

УДК 625.111; 519.876.5

Формирование множества вариантов допустимых проектных решений при трассировании железной дороги в условиях пересеченного рельефа местности

В. А. Анисимов, Р. Д. Пренинг, Н. Ю. Ильин, Г. А. Стрехнин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Анисимов В. А., Пренинг Р. Д., Ильин Н. Ю., Стрехнин Г. А. Формирование множества вариантов допустимых проектных решений при трассировании железной дороги в условиях пересеченного рельефа местности // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 3. — С. 149–158. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-149-158

Аннотация

Цель: Создание информационной основы для модернизации существующих и разработки новых методов оптимального трассирования железной дороги на участках со сложным пересеченным рельефом местности. **Методы:** Применены математическое моделирование, методы оптимизации и теории принятия решений. **Результаты:** Поставлен вычислительный эксперимент, определены этапы его проведения, и разработан алгоритм формирования множества допустимых вариантов трассы на участке местности с продольным водоразделом, двумя поперечными водоразделами и логом. **Практическая значимость:** Сформированные по результатам проведения эксперимента множества допустимых вариантов трассы на участках со сложным пересеченным рельефом местности послужат информационной основой совершенствования математического обеспечения реализации новой технологии автоматизированного проектирования железных дорог, которая должна кардинально снизить затраты времени на принятие эффективных проектных решений.

Ключевые слова: Трасса железной дороги, план трассы, проектная линия, пересеченный рельеф местности, математическая модель, методы оптимизации.

В процессе проектирования железных дорог основополагающим является этап трассирования. Найденное пространственное положение трассы определяет технические и экономические показатели железной дороги, степень ее влияния на окружающую среду, а также объем капиталоемких вложений и эксплуатационных расходов. Нередко на пути трассы встречаются сложные участки пересеченной местности с выраженным неровным рельефом и большими перепадами высот. В таких условиях малейшие сдвиги трассы могут в значительной степени повлиять на изменение объема строительно-монтажных работ. В существующих системах автоматизированного проектирования (САПР) корректность принятых решений по плану трассы и проектной линии железной дороги полностью зависит от квалификации и опыта инженера-проектировщика. На участках со сложными условиями пересеченного рельефа местности он может испытывать серьезные затруднения в принятии проектного решения, для разрешения которых требуются значительные затраты времени на расчеты, анализ и сравнение множества возможных вариантов трассы.

Активная исследовательская работа по данной проблеме велась в 60–80-х годах прошлого столетия [1–5], и была создана всесоюзная лаборатория автоматизированного проектирования транспортных систем. С внедрением ЭВМ в проектную деятельность и появлением первых САПР были предложены численные методы оптимального трассирования, которые были разработаны для компьютеров того времени.

В нынешнем веке работы в области оптимального трассирования линейных сооружений были продолжены В. И. Стручковым [6–12]. Им исследовано использование в проектировании трасс методов динамического и нелинейного программирования. Для поиска оптимального положения трассы на основе заданного начального варианта ее плана были применены дискретные математические модели в виде ломанных с заданным числом звеньев. Полученные после оптимизации дискретные модели проектной линии и плана трассы затем аппроксимируют в сплайны с учетом ограничений по условиям обеспечения норм проектирования.

Также активные исследования в области автоматизации проектирования железных дорог ведутся А. И. Богдановым. В своих работах [13–15] он представил математические модели плана и продольного профиля трассы железной дороги в виде кусочно-ломанных линий, которые задаются координатами своих вершин. Трассирование новой железной дороги им рассматривается как задача линейной аппроксимации. В качестве аппроксимируемых линий используются магистральный ход и профиль земли, план и продольный профиль трассы являются аппроксимирующими. Для модели плана эти линии представлены угловыми диаграммами.

В настоящее время математические модели и методы, предложенные в [1–15], не получили широкого применения в современных САПР. По нашему мнению, это связано с трудностями технологической реализации данных методов в системах автоматизированного проектирования железных дорог. Поэтому авторами поставлена задача разработки технологичных методов автоматического поиска оптимального положения трассы в пространстве на основе комплексной математической модели плана и продольного профиля трассы железной дороги.

Для ее решения проводится вычислительный эксперимент [16] с использованием САПР «Топоматик Robur» и компьютерной программы «Формирование множества вариантов трассы железной дороги на участках с пересеченным рельефом местности» [17].

На первом этапе проведения эксперимента используются триангуляционная модель рельефа на участке местности с продольным водоразделом 1, поперечными водоразделами 2 и 3, логом 4 (рис. 1) и алгоритм формирования множества вариантов допустимых вариантов трассы:

1. На пересечениях горизонтальных проекций структурных линий поперечных водоразделов 2 и 3, лога 4 и прямой, соединяющей фиксированные точки трассы, назначаются вершины углов поворота ВУ2, ВУ3 и ВУ4 (рис. 2).

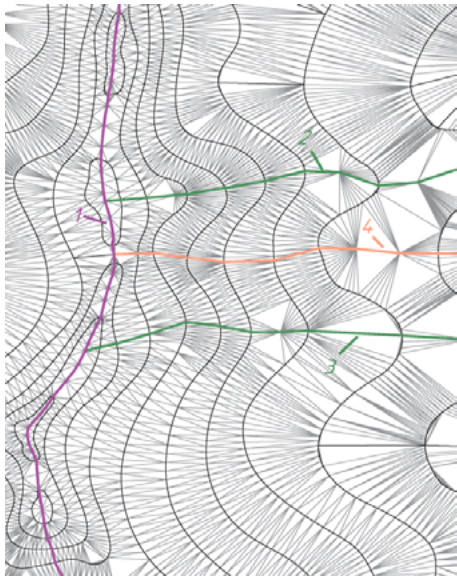


Рис. 1. Цифровая TIN-модель рельефа

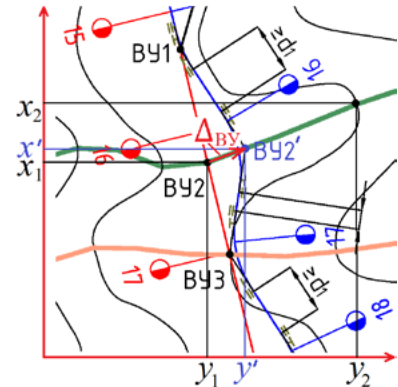
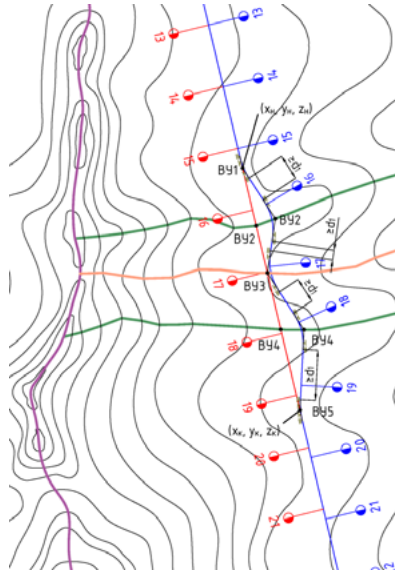


Рис. 2. Формирование допустимых вариантов трассы железной дороги на участке с пересеченным рельефом местности

2. Определяют шаг изменения положения вершин углов поворота $\Delta_{\text{БУ}}$ вдоль структурных линий поперечных водоразделов 2 и 3 в направлении понижения высот (рис. 2).

3. Определяют измененные координаты ВУ2 при ее сдвиге на $\Delta_{\text{БУ}}$ вдоль водораздела 2 (рис. 2):

$$\Delta x = x_2 - x_1,$$

$$\Delta y = y_2 - y_1,$$

$$\alpha_{1-2} = \left\{ \begin{array}{l} \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x}, \text{ при } \Delta x > 0, \Delta y > 0 \\ 180^\circ + \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x}, \text{ при } \Delta x < 0, \Delta y > 0 \text{ или } \Delta y < 0 \\ 360^\circ + \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x}, \text{ при } \Delta x > 0, \Delta y < 0 \end{array} \right\}$$

$$x' = \Delta_{\text{БУ}} \cdot \cos \alpha_{1-2},$$

$$y' = \Delta_{\text{БУ}} \cdot \sin \alpha_{1-2}.$$

4. Для нового положения ВУ2 подбирают значения радиусов круговых кривых и длин переходных кривых, при которых обеспечиваются основные и допускаемые в трудных условиях нормы проектирования плана трассы железной дороги¹.

¹ СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм.

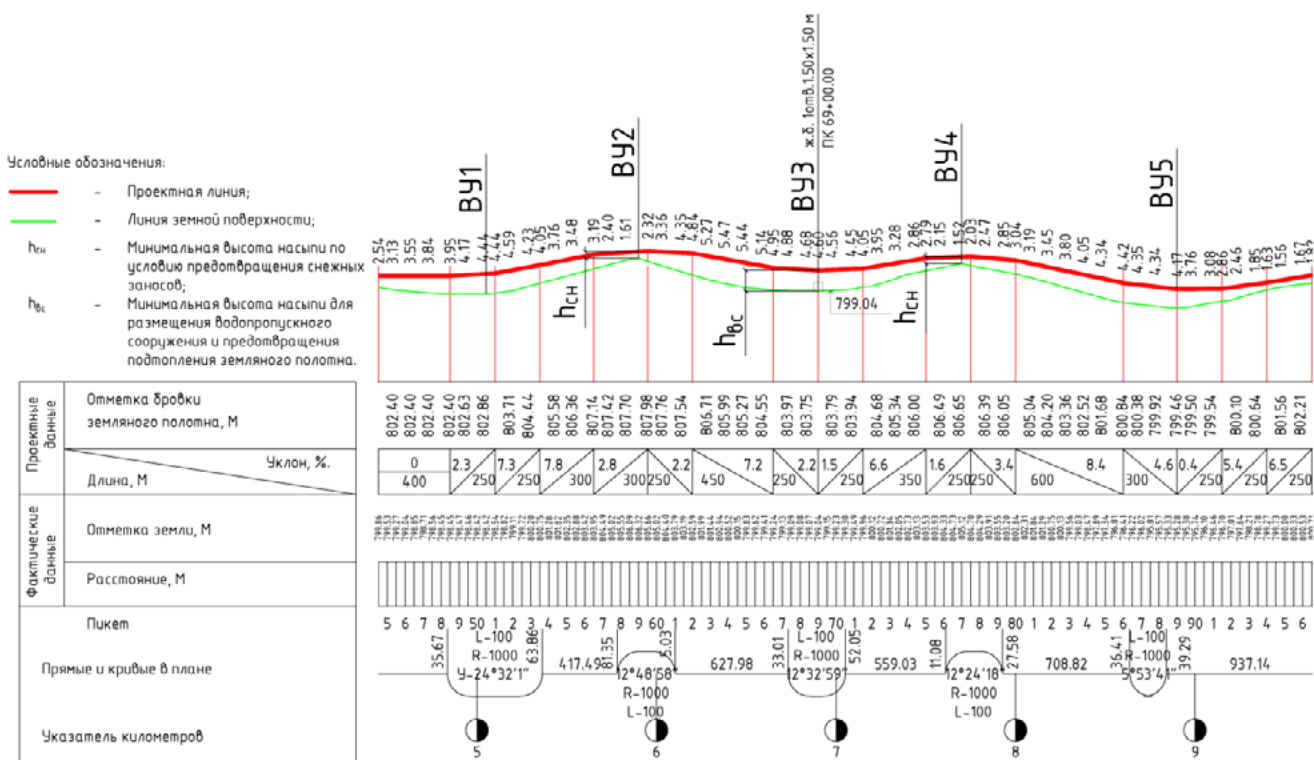


Рис. 3. Проектирование продольного профиля варианта трассы

5. Определяют площадь водосбора, расчетный расход через створ водопропускного сооружения в логе 4, тип и размеры водопропускного сооружения, а также минимальную высоту насыпи в месте его расположения.

6. По новому варианту плана трассы проектируют ее продольный профиль (рис. 3) и вычисляют технико-экономические показатели трассы (таблица).

7. ВУ2 сдвигают на $\Delta_{\text{ВУ}}$ вдоль водораздела 2 до тех пор, пока обеспечиваются нормы проектирования плана трассы, и при каждой сдвижке выполняют действия в пунктах алгоритма 3–6.

8. Действия алгоритма из пп. 3–7 выполняют для вершины угла поворота ВУ4, смещая ее вдоль структурной линии водораздела 3.

9. Среди вариантов, соответствующих нормам проектирования плана трассы железной дороги, отбираются новые комбинации положений ВУ2 и ВУ4 с последующим выполнением этапов алгоритма согласно пунктам 4–6.

10. Во всех сформированных вариантах изменяют положение ВУ3 с шагом $\Delta_{\text{ВУ}}$ по направлению снижения высот вдоль структурной линии лога 4 и назначают новые допустимые варианты трассы, выполняя действия алгоритма из пп. 4–6.

В таблице приведен фрагмент сформированного множества.

Варианты допустимых проектных решений и показатели их оценки

Сдвигка, м	R, м	Длина линии, м	Прира- щение линии, м	Объем земляных работ, м ³		Перепад высот «туда», м	Перепад высот «обратно», м	d, %	Строительная стоимость, тыс. руб
				Насыпь	Выемка				
Кр. расст.	—	11 192	—	221,72	15,19	7,25	10,00	18,32	86 889,28
ВУ2.100	1000	11 230	37,74	377,04	0,00	8,97	11,44	14,69	95 066,37
ВУ2.120	1000	11 234	41,21	371,22	0,00	8,92	11,25	14,69	94 759,72
...									
ВУ2.275	1000	11 238	45,21	339,87	0,00	8,95	11,43	13,79	93 012,37
ВУ4.100	1000	11 198	5,75	386,88	0,00	9,03	12,06	19,20	95 430,78
ВУ4.120	1000	11 244	51,49	333,90	0,00	8,94	12,07	13,34	92 715,63
...									
ВУ4.297	1000	11 256	63,34	359,30	0,00	8,25	12,27	10,22	94 230,55
ВУ2+4.100	1000	11 207	14,72	386,15	0,00	8,67	11,61	18,75	95 390,77
ВУ2+4.120	1000	11 213	21,12	343,51	0,00	8,56	11,32	10,65	93 060,14
...									
ВУ2+4.310	1000	11 290	97,90	378,64	0,00	7,75	11,38	18,30	95 551,84
ВУ2.60	2000	11 193	1,35	224,87	14,06	6,25	9,25	18,30	87 012,42
ВУ2.80	2000	11 195	2,91	218,00	25,56	5,75	8,95	17,42	87 284,53
...									
ВУ2.157	2000	11 204	11,53	216,60	20,66	6,57	9,67	16,06	86 984,63
ВУ4.60	2000	11 196	3,38	216,92	20,87	5,75	8,58	16,95	86 961,03
ВУ4.80	2000	11 198	5,75	215,98	21,98	5,75	8,58	15,60	86 986,48
...									
ВУ4.192	2000	11 217	24,56	222,50	22,53	5,50	8,47	17,41	87 510,07
ВУ2+4.20	2000	11 200	7,85	223,08	17,89	4,98	7,96	17,33	87 170,35
ВУ2+4.40	2000	11 201	8,13	226,22	15,33	5,66	8,64	16,50	87 205,68
...									
ВУ2+4.140	2000	11 214	21,23	381,09	0,00	5,89	8,83	14,25	95 186,98

Заключение

Проводимый вычислительный эксперимент формирует базу данных для совершенствования математических моделей и методов решения задачи оптимального трассирования железных дорог в условиях сложного пересеченного рельефа местности.

На основе экспериментальных данных разрабатывается математическое обеспечение технологичных методов автоматического поиска оптимальной трассы. Это позволит реализовать новую проектную технологию, существенно

снижающую трудоемкость процессов ввода, обработки данных, расчета, анализа и сравнения допустимых вариантов. Внедрение технологии обеспечит проектировщиков эффективным инструментом принятия решений в минимальные сроки».

Список источников

1. Турбин И. В. Метод оптимизации положения трассы железной дороги в плане, основанный на принципах направленного поиска / И. В. Турбин // Труды МИИТа. Совершенствование методов проектирования железных дорог. — 1976. — Вып. 538. — С. 16–23.
2. Турбин И. В. Основы системы машинного трассирования на косогорных участках напряженного хода / И. В. Турбин // Труды МИИТа. Вопросы повышения качества и эффективности проектных решений железных дорог. — 1978. — Вып. 614. — С. 21–25.
3. Анисимов В. А. Численные методы выбора положения трассы на участке напряженного хода / В. А. Анисимов // Труды МИИТа. — 1982. — Вып. 715. — С. 98–107.
4. Струченков В. И. Основы теории и методы оптимизации трасс железных дорог и других линейных объектов: дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Струченков. — М.: ВНИИ транспортного строительства, 1985. — 405 с.
5. Шейдвассер Д. М. Оптимизация трасс железных дорог на напряженных ходах / Д. М. Шейдвассер // Автоматизация проектирования объектов транспортного строительства. — М.: Транспорт, 1986. — С. 16–29.
6. Струченков В. И. Методы оптимизации трасс в САПР линейных сооружений / В. И. Струченков. — М.: СОЛОН-Пресс, 2020. — 272 с.
7. Струченков В. И. Компьютерные технологии в проектировании трасс линейных сооружений / В. И. Струченков // Российский технологический журнал. — 2017. — Т. 5. — № 1(15). — С. 29–41.
8. Карпов Д. А. Двухэтапная сплайн-аппроксимация в компьютерном проектировании трасс линейных сооружений / Д. А. Карпов, В. И. Струченков // Российский технологический журнал. — 2021. — Т. 9. — № 5. — С. 45–56. — DOI: 10.32362/2500-316X-2021-9-5-45-56.
9. Карпов Д. А. Сплайн-аппроксимация многозначных функций в проектировании трасс линейных сооружений / Д. А. Карпов, В. И. Струченков // Russ. Technol. J. — 2022. — Т. 10. — № 4. — С. 65–74. — DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-4-65-74.
10. Карпов Д. А. Оптимизация параметров сплайна при аппроксимации многозначных функций / Д. А. Карпов, В. И. Струченков // Russ. Technol. J. — 2023. — Т. 11. — № 2. — С. 72–83. — DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-2-72-83.
11. Карпов Д. А. Комбинированные алгоритмы аппроксимации для интерактивного проектирования дорожных трасс в системах автоматизированного проектирования / Д. А. Карпов, В. И. Струченков // Russ. Technol. J. — 2023. — Т. 11. — № 4. — С. 72–83. — DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-4-72-83.

12. Струченков В. И. Использование сплайнов сложной структуры в проектировании дорожных трасс / В. И. Струченков, Д. А. Карпов // Russ. Technol. J. — 2024. — Т. 12. — № 1. — С. 111–122. — DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-1-111-122.
13. Богданов А. И. Математическая модель продольного профиля трассы новых железных дорог / А. И. Богданов // Проектирование развития региональной сети железных дорог. — 2018. — № 6. — С. 12–15.
14. Богданов А. И. Математическая модель плана трассы новых железных дорог / А. И. Богданов // Проектирование развития региональной сети железных дорог. — 2019. — № 7. — С. 17–23.
15. Богданов А. И. Общая модель плана и профиля для автоматизированного проектирования новых и реконструируемых железных дорог / А. И. Богданов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 3(63). — С. 142–148. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).142-148.
16. Пренинг Р. Д. О совершенствовании математических моделей и методов трассирования участков железных дорог в условиях пересеченного рельефа / Р. Д. Пренинг, Р. В. Виноградов, А. Ш. Баткаева, А. М. Лазарева // Вестник транспорта Поволжья. — 2025. — № 1(109). — С. 128–135.
17. Свид. 2025610833 Российская Федерация. Программа формирования множества вариантов трассы железной дороги на участках с пересеченным рельефом местности: заявл. 28.12.2024; опубл. 14.01.2025 / Р. Д. Пренинг, Р. В. Виноградов, А. Ш. Баткаева, А. М. Лазарева; заявитель — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Дата поступления: 07.07.2025

Решение о публикации: 04.08.2025

Контактная информация:

АНИСИМОВ Владимир Александрович — д-р техн. наук, доц., проф. кафедры

«Изыскания и проектирование железных дорог»; anisvl@mail.ru

ПРЕНИНГ Ростислав Денисович — аспирант кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; kolga139@yandex.ru

ИЛЬИН Николай Юрьевич — студент 5-го курса; nikolay.ilyin.02@mail.ru

СТРЕХНИН Глеб Андреевич — студент 5-го курса; glebstrehnin@gmail.com

Generating a Variety of Acceptable Design Solutions for Railway Alignment in Rough Terrain Conditions

V. A. Anisimov, R. D. Prening, N. Yu. Ilyin, G. A. Strehnin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Anisimov V. A., Prening R. D., Ilyin N. Yu., Strehnin G. A. Generating a Variety of Acceptable Design Solutions for Railway Alignment in Rough Terrain Conditions. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 3, pp. 149–158. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-3-149-158

Summary

Purpose: To create an information basis for the modernization of existing and development of new methods for optimal railway routing in areas with difficult rough terrain. **Methods:** Mathematical modelling, optimisation methods, and decision theory were applied. **Results:** A computational experiment was conducted, its stages were determined, and an algorithm was developed for forming a set of acceptable route variants on a terrain section with a longitudinal watershed, two transverse watersheds and a ravine. **Practical significance:** A thorough examination of the experiment's outcomes reveals that the numerous viable railway route alternatives in regions with complex, rough terrain will provide a substantial information foundation for enhancing the mathematical support for the implementation of innovative technology in computer-aided railway designs. This should result in a significant reduction in the time required to make effective design decisions.

Keywords: Railway alignment, route plan, design line, rough terrain, mathematical model, optimisation methods.

References

1. Turbin I. V. Metod optimizatsii polozheniya trassy zheleznoy dorogi v plane, osnovanny na printsipakh napravlenogo poiska [Method for optimizing the position of a railway track plan based on the principles of directed search]. *Trudy MIIT* [Proceedings of MIIT]. 1976, Iss. 538, pp. 16–23. (In Russian)
2. Turbin I. V. Osnovy sistemy mashinnogo trassirovaniya na kosogornyh uchastkah napryazhennogo hoda [Fundamentals of the machine routing system on slope sections of the stressed course]. *Trudy MIIT* [Proceedings of MIIT]. 1978, Iss. 614, pp. 21–25. (In Russian)
3. Anisimov V. A. Chislennye metody vybora polozheniya trassy na uchastke napryazhennogo hoda [Numerical methods for selecting the position of the route in the stressed course section]. *Trudy MIIT* [Proceedings of MIIT]. 1982, Iss. 715, pp. 98–107. (In Russian)
4. Struchenkov V. I. *Osnovy teorii i metody optimizatsii trass zheleznih dorog i drugih linejnykh ob'ektov: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Fundamentals of theory and methods for optimizing railway routes and other linear objects: dis. ... Doctor of Engineering Sciences]. Moscow: VNIITransstroy Publ., 1985, 405 p. (In Russian)
5. Sheidvasser D. M. Optimizatsiya trass zheleznih dorog na napryazhennykh hodakh [Optimization of railway routes on stressed courses]. *Avtomatizatsiya proektirovaniya ob'ektov transportnogo stroitel'stva* [Automation of design of transport construction objects]. Moscow: Transport Publ., 1986, pp. 16–29. (In Russian)

6. Struchenkov V. I. *Metody optimizatsii trass v SAPR lineynykh sooruzheniy* [Methods for optimizing routes in CAD of linear structures]. Moscow: SOLON-Press, 2020, 272 p. (In Russian)
7. Struchenkov V. I. Komp'yuternye tekhnologii v proektirovanii trass lineynykh sooruzheniy [Computer technologies in the design of linear structure routes]. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* [Russian Technological Journal]. 2017, vol. 5, Iss. 1(15), pp. 29–41. (In Russian)
8. Karpov D. A., Struchenkov V. I. Dvukhetapnaya splayn-approksimatsiya v komp'yuternom proektirovanii trass lineynykh sooruzheniy [Two-stage spline approximation in computer design of linear structure routes]. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* [Russian Technological Journal]. 2021, vol. 9, Iss. 5, pp. 45–56. DOI: 10.32362/2500-316X-2021-9-5-45-56. (In Russian)
9. Karpov D. A., Struchenkov V. I. *Splayn-approksimatsiya mnogoznachnykh funktsiy v proektirovanii trass lineynykh sooruzheniy* [Spline approximation of multivalued functions in the design of linear structure routes]. *Russ. Technol. J.* 2022, vol. 10, Iss. 4, pp. 65–74. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-4-65-74.
10. Karpov D. A., Struchenkov V. I. *Optimizatsiya parametrov splayna pri approksimatsii mnogoznachnykh funktsiy* [Optimization of spline parameters in the approximation of multivalued functions]. *Russ. Technol. J.* 2023, vol. 11, Iss. 2, pp. 72–83. DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-2-72-83.
11. Karpov D. A., Struchenkov V. I. *Kombinirovannye algoritmy approksimatsii dlya interaktivnogo proektirovaniya dorozhnykh trass v sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Combined approximation algorithms for interactive design of road routes in CAD systems]. *Russ. Technol. J.* 2023, vol. 11, Iss. 4, pp. 72–83. DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-4-72-83.
12. Struchenkov V. I., Karpov D. A. *Ispol'zovanie splaynov slozhnoy struktury v proektirovanii dorozhnykh trass* [Using complex structure splines in road route design]. *Russ. Technol. J.* 2024, vol. 12, Iss. 1, pp. 111–122. DOI: 10.32362/2500-316X-2024-12-1-111-122.
13. Bogdanov A. I. Matematicheskaya model' prodol'nogo profilya trassy novykh zheleznykh dorog [Mathematical model of longitudinal profile of new railway routes]. *Proektirovanie razvitiya regional'noy seti zheleznykh dorog* [Railway Network Development Design]. 2018, Iss. 6, pp. 12–15. (In Russian)
14. Bogdanov A. I. Matematicheskaya model' plana trassy novykh zheleznykh dorog [Mathematical model of new railway routes plan]. *Proektirovanie razvitiya regional'noy seti zheleznykh dorog* [Railway Network Development Design]. 2019, Iss. 7, pp. 17–23. (In Russian)
15. Bogdanov A. I. Obshchaya model' plana i profilya dlya avtomatizirovannogo proektirovaniya novykh i rekonstruirovannykh zheleznykh dorog [General plan and profile model for automated design of new and reconstructed railways]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2019, Iss. 3(63), pp. 142–148. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).142-148.
16. Prening R. D., Vinogradov R. V., Batkaeva A. Sh., Lazareva A. M. O sovershenstvovanii matematicheskikh modelej i metodov trassirovaniya uchastkov zheleznykh dorog v usloviyakh peresechyonnogo rel'efa [On improving mathematical models and methods of railway routing in rugged terrain]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Volga Transport Herald]. 2025, Iss. 1(109), pp. 128–135. (In Russian)

17. Prening R. D., Vinogradov R. V., Batkaeva A. Sh., Lazareva A. M. *Programma formirovaniya mnozhestva variantov trassy zheleznoy dorogi na uchastkakh s peresechennym rel'efom mestnosti* [Program for the formation of a set of railway route options on sections with rugged terrain]. Svidetel'stvo RF, no. 2025610833, 2025. (In Russian)

Received: July 07, 2025

Accepted: August 04, 2025

Author's information:

Vladimir A. ANISIMOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department “Railway Survey and Design”; anisvl@mail.ru

Rostislav D. PRENING — Postgraduate Student, Department “Railway Survey and Design”; kolga139@yandex.ru

Nikolay Yu. ILYIN — 5-year Student; nikolay.ilyin.02@mail.ru

Gleb A. STREHNIN — 5-year Student; glebstrehnin@gmail.com