, объединяющие группы подклассов на основе их типологического сходства, что позволяет создавать более обобщенные уровни абстракции.

Верхним уровнем системы являются обобщающие категории видов туризма. Современные исследования и подходы к классификации стремятся к

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

сужению данной типологии [5,6]. На основании этого рассматриваемая типология сужена до следующей:

1. историко-культурный,
2. лечебно-оздоровительный,
3. экстремально-спортивный,
4. культурно-рекреационный,
5. пляжный,
6. деловой.

Таким образом, полная структура модели имеет вид:

- уровень 4: Множество туристических мест,
- уровень 3: Подклассы — отраслевое объединение объектов,
- уровень 2: Классы — типологическое объединение подклассов,
- уровень 1: Виды туризма.

В соответствии с классификацией, основанной на рекомендациях разработчиков и документации OpenStreetMap, а также семантическом анализе, для каждого вида туризма, класса и подкласса создан словарь тегов, характеризующих соответствующую категорию. Диаграмма классов сформированной модели представлена на рисунке 1. Она отображает формализованные сущности предметной области в рамках объектно-ориентированного подхода.

Для каждого туристического объекта вычисляется степень принадлежности к подклассу, затем — степень принадлежности подкласса к классу, и далее — класса к виду туризма. В исследовании рассмотрены два метода расчета степени принадлежности объекта к подклассу:

1. частотный анализ. В рамках вычисляется частотное сходство между тегами из предварительно сформированных словарей и тегами, присвоенными туристическому объекту,

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

2. сематический анализ на основе LLM. Для данного варианта словарь подклассов и пары ключ-значение (теги) из разметки туристических данных преобразуются в векторы. Затем схожесть между ними определяется с помощью косинусного сходства.

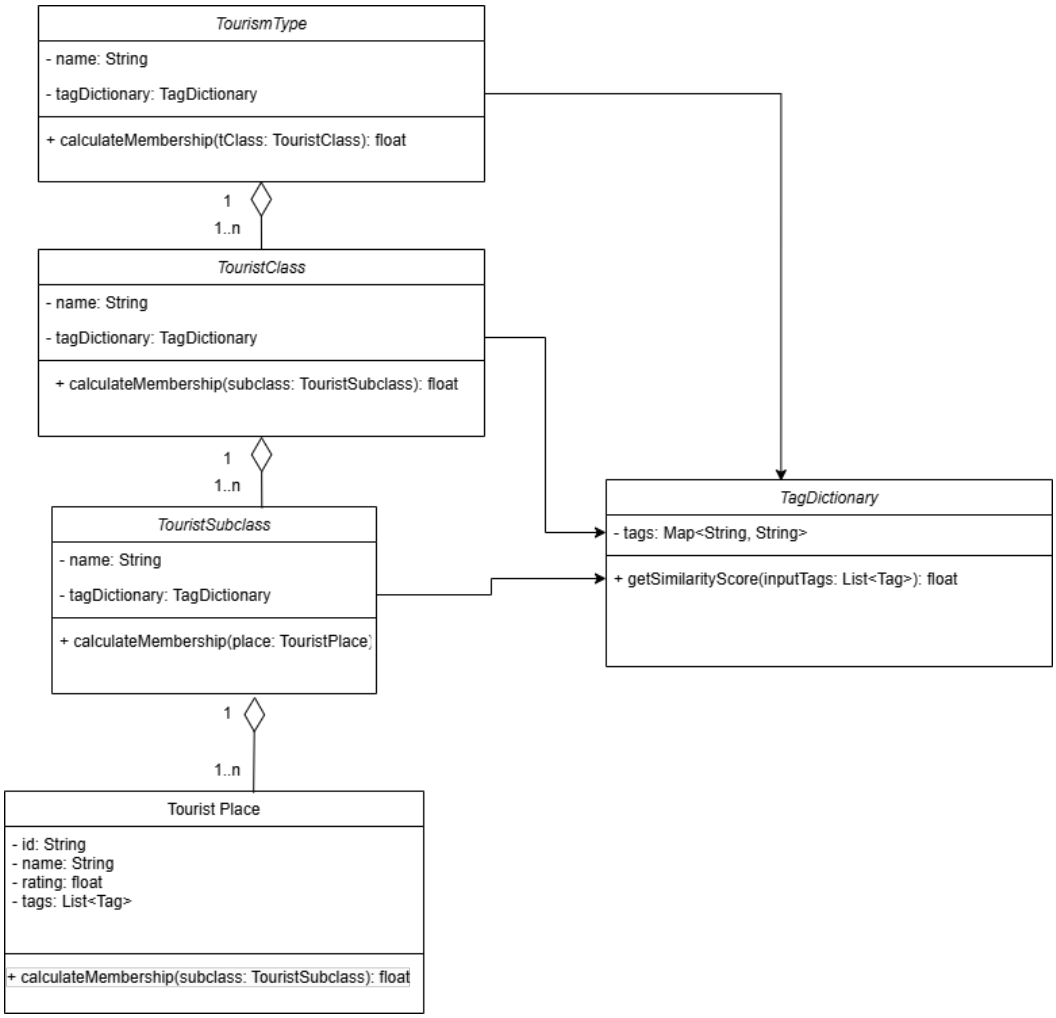

Рис. 1. – Диаграмма классов иерархической модели

Семантический подход продемонстрировал значительное повышение точности (более 70%), что обусловило его выбор для дальнейшего использования. Аналогично, семантическим анализом определяется степень принадлежности подкласса к классу и класса к виду туризма. Для оценки межуровневого влияния нечеткие степени принадлежности перемножаются, позволяя оценить транзитивное влияние видов туризма на туристические объекты.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

Целевая функция критерия релевантности направлена на соответствие туристического объекта индивидуальному запросу пользователя. При регистрации в мобильном приложении пользователю предлагается оценить свою заинтересованность в различных видах туризма по шкале от 0 до 10, где 10 — максимальная заинтересованность, а 0 — отсутствие интереса. Эти данные нормируются делением на 10 и преобразуются в многомерный вектор, характеризующий индивидуальный запрос пользователя для предоставления персонализированных рекомендаций.

В качестве функции, оценивающей соответствие индивидуальным пользовательским запросам, используется косинусное сходство вектора объекта и вектора пользователя:

$$s(x,y) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1}(x_i)^2} \times \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1}(y_i)^2}},$$

где x – векторные характеристики пользователя, y – векторные характеристики туристического объекта.

Выбор главной целевой функции метода многокритериальной оптимизации зависит от поведения пользователя. Помимо оценки степени заинтересованности в видах туризма пользователю предлагается оценить индивидуальную степень важности критериев. В случае если критерии оценены как равновесные, т.е. пользователь в равной степени заинтересован в максимальном сходстве места с его персональными запросами, высоком рейтинге и минимальном расстоянии, тогда интеллектуальная система использует метод принципа приближения по всем локальным критериям к идеальному решению. Идеальным в данном случае является решение, которое имеет степень принадлежности ко всем заданным нечетким целевым параметрам равную 1. В таком случае, задача многокритериальной оптимизации будет сформулирована согласно формуле (2):

$$(\max\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\}, x \in X,), \quad (2)$$

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

при заданных условиях:

– $\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j = b_i,\ i = 1, r;$

– $\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j \leq b_i,\ i = r+1, m;$

– $x_j \geq 0, j = 1, n.$

Ранжирование итоговых рекомендаций производится согласно формуле (3):

$$R(x) = \left|\left|F(x) - F_o\right|\right|^2. \quad (3)$$

В случае если же пользователь оценил для себя важность критериев с разными весами, системой применяется метод линейной свертки. К весам критериев применяется ограничение w1+w2+w3 = 1. Целевая функция будет иметь вид формулы (4):

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^{m} a_i F_i(x), \quad (4)$$

Таким образом, предлагаемые математические модели позволяют решать задачу выбора индивидуальной траектории образовательного туризма с использованием аппарата нечеткой многоцелевой оптимизации, а также используются в качестве математического обеспечения функциональных возможностей интеллектуального мобильного приложения, что вместе с представленной диаграммой классов завершают этап логического проектирования программной системы.

3. Результаты

Результаты исследования апробированы программной реализацией и тестовыми расчетами. Клиентская часть мобильного приложения разработана на Dart с использованием Flutter и чистой архитектуры. Серверная часть реализована на Python с применением FastAPI в микросервисной архитектуре. Клиент-серверное взаимодействие осуществляется через REST API, обеспечивая совместную работу языковой модели, модулей для расчетов, ранжирования, рекомендаций и хранения пользовательских данных в

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

PostgreSQL. Датасет туристических мест получен с помощью запроса на Overpass QL в Overpass Turbo, включая географическую область и атрибуты туристических объектов. Для семантического анализа использован Python с библиотеками gensim, sentence_transformers, pandas и numpy. Векторное представление тегов для каждого уровня онтологии создано с применением предобученной на английском языке модели FastText, учитывающей морфологию слов. Степени принадлежности элементов онтологии оценены на основе косинусного сходства векторных представлений, а итоговая оценка влияния вида туризма на объект вычислена путем их перемножения.

Полученные данные итогового расчёта преобразуются в многомерный вектор. Путем косинусного сходства оценивается степень релевантности туристического места к индивидуальному запросу пользователя.

Для тестового расчёта степень заинтересованности в видах туризма представлена в виде вектора [0.9,0.6,0.2,0.2,0.5,0.2], т.е.:

1. историко-культурный: 0.9;
2. лечебно-оздоровительный: 0.2;
3. экстремально-спортивный: 0.2;
4. культурно-рекреационный: 0.8;
5. пляжный: 0.5;
6. деловой: 0.2.

Распределение весов важности критериев:

1. Критерий релевантности: 0.5;
2. Критерий рейтинга: 0.1;
3. Критерий расстояния: 0.4.

Географическое местоположение:

1. Широта: 59.956169
2. Долгота: 30.318716

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

Пример итогового расчёта рекомендаций для тестового пользователя представлен в таблице 1:

Таблица № 1

Результаты тестового расчета и ранжирования рекомендаций

Туристическое место	Оценка для критерия релевантности	Оценка для критерия рейтинга	Оценка для критерия расстояния	Итоговая оценка
Петропавловская крепость	0.8486	0.7000	0.8800	0.8514
Петро Палас	0.8508	0.6000	0.7500	0.8203
Михайловский замок	0.8486	0.6500	0.700	0.8094
Особняк Румянцева	0.8440	0.4000	0.5000	0.7176
Музей прикладного искусства СПБГХПА им. А. Л. Штиглица	0.8486	0.0000	0.5000	0.6220

В связи с тем, что пользователь задал веса для критериев, поэтому для расчёта применяется метод свёртки критериев в суперкритерий. Низкие значения рассчитанных критериев указывают на несоответствие данных заданным целевым функциям. Тестовые расчёты подтверждают точность рекомендаций, соответствующих запросу пользователя. Анализ модели запросов показывает, что пользователь в первую очередь ценит учёт своих индивидуальных предпочтений и удобство пешеходной доступности, а

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

мнение других пользователей, выраженное в виде рейтинга, имеет для него меньший вес.

4. Обсуждение результатов

Предложенный программно-математический комплекс является расширением наиболее популярного механизма коллаборативной фильтрации при поддержке принятия решений. Постановка задачи выдачи туристических рекомендаций в виде решения задачи многокритериальной оптимизации существенно повышает степень персонализированности в данном процессе. Математическая модель учитывает как уже существующий пользовательский опыт за счет внедрения критерия рейтинга, так и ориентируется на индивидуальный пользовательский запрос на основе критерия релевантности.

Литература

1. Азимбаева В. Д. и др. Виды туризма и география турпотоков в зеркале пандемии COVID-19. Псков: Псковский государственный университет, 2022. 214 с.

2. Tang, R., & Huang, J. (2023). The influence of digital transformation on the resilience of tourism companies under the shock of the COVID-19 pandemic. Asia Pacific Journal of Tourism Research, 28(8), 827–840. DOI: doi.org/10.1080/10941665.2023.2276469

3. Богомазова И. В., Аноприева Е. В., Климова Т. Б. Цифровая экономика в индустрии туризма и гостеприимства: тенденции и перспективы // Сервис в России и за рубежом. 2019. Т. 13, № 3. С. 34–47.

4. Коцюба И. Ю., Блинов И. С. Разработка туристического мобильного приложения с рекомендательной системой на основе нечеткой логики // Программная инженерия. 2024. Т. 15, № 8. С. 425–433. DOI: 10.17587/prin.15.425-433.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

5. Хамина Н. В. Молодежный туризм: анализ результатов исследования // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Т. 7, № 1. С. 193–200. DOI: 10.37279/2309-7663-2021-7-1-193-200.

6. Булганина С.В., Лебедева Т.Е., Александрова В.Ю., Мартысевич В.В., Смирнова Ю.А. Маркетинговое иследование выявления предпочтений туристов при выборе зарубежных туров. Инновационная экономика: Перспективы развития и совершенствования. 2021. № 5 (55). DOI: 10.47581/2021/PS92/IE.5.55.32

7. Горбунов Д. В. Теоретический анализ соответствия предпочтений туристов и выбора дестинаций // Национальная ассоциация ученых. 2020. № 61-3 (61). С. 18–20.

8. Юдин В. Ю., Бурмистрова В. А. Обеспечение пешеходной доступности как важный фактор для создания комфортной среды и улучшения качества жизни людей в городе // Архитектура, градостроительство и дизайн. 2023. № 37. С. 10–16.

9. Коцюба И. Ю., Назаренко А. Е. Разработка рекомендательной системы для планирования туристических маршрутов в оптимизационной постановке // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 2. С. 21–22.

10. Муродова Н. У. Соцсети и туризм: роль отзывов и рейтингов // Miasto Przyszłości. 2024. № 46. С. 82–87.

11. Luca, M. (2016). Reviews, reputation, and revenue: The case of Yelp.com. Harvard Business School NOM Unit Working Paper, (12-016). DOI: dx.doi.org/10.2139/ssrn.1928601

12. Войтенков С. С., Банкет М. В. Определение пешеходной доступности остановочных пунктов городского пассажирского транспорта // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2022. Т. 19, № 2. С. 198–215. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2-198-215.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

References

1. Azimbaeva V.D., et al. Pskov: Pskovskiy gosudarstvennyj universitet, 2022, 214 p.

2. Tang R., Huang J. Asia Pacific Journal of Tourism Research, 2023, vol. 28, no. 8, pp. 827–840. DOI: doi.org/10.1080/10941665.2023.2276469

3. Bogomazova I.V., Anoprieva E.V., Klimova T.B. Servis v Rossii i za rubezhom, 2019, vol. 13, no. 3, pp. 34–47. DOI:10.24411/1995-042X-2019-10303.

4. Kotsyuba I. Yu., Blinov I.S. Programmnaya inzheneriya, 2024, vol. 15, no. 8, pp. 425–433.

5. Khamina N.V. Geopolitika i ekogeodinamika regionov, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 193–200.

6. Bulgakova S. V., Lebedeva T. E., Aleksandrova V. Yu., Martysewich V. V., Smirnova Yu. A. Innovatsionnaya ekonomika: Perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya. 2021. № 5 (55). DOI: 10.47581/2021/PS92/IE.5.55.32.

7. Gorbunov D.V. Natsionalnaya assotsiatsiya uchenykh, 2021, no. 61(3), pp. 18–20. DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.3.61.333.

8. Yudin V.U., Burmistrova V.A. Arhitektura, gradostroitel'stvo i dizajn, 2023, no. 37, pp. 10–16.

9. Murodova N.U. Miasto Przyszłości, 2024, no. 46, pp. 82–87.

10. Luca M. Harvard Business School NOM Unit Working Paper, 2016, no. 12-016. DOI: 10.2139/ssrn.1928601.

11. Kotsyuba I.Y., Nazarenko A.E. Modeling, Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 21–22. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.021

12. Voitenkov S.S., Banket M.V. Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobilno-dorozhnoy akademii, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 198–215.

Дата поступления: 7.03.2025

Дата публикации: 25.04.2025

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025