

Оценка влияния тяжелых грузовых автоперевозок на дорожные конструкции.  
Виртуальная симуляция



# Оценка влияния тяжелых грузовых автоперевозок на дорожные конструкции. Виртуальная симуляция

Изучение пилотной а/д «Архангельск-Рикасиха-Онега»,  
русская часть Баренц региона

Петри Варин, Аннеле Матинтупа, Тимо Сааренкетто

2012

Перевод на русский язык выполнен НП «Зеленая Волна» по заказу Лидирующего партнера Проекта Kolarctic ENPI CBC «Управление дорогами с низкой интенсивностью движения в Баренц регионе» - ООО «АвтоДорожный Консалтинг».

Контактные данные:

НП «Зеленая Волна»  
г. Архангельск,  
ул. Смольный Буян, 20

[greenwave29@mail.ru](mailto:greenwave29@mail.ru)

ООО АвтоДорожный Консалтинг»  
г. Архангельск,  
пр. Чумбарова-Лучинского, 23-5

[adc.ltd@mail.ru](mailto:adc.ltd@mail.ru)  
+7 (8182) 655-921

## Резюме

Данный отчет подготовлен в рамках выполнения Задачи 3 проекта Kolarctic ENPI CBC “Управление дорогами с низкой интенсивностью движения в Баренц Регионе”. “Изучения в Лапландии” были сфокусированы на описании и тестировании технологий, которые можно применять при оценке рисков, возникающих в случае увеличения весовых нагрузок от тяжелого грузового автотранспорта с позиции влияния последних на структурные и функциональные характеристики автомобильных дорог. Рассматриваемые технологии были опробованы на двух пилотных участках автомобильной дороги HW4, к северу от Рованиеми в финской Лапландии. Для проведения экспериментов использовались следующие основные виды оборудования: лазерный сканер, грунтовый пенетрационный радар (георадар), дефлектометр падающего груза (российский аналог - установка динамического нагружения), а также камера для проведения цифровой видеосъемки. Лапландское изучение использовалось в качестве модели для проведения изучения в Архангельске.

Настоящий отчет был подготовлен в рамках Задачи 3 проекта «Управление дорогами с низкой интенсивностью движения в Баренц регионе», реализуемого в рамках программы Kolarctic ENPI CBC. «Изучение в Архангельске» содержит описание характерных проблем, рекомендуемые структурные решения и их сравнение для пилотной автомобильной дороги с низкой интенсивностью движения регионального значения «Архангельск –Рикасиха -Онега». Также в отчете представлена оценка влияния различных грузовых опций на дорожные конструкции. В рамках проведения обследований выполнялись визуальное инспектирование, отбор проб материалов дорожных конструкций, видеосъемка и лабораторные испытания образцов (построение кривой гранулометрического состава и расчет коэффициента водопоглощения).

Для обследованных участков автомобильной дороги типичными были такие проблемы как: низкая несущая способность в период весенней распутицы, пылеобразование, неудовлетворительный водоотвод, тонкослойность дорожной одежды, низкое качество материалов основания и покрытия дорожной одежды, морозочувствительные грунты земляного полотна, гребенка (эффект «стиральной доски») и прочие проблемы неровности дорожного покрытия, а также избыточная ширина проезжей части (12м вместо нормативных 8м). Лабораторные испытания показали, что материал основания дорожной одежды содержал в составе избыточное количество пылеватых частиц (<0,063мм) - 8,5-13,6%. Коэффициент водопоглощения также был признан высоким: 5,4-5,7%.

Для детальной оценки были выбраны 4 варианта восстановления дороги, включая восстановление в качестве гравийной дороги и в качестве дороги с твердым покрытием (версия ROADEX и российская версия, а также устройство битумосодержащего покрытия). Ширину проезжей части автомобильной дороги

необходимо сократить, дорожный водоотвод – улучшить. Варианты восстановления были оценены с использованием программного обеспечения Bisar. Показатели несущей способности были определены по формуле Одемарка для трех показателей несущей способности земляного полотна (модули упругости 10МПа, 20МПа и 43 МПа). Расчеты Bisar выполнялись для четырех типов грузовых автомобилей: российский КАМАЗ (33т), стандартный для дорог Финляндии и Швеции грузовой автомобиль (60т), автомобили “Boliden” (72т) и “En trave till” (90т), используемые в рамках особых грузовых автоперевозок в Швеции.

В целях улучшения транспортно-эксплуатационных показателей дороги рекомендуется сократить ширину проезжей части до 8м. Для восстановления дороги рекомендуется применить решение, включающее битумную обработку покрытия, позволяющую использовать местные материалы, что чрезвычайно важно в условиях недостатка недорогих качественных дорожно-строительных материалов. Данное решение обеспечивает достижение адекватной несущей способности даже в случае ослабленных грунтов земляного полотна (10МПа), что характерно для периода весенней распутицы. Максимальные горизонтальные напряжения в связных слоях и вертикальные напряжения в несвязных слоях незначительны. Смещение земляного полотна в случае устройства нового битумосодержащего слоя покрытия примерно то же, что и в случае устройства твердого покрытия по версии ROADDEX (200мм несвязный слой + 50мм покрытие).

## Предисловие

Проект Коларктик «Управление дорогами с низкой интенсивностью движения в Баренц регионе» является техническим международным проектом, реализуемым совместно партнерами - Лапландским Центром экономического развития, транспорта и окружающей среды (Финляндия), Государственным казенным учреждением Архангельской области «Дорожное агентство «Архангельскавтодор»», Государственным областным казенным учреждением по управлению автомобильными дорогами Мурманской области «Мурманскавтодор» (Россия). ФГУ «Управление автомобильной магистрали Санкт–Петербург — Мурманск» (ФГУ Упрдор «Кола») и Министерство строительства республики Карелия являются Ассоциированными Партнерами Проекта. Лидирующим Партнером проекта выступает ООО «Автодорожный консалтинг». Лапландский Центр экономического развития, транспорта и окружающей среды отвечает за проведение Лапландского изучения, «Архангельскавтодор» – за проведение изучения в Архангельской области. Консультантом проекта является консорциум, сформированный компаниями Roadscanners Оу и Rõугу Finland Оу (Финляндия). Данный отчет подготовлен Петри Варином, Аннеле Матинтупа и Тимо Сааренкетто, компания Roadscanners Оу.

Главными целями проекта «Управление дорогами с низкой интенсивностью движения в Баренц регионе» являются:

- Гармонизация территориальных отраслевых практик на основе добровольного профессионального партнерства, а не директив сверху;
- Вклад в развитие экономик территорий Баренц Региона посредством улучшения состояния сетей дорог с низкой интенсивностью движения для развития бизнеса и выхода его на региональные, национальные и международные рынки, для повышения уровня социальных услуг для населения.

Особые цели проекта:

- Гармонизация принципов и технологий содержания дорог с низкой интенсивностью движения в Баренц регионе;
- Повышение устойчивости функционирования сетей дорог и снижение негативного влияния дорожной деятельности на окружающую среду;
- Оптимизация затрат по содержанию сетей дорог с низкой эффективностью при помощи инноваций, адаптированных к местным условиям;
- Вхождение российских дорожников в инновационное пространство транспортного кластера Баренц Региона для ускорения решения общих специфических проблем северных периферийных территорий, что требует лучшей транспортной доступности как основной предпосылки развития бизнеса, повышения занятости и качества жизни местного населения.

Авторы выражают благодарность Марии Шабашевой и Юхе Хювяринену за их вклад в проведение данного изучения. Авторы также признательны Руководящей Группе Проекта за поддержку и руководство деятельностью. Одной из целей Проекта является распространение ноу-хау проектов Северной Периферии «ROADX I...IV» в России. Авторы также выражают признательность за сотрудничество Лидирующему Партнеру Проекта ROADX IV – Шведской Транспортной Администрации, Северный Регион.

# Содержание

<b>РЕЗЮМЕ</b>	<b>3</b>
<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>	<b>5</b>
<b>СОДЕРЖАНИЕ</b>	<b>6</b>
<b>1. ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>7</b>
<b>2. ПИЛОТНЫЕ УЧАСТКИ ДОРОГИ</b>	<b>8</b>
<b>3. МЕТОДЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ</b>	<b>10</b>
3.1 ВИЗУАЛЬНАЯ ИНСПЕКЦИЯ И ВИДЕОСЪЕМКА	10
3.2 ОТБОР ПРОБ	10
3.3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ	11
3.3.1 Гранулометрический состав	11
3.3.2 Коэффициент водопоглощения	12
3.4 МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	12
<b>4. ОПИСАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОГИ, РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЙ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ</b>	<b>13</b>
4.1 ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОРОГИ	13
4.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ВИЗУАЛЬНОГО ИНСПЕКТИРОВАНИЯ ПИЛОТНЫХ УЧАСТКОВ ДОРОГИ	14
4.3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ	19
4.3.1 Гранулометрический состав	19
4.3.2 Коэффициент водопоглощения	20
4.4 Модули упругости и несущая способность существующей дорожной конструкции	20
4.4.1 Пилотный участок км 47-49, российский метод расчета	20
4.4.2 Пилотный участок км 57-59, российский метод расчета	21
4.4.3 ROADEX показатели несущей способности существующей дорожной конструкции по Одемарку	22
<b>5. ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕРЫ ПО УЛУЧШЕНИЮ</b>	<b>24</b>
<b>6. СТРУКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ</b>	<b>25</b>
6.1 ВОССТАНОВЛЕНИЕ В КАЧЕСТВЕ ГРАВИЙНОЙ ДОРОГИ	25
6.2 ВОССТАНОВЛЕНИЕ В КАЧЕСТВЕ ДОРОГИ С ТВЕРДЫМ ПОКРЫТИЕМ (ПО ВЕРСИИ ROADEX)	26
6.3 ВОССТАНОВЛЕНИЕ В КАЧЕСТВЕ ДОРОГИ С ТВЕРДЫМ ПОКРЫТИЕМ (РОССИЙСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА)	27
6.4 ВОССТАНОВЛЕНИЕ С ОБРАБОТКОЙ БИТУМНЫМ ВЯЖУЩИМ	29
<b>7. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ</b>	<b>31</b>
7.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	31
7.2 ТИПЫ РАССМАТРИВАЕМЫХ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ	32
7.3 СТРУКТУРНОЕ ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ	33
<b>8. РЕЗЮМЕ</b>	<b>2</b>

# 1. Введение

Для периферийных территорий Баренц региона характерны малонаселенность, удаленность, сложность рельефа, неблагоприятные грунты, продолжительные зимы, проблемы межсезонья, низкая интенсивность движения и протяженные расстояния до рынков сбыта продукции. В таких районах надежные дороги жизненно важны, поскольку именно они обеспечивают для местного населения доступность жилья, больниц, школ и прочих социальных учреждений, для местных предприятий рыбной, лесной, горнодобывающей отраслей и сельского хозяйства – транспортные связи с рынками сбыта. Большая часть таких дорог являются дорогами с интенсивностью движения менее 500 авт/сут., и существует лишь небольшое количество рекомендаций в отношении того, как поддерживать эти дороги в эксплуатационном состоянии в условиях все увеличивающихся транспортных нагрузок.

Сеть ROADEX была создана в 1998г. по инициативе дорожных и лесных организаций Северной Периферии ЕС целях тестирования новейших технологий в помощь инженерам в обретении понимания тех процессов, которые лежат в основе возникновения различных дорожных проблем, и сосредоточения на устранении причин этих проблем, а не ежегодном устранении симптомов. Ключевым понятием проектов ROADEX является «Фокус» (например, фокусирование ресурсов только на наиболее ослабленных участках дорог вместо распыления средств по всей сети).

Результаты исследовательского сотрудничества оказались успешными, и кроме прочего проект ROADEX представил множество новых решений и технологий по управлению состоянием дорог в условиях холодного климата. Цель Задачи «Изучение в Архангельске» в рамках проекта «Управление дорогами с низкой интенсивностью движения в Баренц регионе» заключается в виртуальной симуляции влияния грузовых автоперевозок для двух участков пилотной дороги «Архангельск - Рикасиха - Онега» для демонстрации технологий диагностики и расчета усиления дорожных одежд в российских условиях с последующим сравнением их с результатами расчетов по стандартному российскому методу проектирования.

Еще одна цель данной работы – предоставление информации о том, что произойдет, если по российским дорогам с низкой интенсивностью движения будут перемещаться более тяжелые грузовые автомобили по сравнению с текущими стандартными конфигурациями. Использование автомобилей с большей грузоподъемностью окажет значительный экономический эффект на местные производства и будет способствовать снижению выбросов CO<sub>2</sub>. Однако перед увеличением транспортных нагрузок организации, ответственные за управление дорожными сетями, должны точно оценить то влияние, которое окажут более тяжелые грузовые автомобили на состояние и эксплуатацию дорог, мостов, окружающую среду, безопасность дорожного движения и т.д.

## 2. Пилотные участки дороги

Автомобильная дорога регионального значения «Архангельск-Рикасиха-Онега» была выбрана в качестве пилотной в рамках проекта «Управление дорогами с низкой интенсивностью движения в Баренц регионе» для изучения типичных проблем дорог с низкой интенсивностью движения в российской Северной Периферии и предложения решений по улучшению состояния дороги на основе ноу-хау проекта ROADDEX.

Выбор данной дороги в качестве пилотной был продиктован следующими обстоятельствами:

- Низкая интенсивность движения;
- Близость участков к Архангельску (удобство посещения специалистами «Архангельскавтодора»);
- Наличие всего спектра типичных для дорог с низкой интенсивностью движения проблем: низкая несущая способность в период весенней распутицы, пылеобразование, неудовлетворительный водоотвод, тонкослойность дорожной одежды, низкое качество материалов основания, чувствительность материалов земляного полотна к воде, износ дорожных покрытий, а также колеи, неровности, гребенка, т.д.

Типичный ландшафт на одном из пилотных участков дороги приведен на Рисунке 1.

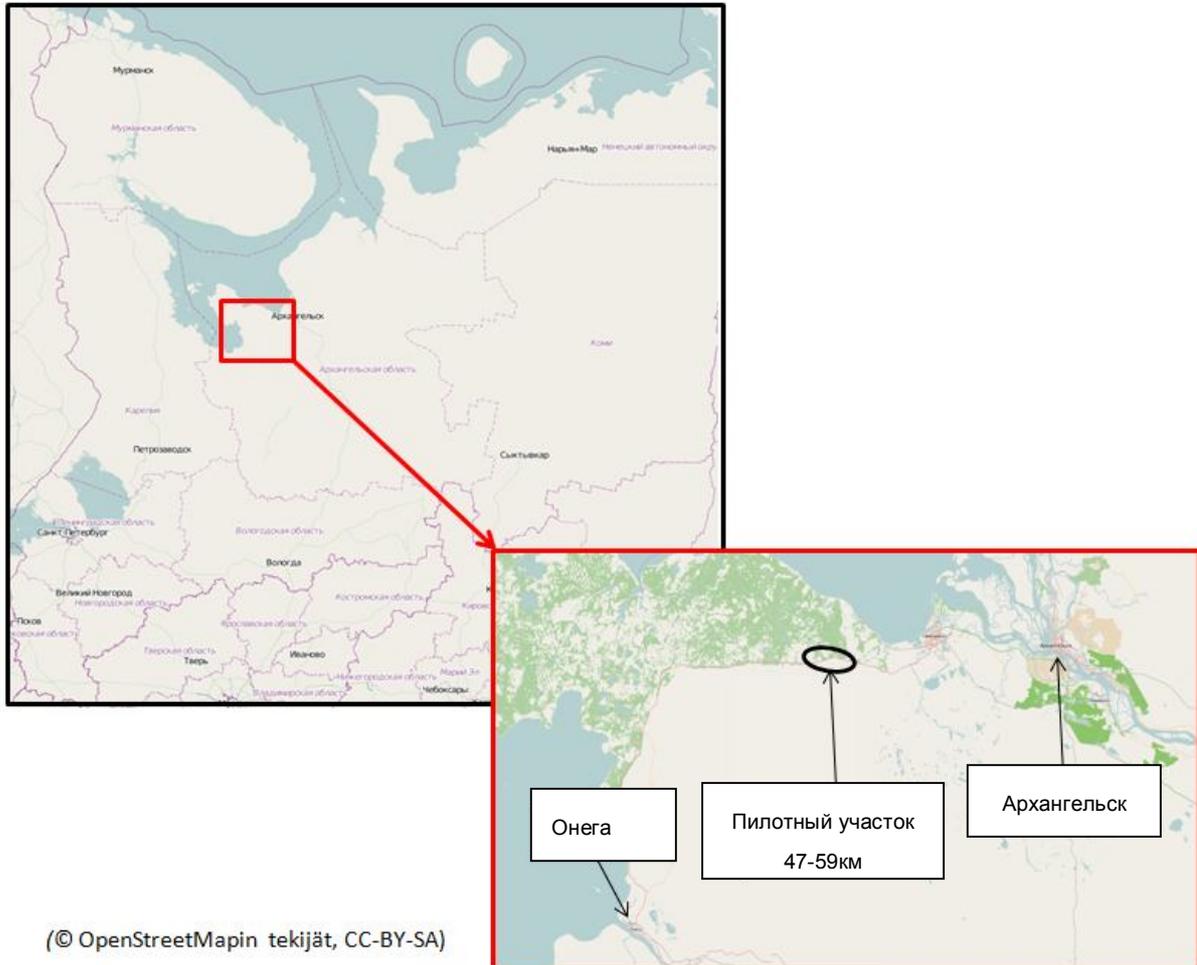


*Рисунок 1: Пилотный участок а/д Архангельск-Рикасиха-Онега, км47, на подходах к мосту через р.Верховка*

Для более детального изучения были выбраны следующие два пилотных участка дороги:

1. Архангельск-Рикасиха-Онега, км 47-49, на подходах к мосту через р.Верховка
2. Архангельск-Рикасиха-Онега, км 57-59

Местоположение пилотных участков показано на Рисунке 2.



*Рисунок 2. Местоположение пилотного участка дороги в рамках изучения в российской части Баренц региона.*

Оба участка преимущественно гравийные, и лишь на первом участке первые 300м имеют битумосодержащее покрытие. Данный участок на подходе к мосту характеризуется большим уклоном. Боковые канавы укреплены бетонными плитами, кроме этого правая обочина укреплена с формированием водоотводного лотка.

На пилотном участке грунты земляного полотна в основном представлены суглинком, но также имеются участки с залеганием торфа, супеси и пылеватого речного песка. Особенностью участка является отсутствие поблизости качественных дорожно-строительных материалов (ближайший карьер расположен в сотнях километров от участка).

## 3. Методы обследования

В рамках настоящего проекта по ряду причин отсутствовала возможность проведения георадарных обследований и обследований с применением дефлектометра падающего груза, которые обычно применяются в проектах по диагностике дорог ROADEX. Поэтому был применен метод виртуальной симуляции, дополненный визуальной инспекцией с выявлением дефектов, отбором образцов материалов дорожной одежды и последующим их испытанием в дорожной лаборатории.

### 3.1 Визуальная инспекция и видеосъемка

Первое визуальное обследование пилотного участка автомобильной дороги было проведено в рамках первого обучающего курса в Архангельске, который состоялся 7 июля 2011г. Участники обучающего курса посетили и обследовали пилотный участок км 47-49 под руководством эксперта Проекта доктора наук Тимо Сааренкетто (Roadscanners Oy). Ряд предложений был высказан Юккой Яаскё (Лапландский центр экономического развития, транспорта и окружающей среды) в отношении устранения проблем содержания пилотной дороги и улучшения ее эксплуатационных характеристик.

Чуть позднее были проведены визуальные обследования участка с видеосъемкой. Вначале в ходе видеосъемки возникли проблемы с определением расстояний и аудиокomentarиями, после чего местоположение записывалось путем фиксирования данных GPS и видео по времени (часы на обоих устройствах были синхронизированы). На первом участке км 47 – км 49 видео записывалось при скорости движения 20км/ч в обоих направлениях с фиксированием особых объектов в ноутбуке (мосты, километровые столбы, подъезды к частным владениям с водопропускными трубами и без). Аналогичным образом был снят на видео второй пилотный участок км57-59, и на км 58 были взяты образцы материалов.

### 3.2 Отбор проб

Отбор проб осуществлялся в двух точках путем устройства шурфа. Первая точка располагалась на оси проезжей части на км 48. Материал на глубине 0-60см от поверхности дороги являлся однородным. Вторая точка для отбора образцов материалов дорожной одежды располагалась на км 58. Оба образца были направлены на лабораторный анализ. Материалы верхних 10-15см слоя износа отличались от материала основания, располагавшегося на глубине 15...50см. На Рисунке 3 проиллюстрированы шурфы на двух пилотных участках.



*Рисунок 3: Шурфы для отбора проб материалов дорожной одежды на пилотной дороге «Архангельск-Рикасиха-Онега»: км48 (слева) и км 58 (справа).*

### 3.3 Лабораторные испытания

#### 3.3.1 Гранулометрический состав

Кривая гранулометрического состава – один из наиболее значимых компонентов при оценке качества дорожных материалов, получаемая методом просеивания (Рисунок 4). Содержание пылеватых частиц и очертания кривой гранулометрического состава характеризуют механические свойства материала, и полученные результаты могут также дать представление о возможных вариантах стабилизации материалов на стадии проектирования.



*Рисунок 4: Набор сит для определения гранулометрического состава материала.*

### 3.3.2 Коэффициент водопоглощения

Коэффициент водопоглощения свидетельствует о качестве пылеватого материала и способности воды адсорбироваться на поверхности пылеватых частиц при 100% относительной влажности воздуха (Рисунок 5). Он также служит показателем того, насколько активно взаимодействие между минеральным материалом и водой. При испытаниях на определение коэффициента водопоглощения сухие образцы материала помещаются в закрытый контейнер с водой на дне при 100% относительной влажности воздуха. Материал адсорбирует молекулы воды из воздуха в течение определенного периода времени. Затем материал взвешивается, и по разнице между весом образца в начале и в конце эксперимента определяется коэффициент водопоглощения.



*Рисунок 5: Контейнер с испытываемыми образцами материала при определении коэффициента водопоглощения.*

### 3.4 Методы анализа данных и применяемое программное обеспечение

Данные видеосъемки совместно с остальными имеющимися данными были проанализированы при помощи программного обеспечения Road Doctor™ Pro. Данный программный продукт позволяет комбинировать данные, например, георадара, дефлектометра падающего груза, лазерного сканера, термальной камеры, устройства для измерения международного показателя ровности и прочие с данными видеосъемки и картами.

В данном проекте применялось программное обеспечение BISAR® для анализа прогибов и оценки осевых нагрузок при различных грузовых опциях. Алгоритмы Bisar основаны на теории линейной упругости. Bisar® выполняет расчет горизонтальных и вертикальных напряжений, возникающих в различных слоях дорожной конструкции при заданной нагрузке. Также определяется величина горизонтального и вертикального смещения в выбранных точках земляного полотна и слоях дорожной одежды.

## 4. Описание характеристик дороги, результаты обследований и лабораторных испытаний

### 4.1 Общие характеристики дороги

Пилотная автомобильная дорога является дорогой общего пользования с низкой интенсивностью движения и обслуживает транспортные потоки между Архангельском, Северодвинском и Онегой, а также рядом промежуточных населенных пунктов на данном маршруте. Ранее трасса являлась лесовозной.

Протяженность дороги составляет 113км. Протяженность рассматриваемой пилотной зоны – 12км (км47-59). Проектная ширина дороги составляет 8м, однако на практике ширина варьируется от 6 до 12м. Покрытие проезжей части преимущественно гравийное, имеются также участки с асфальтобетонным покрытием.

В 2010г. среднегодовая суточная интенсивность движения составляла 606 авт/сут. (см. Рисунок 6).

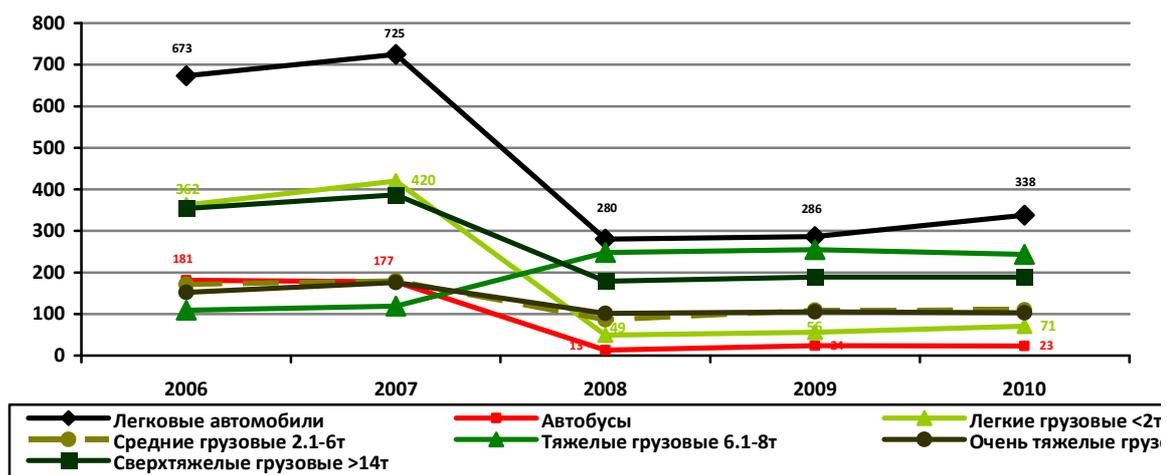


Рисунок 6: Среднегодовая суточная интенсивность движения на пилотных участках автомобильной дороги «Архангельск-Рикасиха-Онега», 2006-2010гг.

Данные по учету интенсивности движения позволяют сделать следующие выводы (пункт учета на км47, Куртяево):

- Значительное снижение суммарной интенсивности движения в 2008г.
- Как исключение – удвоение объема тяжелого грузового движения в 2008г.
- Транспортный поток представлен преимущественно грузовыми автомобилями разной грузоподъемности (59% в 2010г.)

Источник: информация предоставлена «Архангельскавтодором»

## 4.2 Результаты визуального инспектирования пилотных участков дороги

В рамках визуального инспектирования обоих пилотных участков с отбором образцов материалов были выявлены следующие типичные проблемы:

- Гребенка
- Повышенное пылеобразование
- Избыточная ширина проезжей части – 11-12м вместо нормативных 8м как результат колейности 2 степени и работ по содержанию (грейдерованию) дороги за последние 10 лет. Подробности о развитии колейности 2 степени приведены ниже.
- Обочины укреплены песчаным материалом и засевом трав, уровень обочин превышает уровень проезжей части (на участках с засевом трав – 10-60см), что препятствует свободному стоку воды с проезжей части в канавы в период дождей и таяния снега.

### Предварительные наблюдения показывают:

- Состояние покрытия - неудовлетворительное (см. Рисунок 7)
- Наличие в земляном полотне суглинистого грунта приводит к тому, что при переувлажнении под воздействием тяжелого грузового движения возникают остаточные деформации – колейность 1 и 2 степени (остаточные деформации имеют место не только в слоях дорожной одежды, но и в земляном полотне). В дальнейшем это приводит к нежелательному уширению дороги. Главным образом уширение дороги и колейность 2 степени можно отнести за счет воздействия морозного пучения и циклов замерзания/оттаивания. Данные процессы проиллюстрированы Рисунок 8.
- Фактическая ширина дороги составляет 12м, что на 4м больше нормативного значения (по 2м с каждой стороны) (см. Рисунок 9).
- Наличие деформаций с внутренней стороны кривых, что служит индикатором тонкослойности дорожной одежды (Рисунок 10)
- Деформации имеют место на участках перехода от слабых подстилающих грунтов к более прочным породам.



Рисунок 7. Состояние покрытия на пилотном участке, км 47. Покрытие неровное из-за наличия гребенки.

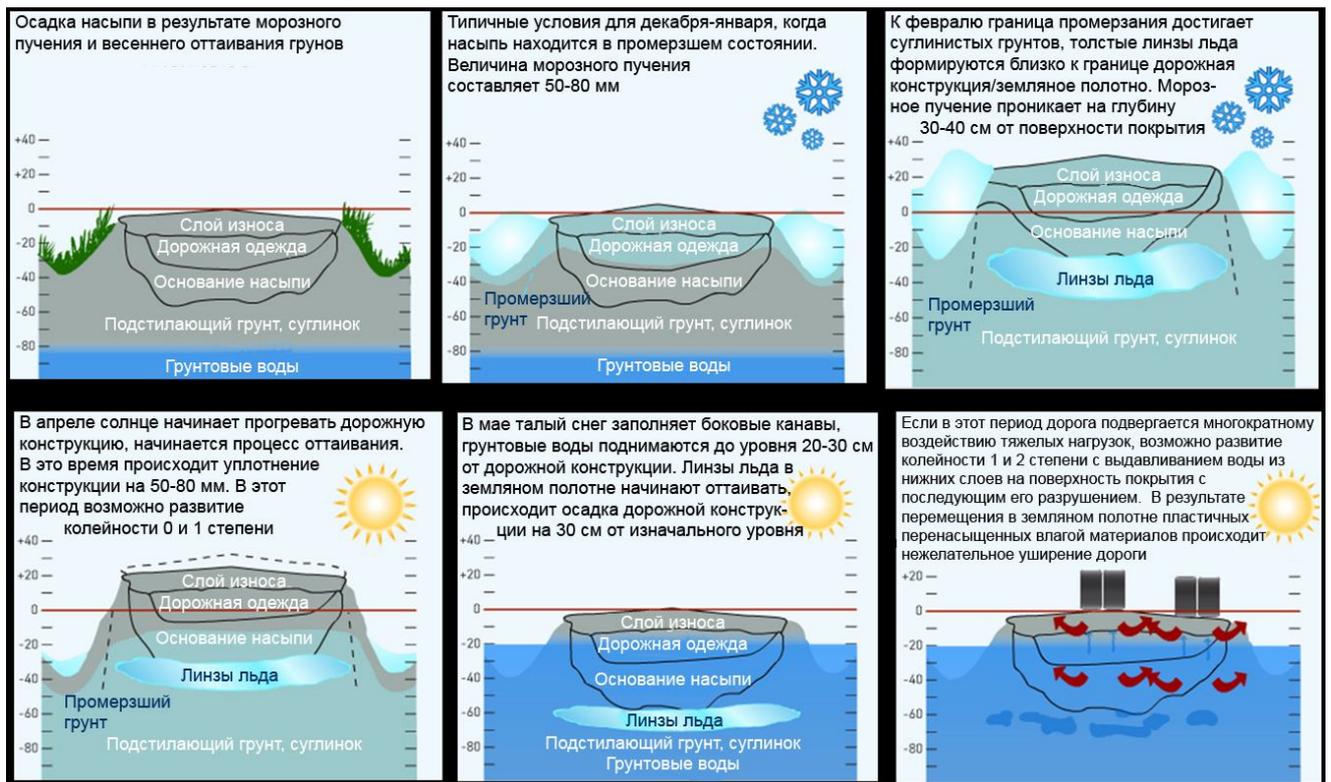


Рисунок 8. Описание процессов морозного пучения на гравийной дороге в период замерзания (выше) и оттаивания (ниже). Рисунок заимствован из пакета дистанционного обучения ROADEX "Остаточные деформации", сайт [www.roadex.org](http://www.roadex.org).



*Рисунок 9. Состояние обочин на пилотном участке, км 47. Превышение уровня обочин на проезжей части и наличие растительности создают проблемы для водоотвода. Справа боковая канава отсутствует.*



*Рисунок 10. Толщина дорожной одежды на внутренней кривой меньше, чем на внешней, что приводит к развитию деформаций.*

**Владельцем дороги выявлены следующие проблемы:**

1. Образование колеиности после каждого дождя и возникающая в результате потребность в постоянном грейдерование для поддержания дороги в надлежащем эксплуатационном состоянии;
2. Гребенка
3. Пылеобразование (Рисунок 11)
4. Повышенные затраты на содержание дороги как в летний, так и в зимний период (частое грейдерование).



*Рисунок 11. Пылеобразование как одна из типичных проблем пилотной дороги.*

### **Механизм возникновения проблемы по мнению экспертов ROADEX:**

Под действием веса насыпи и нагрузок от проходящего транспорта пластичный грунт земполотна выдавливается в направлении обочин. Последующее грейдерование дороги для устранения колейности и восстановления поперечного профиля разравнивает и сдвигает материал в сторону обочин и, таким образом, расширяет дорогу в обе стороны на 5-15 см ежегодно.

Избыточная ширина дороги ведет к тому, что дождевая вода (даже при обеспеченном уклоне поперечного профиля дороги), направляясь в сторону обочин, не успевает их достичь (из-за увеличенной протяженности пути) и впитывается в тонкое гравийное покрытие, ослабляя дорожную конструкцию. Боковые канавы утрачивают функциональность, что не стимулирует регулярно содержать ни боковой водоотвод, ни обочины (заросшие растительностью).

Колейность 2 степени характерна для случаев, когда качество каменного материала выше, а покрытие в целом деформировано. Такое можно наблюдать, когда земляное полотно деформируется вместе со слоями зернистых материалов, прогибающихся на него (без всякого утоньшения). На Рисунке 12 показаны различия между степенями развития колейности. На Рисунке 13 схематично представлен пример колейности 2 степени на пилотной дороге.

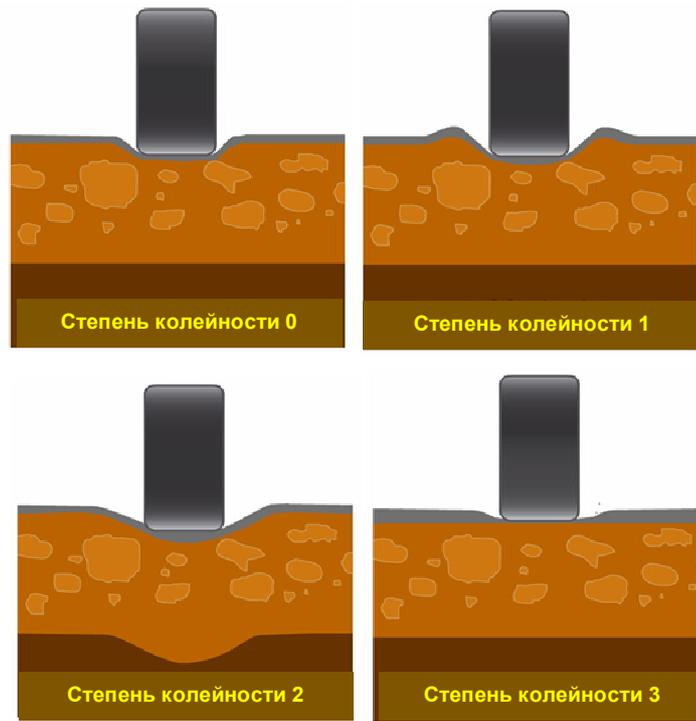


Рисунок 12. Виды колейности согласно ROADEX. Степень 0 колейности характеризует уплотнение покрытия, степень 1 – деформации в дорожной одежде, степень 2 – деформации на границе дорожной одежды и земполотна, степень 3 – колейность по причине износа покрытия.

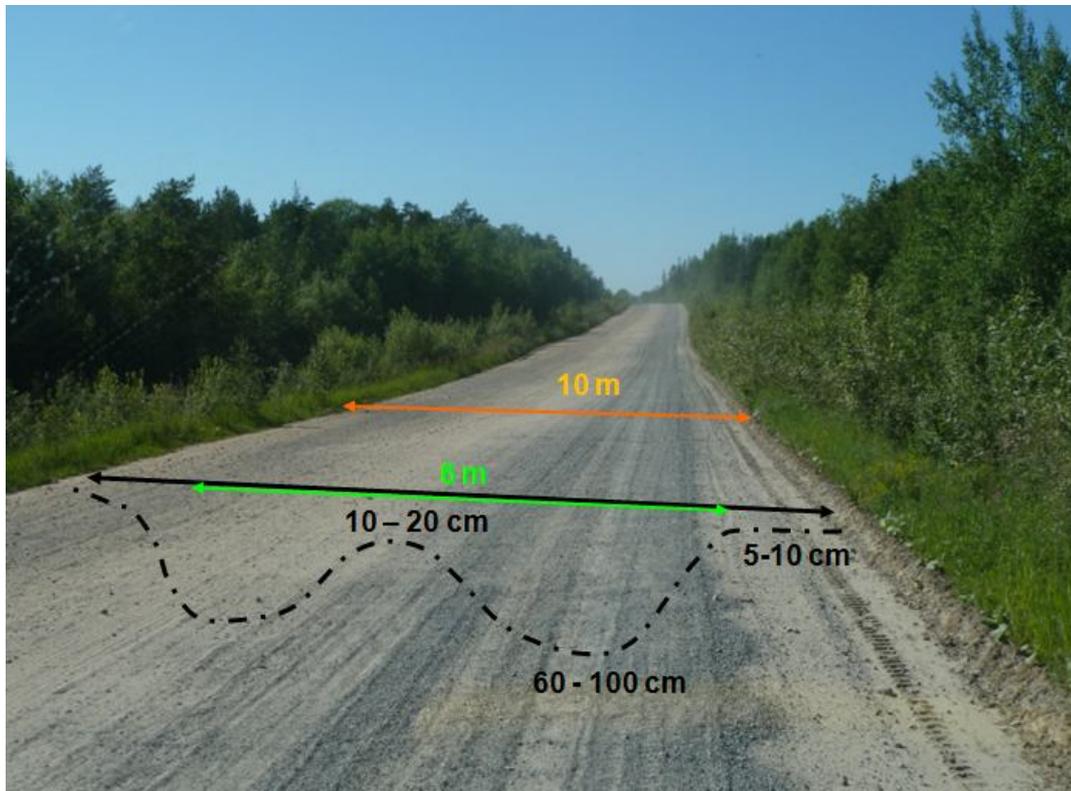


Рисунок 13. Степень 2 колейности, приводящая к уширению дороги.

### **Вывод:**

- Чем шире гравийная дорога, тем менее производителен отвод воды с покрытия, выше влажность земполотна при дожде, тем менее дорога способна противостоять остаточным деформациям от движения транспорта, тем быстрее она разрушается и больших средств требует для поддержания надлежащего эксплуатационного состояния.

Негативное влияние также оказывает высокое давление воздуха в шинах грузовых автомобилей, что приводит к возникновению гребенки. Гребенка создает транспортные вибрации, которые:

- Оказывают негативное влияние на здоровье водителей и пассажиров, особенно на постоянных пользователей дороги (стресс, головная боль, боль в пояснице, обострение сердечно-сосудистых заболеваний);
- Сокращают срок службы ТС, увеличивая потребности в ремонте, запасных частях, т.е. повышают эксплуатационные затраты пользователей, а следовательно стоимость товаров и услуг, ухудшая качество жизни населения и снижая конкурентоспособность местных производителей.

Гребенка настолько значительна, что средние скорости движения на дороге недопустимо низкие (10-20 км/ч на некоторых участках), что создает дополнительные издержки по причине потери времени в пути.

## **4.3 Лабораторные испытания**

Лабораторные испытания отобранных образцов материалов дорожной одежды и земляного полотна пилотной дороги выполнялись в Технологическом университете Тампере. Результаты анализа приведены далее.

### **4.3.1 Гранулометрический состав**

При анализе гранулометрического состава материала основания необходимо обратить внимание, в первую очередь, на содержание мелких частиц, т.е. относительное количество частиц <0,063мм. Если содержание таких частиц превышает 10%, материал нельзя использовать в качестве материала основания дорожной одежды, даже если качество мелких частиц достаточно высокое. В этом случае необходимо также построить кривую гранулометрического состава (см. ниже). Если содержание мелких частиц находится в диапазоне 4-10%, качество материала будет зависеть от качества этих частиц. Если содержание мелких частиц менее 4%, даже в случае низкого качества этих частиц маловероятно возникновение каких-либо механических проблем.

Анализ просеивания материала выполнялся для образцов, отобранных из шурфов на км48 и км58. Содержание мелких частиц (<0,063мм) на км48 составило 13,6%, на км58 - 8,5%. Оба материала излишне песчаные, поскольку доля частиц более 6мм составляет менее 10% при норме около 50% (Рисунок 14).

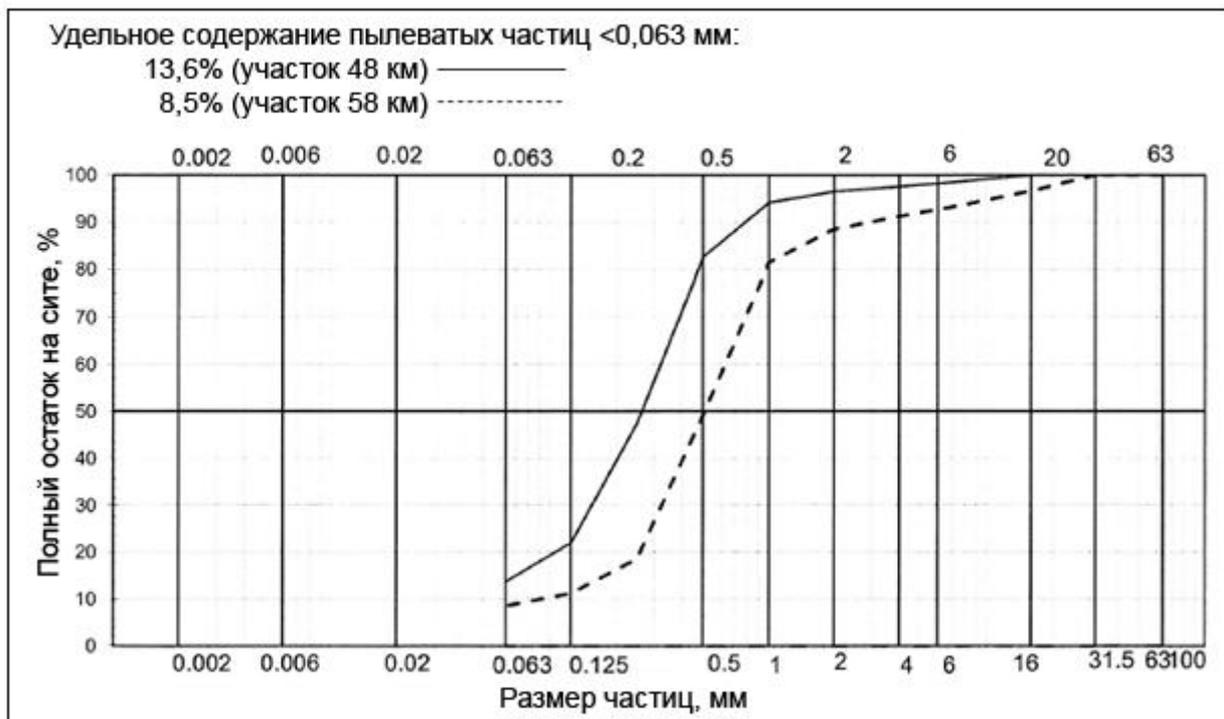


Рисунок 14. Гранулометрический состав материала на пилотных участках дороги: км48 (\_\_\_\_\_, содержание пылеватых частиц <0,063мм - 13,6%) и км 58 ( \_ \_ \_ , содержание пылеватых частиц <0,063мм – 8,5%)

#### 4.3.2 Коэффициент водопоглощения

При незначительном содержании мелких частиц (менее 4%) и коэффициенте водопоглощения <1% маловероятно, что анализируемый материал окажется чувствительным к воде и что водочувствительность окажется причиной деформаций. Коэффициент водопоглощения более 3% свидетельствует о наличии проблемы – отсутствуют ли в образце хлориды?

Коэффициент водопоглощения образца материала из шурфа на км48 составил 5,72%, на км58 - 5,42%. Эти показатели свидетельствуют о низком качестве материала.

#### 4.4 Модули упругости и несущая способность существующей дорожной конструкции

Оценка несущей способности дороги выполнялась на основе данных о толщинах слоев дорожной одежды и качества грунтов земляного полотна, а также модулей упругости, предоставленных авторам отчета российскими специалистами.

##### 4.4.1 Пилотный участок км 47-49, российский метод расчета

Существующая дорожная одежда (данные предоставлены «Архангельскавтодором», см. Рисунок 15):

- Слой 1: 100мм - "Песчаные основания, песок средней крупности, содержание пылевато-глинистой фракции: 5%",  $E = 120.00$  МПа ( $E_{\text{факт}} = 120.00$  МПа), коэфф. старения 1.00
- Слой 2: 500мм - "Песчаные основания, песок мелкий, содержание пылевато-глинистой фракции: 5%",  $E = 100.00$  МПа ( $E_{\text{факт}} = 100.00$  МПа), коэфф. старения 1.00
- Слой 3: грунты земляного полотна - "Грунт суглинок легкий",  $E = 43.08$  МПа ( $E_{\text{факт}} = 43.08$  МПа), коэфф. старения 0.00



Рисунок 15. Существующая дорожная конструкция и модули упругости слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна на пилотном участке км 47-49

Расчет фактического модуля упругости по существующей дорожной одежде (российский метод расчета по данным «Архангельскавтодора»):

$E_3 = 43.08$  МПа

$E_{2-3} = 74.56$  МПа

$E_{1-3} = 81.71$  МПа

Фактический модуль упругости  $E_{\text{факт}} = 81.71$  МПа

Требуемый модуль упругости  $E_{\text{тр}} = 137.68$  МПа

Требуемый коэффициент прочности = 0.63

Коэффициент прочности = 0.59

- Требуется расчет усиления слоев дорожной одежды!

Источник: данные предоставлены «Архангельскавтодором».

#### 4.4.2 Пилотный участок км 57-59, российский метод расчета

Конструкция существующей дорожной одежды (данные предоставлены «Архангельскавтодором», см. Рисунок 16):

- Слой 1: 150 мм "Гравийные смеси с непрерывной гранулометрией при максимальном размере зерен 20 мм  $E=180$  МПа", коэффициент старения 1.00
- Слой 2: 500 мм "Песчаные основания, песок мелкий, содержание пылевато-глинистой фракции: 5%",  $E = 100$  МПа, коэффициент старения 1.00
- Слой 3: "Грунт суглинок легкий",  $E = 43$  МПа, коэффициент старения 0.00



Рисунок 16: Существующая дорожная конструкция и модули упругости слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна на пилотном участке км 57-59

Расчет фактического модуля упругости по существующей дорожной одежде (русский метод расчета по данным «Архангельскавтодора»):

$$E_3 = 43.08 \text{ МПа}$$

$$E_{2-3} = 74.56 \text{ МПа}$$

$$E_{1-3} = 95.21 \text{ МПа}$$

Фактический модуль упругости  $E_{\text{факт}} = 95.21 \text{ МПа}$

Требуемый модуль упругости  $E_{\text{тр}} = 137.68 \text{ МПа}$

Требуемый коэффициент прочности = 0.63

Коэффициент прочности = 0.69

➤ Требуется расчет усиления слоев дорожной одежды!

Источник: данные предоставлены «Архангельскавтодором»

#### 4.4.3 ROADEX показатели несущей способности существующей дорожной конструкции по Одемарку

В данной работе для дальнейших расчетов была выбрана наиболее ослабленная дорожная одежда (пилотный участок км 47-49). Кроме этого, в расчетах применялись различные модули упругости земляного полотна:

- 43 МПа (согласно данным, предоставленным «Архангельскавтодором» для обычных условий);
- 20 МПа (для слабых грунтов земляного полотна - таких как суглинок или морена с высоким содержанием пылеватых частиц);
- 10 МПа (для экстремально ослабленного в период весенней распутицы земляного полотна, представленного, например, суглинистыми или мореновыми грунтами).

Толщина слоев и модули упругости влияют на увеличение несущей способности на поверхности структурного слоя в сравнении с несущей способностью на подошве слоя. Таким образом, несущая способность на поверхности покрытия определяется свойствами земляного полотна и каждого слоя дорожной одежды, уложенного на него. Расчет по формуле Одемарка – простой метод определения несущей способности послойной конструкции. Расчетная осевая нагрузка составляет 50кН, но в расчет не принимается количество нагружаемых осей. Несущая способность рассчитывается на основании толщины и модуля упругости каждого слоя. Тем не менее, данный метод позволяет легко определить, адекватна

ли прочность дорожной конструкции прилагаемым нагрузкам. Формула Одемарка считается широко распространенным методом проектирования дорожных одежд во многих странах. Формула Одемарка представлена ниже:

$$E_P = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \times \left(\frac{h}{0,15}\right)^2}}\right) \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \times \left(\frac{h}{0,15}\right)^2} \left(\frac{E}{E_A}\right)^{\frac{2}{3}}}}$$

где:

$E_P$  = несущая способность на поверхности расчетного слоя [МПа]

$E_A$  = несущая способность на подошве расчетного слоя [МПа]

$E$  = модуль упругости материала расчетного слоя [МПа]

$h$  = толщина расчетного слоя [м]

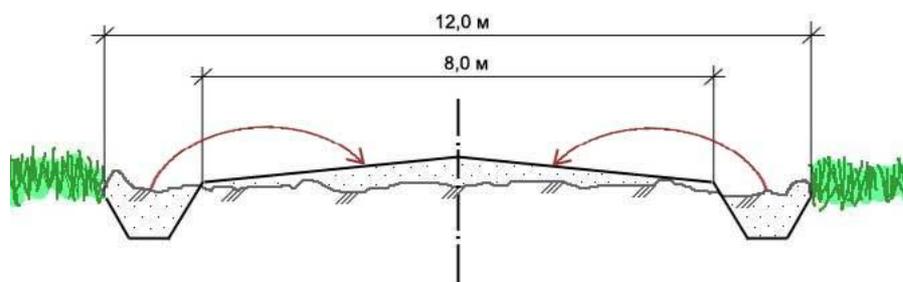
На Рисунке 17 приведены результаты расчета несущей способности существующей дорожной конструкции с использованием метода ROADEX по Одемарку при различных модулях упругости грунтов земляного полотна. Полученный показатель 90МПа сопоставим с полученным российским методом расчета (82 МПа) (см. Главу 4.4)



Рисунок 17. Результаты расчета несущей способности существующей дорожной конструкции с использованием метода ROADEX по Одемарку при различных модулях упругости грунтов земляного полотна. В качестве расчетной дорожной конструкции использована наиболее слабая – на участке км47-49.

## 5. Первоначальные предлагаемые меры по улучшению

Первоначальные меры по улучшению состояния дороги, рекомендуемые авторами, включают сужение проезжей части, гомогенизацию материала существующей дорожной одежды и улучшение дорожного водоотвода. Эти восстановительные меры необходимо осуществить за 1 год до работ по усилению дорожной одежды, чтобы обеспечить достаточное время для полного восприятия нагрузки от дорожно-строительной техники. Ширина дороги должна быть уменьшена до нормативных 8м при поперечном уклоне 4-5%. Излишнюю ширину дороги следует устранить путем нарезки четких откосов и боковых канав. Излишки материала по обе стороны дороги могут быть использованы для усиления покрытия (битумосодержащего), при этом должны быть устранены все примеси органики и включения некачественных материалов. Рекомендации проиллюстрированы на Рисунке 18.



*Рисунок 18. Исправление поперечного профиля гравийной дороги с использованием существующего материала*

Существующая дорожная одежда должна быть гомогенизирована методом миксмиллинга (mixmilling) на глубину 200мм, а поверхности покрытия необходимо придать достаточный поперечный уклон - 4-5%.

Ранней весной валы снега, скапливающиеся на обочинах дороги за зиму, следует столкнуть с обочин в стороны, чтобы предотвратить скапливание талых вод на покрытии и обеспечить равномерное оттаивание дороги на всю ширину. Это также обеспечивает равномерное оттаивание дороги по всей протяженности.

Перед усилением дорожной конструкции необходимо улучшить дорожный водоотвод.

## 6. Структурные решения

### 6.1 Восстановление в качестве гравийной дороги

Если рассматриваемая пилотная дорога так и останется гравийной, то целевая несущая способность ее будет установлена равной 110 МПа, что является типичным целевым показателем для восстанавливаемых гравийных дорог в Финляндии и Швеции. Расчеты по формуле Одемарка (Рисунок 19) выполнялись для различной толщины слоев новых несвязных слоев основания (100-200мм). Целевая несущая способность должна быть достигнута для каждого типа земляного полотна при устройстве нового слоя основания толщиной 200мм. Однако, модуль упругости слоя 300 МПа является несколько оптимистичным показателем, поскольку достичь качественного уплотнения материала основания, уложенного на существующее слабое земляное полотно, – непростая задача.

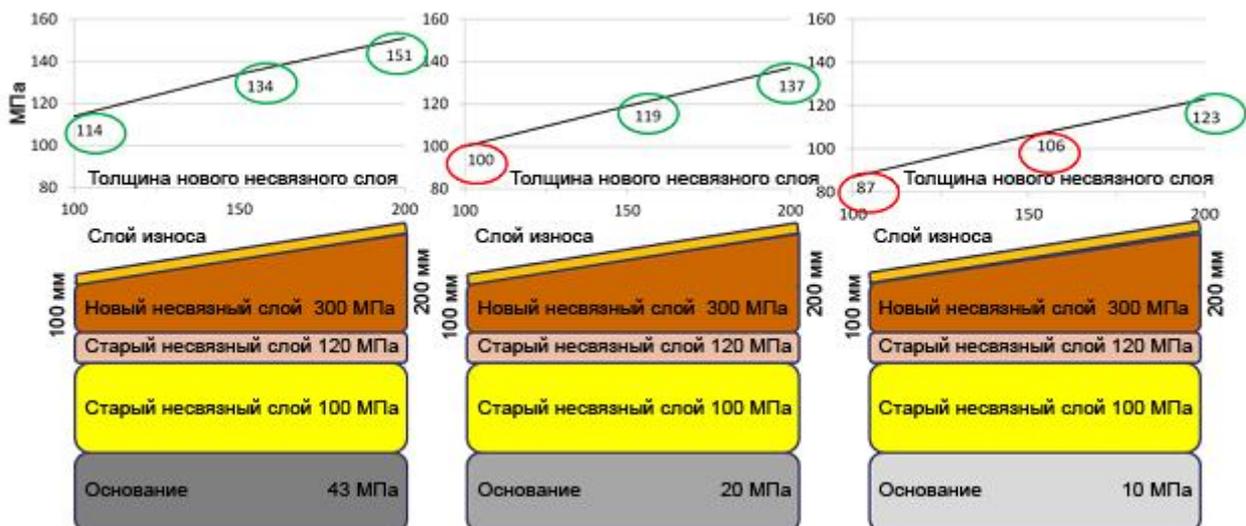


Рисунок 19. Расчетные показатели несущей способности ROADEX по Одемарку для восстановления гравийной дороги при разных показателях модуля упругости грунтов земляного полотна и толщине слоев дорожной одежды. Целевая несущая способность принята в расчете равной 110МПа. Зелеными кружками обведены допустимые значения.

Принципы восстановления гравийной дороги проиллюстрированы Рисунок 20.

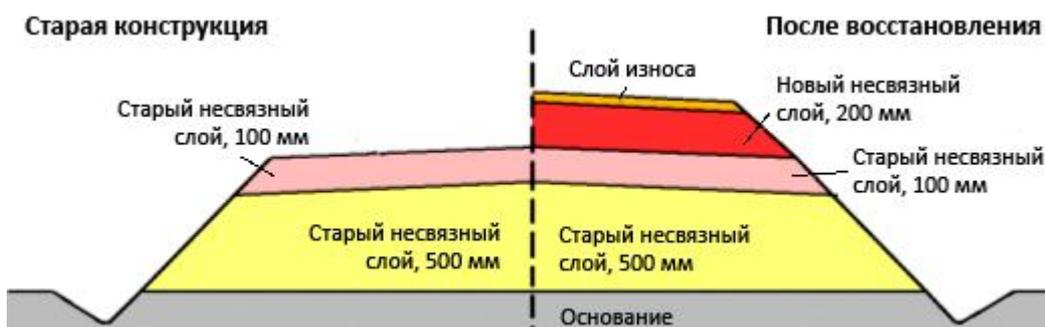


Рисунок 20. Восстановление в качестве гравийной дороги: устройство нового несвязного слоя основания (200мм, модуль упругости 300 МПа) +слой износа.

## 6.2 Восстановление в качестве дороги с твердым покрытием (по версии ROADEx)

Если пилотная автомобильная дорога будет переводиться в дорогу с твердым покрытием, целевая несущая способность составит не менее 160 МПа. Расчеты несущей способности по Одemarkу (Рисунок 21) также были выполнены для конструкций с различной толщиной нового несвязного слоя основания (100-250мм). Расчеты показали, что требуемой несущей способности можно достичь при устройстве нового слоя основания толщиной 200мм. В случае слабого земляного полотна (10МПа) несущая способность будет несколько ниже нормативной (158МПа вместо требуемых 160 МПа), однако прочность конструкции все же будет обеспечена. Рекомендуется устройство нового слоя покрытия толщиной 50мм и несвязного основания толщиной 200мм. В этом случае модуль упругости 300МПа для слоя основания также слишком оптимистичен.

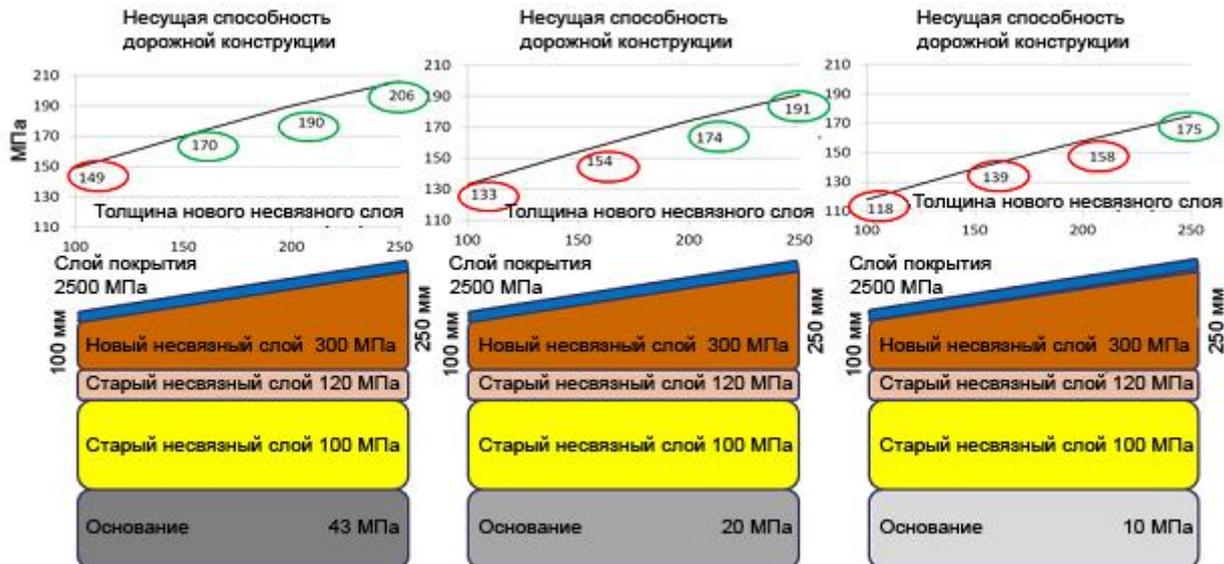


Рисунок 21. Расчетные показатели несущей способности ROADEx по Одemarkу для варианта восстановления как дороги с твердым покрытием при разных показателях модуля упругости и толщины слоя основания. Целевая несущая способность была принята в расчетах равной 160МПа. Зеленым кружком обведены допустимые значения модуля упругости.

Принципы восстановления в качестве дороги с твердым покрытием проиллюстрированы Рисунком 22.

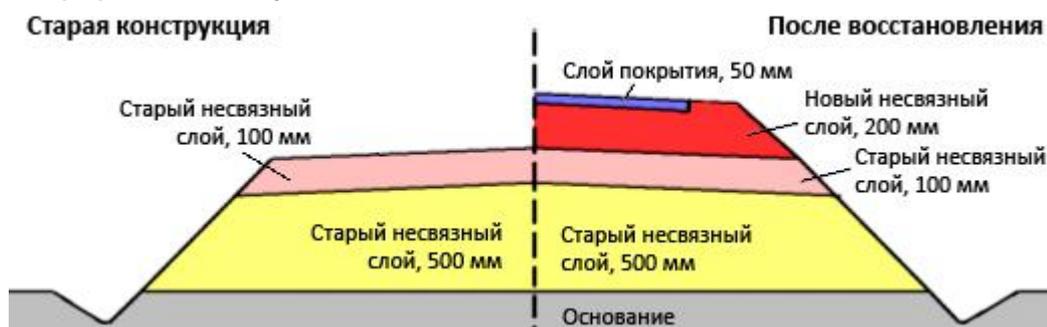


Рисунок 22. Восстановление в качестве дороги с твердым покрытием (по версии ROADEX): устройство нового несвязного слоя основания толщиной 200 мм (модуль упругости 300МПа) + нового слоя покрытия толщиной 50мм (модуль упругости 2500 МПа)

### 6.3 Восстановление в качестве дороги с твердым покрытием (русский метод расчета)

Русский метод расчета показывает, что достаточную прочность может обеспечить устройство нового слоя покрытия 40мм+40мм и нового слоя основания толщиной 280мм.

Русский метод расчета (результаты расчета предоставлены «Архангельскавтодором»):

Конструкция слоев усиления дорожной одежды (по проекту)

Слой 1.  $h = 4.00$  см - "Асфальтобетон горячий плотный типа Б на вязком битуме БНД и БН марки: 90/130  $E=2400$  МПа"

Слой 2.  $h = 4.00$  см - "Асфальтобетон горячий пористый крупнозернистый на вязком битуме БНД и БН марки: 90/130  $E=1400$  МПа"

Слой 3.  $h = 14.00$  см - "Щебень. фр. 40-80 мм легкоуплотн. (известн) с заклинкой фракционированным мелким щебнем  $E=450$  МПа"

Слой 4.  $h = 14.00$  см - "Щебень. фр. 40-80 мм легкоуплотн. (известн) с заклинкой фракционированным мелким щебнем  $E=450$  МПа"

Фактический модуль упругости, с учетом фрезерования (разборки)  $E_{\text{фрез}} = 76.49$  МПа

Пилотный участок км47-49

Расчет модуля по новой дорожной одежде

$E_4 = 76.49$  МПа

$E_{4-4} = 120.42$  МПа

$E_{3-4} = 170.05$  МПа

$E_{2-4} = 204.20$  МПа

$E_{1-4} = 251.19$  МПа

Фактический модуль упругости  $E_{\text{факт}} = 251.19 \text{ МПа}$

Требуемый модуль упругости, на проектный срок службы  $E_{\text{тр}} = 137.68 \text{ МПа}$

Коэффициент прочности = 1.82

- Прочность обеспечена!

Пилотный участок км57-59

Фактический модуль упругости, с учетом фрезерования (разборки)  $E_{\text{фрез}} = 86.39 \text{ МПа}$

Расчет модуля по новой дорожной одежде

$E_4 = 86.39 \text{ МПа}$

$E_{4-4} = 132.17 \text{ МПа}$

$E_{3-4} = 182.35 \text{ МПа}$

$E_{2-4} = 217.96 \text{ МПа}$

$E_{1-4} = 266.91 \text{ МПа}$

Фактический модуль упругости  $E_{\text{факт}} = 266.91 \text{ МПа}$

Требуемый модуль упругости, на проектный срок службы  $E_{\text{тр}} = 137.68 \text{ МПа}$

Коэффициент прочности = 1.94

- Прочность обеспечена!

Расчеты несущей способности по Одemarkу показывают, что при разных типах грунтов земляного полотна требуемая прочность будет достигнута (см. Рисунок 23). Однако, опираясь на опыт ROADDEX, можно утверждать, что достижение модуля упругости несвязного слоя основания 450МПа, который применялся в вышеприведенных расчетах, слишком завышен и труднодостижим в реальных условиях.



Рисунок 23. Расчетные показатели несущей способности ROADDEX по Одemarkу для варианта восстановления в качестве дороги с твердым покрытием (русская версия) при разных модулях упругости земполотна. Целевой показатель несущей способности – 160МПа.

Результаты расчета проиллюстрированы Рисунок 24.

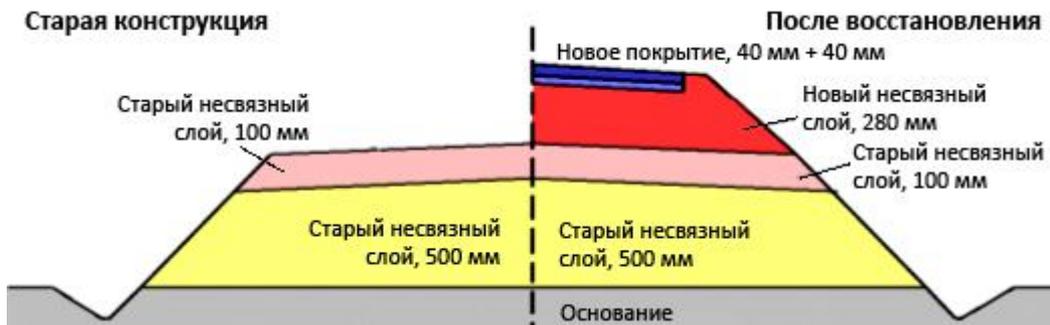


Рисунок 24. Восстановление в качестве дороги с твердым покрытием (русская версия): 280мм нового несвязного слоя основания (модуль упругости 450МПа) + 40мм нового покрытия (модуль упругости 1400 МПа) + 40мм нового покрытия (модуль упругости 2400 МПа)

#### 6.4 Восстановление с обработкой битумным вяжущим

Также рассматривалась возможность устройства битумосодержащего основания с последующей оценкой его прочности, поскольку при обработке материалов битумом не потребуется транспортировать качественные каменные материалы из дальних карьеров. Расчеты показали, что требуемой прочности можно достичь при устройстве битумосодержащего слоя основания толщиной 200мм (см. Рисунок 25). Для данного варианта целевая несущая способность также была установлена равной 160МПа. В случае ослабленного земляного полотна (период весенней распутицы, модуль упругости грунтов 10МПа), несущая способность будет чуть ниже (158 МПа) целевого показателя (160 МПа), однако в целом конструкция будет достаточно прочной. Поэтому толщина битумосодержащего слоя основания выбрана равной 200мм. Данная толщина также удобна с позиции применения дорожно-строительных машин, которыми выполняется стабилизация материалов.

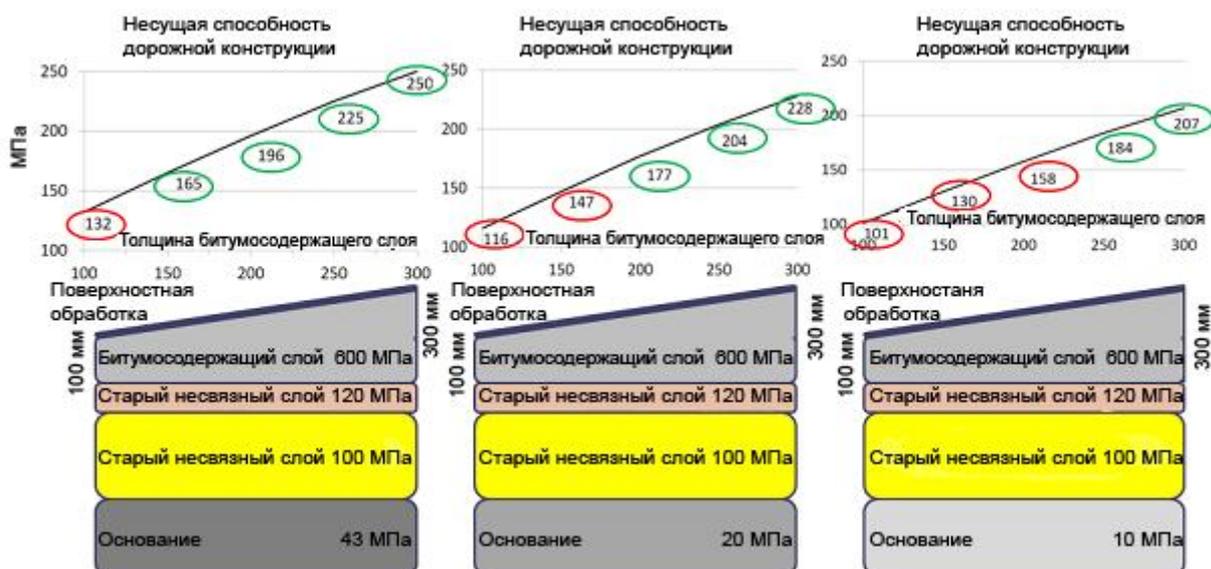


Рисунок 25. Расчетные показатели несущей способности ROADEX по Одemarkу для восстановления методом стабилизации основания битумным вяжущим при различных модулях упругости грунтов земляного полотна и толщине слоя

битумосодержащего основания. Целевая несущая способность составляет 160МПа. Зелеными кружками обведены допустимые значения.

Рисунок 26 иллюстрирует данный метод восстановления дороги.

Авторы данного отчета рекомендуют к реализации именно это решение по причине отсутствия вблизи пилотной дороги карьеров с качественными дорожно-строительными материалами. Данное решение позволяет использовать местные каменные материалы. Процесс восстановления дороги по данному методу включает следующие шаги:

- Нарезка боковых канав;
- Гомогенизация существующей дорожной конструкции методом миксмиллинга на толщину 200мм;
- Устройство нового слоя основания (местные материалы) толщиной 200мм, смешанного с 1-2% битумного вяжущего. Уплотнение слоя. Обработка вяжущим может производиться или на асфальтобетонном заводе, или непосредственно на месте с использованием специальных машин (миксмиллинг);
- Устройство двойной поверхностной обработки.

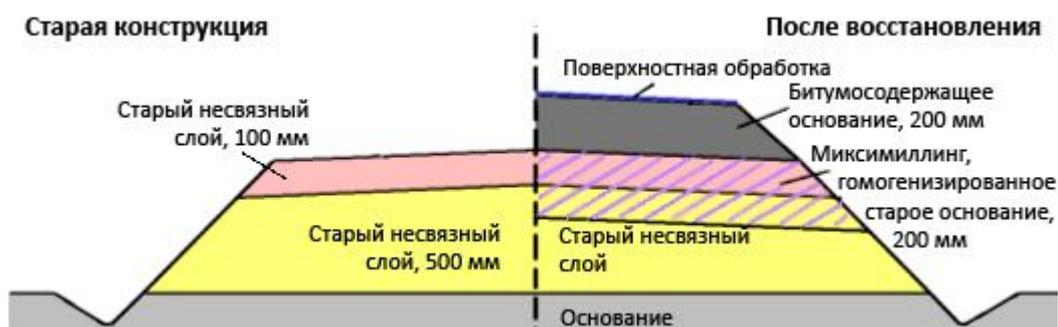


Рисунок 26. Восстановление дороги методом обработки основания битумным вяжущим: 200мм слой битумосодержащего основания (модуль упругости 600МПа)

## 7. Анализ влияния различных типов грузовых автомобилей

### 7.1 Общие положения

В рамках данной работы была выполнена оценка влияния на транспортно-эксплуатационные показатели дороги и сравнение между собой различных типов грузовых автомобилей (33т, 60т, 72т и 90т). Анализ влияния на покрытие различных нагрузок выполнялся с использованием метода моделирования с применением теории линейной упругости для многослойных конструкций, что было реализовано при помощи программы BISAR®. Такой подход является широко распространенным международным методом анализа механического поведения разных типов дорожных одежд. При многослойном линейном моделировании дорожная конструкция описывается как совокупность слоев, уложенных один поверх другого, и подстилаемых упругим полупространством, представленным земляным полотном. В модели толщина и прочность каждого слоя задается свободно для достижения наибольшего соответствия оригинальной конструкции. Между тем также можно моделировать колесные нагрузки на поверхность покрытия, одну за другой, при помощи сферических площадей контакта, на которые оказывается равномерно распределенное вертикальное давление, соответствующее давлению воздуха в шинах.

Программа BISAR® предоставляет результаты анализа усилий и напряжений, а также смещений в разных направлениях в выбранных точках дорожной одежды и земляного полотна. Для данного изучения определялись три наиболее важных показателя – максимальные горизонтальные напряжения растяжения на подошве связных слоев и максимальные вертикальные напряжения сжатия в несвязных слоях и на поверхности земляного полотна. Также важным результатом расчетов является величина вертикального смещения/осадки поверхности земляного полотна, что может служить индикатором суммарного разрушения в результате воздействия нагрузки от автотранспорта.

Ограничением, присущим методу моделирования с применением линейной теории упругости, является то, что нагрузки оцениваются не в движении, а в одной постоянной точке. Поэтому модель не может напрямую применяться при оценке вязкоупругого поведения ослабленных и увлажненных грунтов земляного полотна, в которых поровое давление воды может увеличиться под действием многократных нагрузок. Еще одно ограничение данного метода связано с тонкослойными дорожными одеждами, типичными для дорог с низкой интенсивностью движения, когда имеется только тонкий битумосодержащий слой в качестве слоя износа.

В качестве применяемого при оценке типа шин были выбраны сдвоенные шины, поскольку опыт ROADDEX и ряд других, более ранних исследований показал, что сдвоенные шины намного более дружелюбно относятся к покрытию по сравнению с шинами типа «супер сингл». Усилия и напряжения в верхней части дорожной

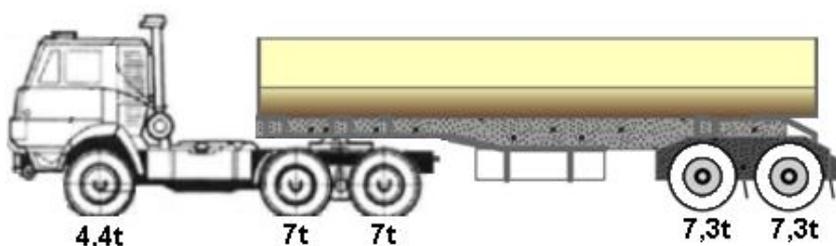
конструкции будут, вероятно, слишком высокими в случае применения шин типа «супер сингл».

## 7.2 Типы рассматриваемых грузовых автомобилей

Для расчетов «Архангельскавтодором» были предоставлены данные по наиболее типичному грузовому автомобилю – КАМАЗу грузоподъемностью 33т. Также очевидным выбором для выполнения расчетов стал стандартный (наиболее популярный в Финляндии и Швеции) 60т грузовой автомобиль. В качестве тяжелых опций были выбраны грузовые автомобили "Boliden" грузоподъемностью 72т и "En trave till" (еще один прицеп) грузоподъемностью 90т. Выбор данных конфигураций обоснован тем, что они уже используются при осуществлении тяжелых грузоперевозок в рамках специальных проектов в Швеции и являются более или менее вероятными альтернативами стандартному 60т грузовому автомобилю. В итоге, в дальнейших расчетах участвуют следующие виды грузовых автомобилей:

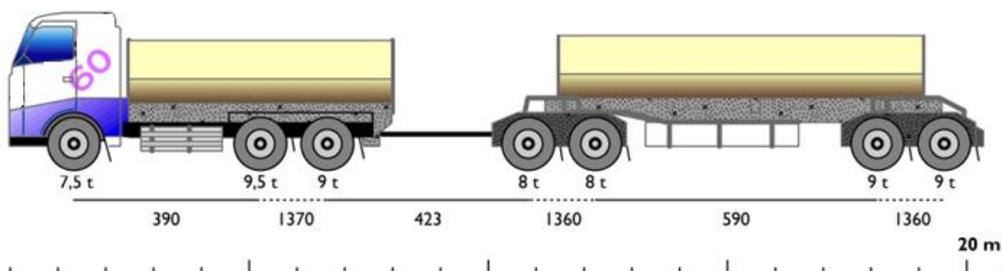
### Грузовой автомобиль КАМАЗ грузоподъемностью 33т

5-осный, с тремя осями на тягаче и двумя на прицепе. Расчетной (критической) нагрузкой является 2 x 7,3 т с двойной тележкой. Полная масса для данной конфигурации составляет 33т.



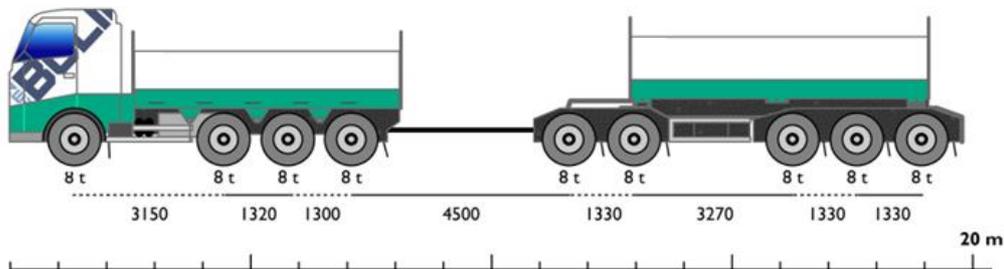
### Стандартный 60-тонный грузовой автомобиль

7-осный, с тремя осями на тягаче и четырьмя на прицепе. Расчетной (критической) нагрузкой, используемой в расчетах, является 9,5 + 9т с двойной тележкой. Общая масса для данной конфигурации составляет 60т при полезной нагрузке 38т. Длина грузового автомобиля с прицепом составляет 20м.



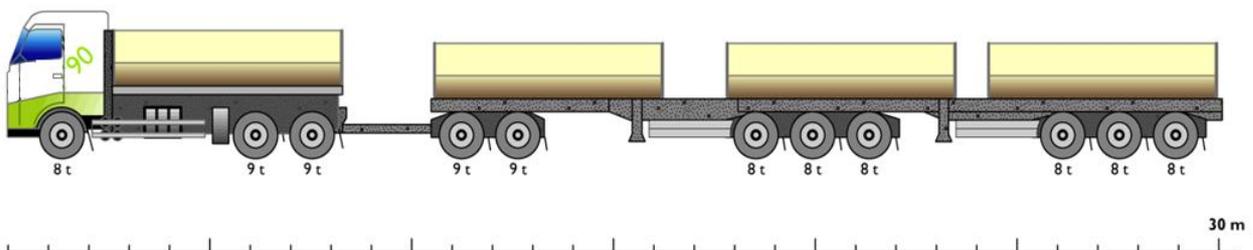
### 72-тонный грузовой автомобиль "Boliden"

9-осный, с четырьмя осями на тягаче и пятью на прицепе. Расчетной нагрузкой является 3 x 8 т с тройной тележкой. Общая масса для данной конфигурации – 72т при полезной нагрузке 49т. Длина грузового автомобиля с прицепом составляет 20м.



### 90-тонный грузовой автомобиль "ЕТТ (еще один прицеп)"

Комбинация тягача, транспортной тележки и прицепа с 11 осями. Расчетная (критическая) нагрузка - 3 x 8 т с тройной тележкой. Длина автопоезда – 30м.



### 7.3 Структурное влияние различных типов грузовых автомобилей

Для дальнейших расчетов применялась наиболее ослабленная дорожная конструкция (пилотный участок км 47-49). Кроме этого, расчеты выполнялись для трех различных модулей упругости грунтов земляного полотна в зависимости от условий:

- 43 МПа (по данным «Архангельскавтодора» для обычных условий)
- 20 МПа (для земляного полотна, представленного слабыми грунтами-суглинком или мореной с высоким содержанием пылеватых частиц)
- 10 МПа (для экстремально ослабленного земляного полотна, представленного суглинистыми или мореновыми грунтами, в период весенней распутицы).

Воздействие на дорожную конструкцию определялось наиболее тяжелой осевой группой рассматриваемого грузового автомобиля. Расчеты выполнялись как для существующей дорожной конструкции, так и для каждого предложенного ранее варианта восстановления, приведенного в Главе 6. Резюме расчетов приведено в Таблице 1.

**Таблица 1. Типы дорожных конструкций, применяемых в расчетах влияния разных грузовых опций. Цветом в таблице выделены разные слои конструкции с разными модулями упругости**

Дорожная конструкция	Слой	Толщина слоя, мм	Модуль упругости, МПа
Существующая дорожная конструкция	Несвязный	100	120
	Несвязный	500	100
	Земляное полотно		43/20/10
Существующая дорожная конструкция + 200мм слой основания	Несвязный	200	300
	Несвязный	100	120
	Несвязный	500	100
	Земляное полотно		43/20/10
Существующая дорожная конструкция + 200мм слой основания + 50мм покрытие	Связный	50	2500
	Несвязный	200	300
	Несвязный	100	120
	Несвязный	500	100
	Земляное полотно		43/20/10
Существующая дорожная конструкция + 280мм слой основания + 80мм покрытие	Связный	40	2400
	Связный	40	1400
	Несвязный	280	450
	Несвязный	100	120
	Несвязный	500	100
	Земляное полотно		43/20/10
Существующая дорожная конструкция + 200мм слой битумосодержащего основания (P.S. двойная поверхностная обработка поверх слоя)	Слой основания, обработанный битумом	200	600
	Несвязный	100	120
	Несвязный	500	100
	Земляное полотно		43/20/10

Особое внимание было уделено следующим четырем параметрам:

1. Максимальные горизонтальные напряжения растяжения в подошве связных слоев:

- высокие напряжения в данной точке свидетельствуют о риске усталости покрытия.

2. Максимальные вертикальные напряжения сжатия в верхней части несвязных слоев:

- Высокие напряжения в данной точке наиболее критичны с позиции развития колейности 1 степени, т.е. колееобразования в несвязных слоях дорожной одежды.

3. Максимальные вертикальные напряжения сжатия на поверхности земляного полотна.

- Высокие напряжения в данной точке наиболее критичны с позиции развития колейности 2 степени, т.е. колееобразования в земляном полотне.

4. Вертикальное смещение/осадка земляного полотна под воздействием нагрузки от разных грузовых автомобилей.

### Напряжения

Напряжения и осадка, определенные для каждого типа грузового автомобиля и каждой конструкции, представлены в Таблицах 2, 3 и 4. В каждой из таблиц приведены результаты аналогичных расчетов, но при разных модулях упругости грунтов земляного полотна. Разным цветом обозначены напряжения в пределах лимитов, установленных демонстрационной версией расчетов ROADEX - “The ROADEX Pavement Stress and Strain Calculation Demo”, представленной на сайте ROADEX (is [http://www.uleaborg.com/roadex\\_stress/roadex.html](http://www.uleaborg.com/roadex_stress/roadex.html)). Цвет символизирует риск остаточных деформаций или отказов в слоях дорожной конструкции дороги с низкой интенсивностью движения (около 500авт/сут. и менее).

**Зеленым** цветом обозначается безопасный уровень усилий и напряжений и очень низкий риск отказов/остаточных деформаций.

**Желтым** цветом обозначается умеренный уровень усилий и напряжений и умеренный риск отказов/остаточных деформаций.

**Красным** цветом обозначается высокий уровень усилий и напряжений и высокий риск отказов/остаточных деформаций.

**Черным** цветом обозначена вероятность немедленного отказа/ускоренного развития остаточных деформаций.

Результаты расчетов напряжений показывают, что при отсутствии восстановительных мер структурные слои существующей дорожной конструкции подвержены быстрому разрушению даже под воздействием самого легкого из расчетных грузовых автомобилей.

На основании результатов расчетов напряжений любого из предложенных в Главе 6 решений по восстановлению дороги будет достаточно для снижения риска развития остаточных деформаций до допустимого уровня. Следует заметить, что восстановление в качестве гравийной дороги представляет собой наименее желательный вариант. С другой стороны, российская версия восстановления дороги с устройством твердого покрытия подразумевает достижение избыточной прочности. Кроме того, учитывая опыт ROADEX, достижение модуля упругости несвязного слоя основания (450 МПа) является нереалистичным при существующей конструкции дороги. Версии восстановления ROADEX – устройство покрытия или устройство битумосодержащего слоя основания с двойной поверхностной обработкой – являются наиболее жизнеспособными решениями. При всех вариантах предложенных дорожных конструкций полученные величины

напряжений для грузовых автомобилей большей грузоподъемности не выше значений, полученных для грузового автомобиля грузоподъемностью 33т.

**Таблица 2. Максимальные напряжения и смещения/осадка земляного полотна для каждого из рассматриваемых типов грузовых автомобилей и дорожных конструкций при модуле упругости земляного полотна 43МПа. Расчеты приведены для самой тяжелой осевой группы каждого автомобиля**

Грузовой автомобиль/ расчетная осевая группа	Дорожная конструкция	Макс. гориз. напряжения в связанном слое покрытия	Макс. вертик. напряжения в несвязных слоях	Макс. вертик. напряжения в земляном полотне	Макс. осадка/ смещение земляного полотна
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция		-3067	-652	947
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция		-4525	-901	1230
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция		-4552	-763	1377
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +200мм основание		-1110	-383	800
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция 200мм основание		-1700	-515	1028
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +200мм основание		-1726	-458	1201
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +200мм основание + 50мм покрытие	242	-1010	-306	725
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция +200мм основание + 50мм покрытие	370	-1466	-408	929
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +200мм основание + 50мм покрытие	365	-1385	-378	1105
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +280мм основание + 80мм покрытие	184	-603	-237	668
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция +280мм основание + 80мм покрытие	276	-867	-312	854
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +280мм основание + 80мм покрытие	264	-806	-306	1034
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +200мм битумосодержащее основание	318	-773	-352	773
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция +200мм битумосодержащее основание	448	-1075	-471	992
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +200мм битумосодержащее основание	376	-926	-425	1166

**Таблица 3. Максимальные напряжения и смещения/осадка земляного полотна для каждого из рассматриваемых типов грузовых автомобилей и дорожных конструкций при модуле упругости земляного полотна 20МПа. Расчеты приведены для самой тяжелой осевой группы каждого типа автомобиля.**

Грузовой автомобиль/расчетная осевая группа	Дорожная конструкция	Макс. гориз. напряжения в связанном слое покрытия	Макс. вертик. напряжения в несвязных слоях	Макс. вертик. напряжения в земляном полотне	Макс. осадка/ смещение земляного полотна
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция		-3006	-1044	1875
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция		-4425	-1429	2416
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция		-4465	-1247	2780
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +200мм основание		-1074	-628	1559
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция 200мм основание		-1653	-835	1998
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +200мм основание		-1679	-785	2390
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +200мм основание + 50мм покрытие	230	-998	-502	1390
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция +200мм основание + 50мм покрытие	354	-1450	-661	1778
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +200мм основание + 50мм покрытие	350	-1368	-650	2160
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +280мм основание + 80мм покрытие	175	-593	-394	1270
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция +280мм основание + 80мм покрытие	264	-854	-513	1623
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +280мм основание + 80мм покрытие	251	-792	-535	2000
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +200мм битумосодержащее основание	316	-766	-579	1498
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция +200мм битумосодержащее основание	446	-1066	-767	1918
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +200мм битумосодержащее основание	372	-917	-732	2306

**Таблица 4. Максимальные напряжения и смещения/осадка земляного полотна для каждого из рассматриваемых типов грузовых автомобилей и дорожных конструкций при модуле упругости земляного полотна 10МПа. Расчеты приведены для самой тяжелой осевой группы каждого автомобиля.**

Грузовой автомобиль/расчетная осевая группа	Дорожная конструкция	Макс. гориз. напряжения в связанном слое покрытия	Макс. вертик. напряжения в несвязных слоях	Макс. вертик. напряжения в земляном полотне	Макс. осадка/смещение земляного полотна
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция		-2933	-1534	3440
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция		-4307	-2073	4412
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция		-4352	-1894	5205
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +200мм основание		-1030	-939	2799
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция 200мм основание		-1598	-1236	3579
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +200мм основание		-1619	-1230	4366
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +200мм основание + 50мм покрытие	216	-984	-743	2449
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция +200мм основание + 50мм покрытие	336	-1432	-971	3131
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +200мм основание + 50мм покрытие	330	-1347	-1007	3870
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +280мм основание + 80мм покрытие	164	-582	-593	2222
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция +280мм основание + 80мм покрытие	250	-840	-765	2839
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +280мм основание + 80мм покрытие	235	-776	-837	3547
КАМАЗ 33т / 2х7.3т	Существ. дор. конструкция +200мм битумосодержащее основание	315	-760	-865	2673
Стандарт. 60т / 9.5т +9т	Существ. дор. конструкция +200мм битумосодержащее основание	444	-1058	-1135	3417
72т "Boliden" и 90т "En trave till" / 3х8т	Существ. дор. конструкция +200мм битумосодержащее основание	369	-909	-1147	4188

#### Смещение/осадка земляного полотна

Сравнительный анализ результатов определения осадки/смещения земляного полотна представлен на Рисунке 27. Данные свидетельствуют о значительном увеличении осадки на ослабленном земляном полотне по причине «выдавливания» воды через трещины в покрытии под действием тяжелых транспортных нагрузок, особенно в период весенней распутицы. Грузовые автомобили, движущиеся в колонне, еще более усиливают это негативное воздействие.

Вариант восстановления дороги в качестве гравийной является самым неблагоприятным с позиции осадки/смещения земляного полотна. Величина осадки

по вариантам восстановления в качестве дороги с твердым покрытием и в случае стабилизации основания битумным вяжущим по методу ROADDEX, примерно одинакова. Максимальная прочность обеспечивается в случае реализации российского варианта - устройства твердого покрытия, однако, как уже упоминалось ранее, достижение модуля упругости несвязного слоя основания 450МПа представляется в существующих условиях нереалистичным. Влияние более тяжелых грузовых автомобилей четко прослеживается по результатам расчета осадки земляного полотна. Эта величина для грузового автомобиля грузоподъемностью 60т примерно на 25% выше по сравнению с 33-тонным автомобилем. Величина осадки земляного полотна под воздействием 72-тонного и 90-тонного грузовых автомобилей примерно на 50% выше, чем 33-тонного. Однако, в целом, смещение/осадка восстановленных дорожных конструкций относительно малы даже в случае сверхтяжелых грузовых опций.

Максимальное смещение/осадка земляного полотна при модуле упругости земляного полотна:

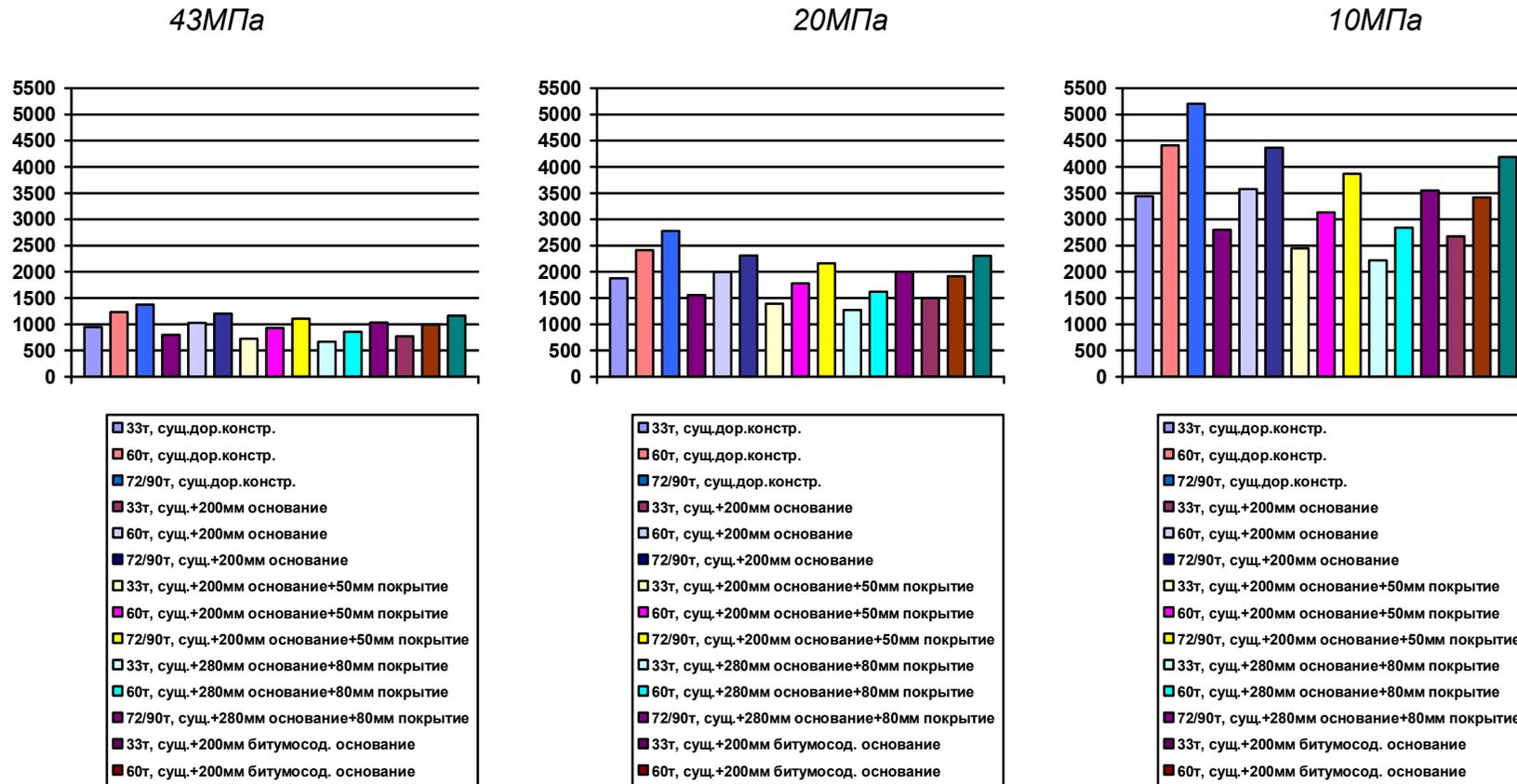


Рисунок 27. Максимальное смещение/осадка земляного полотна, определенное для каждого типа грузового автомобиля и каждого типа дорожной конструкции при трех разных модулях упругости грунтов земляного полотна

Самым рекомендуемым к реализации вариантом является устройство нового слоя основания, обработанного битумным вяжущим, толщиной 200мм, что обосновано:

- Возможностью применения местных каменных материалов;
- Достижением требуемых показателей несущей способности даже на ослабленном земляном полотне (10МПа, период распутицы);
- Низким показателем максимальных горизонтальных напряжений в связанном слое и вертикальных напряжений в несвязных слоях основания и земляном полотне;
- Обеспечением практически тех же показателей осадки/смещения земляного полотна, что и в случае устройства твердого покрытия толщиной 50мм на новом слое основания толщиной 200мм по методу ROADDEX.

#### Транспортно-эксплуатационные характеристики покрытия

Кроме расчетов напряжений и осадки с использованием программного обеспечения BISAR® также было выполнено отдельное сравнение воздействия на дорожную конструкцию различных видов грузовых автомобилей на основании классического «правила четвертой степени» ("fourth power rule"), применяемого при инжиниринге дорожных одежд. Данное правило несколько занижает показатели колеиности и завышает степень повреждения покрытия, но в целом представляет достаточно достоверные данные по оценке транспортно-эксплуатационных характеристик покрытия в зависимости от нагрузки.

Правило четвертой степени выражается формулой  $EKV = (p/p_{ref})^4$ . Показатель эквивалентной нагрузки определялся для каждого рассматриваемого грузового автомобиля на основании количества осей и осевой нагрузки. После этого определялось требуемое количество нагрузок для транспортировки того же самого количества чистого веса при разных вариантах грузовых автомобилей. Чистый вес 33-тонного КАМАЗа был определен как 20т, поскольку точной величины в первоисточнике указано не было. В результате воздействие нагрузки от каждого типа грузового автомобиля было определено путем умножения количество транспортных нагрузок на соответствующий грузовой эквивалент.

Результаты расчетов с применением «правила четвертой степени» приведены в Таблице 5. В последнем столбце указан коэффициент сравнения различных грузовых автомобилей с максимальным воздействием нагрузки (60т). На основе этой оценки наилучшим вариантом является 33-тонный грузовой автомобиль из-за наименьшей осевой нагрузки и минимального количества осей. По воздействию нагрузки 33-тонный грузовой автомобиль на 47,4% лучше, чем 60-тонный. 72-тонный грузовой автомобиль на 27%, а 90-тонный – на 11,2% дружественней по сравнению с 60-тонным автомобилем.

**Таблица 5. Результаты расчета воздействия на транспортно-эксплуатационные характеристики дороги разных типов грузовых автомобилей с применением правила четвертой степени**

Грузовой автомобиль/ грузоподъемность	Осевые нагрузки, т							Показатель эквивал. Нагрузки EKV	Чистый вес, т	Трансп. нагрузки	Эффект нагрузки	Сравнение с наибольшим коэфф. нагрузки
	4,4	7,0	7,3	7,5	8,0	9,0	9,5					
КАМАЗ / 33т	1	2	2	0	0	0	0	1,086	20	3,00	3,26	52,6%
Стандарт / 60т	0	0	0	1	2	3	1	3,918	38	1,58	6,19	100,0%
"Boliden" / 72т	0	0	0	0	9	0	0	3,686	49	1,22	4,51	73,0%
"En trave till" / 90т	0	0	0	0	7	4	0	5,492	60	1,00	5,49	88,8%
Нагруз. экспонента, использованная в расчетах = 4												

## 8. Резюме

В рамках «Изучения в Архангельске» основное внимание было уделено описанию характерных проблем, вариантам решений по их устранению и их сравнению между собой для пилотных участков автомобильной дороги регионального значения с низкой интенсивностью движения «Архангельск-Рикасиха-Онега».

В существующем материале дорожной одежды было выявлено избыточное количество пылеватых частиц, что повышает чувствительность материала к воздействию воды. Наиболее экономичным и в то же время результативным решением, которое можно рекомендовать в данном случае, является устройство битумосодержащего слоя основания толщиной 200мм. Главная выгода данного решения заключается в возможности использования местных материалов. Согласно результатам расчетов обработка слоя битумом позволит обеспечить требуемую несущую способность даже в условиях ослабленного в период весенней распутицы земляного полотна (10МПа). Максимальные горизонтальные напряжения в покрытии и вертикальные напряжения в связных слоях незначительны. Величина максимального смещения/осадки земляного полотна аналогична той, которая могла бы быть в случае устройства твердого покрытия. В рамках восстановительных работ необходимо сужение проезжей части с существующих 12м до нормативных 8м. Кроме этого, требуется произвести работы по улучшению дорожного водоотвода.

Реализация рекомендуемых решений позволит повысить устойчивость дороги к развитию остаточных деформаций, особенно к колебности 2 степени и гребенке, сократить объемы грейдирования в летний период и количество проходов грейдера при зимней снегоуборке. В рамках данного изучения не было рассмотрено влияние морозного пучения, однако именно дифференциальное морозное пучение может вызвать проблемы в связных слоях, особенно если не обеспечен водоотвод.

Расчеты усилий и напряжений показали, что среди рассмотренных грузовых автомобилей наиболее дружелюбным по отношению к дороге является КАМАЗ грузоподъемностью 33т, однако после проведения восстановительных работ дорога может эксплуатироваться и более тяжелыми транспортными средствами без значительного риска разрушений.



ENPI CBC

**Kolarctic**

