

На правах рукописи



Петрушин Алексей Валерьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ТРАССИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ  
В РАЙОНАХ С ВЫСОКОЙ СЕЙСМИЧНОСТЬЮ**

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и  
проектирование железных дорог

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Миронов Виктор Степанович

Официальные оппоненты:

Аккерман Геннадий Львович, доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», кафедра «Путь и железнодорожное строительство», профессор

Бушуев Николай Сергеевич, кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», профессор

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск.

Защита состоится «16» мая 2019 г., в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.15 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 7618.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), [www.miiit.ru](http://www.miiit.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Королев Вадим Вадимович



## **Общая характеристика диссертационной работы**

**Актуальность темы исследования.** Уровень угрозы и опасности сейсмического воздействия на инфраструктуру железнодорожного транспорта очевидны и требуют обязательного учета уже при укладке трассы на стадии разработки проекта железнодорожной линии.

Учет сейсмичности на стадии проектирования – требование свода правил<sup>1</sup> - направлено в первую очередь на обеспечение безопасности движения поездов. Вместе с этим должна быть обеспечена надежность эксплуатации, отсутствие аварийных (чрезвычайных) ситуаций (отказов), сбоев и аварий при функционировании железной дороги.

Однако на сегодняшний день на стадии укладки трассы данному вопросу не уделено должного внимания. Для повышения устойчивости и надежности земляного полотна и предотвращения масштабных разрушений при землетрясениях необходимо обеспечить однородность основной площадки земляного полотна - исключить такие типы поперечного профиля, как «полунасыпь-полувыемка», так как они характеризуются неоднородными грунтовыми условиями: насыпь – насыпной грунт, выемка – местные грунты. Это требование СП по существующей технологии разработки трассы учитывается при проектировании поперечного профиля земляного полотна. При необходимости производится корректировка продольного профиля и плана. Тем самым усложняется как процесс проектирования, так и выбор вариантов трассы.

В связи с этим вопросы совершенствования технологии проектирования трассы новой железнодорожной линии в условиях высокой сейсмичности следует считать актуальными.

### **Степень разработанности темы исследования**

Анализу строительных и эксплуатационных условий проектов новых железнодорожных линий, их влияния на основные экономические и технические параметры новой железнодорожной линии посвящены работы Переселенкова Г.С., Турбина И.В., Ткачевского И.Д., Ашпица Е.С., Аккермана Г.Л., Коншина Г.Г., Шахунянца Г.М., Быковой Н.М., Меркурьева Ю.С., Шестоперова В.Г., Алексеева Е.П., Казмирова И.П., Ольшановского Ч.Б., Дюнина А.К., Исаенко Э.П., Скутина А.И., Ядрошников В.И., Цернанга А.А., Матвиенко В.С. и др.

Несмотря на развитие электронно-вычислительной техники и наличие программных продуктов (систем автоматизированного проектирования (САПР)), которые позволяют сократить рутинные и долговременные операции при укладке трассы: вписывание кривых, построение продольного и

---

<sup>1</sup> СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах»

поперечного профилей, расчет объемов земляных работ и т.д., они не решают основных проблем проектирования, а являются инструментом для анализа и сравнения вариантов решений. В качестве примеров, можно назвать Robur, AutoCAD Civil, MX Rail, Card, Bentley.

В их основе лежат алгоритмы и технологии, разработанные учеными-железнодорожниками Турбиным И.В., Горинным А.В., Иоаннисяном А.И., Кондратченко А.П., Гороховцевым Б.И., Гавриленковым А.В., Кантором И.И., Житкевичем В.П., Быковым Ю.А., Аккерманом Г.Л., Свинцовым Е.С., Бушуевым Н.С., Шкурниковым С.В., Шварцфельдом В.С., Анисимовым В.А., Понариным А.С., Полосиным Ю.К., Подвербным В.А., Гончаруком С.М., Струченковым В.И., Бучкиным В.А. и др.

Как показал анализ научных работ, вопросы проектирования трассы в условиях высокой сейсмичности на сегодняшний день недостаточно изучены.

**Цель работы.** Целью данного исследования является совершенствование технологии трассирования и разработка рекомендаций по проектированию трассы железнодорожных линий на косогорных участках в условиях высокой сейсмичности.

В рамках существующей технологии трассирования предложена методика укладки трассы с учетом обеспечения однородности земляного полотна, как одного из антисейсмических мероприятий; даны рекомендуемые высоты насыпей и глубины выемок в различных природных условиях на косогорных ходах трассы.

**Задачи исследования:**

1) выполнить анализ особенностей условий, тенденций развития и степени изученности вопросов проектирования актуальных проектов новых грузообразующих железнодорожных линий;

2) исследовать способы обеспечения антисейсмического требования по защите земляного полотна железной дороги (устройства однородной площадки земляного полотна);

3) выполнить технико-экономический анализ наиболее рациональной укладки трассы в поперечном сечении земляного полотна;

4) разработать технологию проектирования трассы железнодорожных линий на косогорных участках в условиях высокой сейсмичности и апробировать ее;

5) выполнить варианты расчеты по поиску наиболее рационального решения по корректировке оси трассы на косогорных участках для обеспечения однородности основной площадки земляного полотна в районах с высокой сейсмичностью; дать рекомендации по проектированию трассы железнодорожных линий в указанных условиях;

б) оценить эффективность проектных решений в проектах железных дорог с учетом вероятности возникновения землетрясений.

**Объектом исследования** является трасса железнодорожной линии на косогорных участках в условиях высокой сейсмичности района проектирования.

**Предметом исследования** является выбор и обоснование проектных решений при проектировании трассы новой железнодорожной линии на косогорных участках в районах с высокой сейсмичностью.

#### **Научная новизна исследования:**

1) разработана классификация косогорных участков по виду грунтов, геометрическим параметрам конструкции земляного полотна и категориям по сейсмическим свойствам;

2) установлена зависимость между геометрическими параметрами проектирования земляного полотна и крутизной косогора для грунтов, относящихся к разным группам по сейсмическим свойствам;

3) получены аналитические зависимости наиболее рациональных решений по корректировке оси трассы в продольном профиле и плане на косогорных участках для обеспечения однородности основной площадки земляного полотна в районах с высокой сейсмичностью;

4) разработана технология проектирования линий на косогорных участках в условиях высокой сейсмичности и предложена методика определения эффективности антисейсмических мероприятий с учетом вероятности землетрясений.

#### **Теоретическая и практическая значимость**

Выполненные исследования позволяют произвести обоснованную укладку трассы новых железнодорожных линий в условиях высокой сейсмичности с учетом требований по обеспечению однородности основания основной площадки земляного полотна.

Предложенная технология проектирования может быть использована при укладке трассы на стадии разработки проекта, а также при отделке (корректировке) трассы для рабочей документации.

Приведенный в диссертации алгоритм реализации технологии может быть использован в автоматизированных системах проектирования (САПР) новых железных дорог.

Потенциальными потребителями работы являются проектные организации, а также научно-исследовательские институты, осуществляющие разработку проектов и исследования по проектированию новых железнодорожных линий, а также разработчики САПР железных дорог.

### **Методология и методы исследования**

При анализе задачи исследования и разработке способов их решения использован системный подход.

В исследовании использованы разделы классической математики, в том числе некоторые положения аналитической геометрии на плоскости, методы решения линейных уравнений и другие.

При обосновании проектных решений применены методы выбора оптимальных решений, разработанные и используемые в практике изысканий и проектирования железных дорог. Определение критерия выбора решения в условиях неопределенности и риска базируется на основных принципах теории игр и принятия решений.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- 1) классификация косогорных участков по виду грунтов, геометрическим параметрам конструкции земляного полотна и категориям по сейсмическим свойствам;
- 2) зависимости граничных значений высот насыпей и глубин выемок, обеспечивающие однородность земляного полотна;
- 3) результаты исследования рациональных решений по укладке трассы на участках с различными уклонами косогора и разных видах грунтов в районах с высокой сейсмичностью;
- 4) уравнения границ пространственного коридора смещения оси трассы для обеспечения однородности основной площадки земляного полотна;
- 5) технология проектирования трассы железнодорожной линии на косогорных участках в условиях высокой сейсмичности и ее алгоритм для начальной стадии проектирования новой железнодорожной линии и разработки рабочей документации;
- 6) оценка эффективности антисейсмических решений в проектах железных дорог в условиях неопределенности исходной информации.

#### **Степень достоверности и апробации результатов**

Основные положения диссертации докладывались и получили одобрение на заседаниях кафедр «Изыскания и проектирование ж. д.» и «Проектирование и строительство ж.д.» МГУПС (МИИТ) – 2011 – 2018 гг.; кафедры «Изыскания и проектирование ж. д.» ПГУПС – 2013 г. и 2016 г.; научно-практической конференции «Неделя науки» 2013 г.; научно-методической конференции «Путь XXI века» (ПГУПС) 2013 г.; международной научно-практической конференции «Транспорт-2013» в Ростове-на-Дону 2013 г.; XI международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.М. Шахунянца 2014 г., Седьмой Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (ИргУПС 2016), XVIII научно-

практической конференции «Безопасность движения поездов» (РУТ (МИИТ) 2017), а также вошли в состав научно-исследовательской работы кафедры «Проектирование и строительство ж.д.» МГУПС (МИИТ) 2012-2014 гг. по теме: «Обеспечение надежности трассы железнодорожной линии в районах с высокой сейсмичностью при разработке проекта».

Предложенная технология проектирования трассы на косогорных участках апробирована на примере проекта участка новой железнодорожной линии Кызыл-Курагино.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 3 работы в рецензируемых научных изданиях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы. Объем работы составляет 205 стр. машинописного текста, в том числе 29 рисунков, 28 таблиц и приложение – 93 стр. Список использованных источников содержит 138 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель, задачи, объект и предмет исследования. Указаны методы исследования и сформулированы основные положения научной новизны и практической ценности разработанных решений.

**В первой главе** выполнен обзор и анализ особенностей условий проектирования актуальных новых железных дорог, в частности – грузообразующих линий. Эта новая категория железных дорог была введена «Стратегией развития до 2030 года»<sup>2</sup>. Грузообразующие линии предназначены для транспортного обеспечения развития новых месторождения полезных ископаемых и промышленных зон. Их планируется построить порядка 4.6 тысяч км, что составляет порядка 29% от общего числа новых железнодорожных линий по минимальному варианту развития железнодорожного транспорта до 2030 года и 23% – по максимальному.

Выполнен анализ строительных и эксплуатационных условий проектов новых грузообразующих железнодорожных линий, их влияния на основные экономические и технические параметры новой железнодорожной линии.

Ввиду географического расположения грузообразующих линий в эксплуатационные затраты необходимо закладывать затраты на превентивные и защитные мероприятия от воздействий окружающей среды, немаловажным из которых является защита от сейсмического воздействия.

---

<sup>2</sup> Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года.

Отмечено, что большинство и по количеству, и по протяженности проектов грузообразующих линий предполагается реализовать в Сибири (около 2643 км – 53% от общего числа планируемых новых грузообразующих линий) и на Дальнем Востоке (около 2207 км – 44%). Данные регионы известны своими сложными условиями строительства и эксплуатации, наиболее опасным и непредсказуемым из которых является высокая сейсмичность (5-8 баллов и 5-10 баллов соответственно).

Поэтому проблема проектирования грузообразующих линий в районах с высокой сейсмичностью является актуальной в современных условиях.

**Во второй главе** выполнен обзор мирового опыта защиты от сейсмического воздействия.

Отмечено, что в последние годы исследования ученых обращены к сейсмоизоляционным системам, используемым в основном для зданий и локальных сооружений (таких как мосты): устройство сейсмоизолирующих скользящих поясов, сейсмоизолирующие фундаменты на упругих опорах (здания с гибким нижним этажом, здания на резиновых опорах) и на кинематических опорах гравитационного типа – и системам сейсмогашения – демпферам.

В то же время вопросам сейсмозащиты трассы железнодорожной линии внимание уделено недостаточно, что подтверждает актуальность данного вопроса.

Выполнен анализ накопленного мирового опыта по сейсмическому районированию и рассмотрены мероприятия по защите железных дорог и искусственных сооружений, указанные в Своде правил<sup>3</sup>, и сделаны следующие выводы:

1) вопрос укладки трассы в районах с высокой сейсмичностью недостаточно исследован;

2) в существующей практике высокая сейсмичность района проектирования учитывается на стадии разработки рабочей документации при проектировании поперечных профилей земляного полотна и мероприятий по защите земляного полотна и искусственных сооружений. На предпроектной и проектной стадиях при укладке трассы это не учитывается.

**В третьей главе** выполнена классификация косогорных участков по виду грунтов, геометрическим параметрам конструкции земляного полотна с учетом сейсмических условий. Рассмотрен способ реализации антисейсмического требования по защите земляного полотна железной дороги – устройство однородной площадки земляного полотна – и определено

---

<sup>3</sup> СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах»



оптимальное решение при корректировке положения трассы. В ходе исследований выполнено следующее.

Проведен анализ факторов, влияющих на укладку трассы железной дороги. Сделан вывод о том, что оценка по технико-экономическим показателям вариантов трассы необходима уже при ее укладке. Это позволяет выявить конкурентноспособные варианты для последующего трассирования дороги, детального их сравнения и выбора окончательного варианта трассы.

В исследовании разработана Классификация косогорных участков по виду грунтов, геометрическим параметрам конструкции земляного полотна и категориям, учитывающая их сейсмические свойства (таблица 1).

В соответствии со Сводом правил<sup>4</sup> были выделены геологические слои по видам грунтов и каждому присвоен свой порядковый номер. Далее косогорные участки с такими видами грунтов были разделены на 2 группы (А и Б соответственно) по ширине основной площадки, а затем в зависимости от типа поперечного профиля земляного полотна – насыпи и выемки – и крутизны откосов земляного полотна дополнительно были разбиты на 5 и 2 подгруппы соответственно.

В соответствии со Сводом правил<sup>5</sup> каждому варианту косогорного участка была присвоена категория группы по сейсмическим свойствам.

Рассмотрены варианты обеспечения одного из требований норм проектирования по защите земляного полотна железной дороги от сейсмического воздействия – устройство однородной площадки земляного полотна – за счет корректировки трассы в плане или продольном профиле.

Условие сохранения однородности основной площадки земляного полотна – исключение таких типов поперечного профиля земляного полотна, как полунасыпь-полувыемка (часть поперечного профиля является насыпью, часть выемкой), так как они характеризуется неоднородными грунтовыми условиями: насыпь – насыпной грунт, выемка – местные грунты, и оставление только насыпей или только выемок.

Для соблюдения этого условия были использованы так называемые «коридор профиля» и «коридор плана».

«Коридор профиля» – область в продольном профиле трассы, ограниченная отметками минимальных высот насыпей ( $h_n$ ) и глубин выемок ( $h_v$ ), вне пространства которой должна располагаться проектная линия (рисунок 1).

«Коридор плана» – область в плане трассы, вне пространства которой должна располагаться проектная ось.

---

<sup>4</sup> СП 238.1326000.2015 «Железнодорожный путь»

<sup>5</sup> СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах»

Таблица 1 - Классификация косогорных участков по виду грунтов, геометрическим параметрам конструкций земляного полотна с учётом сейсмических условий

Параметры земляного полотна	Группы						
	А – недренирующие грунты			Б – дренирующие грунты*			
Ширина основной площадки в зависимости от категорий ж.-д. линии	11.7 7.6 7.3 7.1			10.7 6.6 6.4 6.2			
Виды грунтов	<b>Подгруппы</b>						
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Крутизна откоса насыпей: до 6 м от 6 м до 12 м	глинистые и пылеватые грунты в районах избыточного увлажнения, а также пески однородные, мелкие и пылеватые	глинистые грунты тугопластичной консистенции и крупнообломочные грунты с глинистым заполнителем такой же консистенции	пески мелкие и пылеватые, глинистые и пылеватые, глинистые с конгломератом и полутвердой консистенции, крупнообломочные с глинистым заполнителем такой же консистенции, раздробленные скальные легко выветривающиеся	раздробленные скальные выветривающиеся	пески мелкие с барханной в районах засушливым климатом	крупные и средние крупности, крупнообломочные с песчаным заполнителем	раздробленные скальные выветривающиеся
Крутизна откоса выемок: до 6 м от 6 м до 12 м	1:1.75 1:2	1:2 Индивидуальный проект	1:1.5 1:1.75	1:1.5 1:1.5	1:2 1:2	1:1.5 1:1.5	1:1.5 1:1.5
Категория группы по сейсмическим свойствам	III	II	II	II	II	II	I

\*К дренирующим грунтам по условиям работы земляного полотна следует относить грунты, имеющие при максимальной плотности по стандартному уплотнению коэффициент фильтрации не менее 0,5 м/сут, содержащие менее 10% частиц по массе размером менее 0,1 мм.

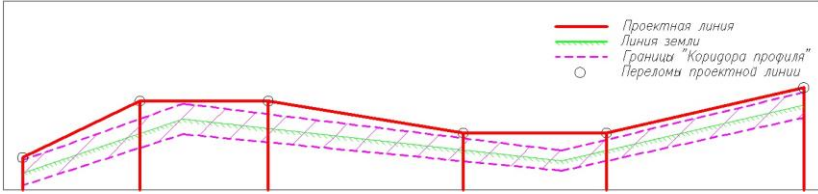


Рисунок 1 - Укладка проектной линии вне «коридора профиля»

Получены формулы минимальных высоты насыпей и глубины выемок, величины необходимых сдвигов трассы для насыпи и выемки в плане для вновь укладываемой трассы и трассы на этапе разработки рабочей документации.

Для вновь укладываемой трассы на стадии проекта:

$$h_n = h_b = \frac{0,5B}{k}, \quad (1)$$

где  $B$  – ширина основной площадки земляного полотна;  $k$  – заложение откоса косогора.

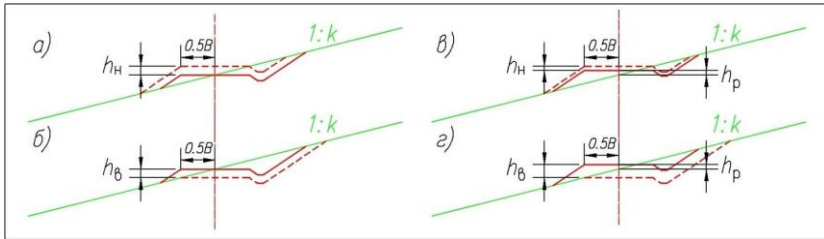


Рисунок 2 - Схемы для расчета минимальных высот насыпей и глубин выемок

Величины необходимых сдвигов трассы для насыпи и выемки в плане (рисунок 3):

$$\Delta_n = \Delta_b = 0,5B \quad (2)$$

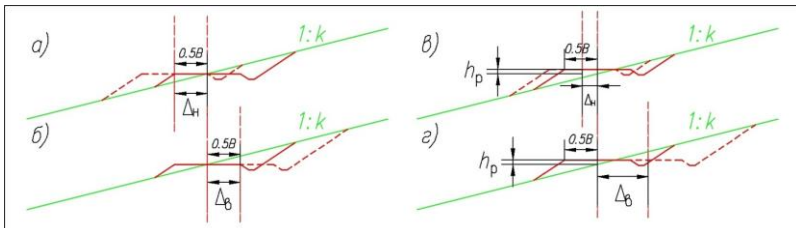


Рисунок 3 - Схемы для расчета сдвигов трассы в плане для насыпи и выемки

Корректировка трассы на этапе разработки рабочей документации показана на рисунке 4.

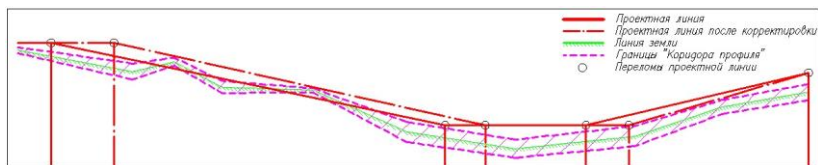


Рисунок 4 - Корректировка положения проектной линии для обеспечения однородности основной площадки

Границы «коридора профиля» и «коридора плана» в этом случае определяются формулами:

$$h_n = \frac{0,5B}{k} - h_p \quad (3)$$

$$h_b = \frac{0,5B}{k} + h_p \quad (4)$$

$$\Delta_n = 0,5B - h_p k \quad (5)$$

$$\Delta_b = 0,5B + h_p k \quad (6)$$

где  $h_p$  – рабочая отметка ранее уложенной проектной линии.

Проведено исследование зависимости стоимости производства земляных работ от крутизны косогора при различных видах грунтов в соответствии с классификацией косогорных участков по виду грунтов, геометрическим параметрам земляного полотна с учетом сейсмических условий (см. таблицу 1) на основе координатной модели поперечного профиля земляного полотна железнодорожной линии и получены результаты, представленные в таблице 2.

Выполнены варианты расчеты по поиску оптимального решения при смещении оси трассы на косогорных участках для выполнения требований по обеспечению однородности основной площадки земляного полотна в районах с высокой сейсмичностью (таблица 3 и рисунки 5-6) и получены выводы по рациональному смещению оси трассы (решение с одновременным смещением оси трассы в продольном профиле и плане).

Таблица 2 - Рациональные решения при различных видах грунтов и уклоне косогора от 1:10 до 1:3

	Категория по сейсмическим свойствам, грунты		
	I	II	III
Уклон	Раздробленные скальные слабо-выветривающиеся	Крупнообломочные и крупнообломочные с песчаным заполнителем; пески гравелистые крупные и средней крупности; пески мелкие барханные в районах с засушливым климатом; раздробленные скальные выветривающиеся; раздробленные скальные легко выветривающиеся; пески мелкие и пылеватые; глинистые грунты (в том числе лессовидные) твердой и полутвердой консистенции; крупнообломочные с глинистым заполнителем такой же консистенции; глинистые грунты тугопластичной консистенции и крупнообломочные грунты с глинистым заполнителем такой же консистенции	Глинистые и пылеватые грунты в районах избыточного увлажнения, а также пески однородные, мелкие и пылеватые
1:10 – 1:7	Смещение в продольном профиле и плане в выемку на величину от 0,35 до 1,95 м и от 3,55 до 5,85 м		Смещения оси трассы в плане и продольном профиле в выемку на величину от 3,10 до 5,35 м и от 0,31 до 0,76 м
1:7 – 1:3			Смещение оси трассы в плане и продольном профиле в насыпь на величину от 3,1 до 5,35 м и от 0,43 до 1,78 м

Таблица 3 - Варианты оптимальных решений смещения оси трассы в продольном профиле и плане с минимальной площадью поперечного профиля в расчетном сечении  $i$ 

№	Вариант
1	$\Delta_{нас}$
2	$0.25 h_{нас} + 0.75 \Delta_{нас}$
3	$0.5 h_{нас} + 0.5 \Delta_{нас}$
4	$0.75 h_{нас} + 0.25 \Delta_{нас}$
5	$h_{нас}$

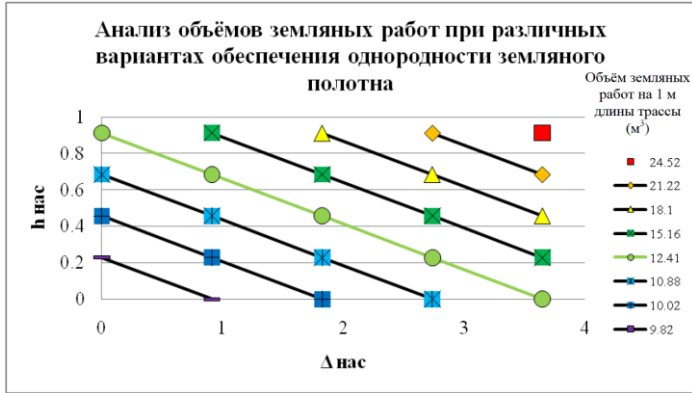


Рисунок 5 – Поиск оптимального решения при смещении трассы в профиле и плане.  
Варианты с оптимальным решением – «12.41»

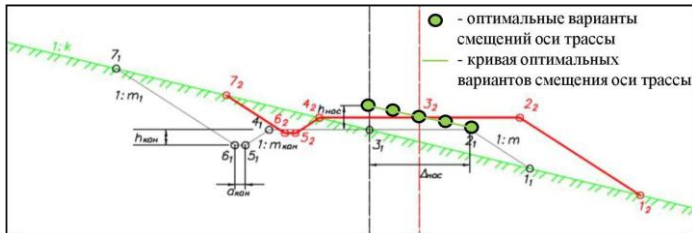


Рисунок 6 – Схема поиска оптимального решения для смещения оси трассы в продольном профиле и плане

Оптимальные решения смещения оси трассы в продольном профиле и плане находятся в линейной зависимости, которую можно описать уравнением:

$$y = -\frac{h_{\text{нас}}}{\Delta_{\text{нас}}}x + h_{\text{нас}} \quad (7)$$

где  $h_{\text{нас}}$  – смещение оси трассы в продольном профиле в насыпь,  $\Delta_{\text{нас}}$  – смещение оси трассы в плане в насыпь,  $y$  – возможные смещения в профиле (от 0 до  $h_{\text{нас}}$ ),  $x$  – возможные смещения в плане (от 0 до  $\Delta_{\text{нас}}$ ).

Аналогично при смещении в выемку:

$$y = -\frac{h_{\text{выем}}}{\Delta_{\text{выем}}}x + h_{\text{выем}} \quad (8)$$

где  $h_{\text{выем}}$  – смещение оси трассы в продольном профиле в выемку,  $\Delta_{\text{выем}}$  – смещение оси трассы в плане в выемку,  $y$  – возможные смещения в профиле (от 0 до  $h_{\text{выем}}$ ),  $x$  – возможные смещения в плане (от 0 до  $\Delta_{\text{выем}}$ ).

С использованием приведенных положений разработана технология проектирования трассы железнодорожной линии на косогорных участках в

условиях высокой сейсмичности, которая может быть использована как на стадии проекта новой железнодорожной линии, так и разработке рабочей документации. На рисунке 7 приведен алгоритм данной технологии.

В блоке 1 «**Определение исходных данных**» должны быть заданы основные характеристики линии, определяющие общую для железной дороги (участка) информацию: категорию линии, число главных путей, вид грунта, используемого для отсыпки насыпей, а также инженерно-геологическую характеристику основания. Эти данные определяют геометрические размеры земляного полотна, как ширину основной площадки и крутизну откосов.

В блоке 2 «**Локализация косогорных участков**» производится отбор участков на основе анализа исходных данных, в частности рельефа района проектирования (крутизны косогора и уклона земли в продольном направлении). Отбираются участки с поперечным профилем в виде полунасыпи-полувыемки.

Предлагаемая методика предназначена для участков линии с крутизной косогора от 1:10 до 1:3 с грунтами I, II, III группы по сейсмическим свойствам с благоприятными физико-геологическими процессами (отсутствуют оползни, осыпи, обвалы, курумы и т.д.).

При установленных границах коридора (рисунок 8) участки с полунасыпью-полувыемкой определяются точками пересечения проектной линии с границами коридора.

Границы участков с полунасыпью-полувыемкой можно также определить расчетом. Для этого сначала необходимо выделить нулевые места на продольном профиле трассы (центр искоемых участков), а затем, на основе данных о местности и трассе, определить границы этих участков по формуле:

$$l = \frac{1000 \cdot B}{k \cdot |i - i_m|},$$

где  $l$  – искомая длина, определяющая положения характерных точек на продольном профиле трассы;  $i$  – уклон проектной линии в нулевом месте;  $i_m$  – продольный уклон земли в нулевом месте;  $k$  – заложение откоса косогора;  $B$  – ширина основной площадки земляного полотна.

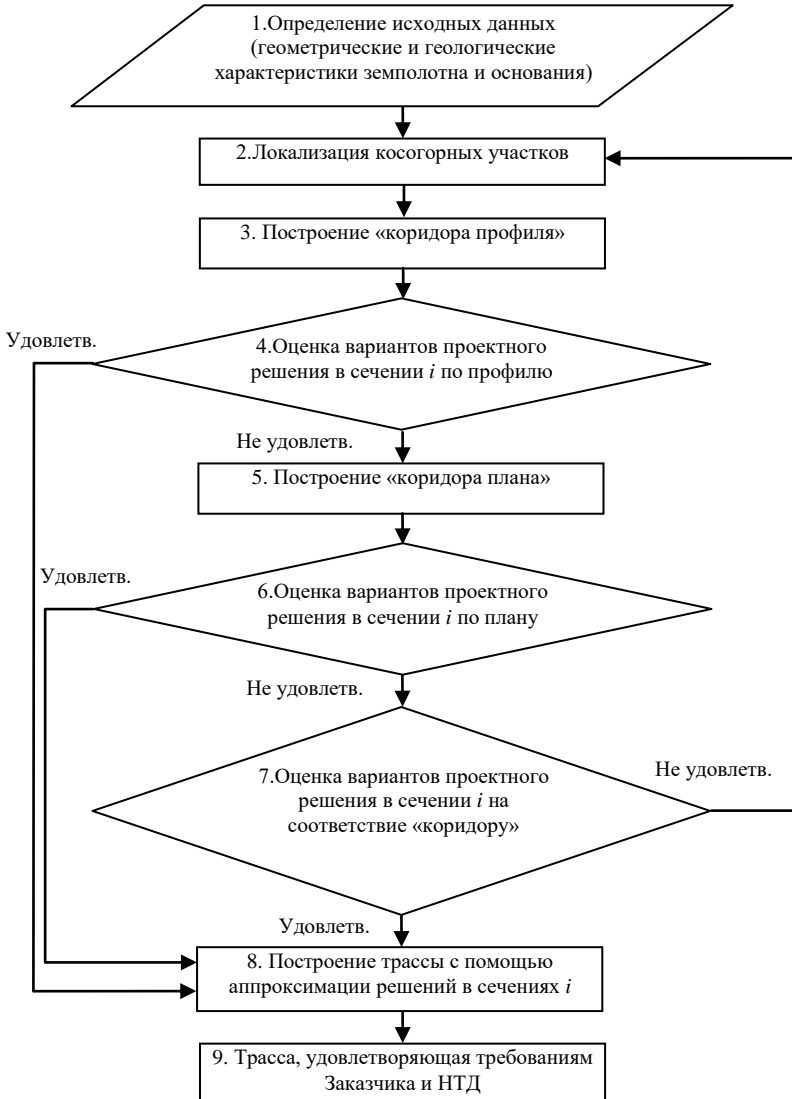


Рисунок 7 - Блок-схема алгоритма укладки трассы железной дороги в условиях высокой сейсмичности: сечение  $i$  – расчетное сечение



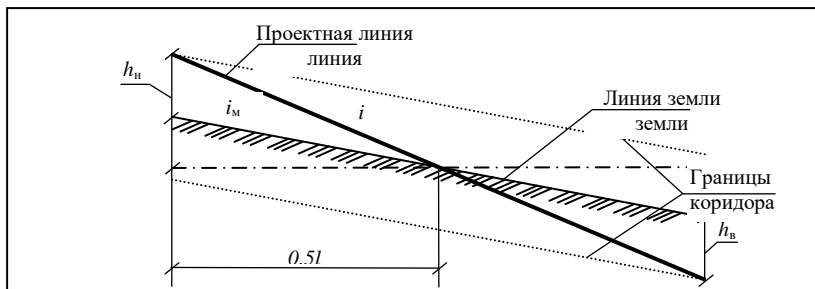


Рисунок 8 - К расчету длины косого участка с полунасыпью-полувыемкой

В блоке 3 «Построение коридора профиля» на основе ранее представленных формул (1), (3) и (4) осуществляется построение «коридора профиля» по выделенным участкам.

В блоке 4 «Оценка вариантов проектных решений в сечении  $i$  по профилю» производится анализ возможных проектных решений по применению их в проекте: поднять/опустить проектную линию, повысить/понизить величину уклона проектной линии с учетом минимальных рабочих отметок в местах размещения водопропускных сооружений, по снегозаносимости с учетом тяговых характеристик подвижного состава в соответствии с техническим заданием и т. д.

В случае невозможности удовлетворения выбранного варианта по результатам анализа поставленным условиям на основе формул (2), (5) и (6) осуществляется операция блока 5 «Построение коридора плана».

В блоке 6 «Оценка вариантов проектных решений в сечении  $i$  по плану» производится анализ возможных проектных решений: смещение плана трассы вправо/влево по ходу увеличения пикетажа, увеличение/уменьшение радиусов кривых, укладка смежных кривых с учетом условий местности, локальных препятствий, барьерных мест, эксплуатационных характеристик будущей линии и т.д.

В случае невозможности реализации возможных вариантов проектных решений поставленным условиям в блоке 7 «Оценка вариантов проектных решений в сечении  $i$  на соответствие пространственному коридору» производится анализ вариантов проектных решений, соответствующих уравнениям (7) и (8).

Если по результатам анализа выбранные варианты не удовлетворяют поставленным условиям, то происходит возвращение к блоку 2, описанному ранее.

Но если в результате операций блоков 5, 6 или 7 были получены положительные результаты, то происходит переход к блоку 8 «Построение

трассы методом аппроксимации проектных решений в сечении  $i$ » и блоку 9 «Трасса, удовлетворяющая требованиям Заказчика и нормативно-технической документации (НТД)», в которых при сборе всех удовлетворяющих проектных решений методом аппроксимации будет получена трасса железнодорожной линии, удовлетворяющая исходным данным.

В четвертой главе описаны результаты апробации предложенной технологии на примере проекта участка новой железнодорожной линии Кызыл-Курагино, расположенной между ст. Курагино Красноярского края и Элегестским угольным месторождением республики Тыва.

В результате использования технологии проектирования трассы железнодорожной линии в условиях высокой сейсмичности из 29 выявленных участков на 9-ти участках была выполнена корректировки трассы в продольном профиле и плане. Ввиду удаленности участков друг от друга применение метода аппроксимации не потребовалось.

Таблица 4 - Характеристики трассы до и после применения метода

Показатель	До корректировки	После корректировки
Длина рассматриваемого участка, км	21,0	21,1
Количество косогорных участков с полунасыпями-полувыемками	29	20
Суммарная протяженность косогорных участков с полунасыпями-полувыемками, % от длины рассматриваемого участка	711 м (~4 %)	370 м (~2 %)

На примере двух участков железнодорожной линии Кызыл-Курагино произведена оценка эффективности проектных решений с учетом неопределенности исходной информации (вероятности возникновения землетрясений).

Для условий рассматриваемой задачи подходят различные критерии принятия решений с учетом неопределенности. Учитывая одноразовый характер реализации решения, а также наличие вероятностных карт по районам проектирования, подходящим критерием для принятия решений был принят критерий Байеса:

$$E_0 = \left\{ E_{i_0} \left| E_{i_0} \in E \wedge e_{i_0} = \max_i \sum_{j=1}^n e_{ij} q_j \wedge \sum_{j=1}^n q_j = 1 \right. \right\}$$

где  $E_0$  – множество оптимальных вариантов проектных решений;

$E_{i_0}$  – варианты оптимальных проектных решений, которые принадлежат множеству вариантов  $E$ ;  $E$  – множество вариантов проектных решений;  $e_{i_0}$  – оптимальный результат варианта оптимального проектного решения  $E_{i_0}$ ;  $e_{ij}$  – результат варианта проектного решения  $E_i$  при внешнем состоянии  $F_j$ ;  $q_j$  – вероятность появления внешнего состояния  $F_j$ .

Единственным фактором неопределенности в данной задаче является факт реализации землетрясения. Возможны два сценария условий эксплуатации линии:  $F_I$  – землетрясение состоялось;  $F_{II}$  – землетрясение не состоялось.

При разработке проекта по постоянным устройствам и сооружениям возможны два проектных решения:  $E_1$  – без учета мероприятий по защите от землетрясений;  $E_2$  – с учетом указанных мероприятий.

Показатели общего критерия принятия решений в условиях неопределенности Байеса:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_1 = K_1 \cdot P_I + (K_1 + \Delta K)(1 - P_I) \\ \mathcal{E}_2 = K_2 \cdot P_I + K_2(1 - P_I) \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \mathcal{E}_1 = (K_1 + \Delta K) - \Delta K P_I \\ \mathcal{E}_2 = K_2 \end{cases}$$

где  $P_I$  – вероятность факта реализации землетрясения.

Таблица 5 - Матрица строительных расходов (проект Кызыл-Курагино)

№ проектного решения	Вариант эксплуатационных условий	
	$F_I$	$F_{II}$
участок км 294 – 296		
$E_1$	101.18	122.59
$E_2$	115.46	115.46
участок км 298 – 300		
$E_1$	7.71	7.97
$E_2$	7.88	7.88

По графикам зависимостей  $\mathcal{E}_1(P_I)$  и  $\mathcal{E}_2(P_I)$ , представленным на рисунках 11 и 12, видно, что при вероятности землетрясений менее 33.3% большим эффектом обладает решение строительства сооружений без учета мероприятий по защите от землетрясений, однако при вероятности более 33.3% эффективнее становится решение о строительстве с учетом мероприятий по защите.

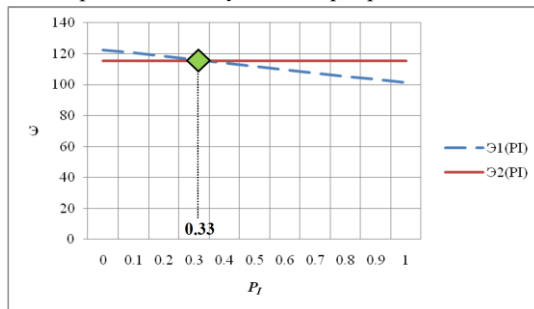
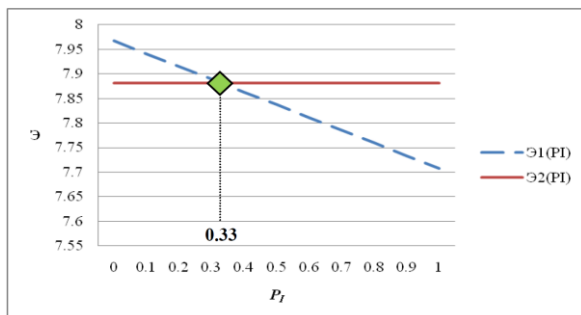


Рисунок 11 - График зависимостей  $\mathcal{E}_1(P_I)$  и  $\mathcal{E}_2(P_I)$  участок км 294 – км 296

Рисунок 12 - График зависимостей  $\mathcal{E}_1(P_f)$  и  $\mathcal{E}_2(P_f)$  участок км 298 – км 300

На основе ранее полученных формул 1, 2, таблиц 1 и 2 даны рекомендации по построению коридора вариантов смещения в продольном профиле и плане трассы при видах грунтов основания групп А и Б (см. таблицу 1) с дифференциацией по ширине основной площадки  $B$  (таблицы 6 и 7).

Таблица 6 - Рекомендуемые границы коридоров продольного профиля и плана трассы при видах грунта основания группы А

Заложение откоса косогора $k$	Ширина основной площадки $B$ , м	Коридор профиля		Коридор плана		Уравнение оптимальных решений	
		$h_{насып}$ , м	$h_{выемка}$ , м	$\Delta_{насып}$ , м	$\Delta_{выемка}$ , м	При смещении в насыпь	При смещении в выемку
10	11.7	0.59	-0.59	5.85	-5.85	$y=-0.1x+0.59$	$y=-0.1x-0.59$
8	11.7	0.73	-0.73	5.85	-5.85	$y=-0.125x+0.73$	$y=-0.125x-0.73$
6	11.7	0.98	-0.98	5.85	-5.85	$y=-0.167x+0.98$	$y=-0.167x-0.98$
4	11.7	1.46	-1.46	5.85	-5.85	$y=-0.25x+1.46$	$y=-0.25x-1.46$
3	11.7	1.95	-1.95	5.85	-5.85	$y=-0.333x+1.95$	$y=-0.333x-1.95$
10	7.6	0.38	-0.38	3.8	-3.8	$y=-0.1x+0.38$	$y=-0.1x-0.38$
8	7.6	0.48	-0.48	3.8	-3.8	$y=-0.125x+0.48$	$y=-0.125x-0.48$
6	7.6	0.63	-0.63	3.8	-3.8	$y=-0.167x+0.63$	$y=-0.167x-0.63$
4	7.6	0.95	-0.95	3.8	-3.8	$y=-0.25x+0.95$	$y=-0.25x-0.95$
3	7.6	1.27	-1.27	3.8	-3.8	$y=-0.333x+1.27$	$y=-0.333x-1.27$
10	7.3	0.37	-0.37	3.65	-3.65	$y=-0.1x+0.37$	$y=-0.1x-0.37$
8	7.3	0.46	-0.46	3.65	-3.65	$y=-0.125x+0.46$	$y=-0.125x-0.46$
6	7.3	0.61	-0.61	3.65	-3.65	$y=-0.167x+0.61$	$y=-0.167x-0.61$
4	7.3	0.91	-0.91	3.65	-3.65	$y=-0.25x+0.91$	$y=-0.25x-0.91$
3	7.3	1.22	-1.22	3.65	-3.65	$y=-0.333x+1.22$	$y=-0.333x-1.22$
10	7.1	0.36	-0.36	3.55	-3.55	$y=-0.1x+0.355$	$y=-0.1x-0.355$
8	7.1	0.44	-0.44	3.55	-3.55	$y=-0.125x+0.44$	$y=-0.125x-0.44$
6	7.1	0.59	-0.59	3.55	-3.55	$y=-0.167x+0.59$	$y=-0.167x-0.59$
4	7.1	0.89	-0.89	3.55	-3.55	$y=-0.25x+0.89$	$y=-0.25x-0.89$
3	7.1	1.18	-1.18	3.55	-3.55	$y=-0.333x+1.18$	$y=-0.333x-1.18$

Таблица 7 – Рекомендации по построению коридора продольного профиля и плана трассы при видах грунтов основания группы Б

Заложение откоса косогора $k$	Шири-на основ-ной площад-ки $B$ , м	Коридор профиля		Коридор плана		Уравнение оптимальных решений	
		$h_{нас}$ , м	$h_{выем}$ , м	$\Delta_{нас}$ , м	$\Delta_{выем}$ , м	При смещении в насыпь	При смещении в выемку
10	10.7	0.54	-0.54	5.35	-5.35	$y=-0.1x+0.54$	$y=-0.1x-0.54$
8	10.7	0.67	-0.67	5.35	-5.35	$y=-0.125x+0.67$	$y=-0.125x-0.67$
6	10.7	0.89	-0.89	5.35	-5.35	$y=-0.167x+0.89$	$y=-0.167x-0.89$
4	10.7	1.34	-1.34	5.35	-5.35	$y=-0.25x+1.34$	$y=-0.25x-1.34$
3	10.7	1.78	-1.78	5.35	-5.35	$y=-0.333x+1.78$	$y=-0.333x-1.78$
10	6.6	0.33	-0.33	3.3	-3.3	$y=-0.1x+0.33$	$y=-0.1x-0.33$
8	6.6	0.41	-0.41	3.3	-3.3	$y=-0.125x+0.41$	$y=-0.125x-0.41$
6	6.6	0.55	-0.55	3.3	-3.3	$y=-0.167x+0.55$	$y=-0.167x-0.55$
4	6.6	0.83	-0.83	3.3	-3.3	$y=-0.25x+0.83$	$y=-0.25x-0.83$
3	6.6	1.1	-1.1	3.3	-3.3	$y=-0.333x+1.1$	$y=-0.333x-1.1$
10	6.4	0.32	-0.32	3.2	-3.2	$y=-0.1x+0.32$	$y=-0.1x-0.32$
8	6.4	0.4	-0.4	3.2	-3.2	$y=-0.125x+0.4$	$y=-0.125x-0.4$
6	6.4	0.53	-0.53	3.2	-3.2	$y=-0.167x+0.53$	$y=-0.167x-0.53$
4	6.4	0.8	-0.8	3.2	-3.2	$y=-0.25x+0.8$	$y=-0.25x-0.8$
3	6.4	1.07	-1.07	3.2	-3.2	$y=-0.333x+1.07$	$y=-0.333x-1.07$
10	6.2	0.31	-0.31	3.1	-3.1	$y=-0.1x+0.31$	$y=-0.1x-0.31$
8	6.2	0.39	-0.39	3.1	-3.1	$y=-0.125x+0.39$	$y=-0.125x-0.39$
6	6.2	0.52	-0.52	3.1	-3.1	$y=-0.167x+0.52$	$y=-0.167x-0.52$
4	6.2	0.78	-0.78	3.1	-3.1	$y=-0.25x+0.78$	$y=-0.25x-0.78$
3	6.2	1.03	-1.03	3.1	-3.1	$y=-0.333x+1.03$	$y=-0.333x-1.03$

Так, например, при грунтах группы Б, ширине основной площадки  $B = 6.6$  м и уклоне косогора 1:6 коридор профиля от 0.55 м до - 0.55 м, коридор плана от 3.3 м до - 3.3 м, варианты оптимальных решений при смещении в насыпь описываются уравнением  $y = 0.167x + 0.55$ , при смещении в выемку –  $y = -0.167x - 0.55$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа теории и практики проектирования железных дорог установлено, что при укладке трассы на косогорных участках в районах с высокой сейсмичностью не достаточно учитывают требование нормативных документов по обеспечению однородности основной площадки земляного полотна.

В диссертации предложена технология проектирования трассы с учетом этого требования для вновь укладываемой трассы и при ее корректировке в составе рабочей документации.

2. Разработаны формулы (1–6), определяющие параметры коридора на профиле и плане, вне которого, по возможности, должна быть уложена трасса (рисунки 1 и 4).

3. Впервые составлена классификация косогорных участков по виду грунтов, геометрическим параметрам конструкции земляного полотна и категориям по сейсмическим свойствам.

На ее основе выполнен технико-экономический анализ наиболее рациональной укладки трассы в поперечном сечении земляного полотна. Установлены рациональные решения по смещению оси трассы в профиле и плане при различных грунтах и уклоне косогора (таблица 2).

4. Составлен алгоритм укладки трассы на косогорах в районах с высокой сейсмичностью (рисунок 7).

Предложенная технология апробирована на одном из участков проектируемой линии Кызыл-Курагино (таблица 4).

5. Выполнены вариантные расчеты по поиску наиболее рационального решения по корректировке оси трассы на косогорных участках для обеспечения однородности основной площадки земляного полотна в районах с высокой сейсмичностью. Получены аналитические зависимости, описывающие искомые решения (формулы 7 – 8).

6. Сделана оценка эффективности проектных решений в поперечном сечении в условиях неопределенности исходной информации с учетом вероятности возникновения землетрясений. Определены условия для применения проектных решений с учетом и без учета мероприятий по защите землетрясений (рисунки 11 – 12).

7. Даны рекомендации по минимальным высотам насыпей и глубинам выемок для обеспечения однородности основной площадки при различных видах грунтов основания и косогорности местности (таблицы 6 – 7).

8. Предложенная технология может быть использована в практике проектирования новых железных дорог и для автоматизации в программных продуктах специальных САПР.

9. Перспективой дальнейшей разработки темы может быть учет неблагоприятных физико-геологических процессов (оползни, осыпи, обвалы, курумы и т.д.) и сейсмических характеристик грунтов основания (скорость распространения продольной сейсмической волны и приращения балльности), учет силы сейсмического воздействия, а также конструкций укреплений земляного полотна (например, демпферов) с проведением анализа устойчивости земляного полотна в технологии трассирования железной дороги в районах с высокой сейсмичностью.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Публикации в рецензируемых научных изданиях:*

1. **Петрушин, А.В.** Укладка трассы в районах с высокой сейсмичностью / В.С. Миронов, А.В. Петрушин // *Путь и путевое хозяйство*. – 2014. – № 12. – С. 22 – 24. ISSN 0131-5765;

2. **Петрушин, А.В.** Рекомендации по укладке трассы новой железнодорожной линии в условиях высокой сейсмичности / В.С. Миронов, А.В. Петрушин // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. – 2016. – № 3(31). – С. 98-107. ISSN 2079-0392;

3. **Петрушин, А.В.** К вопросу совершенствования технологии укладки трассы новой железнодорожной линии в условиях высокой сейсмичности / В.С. Миронов, А.В. Петрушин // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. – 2018. – № 1(37). – С. 69-77. ISSN 2079-0392.

*В других изданиях:*

4. **Петрушин, А.В.** Особенности проектирования трассы в районах с высокой сейсмичностью / А.В. Петрушин // *Сборник трудов «Инженерные сооружения на транспорте»*. – М.: МИИТ, 2013. – Вып. № 5 – С. 101 – 102;

5. **Петрушин, А.В.** Трассирование железной дороги с учетом конструкций земляного полотна в районах с высокой сейсмичностью / В.С. Миронов, А.В. Петрушин // *Путь XXI века: Сб. науч. трудов Междунар. научно-методической конференции (14-15 февраля 2013 г.)* / Под ред. проф. Л.С. Блажко – СПб.: ПГУПС, 2013. – С. 207 – 212;

6. **Петрушин, А.В.** Проектирование трассы железной дороги на косогорных участках в районах с высокой сейсмичностью / В.С. Миронов, А.В. Петрушин // *Сб. трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт-2013»*. – Ч. 3. Естественные и технические науки. – Ростов н/Д: РГУПС, 2013. – С. 39 – 40;

7. **Петрушин, А.В.** Корректировка положения трассы на косогорных участках в районах с высокой сейсмичностью на примере железной дороги «Кызыл-Курагино» / В.С. Миронов, А.В. Петрушин // *Сб. трудов XI Международной научно-технической конференции, посвященной памяти профессора Г.М. Шахунянца*. – М.: МИИТ, 2014. – С. 169 – 172;

8. **Петрушин, А.В.** Особенности трассирования и оценка эффективности проектных решений в районах с высокой сейсмичностью / В.С. Миронов, А.В. Петрушин // *Сб. трудов Седьмой Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона»*: в 2 т. – Иркутск.: ИрГУПС, 2016. – Т. 1 – С. 493 – 498;

9. **Петрушин, А.В.** Рациональное положение трассы при однородном земляном полотне в районах с высокой сейсмичностью / В.С. Миронов,

А.В. Петрушин // Труды Восемнадцатой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: РУТ (МИИТ), 2017. – С. IV-48 – IV-49.

**ТЕХНОЛОГИЯ ТРАССИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ  
В РАЙОНАХ С ВЫСОКОЙ СЕЙСМИЧНОСТЬЮ**

05.22.06 – Железнодорожный путь,  
изыскание и проектирование железных дорог

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать \_\_\_\_\_. Заказ - \_\_\_\_\_. Формат 60\*90/16.  
Усл. печ.л. – 1,5 \_\_\_\_\_ Тираж 80 экз.

---

127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, УПЦ Ги МИИТ