



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-472-480

EDN: DPMIXG

Научная статья / Research article

Применение генетического алгоритма для задач проектирования магистральных газопроводов

В.К. Лобанов[✉], М.С. Кондрашина[✉], Ш.М. Гаджиев[✉]

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ 1132236536@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 2 июля 2025 г.

Доработана: 22 сентября 2025 г.

Принята к публикации: 30 сентября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Исследован вопрос оценки нового подхода для процесса проектирования маршрута трубопровода с помощью синтеза алгоритмов искусственного интеллекта и данных дистанционного зондирования Земли. В целях эффективного строительства газопроводов необходим тщательный комплексный анализ множества геологических, экологических, экономических и инфраструктурных факторов. Проектирование маршрута основано на принципе построения траектории наименьшей стоимости. Для этого проведен многофакторный анализ территории по ключевым параметрам, влияющим на финансовые затраты при строительстве. Выделены следующие группы признаков: водные преграды, геоморфологические факторы, существующие транспортные магистрали, особо охраняемые природные зоны и близость к крупным населенным пунктам. Изучен и адаптирован подход многофакторного анализа пригодности, на основе которого формировалась карта стоимости, используемая при поиске пути наименьшей стоимости. Основным результатом работы является полученное программное решение, обеспечивающее оптимизацию весовых коэффициентов при многофакторном анализе территорий для прокладки магистральных газопроводов на основе генетического алгоритма. К преимуществам предложенного подхода относятся автоматизация процесса и учет региональных особенностей территорий. В качестве практического применения разработаны траектории, обеспечивающие решение задачи газификации Красноярского края Российской Федерации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, эволюционный алгоритм, поиск пути наименьшей стоимости, оптимизация, трассы трубопровода, алгоритм A*

Вклад авторов

Лобанов В.К. — общая концепция исследования, научное руководство; Кондрашина М.С. — написание текста, визуализация; Гаджиев Ш.М. — написание текста. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Лобанов В.К., Кондрашина М.С., Гаджиев Ш.М. Применение генетического алгоритма для задач проектирования магистральных газопроводов // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 472–480. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-472-480>

© Лобанов В.К., Кондрашина М.С., Гаджиев Ш.М., 2025

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Application of a Genetic Algorithm for Pipeline Route Design

Vasily K. Lobanov^{ID}, Mariia S. Kondrashina^{ID✉}, Shamil M. Gadzhiev^{ID}

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ 1132236536@rudn.ru

Article history

Received: July 2, 2025

Revised: September 22, 2025

Accepted: September 30, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. This study investigates the evaluation of a new approach for the pipeline route design process using the synthesis of artificial intelligence algorithms and Earth remote sensing data. For the effective construction of gas pipelines, a thorough comprehensive analysis of various geological, environmental, economic, and infrastructural factors is necessary. Route design is based on the principle of building a trajectory with the lowest cost. For this purpose, a multifactorial analysis of the territory was conducted according to key parameters that affect the financial costs during construction. The following groups of features were identified: water barriers, geomorphological factors, existing transport routes, specially protected natural areas, and proximity to large settlements. The approach of multifactorial suitability analysis was studied and adapted, on the basis of which the cost map used in the search for the path of lowest cost was formed. The main result of this study is the obtained software solution, which provides optimization of weighting coefficients in the multifactorial analysis of territories for laying main gas pipelines based on a genetic algorithm. The advantages of the proposed approach are the automation of the process and consideration of the regional characteristics of the territories. As a practical application, trajectories have been developed to solve the problem of gasification in the Krasnoyarsk Territory of the Russian Federation.

Keywords: earth remote sensing, evolutionary algorithm, least-cost path search, optimization, pipeline routing, algorithm A*

Authors' contribution

Lobanov V.K. — research concept, supervision; Kondrashina M.S. — writing, visualization; Gadzhiev Sh.M. — writing. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Lobanov VK, Kondrashina MS, Gadzhiev ShM. Application of a genetic algorithm for pipeline route design. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):472–480. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-472-480>

Введение

Проектирование трубопроводов является сложной инженерной задачей, требующей специалистов из разных сфер науки и сотен часов для оценки разных факторов: геологических, экологических, экономических и инфраструктурных [1].

При строительстве протяженных магистралей даже незначительные изменения траектории трубопровода приводят к существенной экономии ресурсов.

Цель исследования — разработка метода проектирования маршрута трубопровода. Для достижения цели были решены следующие задачи: изучена возможность применения мно-

гофакторного анализа пригодности территории; применен генетический алгоритм для оптимизации весовых коэффициентов факторов; предложены варианты траекторий газопровода.

Новизна подхода заключается в применении генетического алгоритма для подбора весовых коэффициентов факторов на основе существующих трубопроводов, что позволяет решать задачу даже при отсутствии экспертной оценки влияния факторов на стоимость работ по проектированию маршрута.

В качестве координат начала и конца проектируемого газового трубопровода рассмотрены Ковыктинское газоконденсатное месторождение, город Новосибирск и участок в окрестностях Красноярска. Выбор связан с тем,

что уровень газификации Красноярского края в среднем составляет около 19 %, что значительно ниже среднего показателя по стране — 73 %¹.

В нефтегазовой отрасли планирование маршрута основано на минимизации затрат на строительство и эксплуатацию трубопроводов: проектирование траектории трубопровода требует построения пути с наименьшей стоимостью прокладки [2; 3].

1. Методы

1.1. Многофакторный анализ пригодности территории

Стоимость прокладки в интересующей области определяется методом анализа пригодности территории. Создается карта пригодности, где каждый пиксель карты имеет значение, обозначающее, насколько конкретный участок подходит для использования [4].

В нашем случае итоговая карта пригодности представляет собой карту стоимости про-

хождения маршрута [5; 6], в которой чем ближе значение пикселя к нулю, тем выгоднее область. Первым этапом проведения анализа пригодности является определение факторов, влияющих на стоимость [7].

Были выделены следующие группы признаков, усложняющих постройку трубопровода: водные преграды, особенности рельефа, транспортные магистрали и особо охраняемые зоны. Дополнительно был рассмотрен фактор близости к населенными пунктами для баланса между доступностью и безопасностью трубопровода.

Основой для формирования факторов пригодности послужили данные из двух источников: OpenStreetMap (OSM)², данные из которого получались при помощи плагина QuickOSM в QGIS, и облачного сервиса Google Earth Engine (GEE). Информация по выгружаемым из OSM факторам представлена в табл. 1. Векторные данные преобразовывались в растровые изображения, где значение 1 обозначало наличие фактора, а 0 — его отсутствие.

Таблица 1 / Table 1

Данные, обрабатываемые в QGIS / Data processed in QGIS

Фактор / Factor	Тег выгрузки / Export tag	Тип данных / Data type
Болота 1-й тип / Wetlands 1st type	Wetland = Bog	Полигон / Polygon
Болота 2-й тип / Wetlands 2nd type	Wetland = Fen	Полигон / Polygon
Болота 3-й тип / Wetlands 3rd type	Natural = Wetland (- Fen, Bog)	Полигон / Polygon
Реки / Rivers	Waterway = River	Линия / Line
Автодороги / Highways	Highway = Motorway Trunk Primary Secondary	Линия / Line
Железные дороги / Railways	Landuse = Railway	Линия / Line

Источник: выполнено М.С. Кондрашиной / Source: by M.S. Kondrashina

В GEE обрабатывались наборы данных: цифровая модель рельефа SRTM⁴ для расчета уклонов, снимкиочной освещенности VIIRS⁵ за период 01.01.2024 — 31.01.2025 для опре-

ления удаленности от жилых зон и полигонов особо охраняемых природных территорий (ООПТ) из базы WDPA⁶. Уклоны учитывались по следующему правилу: значение менее 20° —

¹ Пашкова Л., Смирнов Г. «Газпром» начал проектирование газопровода длиной 700 км в Красноярск // РБК. URL: <https://www.rbc.ru/business/31/08/2023/64f0a5259a79473ff6f6c945> (дата обращения: 21.04.2025).

² OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=14/-1.32006/36.89358> (accessed: 21.04.2025).

⁴ NASA SRTM Digital Elevation 30m. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS_SRTM_GL1_003 (accessed: 21.04.2025).

⁵ VIIRS Stray Light Corrected Nighttime Day/Night Band Composites Version 1. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NOAA_VIIRS_DNB_MONTHLY_V1_VCMSCFG (accessed: 21.04.2025).

⁶ WDPA: World Database on Protected Areas (polygons). URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/WCMC_WDPA_current_polygons (accessed: 21.04.2025).

0,5, от 20° до 40° — 0,8, а выше 40° — 0,9. Удаленность от населенных пунктов рассчитывалась через евклидово расстояние и инвертировалась для соответствия логике анализа, где 1 — это зоны вблизи городов, а 0 — удаленные территории. Также добавлялись буферные зоны вокруг некоторых факторов. Например, для автодорог устанавливался буфер 25 м, для железных дорог — 50 м, а для болот и рек — 30 м. Это позволило учесть не только непосредственное наличие объектов, но и влияние зоны вокруг.

На основе обработанных данных была сформирована карта стоимости с применением методов растровой алгебры. Рассчитывается взвешенная сумма факторов (без ООПТ), затем для исключения особо охраняемых природных территорий выполняется умножение результата на бинарную маску ООПТ, обнуляющее значение стоимости в этих зонах. На заключительном этапе нулевые значения заменяются на бесконечно высокую стоимость (∞), что исключает их из рассмотрения алгоритмом поиска пути наименьшей стоимости А* [8]. Каждый пиксель финальной карты отражает увеличение стоимости построения пути.

1.2. Генетический алгоритм для оптимизации весовых коэффициентов факторов

Традиционно для оценки факторов используют экспертный подход. При анализе литературы были найдены сведения о повышающих коэффициентах для расчета стоимости строительства 1 км трубопровода, прокладываемого в сложных условиях или на пересечениях с естественными и искусственными препятствиями⁷.

Данные весовые коэффициенты были нормализованы и выбраны в качестве опорных. В ходе исследования изучался вопрос: насколько полученные коэффициенты факторов актуальны и применимы к нашей терри-

тории? Каким образом не представленные в исследованиях факторы следует оценивать? Возможен ли анализ при отсутствии экспертных оценок? Мы применили эволюционный алгоритм, в котором в качестве эталона использовался существующий трубопровод, и на его основе получали весовые коэффициенты для каждого интересующего фактора.

Генетический алгоритм (ГА) — это адаптивный эвристический метод поиска, основанный на принципах естественного отбора из биологии. Впервые был предложен в 1975 г. Джоном Холландом в книге «Adaptation in Natural and Artificial Systems» [9].

Применение ГА для подбора весовых коэффициентов, влияющих на стоимость прокладки газопровода, приведено на схеме 1 (рис. 1).

В алгоритме особи популяции представляются в виде набора весов каждого фактора. Ключевым отличием предложенного решения от общепринятого является блок селекции, поскольку оценка весовых коэффициентов производится на основе построенного маршрута. Следовательно, для каждой особи необходимо получить карту стоимости и спроектировать маршрут на основе алгоритма А*, после чего рассчитать степень схожести между опорным и построенным маршрутами.

В каждом поколении лучшие комбинации весов «выживают» и дают потомство, то есть ГА позволяет получить значение веса, оптимального для исследуемых территориальных условий.

В работе составляющие блоки алгоритма, описываются следующим образом [10]:

1) *селекция* — выбор родителей для скрещивания. Применялся турнирный подход, из 5 особей выбиралась одна с максимальным значением оценки;

2) *оценка приспособленности (fitness)* — совпадение маршрутов (построенного и целевого) и их буферных зон с использованием коэффициента Жаккара, вычисляемого как отно-

⁷ СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85. Дата введения 2013-07-01.

шение размера их пересечения к размеру их объединения;

3) скрещивание — комбинация генов родителей для создания потомков. В предложен-

ном решении использовался арифметический метод, где $Child = a \times Parent1 + (1 - a) \times Parent2$;

4) мутация — случайное изменение генов (веса одного фактора).

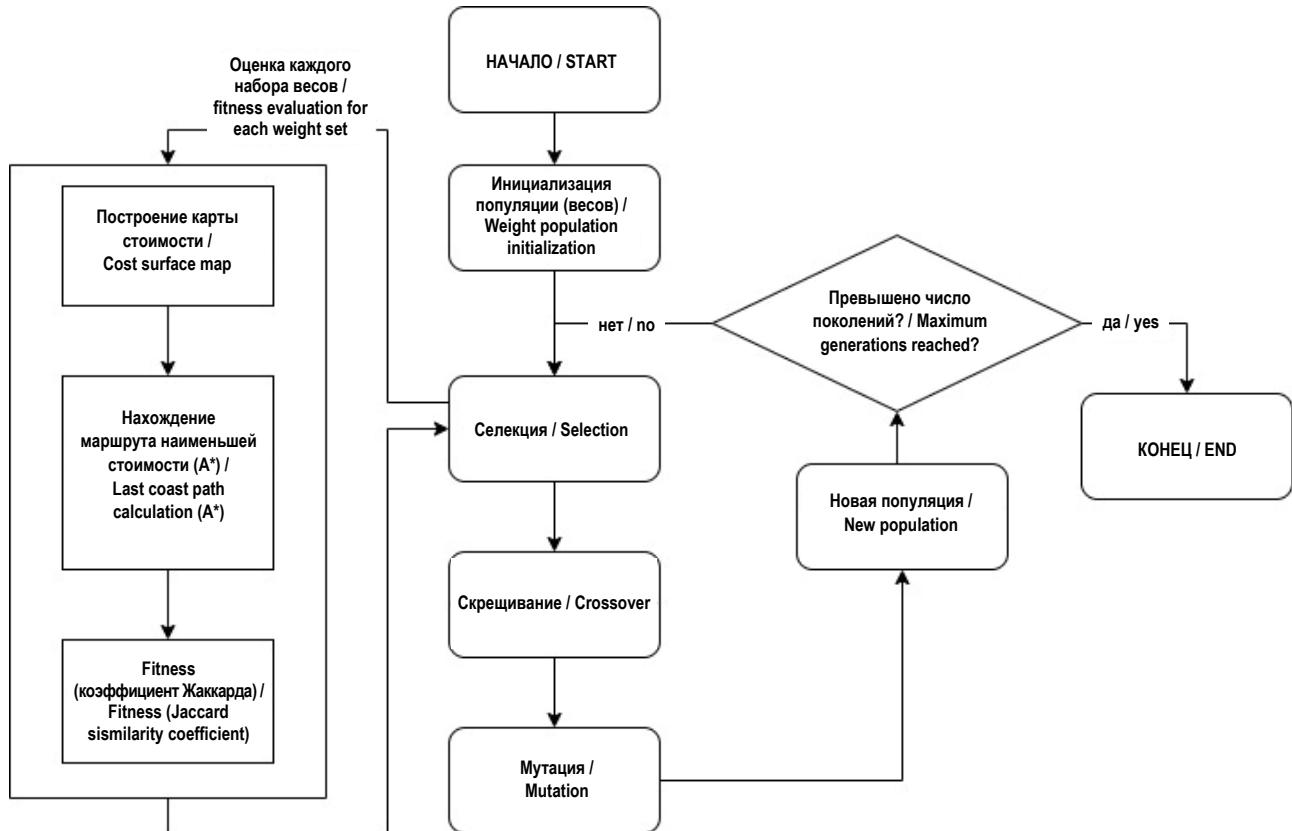


Рис. 1. Алгоритм работы ГА для оптимизации весов факторов
Источник: выполнено М.С. Кондрашиной

Figure 1. Genetic Algorithm for Optimizing Factor Weights
Source: by M.S. Kondrashina

2. Результаты и обсуждение

В качестве опорного трубопровода был выбран участок маршрута Омск — Иркутск, который пролегает через большую часть области интереса и представлен на рис. 2. Для обучения были выгружены все факторы с масштабом растрового изображения 500 м/пкс. Основные параметры используемые во время поиска весов при помощи ГА, представлены в табл. 2.

По итогам обучения были получены новые весовые коэффициенты представленные в

табл. 3 и спроектированы маршруты газопроводов на рис. 3, а и б. Сравнительный анализ маршрутов показывает, что использование генетического алгоритма для настройки весовых коэффициентов позволяет минимизировать расхождения между построенной и обучающей траекторией. Данный результат подтверждает эффективность предложенного подхода для нахождения весов различных признаков с учетом территориальной особенности.

Кроме того, в рамках проведенного исследования были разработаны траектории газопро-

водов для достижения поставленной цели — газификации Красноярска. Первый маршрут проложен от Новосибирска до участка вблизи Красноярска, а второй — от месторождения

Жигалово до этого же места. Оба трубопровода представлены на рис. 4 и 5 в двух вариантах — построение на основе начальных и подобранных коэффициентов.

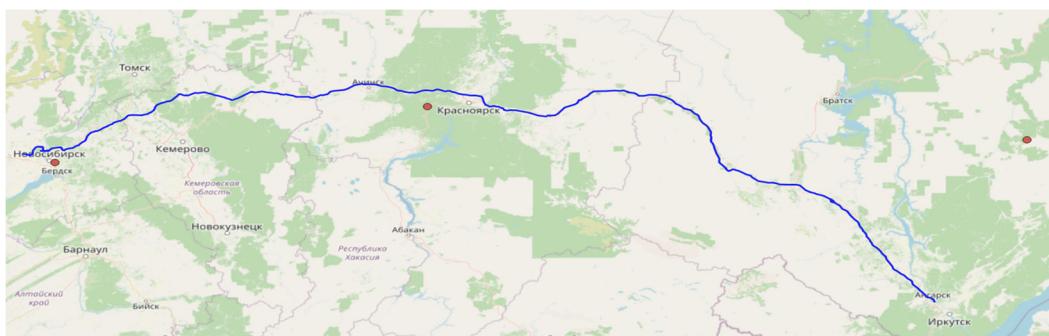


Рис. 2. Участок нефтепровода Омск — Иркутск (точками отмечены рекомендованные места начала и конца газопровода, проектируемого в работе)

Источник: выполнено М.С. Кондрашиной

Figure 2. Section of the Omsk — Irkutsk Oil Pipeline (points indicate the recommended start and end locations of the gas pipeline designed in this work)

Source: made by M.S. Kondashina

Таблица 2 / Table 2

Параметры обучения ГА / Genetic Algorithm (GA) Training Parameters

Параметр / Parameter	Значение / Value
Число поколений / Number of Generations	10
Размер популяции / Population Size	30
Значение мутации / Mutation Value	0,5
Дополнительный параметр перекрытие путей / Additional Parameter Route Overlap	500

Источник: выполнено М.С. Кондрашиной / Source: by M.S. Kondashina

Таблица 3 / Table 3

Весовые коэффициенты факторов / Factor Weight Coefficients

Фактор / Factor	Начальный вес / Initial Weight	Подобранный вес / Optimized Weight
Болота 1-й тип / Wetlands 1st type	0,5	0,5
Болота 2-й тип / Wetlands 2nd type	0,9	0,4
Болота 3-й тип / Wetlands 3rd type	0,7	0,9
Уклон / Slope	1	0,9
Реки / Rivers	0,7	0,4
Автодороги / Highways	0,6	1
Железные дороги / Railways	0,6	0,3
Удаленность от жилых зон / Distance from Residential Areas	1	0,5

Источник: выполнено М.С. Кондрашиной / Source: by M.S. Kondashina

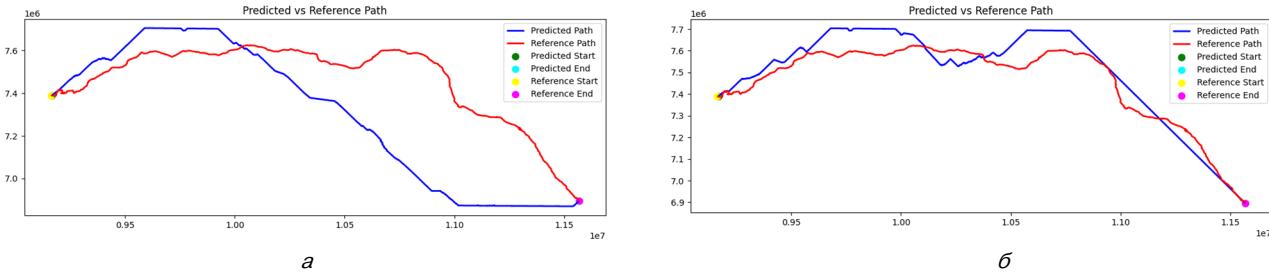


Рис. 3. Построенные маршруты на основе: *а* — начальных весов; *б* — оптимизированных

Источник: выполнено М.С. Кондрашиной

Figure 3. Constructed routes based on: *a* — initial weights; *b* — optimized

Source: by M.S. Kondrashina

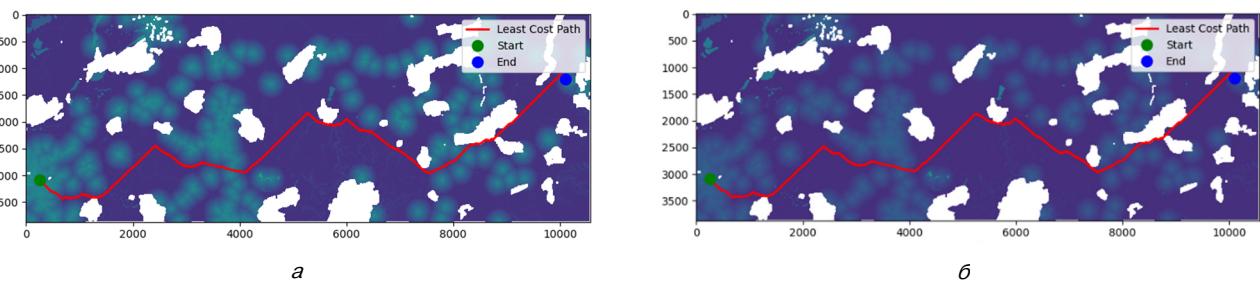


Рис. 4. Маршрут Новосибирск — Красноярск: *а* — начальные веса; *б* — оптимизированные веса

Источник: выполнено М.С. Кондрашиной

Figure 4. Novosibirsk — Krasnoyarsk route: *a* — initial weights; *b* — optimized weights

Source: by M.S. Kondrashina

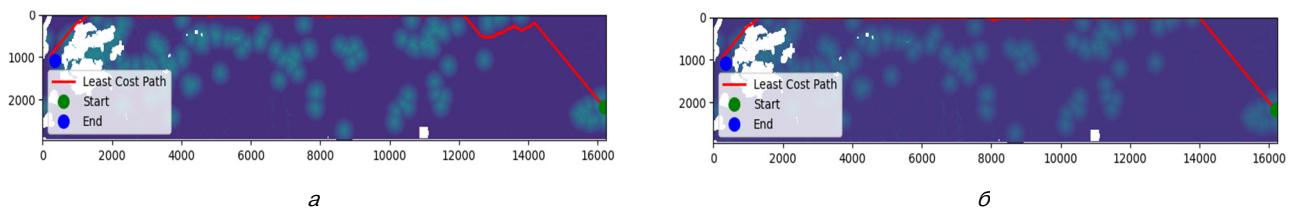


Рис. 5. Маршрут Жигалово — Красноярск: *а* — начальные веса; *б* — оптимизированные веса

Источник: выполнено М.С. Кондрашиной

Figure 5. Zhigalovo—Krasnoyarsk route: *a* — initial weights; *b* — optimized weights

Source: by M.S. Kondrashina

Заключение

Исследование было посвящено гибридному подходу, соединяющему в себе многофакторный анализ территории и оптимизацию весовых коэффициентов для построения маршрутов с использованием геопространственных данных. Реализация такого подхода позволяет на основе генетического алгоритма и отобранных признаков создать комплексную систему

проектирования и принятия решения, сочетающую преимущества искусственного интеллекта и геопространственного анализа.

В ходе работы проанализированы полученные из открытых источников факторы, влияющие на стоимость построения газопроводов. Разработанный метод оптимизации весовых коэффициентов с использованием генетического алгоритма доказал свою эффективность для решения задачи проектирования магистральных

трубопроводов. Преимуществами предложенного подхода являются автоматизация процесса и учет региональных особенностей территорий. В качестве практического применения нами разработаны траектории для решения задачи газификации Красноярского края.

Ограничения вычислительных мощностей при проведении экспериментов позволяли использовать факторы в масштабе 500 м/пкс. Даже при этом получены улучшения для оптимизации весов. При наличии больших вычислительных мощностей рекомендуется использовать максимально доступный для спутниковых снимков Sentinel масштаб — 10 м/пкс, а также увеличить число поколений и размер популяции с целью охватить большую вариативность значений весов. Это, безусловно, позволит получить более качественные коэффициенты при применении генетического алгоритма.

References / Список литературы

1. Novoselova IY. Socio-ecological-economic selection of the oil pipeline route. *Regional Environmental Issues*. 2024;(5):85–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-5-85-89> EDN: VZGQNH
Новоселова И.Ю. Социо-эколого-экономический выбор маршрута нефтепровода // Проблемы региональной экологии. 2024. № 5. С. 85–90. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-5-85-89> EDN: VZGQNH
2. Voronin KS, Grigorieva PV, Cherenstov DA. Methods for estimating the pipeline construction cost when choosing its route. *Oil and Gas Studies*. 2018;(3):87–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-3-87-91> EDN: XTHSLR
Воронин К.С., Григорьева П.В., Черенцов Д.А. Методы оценки стоимости сооружения участка трубопровода при выборе трассы // Известия вузов. Нефть и газ. 2018. № 3. С. 87–91. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-3-87-91> EDN: XTHSLR
3. Arya AK, Jain R, Yadav S, Bisht S, Gautam S. Recent trends in gas pipeline optimization. *Materials Today: Proceedings*. 2022;57(4):1455–1461. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.232>
4. Bozdağ A, Yavuz F, Günay AS. AHP and GIS based land suitability analysis for Cihanbeyli (Turkey) county. *Environmental Earth Sciences*. 2016;75(9):1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5558-9> EDN: OCVRFR
5. Gyabeng BA. Selection of optimum petroleum pipeline routes using a multi-criteria decision analysis and GIS least-cost path approach. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*. 2022;10(6):572–579. <http://doi.org/10.29322/IJSRP.10.06.2020.p10270>
6. Durmaz Al, Ünal EÖ, Aydin CC. Automatic pipeline route design with multi-criteria evaluation based on least-cost path analysis and line-based cartographic simplification: A case study of the Mus project in Turkey. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019;8(4):173. <https://doi.org/10.3390/ijgi8040173>
7. Nirala PK, Kumar M, Singh P, Singh P, Das B. Route alignment selection and planning for Ganga Express Way from Meerut to Prayagraj region based on multi-criteria decision analysis techniques with geographic information systems and remote sensing techniques. *Chinese Journal of Urban and Environmental Studies*. 2025;13(2):2550012. <https://doi.org/10.1142/S2345748125500125>
8. Hart PE, Nilsson NJ, Raphael BA. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968;4(2):100–107. <http://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>
9. Holland JH. *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press Publ.; 1992. ISBN 0262581116, 9780262581110
10. Naaman DW, Ahmed BT, Ibrahim IM. Optimization by Nature: A Review of Genetic Algorithm Techniques. *The Indonesian Journal of Computer Science (IJCS)*. 2025;14(1):268–284. <https://doi.org/10.33022/ijcs.v14i1.4596>

Сведения об авторах

Лобанов Василий Константинович, старший преподаватель кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 7266-5340, ORCID: 0000-0001-8163-9663; e-mail: lobanov-vk@rudn.ru

Кондрашина Мария Сергеевна, магистр кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0008-8526-9143; e-mail: 1132236536@rudn.ru

Гаджиев Шамиль Магомедэминович, магистр кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0006-1570-4133; e-mail: 1132236511@rudn.ru

About the authors

Vasily K. Lobanov, Senior Lecturer of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7266-5340, ORCID: 0000-0001-8163-9663; e-mail: lobanov-vk@rudn.ru

Mariia S. Kondrashina, Graduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-8526-9143; e-mail: 1132236536@rudn.ru

Shamil M. Gadzhiev, Graduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-1570-4133; e-mail: 1132236511@rudn.ru