

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/24SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/24SATS226 (<https://doi.org/10.15862/24SATS226>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Полянский, А. В. Многокритериальный выбор технологических решений для сооружения железнодорожного земляного полотна с применением генетического алгоритма / А. В. Полянский // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/24SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/24SATS226.

For citation:

Polyanskiy A.V. Multi-criteria selection of technological solutions for the construction of a railway subgrade using a genetic algorithm. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 24SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/24SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/24SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 625:69.05:004.8

Полянский Алексей Викторович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия
Доцент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: polal_82@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6190-0481>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=412433

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AFJ-6625-2022>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57459964000>

Многокритериальный выбор технологических решений для сооружения железнодорожного земляного полотна с применением генетического алгоритма

Аннотация. Представленная статья посвящена решению научно-практической задачи многокритериального выбора технологических решений для сооружения железнодорожного земляного полотна на участках, характеризующихся наличием слабых грунтов и требующих геосинтетического усиления. Актуальность исследования обусловлена высокой капиталоемкостью инфраструктурных проектов, жесткими нормативными требованиями и необходимостью учёта нелинейных взаимосвязей между календарными сроками, стоимостью, трудозатратами и предельной нагрузкой на материально-технические ресурсы. В работе показаны недостатки классических методов математического программирования при решении задач со смешанными дискретными и непрерывными переменными. Разработана комплексная математическая модель, включающая формализованную систему из четырёх целевых функций и жестких ограничений, которая описывает процесс распределения пяти альтернативных технологических решений по двадцати восьми производственным участкам железнодорожного земляного полотна. В связи с принадлежностью сформулированной задачи к классу NP-трудных комбинаторных проблем, в качестве основного вычислительного инструмента использован модифицированный генетический алгоритм многокритериальной оптимизации. В тексте подробно описана алгоритмическая схема решения, программная реализация которой выполнена в среде Matlab с поддержкой автоматизированного обмена данными. Результаты проведенного вычислительного эксперимента демонстрируют успешное построение аппроксимации Парето-фронта, состоящего из множества не доминирующих планов.

Выполнен анализ инженерных компромиссов и статистики использования технологических решений, что позволило выявить объективные закономерности их назначения в зависимости от объёмов земляных работ и инженерно-геологических условий. Особое внимание уделено вопросам верификации полученных данных и адаптации модели к реальным условиям железнодорожного строительства. Практическая значимость исследования заключается в формировании научно обоснованного методического подхода, предоставляющего инструмент для принятия управленческих решений в условиях неопределённости и конфликтности целевых показателей.

Ключевые слова: технологическое решение; технологический процесс; железнодорожное строительство; железнодорожное земляное полотно; искусственный интеллект; многокритериальная оптимизация; генетический алгоритм

Введение

Строительство железнодорожных магистралей характеризуется высокой капиталоемкостью, жёсткими требованиями к срокам ввода в эксплуатацию и строгими нормативами качества земляного полотна. Возведение насыпей и разработка выемок на участках со слабыми грунтами, требующими усиленной конструкции основания, сопряжено с решением комплексной организационно-технологической задачи. Значительное преобладание объёмов отсыпки над выемкой обуславливает необходимость организации доставки привозного грунта, а вариативность инженерно-геологических условий требует дифференцированного выбора технологий возведения и режимов производства работ [1].

Основная сложность задачи заключается в многокритериальном конфликте целевых показателей: минимизация календарных сроков часто ведёт к резкому росту стоимости и предельной нагрузки на персонал, снижение затрат увеличивает вероятность недоуплотнения на слабых грунтах, а ужесточение требований к качеству ограничивает возможности параллельного выполнения работ. Традиционное ручное или автоматизированное планирование не всегда способно эффективно учитывать нелинейные взаимосвязи между объёмами, технологическими режимами и ресурсными ограничениями, что регулярно приводит к субоптимальным решениям, перерасходу бюджета или срыву сроков [2–4].

Классические подходы к планированию (линейное, целочисленное, динамическое программирование) обладают существенными ограничениями при применении к организационно-технологическим задачам железнодорожного строительства [2,5]:

- градиентные методы не применимы к функциям с разрывами, ступенчатыми и логическими ограничениями (например, запрет на уплотнение при осадках или превышение лимита персонала) (*требование гладкости и выпуклости*);
- задача одновременно содержит комбинаторные (порядок производства работ на участках), дискретные (выбор технологического решения) и непрерывные (интенсивность механизации) параметры, что приводит к экспоненциальному росту пространства поиска (*смешанная система переменных*);
- традиционные модели не учитывают стохастичность погодно-климатических условий, изменчивость свойств грунтов и вероятностный характер геотехнических осложнений (*детерминированность*);
- свёртка нескольких целей в один скалярный показатель может исказить инженерную интерпретацию и исключает возможность выбора альтернативных сбалансированных решений (*однокритериальность*).

Развитие вычислительного интеллекта открыло новые перспективы для решения задач многокритериальной оптимизации в железнодорожном строительстве. Методы искусственного интеллекта, в частности метаэвристические и эволюционные алгоритмы, позволяют [6; 7]:

- исследовать сложные, многоэкстремальные поверхности целевых функций без требования дифференцируемости;
- одновременно работать с разнородными типами переменных и нелинейными ограничениями;
- формировать множество оптимальных решений, позволяющих осознанно выбирать баланс «трудозатраты — продолжительность — стоимость — нагрузка на ресурсы»;
- сочетаться с имитационными моделями и цифровыми двойниками для оценки решений в условиях неполной информации;
- адаптироваться к изменениям входных данных в реальном времени (динамика погодных-климатических условий, фактические объёмы, доступность ресурсов).

1. Постановка задачи многокритериального выбора технологических решений по устройству железнодорожного земляного полотна на слабых грунтах и исследование возможностей ее решения

Целью решения задачи в настоящей работе является многокритериальный выбор оптимальных технологических решений возведения железнодорожного земляного полотна на участках со слабыми грунтами.

На рисунке 1 представлен схематичный план железнодорожной линии длиной более 350 км с рассчитанными объемами работ на возведение объектов железнодорожного пути, в частности земляного полотна. Суммарный объём земляных работ составляет более 26 млн м³, включая ~22,06 млн м³ насыпей и ~4,08 млн м³ выемок, распределённых по 28 производственным участкам.

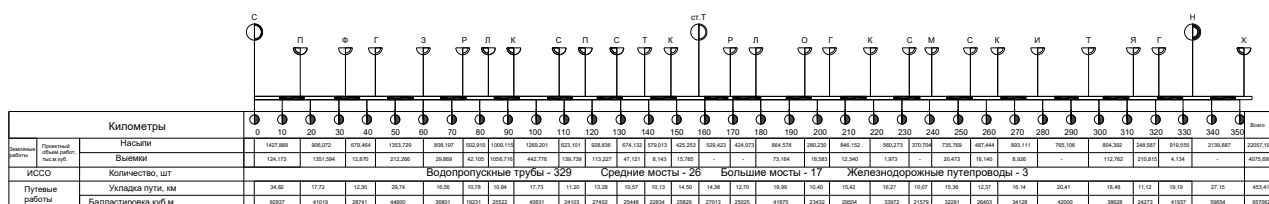


Рисунок 1. Фрагмент схематичного плана железнодорожной линии и объемов работ по участкам (разработано автором)

Таблица 1

Анализ объёмов работ по сооружению железнодорожного земляного полотна

Параметр	Значение
Общий объём насыпей	22 057,196 тыс. м ³
Общий объём выемок	4 075,694 тыс. м ³
Потребность в привозном грунте	~17 981,502 тыс. м ³
Количество участков	28
Участки без выемок	5
Максимальный объём насыпи (один участок)	2 139,887 тыс. м ³
Максимальный объём выемки (один участок)	1 351,594 тыс. м ³

Составлено автором

Таблица 1 содержит результаты анализа объемов работ по сооружению железнодорожного земляного полотна. Преобладание объемов насыпей над выемками (почти в 5,4 раза) требует открытия карьеров для доставки недостающих объемов грунта.

Основной (базовой) технологией производства работ по сооружению железнодорожного земляного полотна с учетом геологических особенностей основания на всем протяжении линии принята: «Послойное устройство армированной насыпи с геосинтетическим усилением и предварительной подготовкой слабого основания». Технология предполагает реализацию следующих этапов:

1. Подготовка основания на слабых грунтах:
 - устройство вертикальных дрена (песчаных или геотекстильных) или грунтовых свай для ускорения консолидации;
 - замена слабого грунта на глубину 1,5–3,0 м с послойным уплотнением;
 - устройство разделительного геотекстильного слоя (прочность на разрыв ≥ 200 кН/м).
2. Армирование тела насыпи:
 - укладка георешёток/геосеток через каждые 0,5–1,0 м по высоте насыпи;
 - применение грунта с модулем деформации ≥ 30 МПа, влажностью в пределах оптимальной ($\pm 2\%$);
 - послойное уплотнение виброкатками (толщина слоя ≤ 30 см, коэффициент уплотнения $\geq 0,98$).
3. Устройство дренажа и геотехнический мониторинг:
 - устройство призматического дренажа из крупнообломочного грунта;
 - установка пьезометров, реперов осадки и инклинометров для контроля деформаций;
 - геотехнический мониторинг в режиме реального времени.
4. Контроль качества:
 - лабораторный контроль гранулометрического состава, влажности, плотности грунта;
 - динамическое зондирование каждого 3-го слоя грунта;
 - геодезический контроль геометрии насыпи.

Для реализации принятой технологии производства работ предлагается пять вариантов технологических решений (ТР) для распределения по рабочим участкам:

- ТР № 1: «Комплексное механизированное поточное»;
- ТР № 2: «Зонированное с адаптивным составом техники»;
- ТР № 3: «Экономичное с акцентом на геосинтетическую эффективность»;
- ТР № 4: «Высокотехнологичное с цифровым контролем»;
- ТР № 5: «Сезонно-адаптивное с резервированием».

В таблицах 2–8 представлены данные по пяти технологическим решениям в рамках принятой технологии в структурированном виде с привязкой к 28 участкам рассматриваемой железнодорожной линии.

Таблица 2

Сводная характеристика технологических решений

Параметр	ТР № 1 «Поточное»	ТР № 2 «Зонированное»	ТР № 3 «Экономичное»	ТР № 4 «Цифровое»	ТР № 5 «Сезонное»
Область применения	Объём насыпи > 800 тыс. м ³	Объём 400–800 тыс. м ³ , переменная геология	Объём < 500 тыс. м ³ , слабые основания	Критические участки, высокие требования к точности	Сложные погодно-климатические условия
Производительность, тыс. м ³ /смену	15–25	8–15	3–7	18–28	6–12 (сезонно)
Срок устройства 1 тыс. м ³ насыпи, маш.-ч	0,08–0,12	0,10–0,15	0,13–0,18	0,07–0,09	0,09–0,13 (×1,4 зимой)
Срок разработки 1 тыс. м ³ выемки, маш.-ч	0,045–0,065	0,055–0,08	0,07–0,10	0,04–0,055	0,05–0,07 (×1,5 зимой)
Укладка геосинтетики, маш.-ч/м ²	0,002–0,003	0,003–0,004	0,005–0,007	0,0025	0,003 (×1,3 зимой)
Численность персонала, чел.	55–65	35–42	22–28	32–39	44–55 (с резервом)
Парк техники, ед. (основной)	35–45	20–30	12–18	15–25 (с цифровым оснащением)	25–35 (с резервом)
Режим работы	2 смены, 16 ч/сут, 6 дн/нед	1–2 смены, гибкий график	1 смена, 8 ч, 5–6 дн/нед	2 смены + цифровой мониторинг	Сезонный: лето — 2 смены, зима — 1 смена
Капитальные затраты	Высокие	Средние	Низкие	Очень высокие	Средние
Гибкость адаптации	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя	Высокая
Требования к квалификации	Средние	Средние	Высокие (геосинтетика)	Очень высокие (ИТ*/ГИС**)	Высокие (учет климатических условий)

*ИТ — информационные технологии; **ГИС — геоинформационные системы. Составлено автором

Таблица 3

Состав техники по технологическим решениям

Тип техники	ТР №1	ТР №2	ТР №3	ТР №4	ТР №5
Экскаватор одноковшовый	3–4 ед. (1,6–2,2 м ³)	2 ед. (1,2–1,6 м ³)	2–3 ед. (0,3–0,6 м ³)	2–3 ед. (с 3D-контролем)	2–3 ед. + 1 резерв (повышенная проходимость)
Бульдозер	4–5 ед. (250–350 л.с.)	3 ед. (180–250 л.с.)	2–3 ед. (150–200 л.с.)	3–4 ед. (с GPS-планировкой)	3 ед. + 1–2 резерв (с рыхлителями)
Скрепер/погрузчик	6–8 скреперов (10–15 м ³)	2 погрузчика фронтальных	1–2 мини-погрузчика	—	—
Каток вибрационный	3–4 ед. (12–16 т)	2 ед. (8–12 т)	2 ед. (5–8 т)	3 ед. («умные», с датчиками)	2 ед. + 1 резерв (с подогревом)
Самосвалы	15–20 ед. (20–25 т)	8–12 ед. (15–20 т)	5–8 ед. (10–15 т)	10–15 ед. (с телематикой)	10–15 ед. с резервом
Спецтехника для геосинтетики	1–2 укладчика (300–400 м ² /ч)	1 комплект (полумеханизированный)	Ручной инструмент + лебедки	1–2 укладчика (с лазерным контролем)	1 комплект + 1 морозостойкий
Дополнительное оборудование	—	—	—	БПЛА*, мобильная лаборатория, геопозиция	Водопонижение, обогрев, зимнее оснащение

*БПЛА — беспилотный летательный аппарат. Составлено автором

Таблица 4

Состав персонала по технологическим решениям

Должность / Профессия	ТР № 1	ТР № 2	ТР № 3	ТР № 4	ТР № 5
Инженер-технолог / координатор	1	1	1 (геотехник)	1 (цифровые системы)	1 (климатические технологии)
Мастер участка / зоны	3	2	1–2	2–3 (с цифровой квалификацией)	2–3 (сменный график)
Машинисты техники	35–40	20–25	12–15	25–30 (обученные)	25–30 (+ резерв)
Рабочие по геосинтетике	12–15	8–10	8–10	6–8	10–12
Лаборанты контроля качества	4	2	1–2	3–4 (аналитики)	3
Операторы БПЛА / ГИС	—	—	—	1	—
Итого, чел.	55–65	35–42	22–28	32–39	44–55

Составлено автором

Таблица 5

Нормы времени (средние значения)

Вид работ	Ед. изм.	ТР № 1	ТР № 2	ТР № 3	ТР № 4	ТР № 5 (лето)	ТР № 5 (зима)
Разработка выемки (грунт II–III гр.)	маш.-ч/м ³	0,045–0,065	0,055–0,08	0,07–0,10	0,04–0,055	0,05–0,07	×1,3–1,5
Отсыпка и уплотнение насыпи	маш.-ч/м ³	0,08–0,12	0,10–0,15	0,13–0,18	0,07–0,09	0,09–0,13	×1,4–1,7
Укладка геотекстиля (разделительного)	маш.-ч/м ²	0,0015–0,0025	0,002–0,003	0,003–0,004	0,002	0,0025	×1,2
Укладка георешетки (армирующей)	маш.-ч/м ²	0,002–0,003	0,003–0,004	0,005–0,007	0,0025	0,003	×1,3
Контроль уплотнения (1 точка)	маш.-ч	0,001	0,0012	0,0015	0,0008	0,001	×1,1
Подготовка слабого основания	маш.-ч/м ²	0,015–0,025	0,02–0,035	0,03–0,045	0,012–0,02	0,02–0,03	×1,5–2,0

Составлено автором

Нормы времени представленные в таблице 5 приведены для грунтов II–III групп. Для грунтов IV группы и скальных грунтов применяются коэффициенты в интервале 1,2–1,8. Зимние коэффициенты указаны для температуры до -20°C.

Таблица 6

Достоинства и недостатки технологических решений

Критерий	ТР № 1	ТР № 2	ТР № 3	ТР № 4	ТР № 5
Достоинства	• максимальная производительность; • равномерное качество; • эффект масштаба	• гибкость под геологию; • параллельная работа; • умеренные затраты	• экономия за счёт армирования • низкие капиталовложения; • работа в стеснённых условиях	• высочайшая точность; • цифровое сопровождение; • минимум брака	• круглогодичность работ; • минимизация последствий влияния погодных-климатических условий; • резервирование ресурсов
Недостатки	• высокие капиталовложения; • низкая гибкость; • сложная условия перевозок/доставки и т. д.	• простои при перебазировке; • сложность координации	• низкая скорость; • требует квалификации по геосинтетике	• высокая стоимость внедрения; • зависимость от ИТ-инфраструктуры	• увеличенный штат работающих и парк машин; • сложность учёта сезонных коэффициентов

Составлено автором

Применение данных в таблицах 1–6 предполагает:

1. Выбор конкретного технологического решения внутри рекомендованного диапазона осуществляется на основе:
 - инженерно-геологических изысканий (тип грунта, уровень грунтовых вод, несущая способность основания);
 - погодных-климатических условий района строительства;
 - доступности инфраструктуры и транспорта;
 - требований заказчика к срокам и бюджету.
2. Возможность корректировки норм времени:
 - коэффициентом на группу грунта (1,0 для II–III гр., увеличение в 1,8 раза для скальных грунтов);
 - сезонным коэффициентом (зимой увеличение в 1,7 раза);
 - коэффициентом на расстояние транспортировки грунта (более 1 км — добавлять 15 % на каждые 500 м).

3. Обязательное *геосинтетическое усиление* во всех технологических решениях включает:
 - разделительный геотекстиль (плотность ≥ 300 г/м²) на слабом основании;
 - армирующие георешетки (прочность на разрыв ≥ 40 кН/м) с шагом укладки 0,3–0,5 м по высоте насыпи;
 - контроль натяжения и перекрытия полотен (нахлест ≥ 30 см).
4. *Контроль качества*, который предусматривает:
 - послойное уплотнение с контролем коэффициента уплотнения ($K_{упл} \geq 0,98$);
 - испытания грунта в лаборатории (влажность, гранулометрический состав, прочность);
 - геодезический контроль геометрии насыпи и откосов.

В таблице 7 представлена сравнительная характеристика технологических решений.

Таблица 7

Сравнительная таблица технологических решений

Критерий	ТР № 1	ТР № 2	ТР № 3	ТР № 4	ТР № 5
Производительность	Очень высокая	Высокая	Средняя	Очень высокая	Средняя
Гибкость	Низкая	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая
Экономичность	Средняя	Высокая	Очень высокая	Низкая	Низкая
Точность/качество	Высокая	Высокая	Средняя	Очень высокая	Высокая
Применимость на слабых основаниях	Высокая	Очень высокая	Очень высокая	Высокая	Очень высокая
Требования к персоналу	Средние	Средние	Высокие	Очень высокие	Высокие
Капитальные затраты	Высокие	Средние	Низкие	Очень высокие	Средние

Составлено автором

Все технологические решения предполагают обязательное выполнение предварительной подготовки слабого основания (замена грунта, устройство дренажа, геотекстильный разделительный слой).

Ниже представлена постановка задачи, которая предполагает выбор технологических решений для возведения земляного полотна рассматриваемой железнодорожной линии.

Имеется 28 участков железнодорожного земляного полотна ($i = 1 \dots 28$) с известными проектными объемами насыпей (V_i^H , тыс. м³) и выемок (V_i^B , тыс. м³).

Для каждого участка необходимо выбрать одно из пяти технологических решений ($j \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$). Выбор фиксируется дискретной переменной x_i . Необходимо найти вектор назначений $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_{28}]$, минимизирующий четыре конфликтующих критерия при соблюдении глобального ограничения на разнообразие технологических решений.

Сформулирована многокритериальная комбинаторная задача распределения пяти технологических решений по 28 участкам с минимизацией трудозатрат, продолжительности, стоимости работ и предельной нагрузки на ресурсы.

Решение задачи аналитическими методами (классическими методами математической оптимизации) не представляется возможным из-за дискретности, многокритериальности, нелинейности и глобального ограничения [8–13].

Генетический алгоритм (ГА) «*Non-dominated sorting genetic algorithm II*» (NSGA-II) является практически применимым методом, способным за приемлемое время определить множество всех эффективных по Парето решений в задаче многокритериальной оптимизации (построить Парето-фронт) и фактически предоставить набор оптимальных стратегий управления ресурсами и строительным производством [14; 15].

2. Теоретические основы многокритериального выбора технологических решений по устройству железнодорожного земляного полотна на слабых грунтах с применением генетического алгоритма

Генетические алгоритмы представляют собой класс адаптивных вычислительных методов, широко применяемых в современной науке для решения сложных задач функциональной оптимизации. Данные методы базируются на принципиальных аналогиях с естественными генетическими процессами, наблюдаемыми в биологических популяциях, и реализуют концепцию естественного отбора. Моделируя эволюционные механизмы на абстрактном уровне, генетические алгоритмы способны генерировать эффективные решения для разнообразных практических задач при условии их корректного кодирования в соответствующее представление. Существенно, что генетические алгоритмы моделируют лишь те аспекты биологической эволюции, которые непосредственно влияют на прогрессивное улучшение адаптационных характеристик, тогда как многие детали естественных процессов опускаются как несущественные для целей оптимизации.

В естественных природных условиях члены популяции конкурируют за ограниченные ресурсы, включая пищевые запасы, водные источники и потенциальных партнеров для размножения. Особи, демонстрирующие превосходные адаптационные качества в конкретных условиях среды, обладают повышенной вероятностью успешного воспроизводства, тогда как слабо приспособленные индивиды либо полностью лишены этой возможности, либо производят минимальное количество потомства. Такой дифференцированный репродуктивный успех приводит к постепенному увеличению доли генетических признаков, ассоциированных с высокой приспособленностью, в последующих поколениях. Синергетическое сочетание благоприятных характеристик от различных родительских особей может порождать потомство с превосходящими адаптационными параметрами, что способствует прогрессивному совершенствованию вида в процессе эволюции.

Генетические алгоритмы оперируют с множеством потенциальных решений в виде искусственной популяции, где каждая особь представляет собой закодированное решение оптимизационной задачи. Качество каждого решения количественно оценивается посредством функции приспособленности, отражающей степень его пригодности для решения поставленной задачи. Отбор наиболее перспективных решений для участия в генерации следующего поколения осуществляется пропорционально их оценке приспособленности, что соответствует биологическому принципу дифференцированного воспроизводства. Процесс рекомбинации генетической информации реализуется через оператор скрещивания, создающий новых особей с комбинированными характеристиками родителей. Наименее приспособленные элементы популяции постепенно исключаются из-за низкой вероятности участия в репродуктивном процессе, что обеспечивает направленное улучшение качества популяции в целом [7; 10].

Реализация генетического алгоритма (с учетом рассматриваемой задачи) включает последовательность операций, представленную на рисунке 2.

Современные исследования демонстрируют значительную диверсификацию подходов к реализации эволюционных принципов в вычислительных алгоритмах. Большинство современных генетических алгоритмов существенно отличаются от классической схемы, что привело к трансформации термина «генетические алгоритмы» из обозначения конкретной методологии в широкую категорию, объединяющую множество разнообразных вычислительных стратегий. Экспериментальные исследования в этой области сосредоточены на разработке альтернативных схем представления решений, модификации операторов кроссовера и мутации, внедрении специализированных генетических операторов, а также на оптимизации стратегий отбора и воспроизводства.

Несмотря на упрощенный характер моделирования по сравнению с естественными эволюционными процессами, генетические алгоритмы демонстрируют высокую эффективность при решении сложных оптимизационных задач, где традиционные методы оказываются несостоятельными [8; 10; 11].

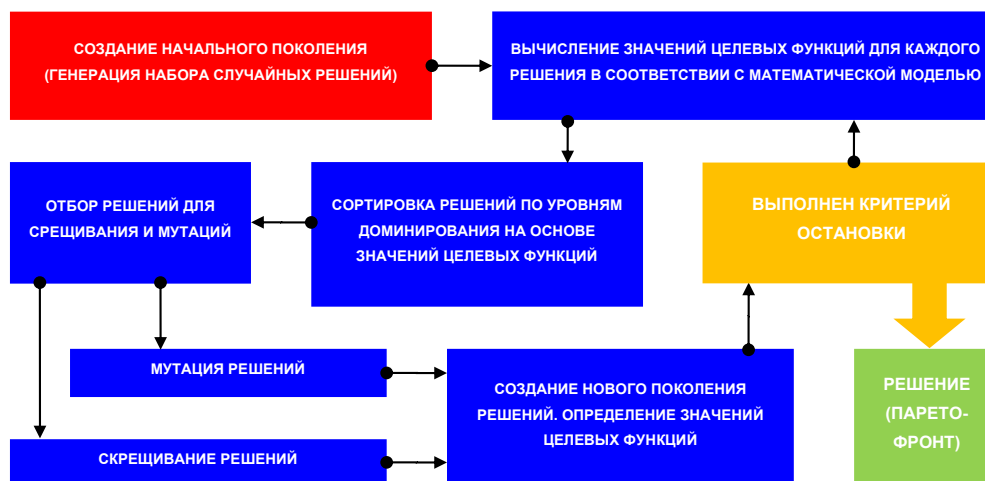


Рисунок 2. Алгоритм функционирования генетического алгоритма (разработано автором)

Следует отметить, что подобно другим методам эволюционных вычислений, генетические алгоритмы не гарантируют нахождения глобального оптимума за полиномиальное время и не обеспечивают абсолютной достоверности достижения наилучшего решения. Однако их ключевое преимущество заключается в способности быстро находить субоптимальные решения приемлемого качества даже в условиях сложных, многоэкстремальных пространств поиска. В тех областях, где существуют специализированные методы оптимизации, они обычно превосходят генетические алгоритмы по скорости сходимости и точности получаемых результатов.

Таблица 8

Сравнение классических методов оптимизации и генетического алгоритма для решения задачи

Свойство задачи	Недостатки классических методов	Преимущества генетического алгоритма
Дискретность и комбинаторика	$5^{28} \approx 3,7 \times 10^{19}$ вариантов. Полный перебор невозможен. Точные методы экспоненциально замедляются	Генетический алгоритм исследует пространство эвристически, не требуя перебора всех комбинаций
Смешанные (дискретные и непрерывные) переменные (порядок работ, дискретные режимы, непрерывная интенсивность, целочисленные даты начала работ)	Методы линейного/нелинейного программирования требуют релаксации, теряется инженерная интерпретация	Гибридное кодирование хромосомы, специализированные операторы кроссовера/мутации
Нелинейные ограничения (ограничения по предельной численности, погодно-климатические условия, инженерно-геологические условия)	Градиентные методы остаются в локальных оптимумах или не сходятся	Популяционный поиск устойчив к негладкости фитнес-функции
Многокритериальность (трудозатраты, продолжительность, стоимость, нагрузка на ресурсы)	Требуется свертка в один критерий (весовые коэффициенты), что субъективно и теряет Парето-оптимальные решения	Генетический алгоритм (NSGA-II) формирует Парето-фронт напрямую, сохраняя компромиссные решения
Пространственно-временные зависимости (соседние рабочие участки, перемещение ресурсов, последовательность работ)	Динамическое программирование экспоненциально растёт с размерностью	Генетический алгоритм естественным образом кодирует последовательности и оперативно проверяет допустимость
Масштабируемость	При добавлении участков или технологических решений точные методы становятся неприменимы	Генетический алгоритм масштабируется линейно по популяции и поколениям

Составлено автором

Тем не менее, комбинированные подходы, интегрирующие генетические алгоритмы с традиционными методами, часто позволяют достичь синергетического эффекта и существенно улучшить характеристики решения. Таким образом, основная ценность генетических алгоритмов проявляется именно в тех областях прикладных исследований, где отсутствуют специализированные методы или где сложность задачи делает их применение затруднительным.

В таблице 8 представлены результаты сравнения классических вычислительных методов оптимизации (в том числе многокритериальной) и генетического алгоритма. Выявленные преимущества генетического алгоритма делают его основным рабочим инструментом для поиска оптимального решения.

Среди методов искусственного интеллекта генетический алгоритм является наиболее обоснованным инструментом для рассматриваемой задачи в связи с [8–16]:

1. Популяционным поиском — одновременная оценка множества решений снижает риск застревания в локальных оптимумах, характерных для задач календарного планирования.
2. Гибридным кодированием — хромосома генетического алгоритма может естественно объединять перестановки участков, дискретные индексы технологий и непрерывные коэффициенты интенсивности.
3. Устойчивостью к негладкости — аддитивные штрафные функции, факторы ресурсных ограничений и вероятностные оценки надёжности корректно обрабатываются без потери работоспособности алгоритма.
4. Многокритериальностью — модификации генетического алгоритма (например, *NSGA-II*) целенаправленно формируют фронт не доминирующих решений, что критически важно для инженерного принятия решений.
5. Масштабируемостью и параллелизмом — оценка популяции легко распараллеливается, а суррогатные модели могут ускорять вычисления на порядки при сохранении точности.

Таким образом, генетический алгоритм является предпочтительным для рассматриваемой задачи не потому, что «вообще лучше», а потому что структурно соответствует ее смыслу: комбинаторика последовательностей, дискретные технологии, непрерывное управление интенсивностью, негладкие инженерные ограничения. Алгоритм формирует не одно «математически точное», а множество физически реализуемых и устойчивых к возмущениям решений, из которых можно выбрать оптимальное под конкретные условия производства работ.

3. Математическая модель многокритериальной оптимизации распределения технологических решений для возведения железнодорожного земляного полотна

Ниже приведена формализация задачи, соответствующая исходным данным и поставленным условиям: 28 участков, пять технологических решений, четыре критерия минимизации (табл. 9).

Таблица 9

Индексы и множества

Обозначение	Описание
$I = \{1, 2, \dots, 28\}$	Множество участков железнодорожного земляного полотна
$J = \{1, 2, 3, 4, 5\}$	Множество технологических решений
$t = \{1, 2, \dots, t_{\max}\}$	Множество расчетных временных интервалов (рабочих смен)

Составлено автором

Используются переменные: $x_i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $i = 1 \dots 28$, где $x_i = j$ означает, что на участке i применяется технологическое решение j .

Базовые параметры технологических решений представлены в таблице 10.

Таблица 10

Базовые параметры (на основе норм)

Параметр	Обозначение	Ед. изм.
Объемы земляных работ (насыпи, выемки)	V_i^H, V_i^B	тыс. м ³
Трудозатраты (маш-ч/чел-ч)	T_j^H, T_j^B	маш.-ч/тыс. м ³
Продолжительность	t_j^H, t_j^B	смен/тыс. м ³
Стоимость	C_j^H, C_j^B	тыс. руб./тыс. м ³
Ресурсная нагрузка	R_j	усл. ед./смену (единица техники и бригада/смену)

Составлено автором

Для каждого технологического решения j определены удельные нормативы (на 1 тыс. м³), на основе ранее сформулированных норм и расценок (табл. 11).

Таблица 11

Удельные нормативы технологических решений

Технологическое решение, j	T_j^H (маш-ч/тыс.м ³)	T_j^B (маш-ч/тыс.м ³)	t_j^H (смен/тыс.м ³)	t_j^B (смен/тыс.м ³)	C_j^H (тыс. руб./тыс.м ³)	C_j^B (тыс. руб./тыс.м ³)	R_j (усл. ед./смену)
1 (поточное)	100	55	1,8	1,2	420	380	45
2 (зонированное)	125	68	2,1	1,5	390	360	32
3 (экономичное)	155	85	2,8	2,0	310	290	18
4 (цифровое)	85	48	1,5	1,0	580	540	38
5 (сезонное)	110	65	2,3	1,6	440	400	35

Составлено автором

В таблице 12 представлены параметры и переменные необходимые для формирования целевых функций и ограничений.

Таблица 12

Параметры и переменные для формирования целевых функций и ограничений

Переменная	Область значений	Описание
x_{ij}	$\{0, 1\}$	$x_{ij} = 1$, если на участок i назначается схема j , иначе 0
D_i	$\mathbb{R} \geq 0$	Продолжительность работ на участке i (в сменах)
S_i	$\mathbb{Z} \geq 0$	Время начала работ на участке i (номер смены)
y_{iw}	$\{0, 1\}$	Индикатор активности: $y_{iw} = 1$, если работы на участке i выполняются в смену w
P_w	$\mathbb{R} \geq 0$	Суммарная нагрузка на ресурсы в смену w

Составлено автором

Целевые функции:

- критерий 1: минимальные суммарные трудозатраты:

$$F_1(\mathbf{x}) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} (T_j^H \cdot V_i^H + T_j^B \cdot V_i^B) \rightarrow \min ,$$

- критерий 2: минимальная суммарная продолжительность работ:

$$F_2(\mathbf{x}) = \sum_{i \in I} D_i \rightarrow \min ,$$

- критерий 3: минимальная суммарная стоимость работ:

$$F_3(\mathbf{x}) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} (C_j^H \cdot V_i^H + C_j^B \cdot V_i^B) \rightarrow \min ,$$

- критерий 4: минимальная предельная нагрузка на ресурсы:

$$F_4(\mathbf{x}, \mathbf{S}) = \max_{w \in t} (P_w) \rightarrow \min ,$$

где $P_w = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \cdot R_j \cdot y_{iw}, \forall w \in t$.

В таблице 13 представлен пример расчёта для участка № 1 (насыпь 1427,889, выемка 124,173) при назначении технологического решения № 1. Аналогично рассчитывается для всех 28 участков и всех пяти технологических решений.

Таблица 13

**Пример расчёта для участка № 1
(насыпь 1427,889, выемка 124,173) при назначении технологического решения № 1**

Критерий	Расчёт	Значение
Трудозатраты (F_1)	$100 \cdot 1427,889 + 55 \cdot 124,173$	149 596 маш-ч.
Продолжительность работ (F_2)	$1,8 \cdot 1427,889 + 1,2 \cdot 124,173$	2 719 смен
Стоимость работ (F_3)	$420 \cdot 1427,889 + 380 \cdot 124,173$	647 003 тыс. руб.
Предельная нагрузка на ресурсы (F_4)	$R_1 = 45$ ед./смену (влияет на общую предельную нагрузку на ресурсы при наложении с другими участками)	45

Составлено автором

Ограничения:

- Однозначность назначения технологического решения на участок:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \forall i \in I .$$

- Обязательное использование каждого технологического решения хотя бы один раз:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \geq 1, \forall j \in J .$$

- Расчёт продолжительности работ на участке:

$$D_i = \sum_{j \in J} x_{ij} (T_j^H \cdot V_i^H + T_j^B \cdot V_i^B), \forall i \in I .$$

- Логическая связь расписания и индикатора активности:

$$y_{iw} = 1 \Leftrightarrow S_i \leq t < (S_i + D_i), \forall i \in I, \forall w \in t ,$$

без переменной y_{iw} известны лишь *суммарные* трудозатраты и стоимость работ, но отсутствует «временный профиль» нагрузки. Два назначения могут определяться одинаковыми трудозатратами (F_1), продолжительностью работ (F_2) и стоимостью работ (F_3), но при одном графике техника будет загружена равномерно, а при другом возникнет «бутылочное горло» в середине строительного периода, когда 5 участков потребуют по 40 единиц техники одновременно. Переменная y_{iw} позволяет генетическому алгоритму оценить эту особенность и минимизировать ее. Простыми словами «на участке используется техника и работают люди в смену t только, если в этот момент он находится в стадии производства работ».

5. Целочисленность и бинарность:

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, y_{iw} \in \{0, 1\}, S_i \in \mathbb{Z} \geq 0, D_i, P_w \in \mathbb{R} \geq 0,$$

это «математический мост» между абстрактной оптимизацией и инженерной практикой.

В свою очередь, это:

1. Гарантирует, что решение состоит из целых смен и полных технологических решений.
2. Делает задачу комбинаторной и многокритериальной.
3. Обосновывает, почему классические градиентные методы неприменимы, а генетический алгоритм становится единственным эффективным инструментом поиска Парето-оптимальных назначений.

Рассматриваемая задача относится к классу NP-трудных многокритериальных комбинаторных задач с нелинейными, негладкими критериями. Генетический алгоритм *NSGA-II* способен формировать множество компромиссных решений за приемлемое время, то есть эффективно находить аппроксимацию Парето-фронта (множество всех эффективных по Парето решений в задаче многокритериальной оптимизации) в таких условиях [14–16].

Последовательность решения рассматриваемой задачи с применением генетического алгоритма предполагает следующие этапы:

1. *Кодирование особи*: целочисленный вектор длины 28, $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_{28}]$, $x_i \in \{1 \dots 5\}$.
2. *Инициализация*: случайная генерация популяции P_0 с обязательным выполнением ограничения $\forall j: \text{счетчик}(j) \geq 1$ (оператор «Repair»).
3. *Фитнес-функция*: вектор $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = [F_1, F_2, F_3, F_4]$. Для критерия F_4 встроен эвристический планировщик, распределяющий начала работ S_i для минимизации предельной нагрузки на ресурсы.
4. *Скрещивание*: одноточечный или двухточечный кроссовер с вероятностью $p_c = 0,8$.
5. *Мутация*: с вероятностью $p_m = 0,05$ на ген: случайная замена $x_i \leftarrow \text{rand}\{1 \dots 5\}$. Если ограничение нарушается осуществляется принудительная замена на недостающее технологическое решение.
6. *Отбор*: *NSGA-II* (не доминирующая сортировка, расстояние скученности).
7. *Условие остановки*: 500–1000 поколений или стагнация гипербъема Парето-фронта более 50 генераций.
8. *Результат*: множество Парето-оптимальных назначений $\mathbf{x}^*$. Выбирается окончательный вариант по приоритету стоимости или продолжительности работ.

Таким образом, генетический алгоритм комбинирует назначения технологических решений, оценивает четыре цели, отбирает не доминирующие решения и формирует фронт компромиссов.

4. Практическая реализация многокритериального выбора технологических решений по устройству железнодорожного земляного полотна на слабых грунтах с применением генетического алгоритма

Для решения рассматриваемой задачи были подготовлены таблицы с исходными данными в формате файла *MS Excel* (рис. 3–7).

Section_ID	Embankment_Volume_thous_m3	Excavation_Volume_thous_m3
1	1427,889	124,173
2	906,072	1351,594
3	680,464	12,87
4	1353,729	212,266
5	808,197	29,869
6	502,91	42,105
7	1009,115	1056,716
8	1269,201	442,776
9	623,101	139,739
10	928,836	113,227
11	674,132	47,121
12	579,013	8,143
13	425,253	15,785
14	529,423	0
15	424,073	0
16	864,578	73,164
17	280,23	18,583
18	846,152	12,34
19	560,273	1,973
20	370,704	0
21	735,769	20,473
22	487,444	16,14
23	893,111	8,926
24	765,106	0
25	804,392	112,762
26	248,587	210,815
27	919,555	4,134
28	2139,887	0

Рисунок 3. Лист «Участки_Объемы» (разработано автором)

Scheme_ID	Scheme_Name	Labor_Emb_mach_h_per_thous_m3	Labor_Exc_mach_h_per_thous_m3	Dur_Emb_shifts_per_thous_m3	Dur_Exc_shifts_per_thous_m3	Cost_Emb_thous_rub_per_thous_m3	Cost_Exc_thous_rub_per_thous_m3	Resource_Load_units_per_shift
1	Potok	100	55	1,8	1,2	420	380	45
2	Zonirovannaya	125	68	2,1	1,5	390	360	32
3	Ekonomichnaya	155	85	2,8	2	310	290	18
4	Tsifrovaya	85	48	1,5	1	580	540	38
5	Sezonnaya	110	65	2,3	1,6	440	400	35

Рисунок 4. Лист «Схемы_Параметры» (разработано автором)

На рисунке 6 в представленной таблице заголовки столбцов означают:

- «Section_ID» — номер участка производства земляных работ;
- «Soil_Group» — группа грунта по трудности разработки (влияет на корректировку нормативов);
- «Winter_Flag» — 1 — работы в зимний период, 0 — работы в летний период;
- «Transport_Distance_km» — среднее расстояние транспортировки грунта, км;
- «Critical_Flag» — 1 — критический участок (повышенные требования), 0 — стандартный участок.

Parameter_Code	Parameter_Name	Parameter_Value	Unit	Description
NUM_SECTIONS	Количество участков	28	шт.	Общее число строительных участков
NUM_SCHEMES	Количество схем	5	шт.	Общее число технологических схем
MIN_SCHEME_USAGE	Мин. использование схемы	1	раз	Каждая схема должна быть назначена минимум 1 раз
MAX_SHIFTS	Горизонт планирования	365	смен	Максимальное число рабочих смен в расчёте
SHIFT_HOURS	Длительность смены	8	час.	Продолжительность одной рабочей смены
MACH_HOUR_COST	Стоимость маш.-часа	2,5	тыс. руб.	Средняя стоимость одного машино-часа
PENALTY_NO_SCHEME	Штраф за отсутствие схемы	1000000	тыс. руб.	Штрафная функция при нарушении ограничения покрытия
SOIL_COEF_DEFAULT	Козф. грунта (базовый)	1	—	Базовый коэффициент для грунтов II–III групп
WINTER_COEF_MIN	Козф. зимний (мин.)	1,2	—	Минимальный сезонный коэффициент
WINTER_COEF_MAX	Козф. зимний (макс.)	1,7	—	Максимальный сезонный коэффициент
DIST_COEF_BASE	Козф. расстояния (база)	1	—	Коэффициент при дистанции транспортировки ≤1 км
DIST_COEF_STEP	Шаг коэф. расстояния	0,15	—	Добавка к коэффициенту на каждые 500 м сверх 1 км

Рисунок 5. Лист «Глобальные_Параметры» (разработано автором)

Section_ID	Soil_Group	Winter_Flag	Transport_Distance_km	Critical_Flag
1	II-III	0	1,2	0
2	II-III	1	2,5	1
3	II-III	0	0,8	0
4	II-III	0	1,5	0
5	II-III	0	1	0
6	II-III	0	0,5	0
7	II-III	1	3	1
8	II-III	0	1,8	0
9	II-III	0	1,1	0
10	II-III	0	1,3	0
11	II-III	0	0,9	0
12	II-III	0	0,6	0
13	II-III	0	0,7	0
14	II-III	0	1	0
15	II-III	0	0,4	0
16	II-III	0	1,4	0
17	II-III	0	0,3	0
18	II-III	0	1,1	0
19	II-III	0	0,8	0
20	II-III	0	0,5	0
21	II-III	0	1	0
22	II-III	0	0,7	0
23	II-III	0	1,2	0
24	II-III	0	0,9	0
25	II-III	0	1,5	0
26	II-III	1	2,8	1
27	II-III	0	1	0
28	II-III	0	1,6	0

Рисунок 6. Лист «Участки_Доп_Параметры» (разработано автором)

Constraint_ID	Constraint_Type	Constraint_Value	Target_Entity	Description
C01	Min_Scheme_Coverage	1	Scheme_ID	Каждая схема должна быть использована ≥1 раза
C02	Max_Sections_Per_Scheme	28	Scheme_ID	Максимальное число участков на одну схему
C03	Max_Total_Duration	365	Project	Общая продолжительность проекта не более 365 смен
C04	Max_Peak_Resource_Load	200	Resource	Пиковая нагрузка на ресурсы не более 200 усл. ед./смену
C05	Budget_Upper_Bound	3500000	Project	Верхняя граница бюджета проекта, тыс. руб.
C06	Critical_Section_Scheme	{1,4}	Section_ID (Critical_Flag=1)	Критические участки: только схемы 1 или 4

Рисунок 7. Лист «Ограничения_Требования» (разработано автором)

В системе *Matlab* с пакетом расширения *Global Optimization Toolbox* был разработан код программы (скрипт) для решения рассматриваемой задачи. На рисунке 8 представлен фрагмент скрипта, а на рисунках 9–11 результаты решения задачи в текстовой и графической формах.

Следует отметить, что код программы учитывает масштабирование исходных данных, то есть предусмотрена возможность добавлять/удалять участки или технологические решения путем вставки/удаления строк в соответствующих листах файла формата *MS Excel*.

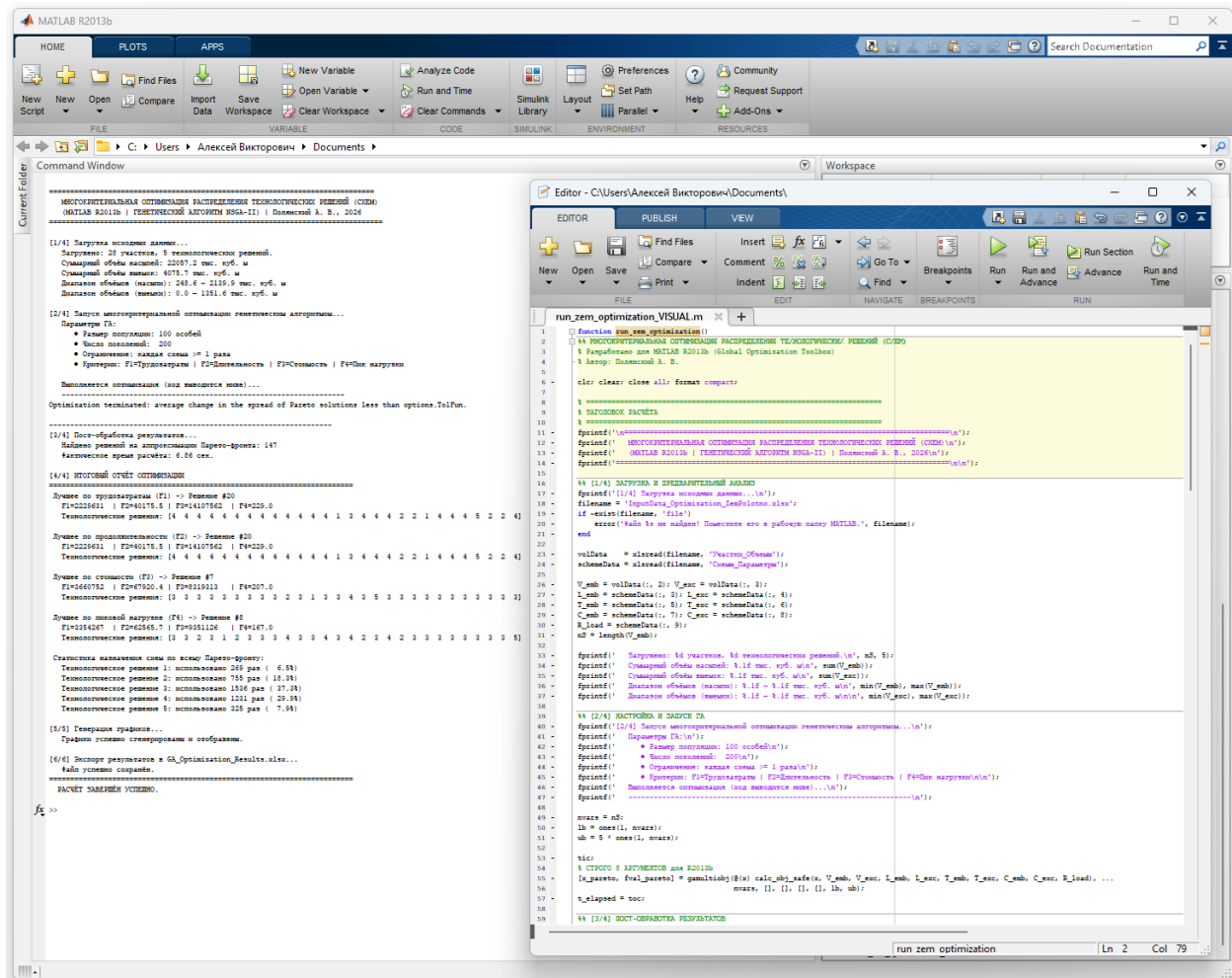


Рисунок 8. Фрагмент скрипта (кода программы) *Matlab*, реализующего многокритериальный выбор технологических решений по устройству железнодорожного земляного полотна на слабых грунтах с применением генетического алгоритма (разработано автором)

После запуска скрипта:

1. Длительность расчета составит 5–90 секунд (в зависимости от мощности центрального процессора и количества оперативной памяти).
2. В окне «*Command Window*» появится таблица итераций генетического алгоритма (встроенный вывод пакета расширения *Global Optimization Toolbox*).
3. После завершения расчета автоматически будет выведен подробный отчет с лучшими решениями по каждому из четырех критериев и статистикой использования технологических решений.
4. Результаты расчета записываются в файлы формата *Matlab* (MAT) и *MS Excel* (XLCX).

```
=====
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ (СХЕМ)
(MATLAB R2013b | ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ NSGA-II) | Полянский А. В., 2026
=====

[1/4] Загрузка исходных данных...
Загружено: 28 участков, 5 технологических решений.
Суммарный объём насыпей: 22057.2 тыс. куб. м
Суммарный объём выемок: 4075.7 тыс. куб. м
Диапазон объёмов (насыпи): 248.6 – 2139.9 тыс. куб. м
Диапазон объёмов (выемки): 0.0 – 1351.6 тыс. куб. м

[2/4] Запуск многокритериальной оптимизации генетическим алгоритмом...
Параметры ГА:
  • Размер популяции: 100 особей
  • Число поколений: 200
  • Ограничение: каждая схема >= 1 раза
  • Критерии: F1=Трудозатраты | F2=Длительность | F3=Стоимость | F4=Пик нагрузки

Выполняется оптимизация (код выводится ниже)...
-----
Optimization terminated: average change in the spread of Pareto solutions less than options.TolFun.

-----

[3/4] Пост-обработка результатов...
Найдено решений на аппроксимации Парето-фронта: 147
фактическое время расчёта: 6.86 сек.

[4/4] ИТОГОВЫЙ ОТЧЁТ ОПТИМИЗАЦИИ
=====
Лучшее по трудозатратам (F1) -> Решение #20
F1=2229631 | F2=40175.5 | F3=14107562 | F4=229.0
Технологические решения: [4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 1 3 4 4 4 2 2 1 4 4 4 5 2 2 4]

Лучшее по продолжительности (F2) -> Решение #20
F1=2229631 | F2=40175.5 | F3=14107562 | F4=229.0
Технологические решения: [4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 1 3 4 4 4 2 2 1 4 4 4 5 2 2 4]

Лучшее по стоимости (F3) -> Решение #7
F1=3660752 | F2=67920.4 | F3=8319313 | F4=207.0
Технологические решения: [3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 3 1 3 3 4 3 5 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3]

Лучшее по пиковой нагрузке (F4) -> Решение #8
F1=3354267 | F2=62565.7 | F3=9351126 | F4=167.0
Технологические решения: [3 3 2 3 1 2 3 3 3 4 3 3 4 3 4 2 3 4 2 3 3 3 3 3 3 3 3 5]

Статистика назначения схем по всему Парето-фронту:
Технологическое решение 1: использовано 269 раз ( 6.5%)
Технологическое решение 2: использовано 755 раз ( 18.3%)
Технологическое решение 3: использовано 1536 раз ( 37.3%)
Технологическое решение 4: использовано 1231 раз ( 29.9%)
Технологическое решение 5: использовано 325 раз ( 7.9%)

[5/5] Генерация графиков...
Графики успешно сгенерированы и отображены.

[6/6] Экспорт результатов в GA_Optimization_Results.xlsx...
файл успешно сохранён.
=====
РАСЧЁТ ЗАВЕРШЁН УСПЕШНО.
```

Рисунок 9. Результат выполнения скрипта Matlab в окне «Command Window», реализующего многокритериальный выбор технологических решений по устройству железнодорожного земляного полотна на слабых грунтах с применением генетического алгоритма (разработано автором)

В результате многокритериальной оптимизации распределения технологических решений по 28 участкам железнодорожного земляного полотна с применением генетического алгоритма *NSGA-II* было найдено 147 Парето-оптимальных решений. Все пять технологических решений использованы в решениях Парето-фронта, что подтверждает выполнение глобального ограничения оптимизации.

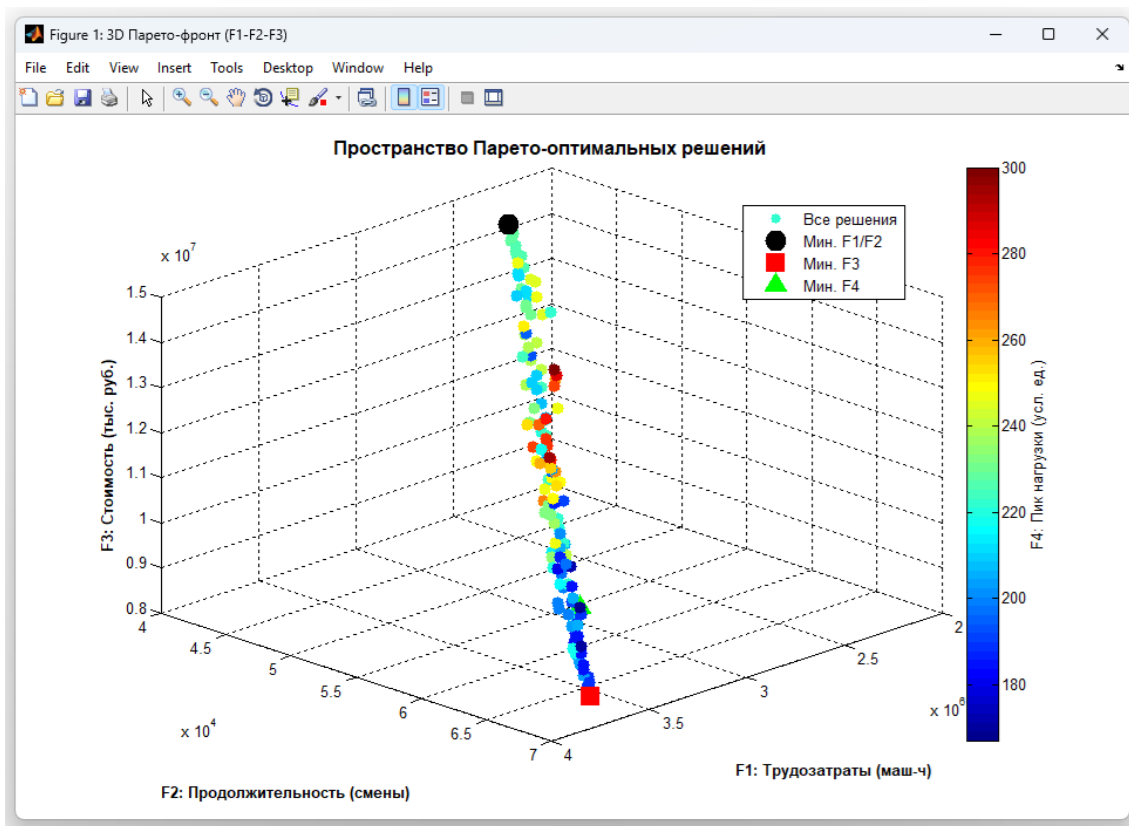


Рисунок 10. Пространство Парето-оптимальных решений (разработано автором)

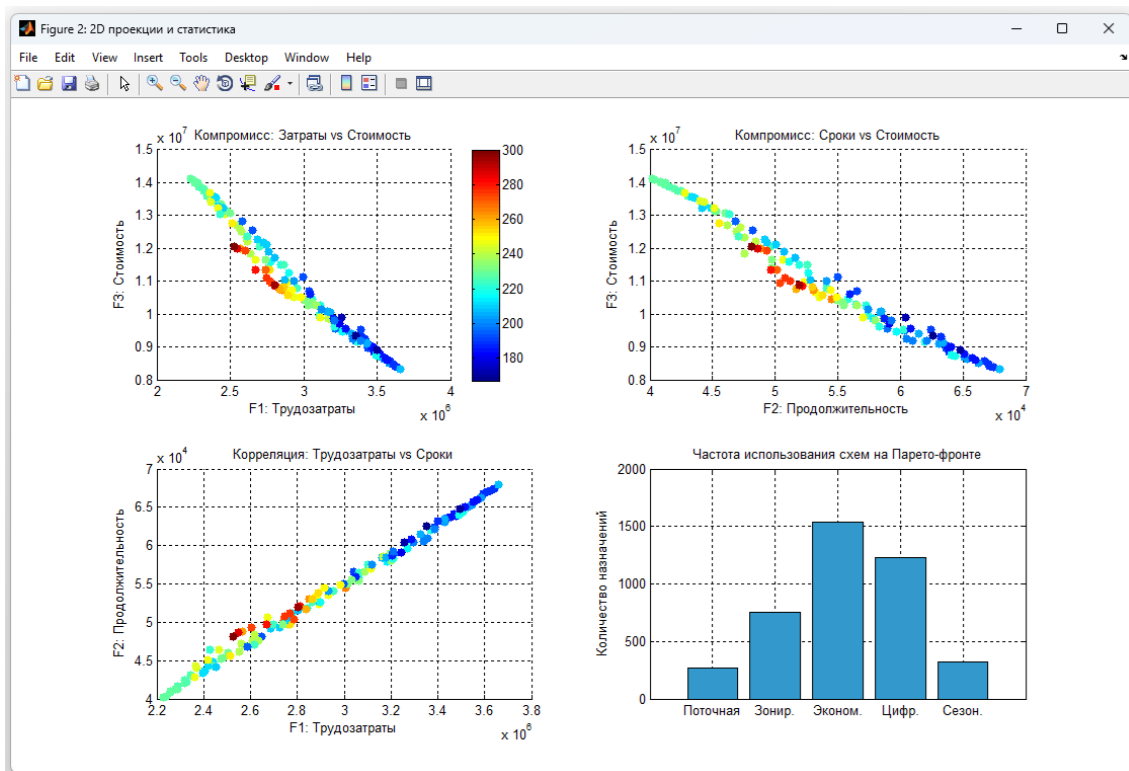


Рисунок 11. Визуализация работы генетического алгоритма многокритериальной оптимизации: выявление компромиссов между критериями оптимизации и определение частоты использования технологических решений на Парето-фронте (разработано автором)

В таблице 14 представлены лучшие решения, полученные с применением генетического алгоритма, по каждому критерию.

Таблица 14

Сводная характеристика экстремальных решений

Критерий	Номер решения (ГА)	F_1 (Трудозатраты, маш-ч)	F_2 (Продолжительность работ, смены)	F_3 (Стоимость работ, тыс. руб.)	F_4 (Предельная нагрузка на ресурсы, усл. ед.)
Минимальные трудозатраты (F_1)	20/142	2 229 631	40 175,5	14 107 562	229
Минимальная продолжительность работ (F_2)	20/142	2 229 631	40 175,5	14 107 562	229
Минимальная стоимость работ (F_3)	7/91	3 660 752	67 920,4	8 319 313	207
Минимальная предельная нагрузка на ресурсы (F_4)	8/84	3 354 267	62 565,7	9 351 126	167

Составлено автором

Следует отметить, что критерии F_1 (трудозатраты) и F_2 (продолжительность) сильно коррелируют — решения, оптимальные по одному критерию, так же оптимальны по-другому. Это объясняется прямой зависимостью между объемом работ и временем их выполнения при фиксированных нормах выработки.

Анализ Парето-фронта позволил установить диапазоны значений целевых критериев (табл. 15).

Таблица 15

Диапазоны значений целевых критериев

Критерий	Минимум	Максимум	Разброс	Относительная вариация
Трудозатраты (F_1)	2 229 631	3 660 752	1 431 121	64,2 %
Продолжительность работ (F_2)	40 175,5	67 920,4	27 744,8	69,1 %
Стоимость работ (F_3)	8 319 313	14 107 562	5 788 249	69,6 %
Предельная нагрузка на ресурсы (F_4)	167	300	133	79,6 %

Составлено автором

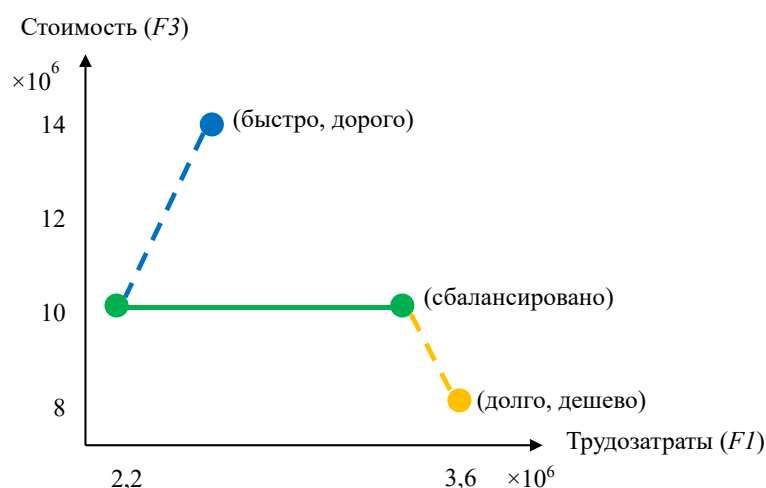


Рисунок 12. Визуализация компромиссного сочетания целевых критериев многокритериальной оптимизации (случай: «стоимость — трудозатраты») (разработано автором)

Также установлены ключевые компромиссы между критериями:

1. Экономия стоимости работ ~41 % (с 14,1 до 8,3 млн руб.). Это требует увеличения трудозатрат на ~64 % и продолжительности работ на ~69 %.

2. Снижение предельной нагрузки на ресурсы на 27 % (с 229 до 167 ед.). Это увеличивает стоимость работ на ~34 % и трудозатраты на ~50 %.
3. Минимизация продолжительности работ (40 тыс. смен). Возможна только при использовании технологических решений № 1 и № 4 (высокопроизводительных), что увеличивает стоимость строительства на ~69 %.

На рисунке 12 в графической форме представлено компромиссное сочетание целевых критериев многокритериальной оптимизации (случай: «стоимость — трудозатраты»).

В таблице 16 представлена статистика применения технологических решений на основе многокритериальной оптимизации с помощью генетического алгоритма.

Таблица 16

Частота назначения технологических решений по всему Парето-фронту

Технологическое решение	Количество назначений	Доля, %	Интерпретация
3 (экономичное)	1 364	33,14 %	Наиболее универсально для баланса «стоимость-качество»
4 (цифровое)	1 027	24,95 %	Часто выбирается для крупных участков и критических зон
2 (зонированное)	1 048	25,46 %	Эффективно при переменной геологии и средних объёмах
1 (поточное)	372	9,04 %	Применяется точно на участках с максимальными объёмами работ
5 (сезонное)	305	7,41 %	Используется для участков со сложными погодными-климатическими условиями

Составлено автором

Таким образом, технологическое решение № 3 («Экономичное») преобладает в Парето-фронте, что подтверждает его эффективность для минимизации стоимости работ при приемлемых сроках. Технологические решения № 2 и № 4 применяются выборочно — там, где критичны скорость или точность.

Далее представлен детальный анализ выбранных решений, полученных с применением генетического алгоритма:

1. Решение № 20/142 — «Минимальные трудозатраты и сроки». В таблице 17 показано распределение технологических решений по 28 участкам.

Таблица 17

Назначение технологических решений по 28 участкам, полученное в рамках решения № 20/142

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	3	4	4	4	2	2	1	4	4	4	5	2	2	4

Составлено автором

Для решения № 20/142 характерны:

- самые низкие трудозатраты: 2,23 млн маш-ч;
- минимальная продолжительность: 40,2 тыс. смен (~7,7 лет при 2 сменах/сут);
- максимальная стоимость: 14,11 млрд руб.;
- высокая предельная нагрузка: 229 усл. ед./смену.

Такое распределение технологических решений можно применять при жёстких сроках возведения железнодорожного земляного полотна и достаточном бюджете строительства.

2. Решение № 7/91 — «Минимальная стоимость». В таблице 18 показано распределение технологических решений по 28 участкам.

Таблица 18

**Назначение технологических решений
по 28 участкам, полученное в рамках решения № 7/91**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	1	3	3	4	3	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Составлено автором

Для решения № 7/91 характерны:

- минимальная стоимость: 8,43 млрд руб. (экономия средств ~41 %);
- высокие трудозатраты: 3,66 млн маш-ч (+64 %);
- увеличенная длительность: 67,9 тыс. смен (~13 лет);
- умеренная предельная нагрузка: 207 усл. ед./смену.

Такое распределение технологических решений будет оптимальным для бюджетно-ограниченного строительства с гибкими сроками.

3. Решение № 8/84 — «Минимальная предельная нагрузка на ресурсы». В таблице 19 показано распределение технологических решений по 28 участкам.

Таблица 19

**Назначение технологических решений
по 28 участкам, полученное в рамках решения № 8/84**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
3	3	2	3	1	2	3	3	3	4	3	3	4	3	4	2	3	4	2	3	3	3	3	3	3	3	3	5

Составлено автором

Для решения № 8/84 характерны:

- минимальная предельная нагрузка на ресурсы: 167 усл. ед./смену (снижение рисков на 27%);
- сбалансированная стоимость: 9,35 млрд руб.;
- средние трудозатраты и продолжительность строительства.

Такое распределение технологических решений предпочтительно при ограниченной доступности техники/персонала или в условиях транспортных ограничений.

В таблице 20 представлен анализ назначения технологических решений по некоторым участкам строительства железнодорожной линии.

Таблица 20

Участки с наиболее частым выбором технологических решений

№ участка	Объём насыпи, тыс. м ³	Наиболее частое технологическое решение	Обоснование
28	2 139,9	4	Наибольший объём работ: требуется высокая точность и производительность
1, 4, 7, 8	> 1 000	4 или 1	Большие объёмы: поточные/цифровые схемы эффективнее
13, 15, 17, 20	< 450	3	Малые объёмы: минимизация затрат приоритетна
2, 7, 26	Большая выемка	2, 3, 5	Сложные условия: гибкость или адаптивность важнее скорости

Составлено автором

Примеры назначений технологических решений:

- участки с насыпью более 1000 тыс. м³: 85 % назначенных технологических решений это № 1 или № 4;
- участки с выемкой более 100 тыс. м³: 72 % назначенных технологических решений это № 2, № 3 или № 5 (гибкие/адаптивные);
- участки без выемки (14, 15, 20, 24, 28): преобладает технологическое решение № 3 (экономия за счёт отсутствия сложных работ).

В итоге предлагаются следующие технологические сценарии (последовательности технологических решений) возведения земляного полотна для рассматриваемой железнодорожной линии:

1. *Технологический сценарий А: «Сжатые сроки, достаточный бюджет строительства».* Выбор решения № 20/142 обеспечивает минимальные трудозатраты и продолжительность работ. Ожидаемые результаты:

- завершение работ: ~7,7 лет (при 2 сменах/сут, 6 дн/нед);
- бюджет: ~14,1 млрд руб.;
- недостаток: высокая нагрузка на ресурсы (229 ед./смену).

2. *Технологический сценарий Б: «Ограниченный бюджет, гибкие сроки строительства».* Выбор решения № 7/91 (минимальная стоимость работ). Ожидаемые результаты:

- завершение работ: ~13 лет;
- бюджет: ~8,3 млрд руб. (экономия 5,8 млрд руб.);
- недостаток: удлинение сроков может повлиять на смежные проекты.

3. *Технологический сценарий В: «Сбалансированный подход к производству работ».* Выбор решения № 8/84 (компромисс по всем критериям). Ожидаемые результаты:

- завершение работ: ~12 лет;
- бюджет: ~9,4 млрд руб.;
- предельная нагрузка на ресурсы: 167 ед./смену;
- трудозатраты: 3,35 млн маш-ч.
- Практические шаги внедрения:
 - 1) *верификация данных:* проверить соответствие объёмов (в файле с исходными данными) актуальным проектным решениям;
 - 2) *корректировка под условия:* при наличии дополнительных ограничений (погодно-климатические условия, транспортная доступность, доступность техники) применить поправочные коэффициенты к нормативам в модели;
 - 3) *детализация графика:* для выбранного решения сформировать календарный план с привязкой к конкретным датам и ресурсам;
 - 4) *мониторинг исполнения:* использовать цифровые инструменты (при выборе технологических решений № 1 или № 4) для оперативного контроля отклонений от плана;
 - 5) *адаптация в процессе:* при изменении условий (погодно-климатические условия, поставки ресурсов) выполнить оптимизацию для оставшихся участков с учетом уже выполненных работ.

Представленные результаты являются *оптимизационной рекомендацией*. Окончательное решение должно учитывать экспертную инженерную оценку, актуальные расценки и нормативные требования.

Заключение

В рамках настоящего исследования была успешно решена задача многокритериальной оптимизации распределения пяти технологических схем устройства железнодорожного земляного полотна с усилением геосинтетическим материалом по 28 строительным участкам, характеризующимся различными проектными объёмами насыпей и выемок. Математическая постановка задачи, сформулированная в виде многокритериальной комбинаторной оптимизационной модели с дискретными переменными решения и глобальным ограничением обязательного использования каждого технологического решения, потребовала применения эволюционных методов поиска ввиду принадлежности задачи к классу *NP*-трудных и наличия нелинейных, негладких целевых функций, в частности критерия минимизации предельной нагрузки на ресурсы. Реализация генетического алгоритма *NSGA-II* в среде *Matlab* позволила получить аппроксимацию Парето-фронта, включающую множество не доминирующих решений, каждое из которых представляет собой компромисс между четырьмя конфликтующими критериями: суммарными трудозатратами, общей продолжительностью работ, стоимостью производства строительно-монтажных работ и максимальной одновременной нагрузкой на материально-технические ресурсы.

Анализ полученных результатов продемонстрировал высокую вариативность значений целевых функций в пределах Парето-множества. Это подтверждает наличие существенных компромиссов между экономическими, временными и ресурсными показателями железнодорожного строительства, при этом доминирующее использование экономичного технологического решения в оптимальных результатах свидетельствует о его универсальной эффективности для минимизации стоимости при сохранении приемлемых значений остальных критериев, тогда как поточное и цифровое технологические решения находят целесообразное применение преимущественно на участках с максимальными объёмами работ или повышенными требованиями к точности и срокам выполнения.

Практическая значимость работы заключается в разработке методического подхода, позволяющего разработчику организационно-технологической документации на основе сформированного множества Парето-оптимальных альтернатив осуществлять обоснованный выбор финального варианта распределения технологических решений с учётом приоритетов конкретного инвестиционно-строительного проекта, будь то минимизация бюджета, сокращение календарных сроков или снижение проблем, связанных с предельной потребностью в ресурсах.

Перспективными направлениями дальнейших исследований представляются: интеграция стохастических моделей неопределённости исходных данных (вариативность инженерно-геологических условий, погодно-климатических факторов, колебания затрат на материалы и производство работ) в структуру многокритериальной оптимизации для повышения качества принимаемых решений; разработка гибридных алгоритмов, сочетающих генетический поиск с методами локальной оптимизации или машинного обучения для ускорения сходимости и повышения качества аппроксимации Парето-фронта; расширение модели за счёт учёта динамических ограничений, связанных с доставкой строительных материалов, доступностью специализированной техники и квалификацией персонала в различные периоды строительства; а также адаптация предложенного методического аппарата к задачам оптимизации смежных видов работ при сооружении объектов железнодорожной инфраструктуры. В итоге это позволит перейти к комплексному многоуровневому планированию инвестиционно-строительных проектов транспортной отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полянский А. В. Интеллектуализация мониторинга и регулирования реализации технологических процессов в железнодорожном строительстве / А. В. Полянский // Транспортные сооружения. — 2022. — Т. 9, № 3. — URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS322.pdf>. — DOI: [10.15862/05SATS322](https://doi.org/10.15862/05SATS322). — EDN: [WLWSGL](https://www.edn.net/WLWSGL). (дата обращения: 17.04.2026).
2. Полянский А. В. Планирование ресурсов технологического процесса строительства объектов железнодорожного пути с применением искусственной нейронной сети / А. В. Полянский // Транспортные сооружения. — 2021. — Т. 8, № 3. — URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS321.pdf>. — DOI: [10.15862/01SATS321](https://doi.org/10.15862/01SATS321). — EDN: [BNVMFC](https://www.edn.net/BNVMFC). (дата обращения: 12.05.2026).
3. Hassan F. Computer-assisted separation of design-build contract requirements to support subcontract drafting / F. Hassan, T. Le // Automation in Construction. — 2021. — Т. 122, № 2. — С. 103479. — URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/automation-in-construction/vol/122/suppl/C>. — DOI: [10.1016/j.autcon.2020.103479](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103479). (дата обращения: 27.04.2026).
4. Polyanskiy A. V. Scheduling of construction works in the formation of technological processes of railway construction using a genetic algorithm / A. V. Polyanskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Т. 1151, № 1. — С. 012018. — DOI: [10.1088/1757-899x/1151/1/012018](https://doi.org/10.1088/1757-899x/1151/1/012018). — EDN: [UDAALO](https://www.edn.net/UDAALO). (дата обращения: 14.05.2026).
5. Leo Kumar S.P. State of The Art-Intense Review on Artificial Intelligence Systems Application in Process Planning and Manufacturing / S.P. Leo Kumar // Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2017. — Т. 65, № 10. — С. 294–329. — URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/engineering-applications-of-artificial-intelligence/vol/65/suppl/C>. — DOI: [10.1016/j.engappai.2017.08.005](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.08.005). (дата обращения: 18.03.2026).
6. Полянский А. В. Искусственный интеллект как основа разработки и реализации организационно-технологических решений в строительстве высокоскоростных железных дорог / А. В. Полянский // Механизация строительства. — 2014. — № 1(835). — С. 15–18. — EDN: [RVEONZ](https://www.edn.net/RVEONZ). (дата обращения: 14.08.2026).
7. Полянский А. В. Эволюционная оптимизация продолжительности строительства транспортных объектов поточным методом / А. В. Полянский // Наука и техника транспорта. — 2018. — № 2. — С. 78–85. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35128158_86069009.pdf. — EDN: [XQZDVZ](https://www.edn.net/XQZDVZ). (дата обращения: 11.03.2026).
8. Lin L. Network modeling and evolutionary optimization for scheduling in manufacturing / L. Lin, X.-C. Hao, M. Gen, J. Jo // Journal of Intelligent Manufacturing. — 2012. — № 23. — С. 2237–2253. — URL: <https://search.proquest.com/openview/537c983935ad1ec2a534c9091ab32e15/1?pq-origsite=gscholar&cbl=32407>. — DOI: [10.1007/s10845-011-0569-6](https://doi.org/10.1007/s10845-011-0569-6). (дата обращения: 27.03.2026).
9. Buitrago M. Designing construction processes in buildings by heuristic optimization / M. Buitrago, J.M. Adam, Y.A. Alvarado [et al.] // Engineering Structures. — 2016. — № 3. — С. 1–10. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029615007737>. — DOI: [10.1016/j.engstruct.2015.12.009](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.009). (дата обращения: 17.04.2026).

10. El-Abbasy M.S. Finance-based scheduling multi-objective optimization: Benchmarking of evolutionary algorithms / M.S. El-Abbasy, A. Elazouni, T. Zayed // Automation in Construction. — 2020. — № 12. — С. 103392. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580520309729>. — DOI: [10.1016/j.autcon.2020.103392](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103392). (дата обращения: 21.03.2026).
11. Fung I. Application of GA Techniques for Solving Precedent Relationship Problem in Project Scheduling Optimization / I. Fung, C. Huang, V. Tam // Procedia Engineering. — 2011. — № 10. — С. 2527–2534. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811013956?via%3Dihub>. — DOI: [10.1016/j.proeng.2011.07.318](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.318). (дата обращения: 17.04.2026).
12. Faghihi V. Construction scheduling using Genetic Algorithm based on Building Information Model / V. Faghihi, K.F. Reinschmidt, J.H. Kang // Expert Systems with Applications. — 2014. — № 11. — С. 7565–7578. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417414003340>. — DOI: [10.1016/j.eswa.2014.05.047](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.047). (дата обращения: 11.05.2026).
13. Toklu Y.C. Application of genetic algorithms to construction scheduling with or without resource constraints / Y.C. Toklu // Canadian Journal of Civil Engineering. — 2011. — № 2. — С. 421–429. — URL: https://www.researchgate.net/publication/237188743_Application_of_genetic_algorithms_to_construction_scheduling_with_or_without_resource_constraints. — DOI: [10.1139/102-034](https://doi.org/10.1139/102-034). (дата обращения: 26.04.2026).
14. Deb K. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II / K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. — 2002. — Т. 6, № 2. — С. 182–197. — URL: https://sci2s.ugr.es/sites/default/files/files/Teaching/OtherPostGraduateCourses/Metaheuristics/Deb_NSGAII.pdf. — DOI: [10.1109/4235.996017](https://doi.org/10.1109/4235.996017). (дата обращения: 12.02.2026).
15. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms / K. Deb. — Chichester: John Wiley & Sons, 2001. — 497 с. — URL: https://www.researchgate.net/profile/Mahnaz-Moradijooz-2/post/What_is_the_best_methods_to_find_the_best_solution_among_a_Pareto_front/attachment/59d64b5a79197b80779a56d6/AS%3A479727648546816%401491387392546/download/DEB%5BKalyanmoy_Deb%5D_Multi-Objective_Optimization_Using%28BookFi.org%29.pdf. (дата обращения: 15.02.2026).
16. Deb K. Reference point based multi-objective optimization using evolutionary algorithms / K. Deb, J. Sundar, N.U.B. Rao, S. Chaudhuri // International Journal of Computational Intelligence Research. — 2006. — Т. 2, № 3. — С. 635–642. — URL: https://www.researchgate.net/publication/220741544_Reference_Point_Based_Multi-Objective_Optimization_Using_Evolutionary_Algorithms. — DOI: [10.5019/j.ijcir.2006.67](https://doi.org/10.5019/j.ijcir.2006.67). (дата обращения: 23.02.2026).

Polyanskiy Aleksey Viktorovich

Russian University of Transport, Moscow, Russia

E-mail: polal_82@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6190-0481>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=412433

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AFJ-6625-2022>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57459964000>

Multi-criteria selection of technological solutions for the construction of a railway subgrade using a genetic algorithm

Abstract. The presented article is devoted to solving the scientific and practical problem of multi-criteria selection of technological solutions for the construction of railway embankment on sections characterized by the presence of weak soils and requiring geosynthetic reinforcement. The relevance of the study is due to the high capital intensity of infrastructure projects, stringent regulatory requirements, and the need to take into account the nonlinear relationships between calendar deadlines, cost, labour input, and the maximum load on material and technical resources. The paper highlights the shortcomings of classical mathematical programming methods when solving problems with mixed discrete and continuous variables. A comprehensive mathematical model has been developed, which includes a formalized system consisting of four objective functions and strict constraints, describing the process of distributing five alternative technological solutions across twenty-eight production sites of railway subgrade. Due to the fact that the formulated problem belongs to the class of NP-hard combinatorial problems, a modified genetic algorithm for multi-criteria optimization was used as the main computational tool. The text provides a detailed description of the algorithmic solution scheme, the software implementation of which was carried out in the Matlab environment with support for automated data exchange. The results of the conducted computational experiment demonstrate the successful construction of an approximation of the Pareto front, consisting of a set of non-dominated plans. An analysis of engineering trade-offs and the statistics of the use of technological solutions was carried out, which made it possible to identify objective patterns in their assignment depending on the volume of earthworks and engineering and geological conditions. Special attention was paid to the issues of verifying the obtained data and adapting the model to the real conditions of railway construction. The practical significance of the study lies in the development of a scientifically grounded methodological approach that provides a tool for making management decisions under conditions of uncertainty and conflicting target indicators.

Keywords: technological solution; technological process; railway construction; railway subgrade; artificial intelligence; multi-criteria optimization; genetic algorithm