

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

2024, Том 11, № 3 / 2024, Vol. 11, Iss. 3 <https://t-s.today/issue-3-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/15SATS324.pdf>

DOI: 10.15862/15SATS324 (<https://doi.org/10.15862/15SATS324>)

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

УДК 625.814.24

## Эффективность применения добавок для модификации грунтов

Павликов А.Б., Каменчуков А.В.

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Павликов Алексей Борисович, e-mail: 012429@pnu.edu.ru

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу совершенствования структуры грунтов с целью улучшения показателей путем внедрения добавок на основе неорганических/органических вяжущих и продуктов вторичной переработки. Авторы проводят обзор существующих методов модификации грунтов и цементогрунтов, включая лабораторные исследования прочности при сжатии образцов из грунтов, модифицированных неорганическим/органическим вяжущими. Модификация грунтов играет важную роль в дорожном строительстве, так как она позволяет улучшить характеристики грунтов, повышая их прочность и долговечность. Это особенно важно в районах, с малой доступностью каменных материалов, так как модифицированные грунты могут заменить каменные материалы в качестве слоев основания дороги. Основное внимание уделено анализу эффективности применения добавок для

модификации цементогрунта, что позволяет повысить прочностные характеристики и использовать их в качестве слоев дорожной конструкции. Проведены лабораторные исследования прочности при сжатии образцов из грунтов, модифицированных неорганическим/органическим вяжущими, а также получены результаты составов с частичной заменой минеральной части на пластиковые частицы. Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод о перспективности дальнейшего исследования модификации грунтов и цементогрунтов для повышения прочностных характеристик и использования их в качестве слоев дорожной конструкции.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога; грунт; цементогрунт; органическое вяжущее; дорожная одежда; дефекты; строительные материалы

## Effectiveness of additive application for soil modification

Aleksej B. Pavlikov, Aleksej V. Kamenchukov

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Corresponding author: Aleksej B. Pavlikov, e-mail: 012429@pnu.edu.ru

**Abstract.** This article addresses the enhancement of soil structure aimed at improving performance indicators through the introduction of additives based on inorganic/organic binders and recycled materials. The authors review existing methods for modifying soils and cement-soils, including laboratory studies on the compressive strength of samples modified with inorganic/organic binders. Soil modification plays a crucial role in road construction as it enhances soil characteristics, increasing their strength and durability. This is particularly significant in areas with limited availability of stone materials, as modified soils can replace stone materials as road base layers. The primary focus is on analyzing the effectiveness of additive

application for cement-soil modification, which allows for improved strength characteristics and their use as layers in road structures. Laboratory studies have been conducted on the compressive strength of samples from soils modified with inorganic/organic binders, and results have been obtained for compositions with partial replacement of the mineral component by plastic particles. The findings of this research suggest promising avenues for further investigation into soil and cement-soil modification to enhance strength characteristics and their application as layers in road construction.

**Keywords:** road; soil; cement-soil; organic binder; road pavement; defects; building materials

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



## Введение

### Introduction

Опыт строительства дорог на Дальнем Востоке и в Арктике показывает, что дорожное покрытие служит не более 10 лет, хотя по нормативам срок его службы должен составлять 24 года. Причина этого — сезонные изменения грунта, которые снижают прочность дорог.

Ещё одна проблема дорожного строительства — необходимость использовать большое количество природных каменных материалов, стоимость которых высока. В целях снижения стоимости строительства допускается заменять каменные материалы на укрепленный грунт. Однако такие материалы менее прочные и долговечные, чем камень. Исходя из этого появляется потребность модификации грунта для повышения его характеристик (по отдельности или в комплексе).

В данной статье представлен обзор теоретических исследований, охватывающий развитие модификации грунтов.

В районах строительства, где нет каменных материалов, возникает необходимость в перевозках щебня, гравия, песка за сотни километров автомобильным транспортом, что удорожает их первичную стоимость в 3–4 раза и более. Указанное обстоятельство является главной причиной значительного удорожания дорожного строительства и замедления темпов производства работ, к тому же разработка карьеров приводит к нарушению экологического равновесия окружающей среды. Как показали результаты многолетних исследований дорожных институтов, а также практический опыт проектирования и строительства, денежные и материальные затраты могут быть значительно снижены, если для устройства дорожных одежд вместо каменных материалов применять местные грунты [1]. Приходится искать альтернативные варианты или разрабатывать иные механизмы включения различных вторичных ресурсов (отходов) и не используемые ранее компоненты.

Существует большое количество работ теоретического и производственного направления по грунтам, над которыми работали: Безрук В.М., Бируля А.К., Иванов Н.Н., Черкасов И.И., Першин М.Н., Сергеев С.М., Морозов С.С., Еленович А.С. и многими другими.

В силу вышеизложенного, предлагается заменить каменные материалы укрепленными грунтами при строительстве слоев основания. При этом их физико-механические характеристики должны сохраняться [2; 3].

## Основная часть

### Main part

Укреплением грунтов следует называть качественное изменение первоначальных свойств естественных или искусственных грунтов различного состава и генезиса и преобразование их в монолитный, прочный и морозоустойчивый конструктивный слой [4].

Существует немалое количество методов укрепления грунтов. Самыми распространёнными на данный момент являются: грунты, укрепленные органическими вяжущими; грунты, укрепленные неорганическими вяжущими; органоминеральные смеси.

- Грунты, укрепленные органическими вяжущими — искусственная смесь, получаемая смешиванием грунта (осадочные несцементированные крупнообломочные и песчаные грунты, супеси всех разновидностей, песчаные грунты, легкие суглинки, песчано-гравийные и песчано-щебеночные смеси (тяжелые суглинки и глины также используются, но при условии предварительного размельчения)) с органическим вяжущим (битумы, битумные эмульсии и дегти).

- Грунты, укрепленные неорганическими вяжущими — искусственная смесь, получаемая смешиванием грунта (природного или техногенное происхождение) с водой и неорганическим вяжущим (порошкообразные минеральные материалы, которые при смешивании с водой образуют пластично-вязкое тесто, способное со временем под влиянием физико-химических процессов затвердевать, постепенно увеличивая свою прочность), согласно ГОСТ Р 70455-2022.

- Органоминеральные смеси — искусственная смесь, получаемая смешением щебня (гравия), песка или их смесей, а также при необходимости — минерального порошка (в том числе порошковых отходов производства) с органическими вяжущими и активными добавками [5]. В некоторых случаях в смесь добавляют асфальтогранулят (продукт, полученный в результате холодного фрезерования асфальтобетонных покрытий или переработки асфальтобетонного лома). Содержание асфальтогранулята в смеси — менее 60 % от массы минеральной части, согласно ГОСТ 30491-2012.

Большой потенциал для дорожно-строительной отрасли имеет цементогрунт. Состав данного материала совершенствуется на протяжении многих лет. Цементогрунт — композиционный материал, состоящий из следующих базовых элементов: грунт (природное или техногенное происхождение), вяжущее, модификатор и вода. В качестве вяжущего используют портландцемент [6]. Следует отметить, что физико-механические свойства цементогрунтов зависят от свойств

каждого компонента в отдельности, соотношения между ними, а также от технологии производства работ по изготовлению цементогрунтовой смеси [7].

При укреплении грунтов портландцементом происходит формирование кристаллизационной структуры материала, обладающей высокими прочностными показателями, водо- и морозостойкостью, а также жесткостью, низкими деформативными свойствами и трещиностойкостью. Целенаправленное формирование у укрепленных грунтов кристаллизационно-коагуляционной структуры позволяет придать материалу высокие прочностные свойства, морозостойкость, а также пластичность и трещиностойкость [8; 9].

В целях выявления оптимального состава цементогрунта, в лаборатории было подготовлено и испытано 3 серии по 7 образцов с различным количеством вяжущего. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Результаты испытаний цементогрунта в лаборатории

Results of cement-soil tests in the laboratory

| п/п<br>in sequence                            | Образец 1<br>Sample 1                                                                                                                 | Образец 2<br>Sample 2 | Образец 3<br>Sample 3 | Образец 4<br>Sample 4 | Образец 5<br>Sample 5 | Образец 6<br>Sample 6 | Образец 7<br>Sample 7 |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                               | Грунт — 1 266,32 гр., цемент — 98,49 гр. ( <b>7 %</b> ), вода — 338 мл<br>Soil — 1 266,32 g, cement — 98,49 g (7 %), water — 338 ml   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Разрушающая нагрузка, кН<br>Breaking load, kN | 8,1                                                                                                                                   | 7,83                  | 8,22                  | 7,66                  | 7,97                  | 9,25                  | 7,25                  |
| h, мм<br>h, mm                                | 49,2                                                                                                                                  | 48,4                  | 50,5                  | 50,2                  | 49,8                  | 49,3                  | 49,6                  |
| m, гр<br>m, gr                                | 195,22                                                                                                                                | 193,36                | 196,03                | 197,02                | 196,66                | 192,22                | 195,07                |
| p, г/см <sup>3</sup><br>p, g/cm <sup>3</sup>  | 1,982                                                                                                                                 | 1,995                 | 1,939                 | 1,960                 | 1,972                 | 1,947                 | 1,964                 |
| Предел прочности, МПа<br>Strength limit, MPa  | 4,050                                                                                                                                 | 3,915                 | 4,110                 | 3,830                 | 3,985                 | 4,625                 | 3,625                 |
|                                               | Среднее 4,020<br>Average 4,020                                                                                                        |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|                                               | Грунт — 1 266,32 гр., цемент — 140,7 гр. ( <b>10 %</b> ), вода — 338 мл<br>Soil — 1 266,32 g, cement — 140,7 g (10 %), water — 338 ml |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Разрушающая нагрузка, кН<br>Breaking load, kN | 11,63                                                                                                                                 | 13,29                 | 10,55                 | 12,88                 | 12,19                 | 10,75                 | 14,84                 |
| h, мм<br>h, mm                                | 50,1                                                                                                                                  | 49,9                  | 50,1                  | 50                    | 49,45                 | 49,8                  | 50,1                  |
| m, гр<br>m, gr                                | 197,2                                                                                                                                 | 199,08                | 196,36                | 196,79                | 199,2                 | 198,53                | 195,1                 |
| p, г/см <sup>3</sup><br>p, g/cm <sup>3</sup>  | 1,966                                                                                                                                 | 1,993                 | 1,958                 | 1,966                 | 2,012                 | 1,991                 | 1,945                 |
| Предел прочности, МПа<br>Strength limit, MPa  | 5,815                                                                                                                                 | 6,645                 | 5,275                 | 6,44                  | 6,095                 | 5,375                 | 7,42                  |
|                                               | Среднее 6,15<br>Average 6,15                                                                                                          |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

| п/п<br><i>in sequence</i>                                                | Образец 1<br><i>Sample 1</i>                                                                                                                   | Образец 2<br><i>Sample 2</i> | Образец 3<br><i>Sample 3</i> | Образец 4<br><i>Sample 4</i> | Образец 5<br><i>Sample 5</i> | Образец 6<br><i>Sample 6</i> | Образец 7<br><i>Sample 7</i> |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                                                                          | Грунт — 1 266,32 гр., цемент — 168,84 гр. ( <b>12 %</b> ), вода — 338 мл<br><i>Soil — 1 266,32 g, cement — 168,84 g (12 %), water — 338 ml</i> |                              |                              |                              |                              |                              |                              |
| Разрушающая нагрузка, кН<br><i>Breaking load, kN</i>                     | 8,82                                                                                                                                           | 6,07                         | 6,60                         | 6,95                         | 7,26                         | 8,22                         | 7,16                         |
| h, мм<br><i>h, mm</i>                                                    | 50,2                                                                                                                                           | 49,85                        | 49,7                         | 51,5                         | 50,15                        | 51,8                         | 51,1                         |
| m, гр<br><i>m, gr</i>                                                    | 194,05                                                                                                                                         | 193,93                       | 193,23                       | 199,31                       | 193,84                       | 197,03                       | 197,08                       |
| $\rho$ , г/см <sup>3</sup><br><i><math>\rho</math>, g/cm<sup>3</sup></i> | 1,931                                                                                                                                          | 1,943                        | 1,942                        | 1,933                        | 1,931                        | 1,900                        | 1,926                        |
| Предел прочности, МПа<br><i>Strength limit, MPa</i>                      | 4,410                                                                                                                                          | 3,035                        | 3,300                        | 3,475                        | 3,630                        | 4,110                        | 3,580                        |
|                                                                          | Среднее 3,648<br><i>Average 3,648</i>                                                                                                          |                              |                              |                              |                              |                              |                              |

*Разработано авторами / Developed by the authors*

Важным направлением исследований является поиск новых компонентов для создания и модификации цементогрунтов, которые обладали бы уникальными физико-механическими характеристиками.

Для укрепления портландцементом обычно используются местные нескальные и искусственные грунты (без жестких связей между частицами): крупнообломочные, песчаные и глинистые виды и разновидности [10; 11].

Также для укрепления могут быть использованы малопрочные скальные грунты, обязательно раздробленные на частицы разных размеров. Пески, супеси и легкие суглинки различного состава, как правило, являются хорошим исходным сырьем, обеспечивающим большой технико-экономический эффект при их укреплении [12].

Несмотря на множество научных трудов в этом направлении, широкого применения цементогрунт не получил из-за существенных недостатков. В качестве основных можно выделить: непродолжительный срок службы, низкая морозостойкость, высокое водопоглощение. Все эти недостатки обусловлены одной особенностью — повышенной пористостью материала [13; 14].

В 2022 году был выпущен нормативный документ, регламентирующий минимальные данные по прочности укрепленных грунтов неорганическим вяжущим. В таблице 2 приведены марки грунтов, зависящие от прочности на сжатие и прочности на растяжение при раскалывании в проектный срок набора прочности, согласно ГОСТ Р 70452-2022.

В патенте № 2371545 С1 (способ повышения однородности по прочности цементогрунтов) авторы за счет метода перемешивания грунта и цемента получают цементогрунт сравнимый по однородности с цементобетоном.

Поэтому многими учеными были предприняты попытки модифицировать цементогрунт введением различных добавок для повышения его свойств.

Таблица 2 / Table 2

### Марки укрепленных грунтов

#### Brand of reinforced soils

| Марка<br>Brand | Прочность на сжатие, МПа, не менее<br>Compressive strength, MPa, not less | Прочность на сжатие при раскалывании, МПа, не менее<br>Compressive strength at splitting, MPa, not less |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| M10 А          | 1,0                                                                       | 0,15                                                                                                    |
| M10 Б          |                                                                           | 0,10                                                                                                    |
| M20 А          | 2,0                                                                       | 0,30                                                                                                    |
| M20 Б          |                                                                           | 0,20                                                                                                    |
| M40 А          | 4,0                                                                       | 0,60                                                                                                    |
| M40 Б          |                                                                           | 0,40                                                                                                    |
| M60 А          | 6,0                                                                       | 0,9                                                                                                     |
| M60 Б          |                                                                           | 0,6                                                                                                     |
| M70 А          | 7,0                                                                       | 1,0                                                                                                     |
| M70 Б          |                                                                           | 0,7                                                                                                     |
| M80 А          | 8,0                                                                       | 1,2                                                                                                     |
| M80 Б          |                                                                           | 0,8                                                                                                     |
| M100 А         | 10,0                                                                      | 1,5                                                                                                     |
| M100 Б         |                                                                           | 1,0                                                                                                     |

Составлено авторами на основе данных ГОСТ Р 70452-2022 / Compiled by the authors on the basis of GOST R 70452-2022 data

В целях выявления экспериментальных зависимостей было подготовлено и испытано 3 модифицированных серии по 7 образец (табл. 3): серия 1 — цементогрунт с частично замененным минеральным материалом на пластик; серия 2 — грунт, усиленный органическим вяжущим; серия 3 — цементогрунт, модифицированный органическим вяжущим.

Таблица 3 / Table 3

### Модифицированный цементогрунт

#### Modified cement-soil

| п/п<br>in sequence                            | Образец 1<br>Sample 1                                                                                                                                                 | Образец 2<br>Sample 2 | Образец 3<br>Sample 3 | Образец 4<br>Sample 4 | Образец 5<br>Sample 5 | Образец 6<br>Sample 6 | Образец 7<br>Sample 7 |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                               | Грунт — 1 125,6 гр., цемент — 140,7 гр. (10 %), вода — 338 мл, пластик — 140,7 гр.<br>Primer — 1 125,6 g, cement — 140,7 g (10 %), water — 338 ml, plastic — 140,7 g. |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Разрушающая нагрузка, кН<br>Breaking load, kN | 9,63                                                                                                                                                                  | 8,13                  | 7,90                  | 8,53                  | 7,78                  | 7,78                  | 9,11                  |
| h, мм<br>h, mm                                | 50,65                                                                                                                                                                 | 52,2                  | 52,05                 | 52,8                  | 52,3                  | 48,1                  | 50,5                  |
| m, гр<br>m, gr                                | 184,7                                                                                                                                                                 | 186,2                 | 186,9                 | 187,7                 | 188,0                 | 172,9                 | 182,9                 |
| p, г/см <sup>3</sup><br>p, g/cm <sup>3</sup>  | 1,821                                                                                                                                                                 | 1,782                 | 1,794                 | 1,776                 | 1,795                 | 1,795                 | 1,809                 |
| Предел прочности, МПа<br>Strength limit, MPa  | 4,815                                                                                                                                                                 | 4,065                 | 3,95                  | 4,265                 | 3,89                  | 3,89                  | 4,555                 |
|                                               | Среднее 4,204<br>Mean 4,204                                                                                                                                           |                       |                       |                       |                       |                       |                       |



| п/п<br><i>in sequence</i>                            | Образец 1<br><i>Sample 1</i>                                                                                                                                                          | Образец 2<br><i>Sample 2</i> | Образец 3<br><i>Sample 3</i> | Образец 4<br><i>Sample 4</i> | Образец 5<br><i>Sample 5</i> | Образец 6<br><i>Sample 6</i> | Образец 7<br><i>Sample 7</i> |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                                                      | Грунт — 1 266,32 гр., вода — 277 мл, битум — 88,6 гр. (7 %)<br><i>Soil — 1 266,32 g, water — 277 ml, bitumen — 88,6 g (7 %)</i>                                                       |                              |                              |                              |                              |                              |                              |
| Разрушающая нагрузка, кН<br><i>Breaking load, kN</i> | 0,5                                                                                                                                                                                   | 0,44                         | 0,46                         | 0,42                         | 0,56                         | 0,65                         | 0,6                          |
| h, мм<br><i>h, mm</i>                                | 53,2                                                                                                                                                                                  | 53,1                         | 55,4                         | 52,95                        | 53,4                         | 52,3                         | 52,1                         |
| m, гр<br><i>m, gr</i>                                | 198,82                                                                                                                                                                                | 196,78                       | 205,89                       | 201,81                       | 210,39                       | 200,45                       | 203,85                       |
| p, г/см <sup>3</sup><br><i>p, g/cm<sup>3</sup></i>   | 1,867                                                                                                                                                                                 | 1,851                        | 1,856                        | 1,904                        | 1,968                        | 1,914                        | 1,954                        |
| Предел прочности, МПа<br><i>Strength limit, MPa</i>  | 0,25                                                                                                                                                                                  | 0,22                         | 0,23                         | 0,21                         | 0,28                         | 0,325                        | 0,3                          |
|                                                      | Среднее 0,25<br><i>Average 0.25</i>                                                                                                                                                   |                              |                              |                              |                              |                              |                              |
|                                                      | Грунт — 1 266,32 гр., цемент — 140,7 гр. (10 %), вода — 338 мл, битум — 98,49 гр. (7 %)<br><i>Soil — 1 266,32 g, cement — 140,7 g (10 %), water — 338 ml, bitumen — 98,49 g (7 %)</i> |                              |                              |                              |                              |                              |                              |
| Разрушающая нагрузка, кН<br><i>Breaking load, kN</i> | 4,13                                                                                                                                                                                  | 3,28                         | 3,63                         | 3,28                         | 6,35                         | 5,87                         | 5,59                         |
| h, мм<br><i>h, mm</i>                                | 51,8                                                                                                                                                                                  | 50,2                         | 51,6                         | 51,6                         | 49,6                         | 50,8                         | 50,2                         |
| m, гр<br><i>m, gr</i>                                | 200,39                                                                                                                                                                                | 194,89                       | 199,36                       | 198,03                       | 195,27                       | 198,04                       | 193,12                       |
| p, г/см <sup>3</sup><br><i>p, g/cm<sup>3</sup></i>   | 1,932                                                                                                                                                                                 | 1,939                        | 1,930                        | 1,917                        | 1,966                        | 1,947                        | 1,921                        |
| Предел прочности, МПа<br><i>Strength limit, MPa</i>  | 2,065                                                                                                                                                                                 | 1,64                         | 1,815                        | 1,64                         | 3,175                        | 2,935                        | 2,795                        |
|                                                      | Среднее 2,295<br><i>Average 2,295</i>                                                                                                                                                 |                              |                              |                              |                              |                              |                              |

*Разработано авторами / Developed by the authors*

Согласно проведенным испытаниям видно, что среднее значение прочности цементогрунта (10 % цемента) на 32 % больше, чем в образцах с частичной заменой минеральной части. Партия образцов из грунта, укрепленного вяжущим, показала неудовлетворительный результат. В свою очередь партия с битумом показала снижение прочности на 63 %. Из данных результатов видно, что отсутствие модификаторов в составе смеси существенно ухудшает характеристики.

Для анализа исследований отечественных и зарубежных авторов, были отобраны те работы, в которых изучались характеристики цементогрунтов, изготавливаемые по традиционной технологии. Методики изготовления цементогрунтов в разных странах отличаются и имеют свои особенности и специфику, поскольку климатические условия эксплуатации дорожных конструкций также значительно отличаются.

По итогам испытаний исследователями определялся оптимальный состав цементогрунта с ожидаемыми свойствами. Практически все работы включали в себя проведение испытаний согласно актуальным ГОСТам (испытание на прочность, колееобразование, морозоустойчивость, водостойкость и пр.). В ряде работ применялись специфические методы



испытаний присущие тем странам, в которых это закреплено нормативными документами.

Цель исследования заключается в анализе работ отечественных и зарубежных исследователей, направленных на изучение характеристик цементогрунтов от введения добавок и новых компонентов в состав смеси.

## Модификаторы цементогрунтов

### Cement-soil modifiers

Вопросам модификации грунтов уделяется повышенное внимание, поскольку эффективность работы дорожной конструкции напрямую зависит от характеристик грунта рабочего слоя. При введении цемента в грунт образуется монолитный слой, который призван заменить дорогостоящий каменный материал. Но у получившегося материала существуют свои особенности, которые позволяют решить следующие добавки и модификаторы:

Инициирование в состав цементогрунта наноксида кремния повышает прочность при сжатии 16,2 до 20,1 МПа в сухом состоянии и с 5,1 до 9,1 МПа в водонасыщенном состоянии [15].

Согласно исследованиям [16], высокие прочностные характеристики полимерцементогрунтовых смесей могут спровоцировать такие неблагоприятные свойства как хрупкость, повышенное трещенообразование, выкрашивание слоя и низкую деформативную способность укрепленного грунта. По этой причине, в целях увеличения деформативности и морозостойкости полимерцементогрунта в состав смеси, в плане эксперимента, была введена добавка отхода переработки нефтяного шлама, представляющая собой гидрофобный материал. При таком подходе основание дорожной конструкции выполняет две функции — это обеспечение несущей способности и защита рабочего слоя земляного полотна, как фундамента дорожной одежды от воздействия климатических факторов [17].

Задачей предлагаемого изобретения (патент № 2794834 С1. Модифицированный цементогрунт для дорожного строительства) является повышение морозостойкости и прочностных характеристик цементогрунта при снижении расхода портландцемента. Указанный технический результат достигается тем, что модифицированный цементогрунт для дорожного строительства содержит минеральное вяжущее портландцемент, активированный в аппарате вихревого слоя наполнитель — цеолитсодержащая порода совместно с поликарбоксилатным суперпластификатором и воду.

В работе [18] описана разработка полимерной добавки на основе латекса «Упрочнитель цементогрунтовой смеси Российский (УЦГСРос)», которая меняет свойства прочности грунта при 8 % добавки в составе.

Результаты, полученные при использовании добавок, описанных в работах [19; 20], показывают, что прочность образцов укрепленного грунта при сжатии за 28 суток увеличилась на 130 %. Такое значительное повышение прочности можно объяснить сложными физико-химическими процессами, которые положительно влияют на формирование структуры укрепленного грунта при модификации стабилизаторами.

В исследовании [21] изучалось использование грунтов в качестве основы для дорожных покрытий из различных материалов. Один из рассмотренных вариантов — это песчано-щебёночная смесь фракции 0–20 мм, составляющая 25 % от общей массы грунта. Также использовались гидравлическое вяжущее (портландцемент марки М 400) в количестве 5 % от массы грунта и битумная катионная эмульсия 3-го класса (ЭБК-3) в том же количестве. Расчёты показали, что модуль упругости основания из грунта, укрепленного таким образом, сопоставим с модулем упругости основания из фракционированного щебня фракции 40–70, уложенного способом заклинки и имеющего толщину 43 см.

В работах [22; 23] в качестве исходного материала использовался крупнозернистый песок. При дозировке цемента 10 % от веса грунта добавка «Ренолит» (нанотехнологичная, многофункциональная добавка, позволяющая на молекулярном уровне управлять процессами формирования материала системы «грунт — цемент — добавка»). При этом проявляются следующие функции: укрепляющая (вяжущее), гидрофобизирующая, пластифицирующая, ускоряющая процессы твердения, водонезамерзающая) составляла 10 % от массы вяжущего. Дозировки цемента и добавки были назначены после проведения лабораторных испытаний. Результаты испытаний водонасыщенных образцов 28-суточного возраста представлены на рисунке 1: прочность при сжатии составила от 6,2 до 10,11 МПа, прочность на растяжение при изгибе — от 2,5 до 3 МПа, коэффициент морозостойкости — не менее 0,85, водонасыщение — от 2,52 до 6,38 %. Прочность при сжатии образцов с добавкой «Ренолит» больше на 80 % по сравнению с образцами с одним цементом. При этом наблюдалось уменьшение почти в два раза срока набора прочности. Кроме того, необходимо отметить влияние количества добавки на прочность цементогрунта.

Автор работы [24] представляет результаты исследований по применению стабилизирующих добавок различной природы в составах цементогрунтов, модифицированных отходами теплоэнергетики Забайкальского края. Показана зависимость прочностных характеристик

модифицированных цементогрунтов на основе суглинка и супеси от массовой доли портландцемента и золошлакового материала. Найдено оптимальное содержание золы уноса (10 мас. %) и портландцемента (8 мас. %) в цементогрунтах для получения дорожно-строительных композитов с максимальной прочностью. Установлено, что стабилизатор Криогелит, разработанный в Забайкальском институте железнодорожного транспорта, позволяет получать цементогрунт с наиболее высокой прочностью и морозостойкостью (не менее F15), при содержании портландцемента 8 мас. %. Выявлено, что стабилизирующая добавка полимерного типа Криогелит способствует образованию вторичных грунтовых микроагрегатов и приводит к образованию плотной коагуляционной структуры в цементогрунтах [25].

В исследовании [26] авторы изучили глинистый грунт, который был укреплен портландцементом с добавлением полиэлектrolита. Они обнаружили, что полиэлектrolит полиДМДААХ влияет на формирование однородной структуры цементогрунта, делая её более кристаллизованной и прочной. Добавление полиДМДААХ в количестве от 0,05 до 0,70 % в цементогрунтовую смесь значительно улучшает её прочностные и деформационные характеристики, а также повышает морозостойкость. Кроме того, использование полиэлектrolита позволяет сократить расход портландцемента на 15–20 %.

Известно положительное влияние различных волокон на прочность и модуль упругости грунтов [27].

Свойства цементогрунта улучшали добавками жидкого стекла, а также полиакриламида [28]. При этом прочность с введением жидкого стекла выросла на 65 %, а полиакриламида на 106 %. При дозировке цемента 7 % введение жидкого стекла обеспечило прочность равную прочности при дозировке одного цемента 15 %.

В свою очередь автор в работе [29] показывает, что образцы клиноптилолит-стильбитовых и клиноптилолитовых пород, модифицированные раствором жидкого стекла повышают физико-механические характеристики цементогрунта, доводя их до величин, соответствующих марке по прочности не менее M100.

В исследовании [30] рассмотрено влияние битумной эмульсии для повышения прочности, водостойкости и долговечности цементогрунта, а также несущей способности и модуля упругости цементогрунта. Оптимальная дозировка у вяжущего покрывает все макрочастицы грунта гидрофобизирующей пленкой. При этом прочность на сжатие, коэффициент водоустойчивости и сцепления достигают максимальных значений, а структура грунта становится зернисто-песчаной.

Работа [31] направлена на увеличение межремонтных сроков строительства, а также сокращения затрат на строительство автомобильной дороги за счет модификации цементогрунта добавкой «Типром У».

В исследовании [32] рассмотрена добавка «ДОРЦЕМ ДС-1». По итогам испытаний авторы отмечают, что применение добавка позволяет регулировать сроки схватывания минерального вяжущего, а также происходит ускорение набора прочности и повышение прочности на сжатие.

Исследование влияния плотности на прочность цементогрунта с модификацией материала полимерной добавкой Nano Terra Soil были проведены в работе [33]. Автор делает вывод, что увеличение уплотняющей нагрузки ведет к повышению коэффициента уплотнения смеси и, как следствие, к возрастанию прочности и снижению водонасыщения.

Также отдельное внимание стоит уделить модификации грунтов отходами промышленности. Ученые активно исследуют совместную работу отходов производства промышленности и грунта [34]. Отдельно можно отметить работу [35], которая посвящена оценке механических свойств различных комбинаций шлаковых и зольных частиц из отвала одной ТЭС. Им были выполнены исследования по оценке прочностных характеристик несущей способности зол и шлаков разного гранулометрического состава и их комбинаций. В работе [36] проводится анализ гранулометрического состава и структуры ЗШС от сжигания твёрдых отходов, которые отличались от угольной золы. В работе приведены комплексные исследования, включающие одновременную оценку механических характеристик золошлаков разного состава при различной влажности, чего у прочих авторов отмечено не было. Коллектив работы [37] сделали вывод, что введение золошлаковых материалов (отходы ТЭС Забайкальского края) в состав цементогрунта позволяет получить композит, соответствующий марке по прочности М 75.

На основании проведенного обзора можно сделать следующие выводы. Лабораторные исследования и создание опытных участков автомобильных дорог показывают, что инициация различных добавок и модификаторов в состав цементогрунта значительно повышает прочностные качества материалов, что позволяет строить высококачественные автомобильные дороги.

## Заключение

### Conclusion

На данный момент не существует модификатора, который улучшал бы все свойства цементогрунта сразу. Исследователям удастся повышать

не более трех характеристик за раз. К таким характеристикам можно отнести прочность, сопротивление деформациям, морозостойкость, предотвращение колееобразования, а также сокращение расхода портландцемента в смеси, в целях удешевления материала.

Большинство результатов исследований ограничиваются в основном локальным решением задач, опираясь на итоговый результат, или на незначительное повышение физико-механических показателей. Однако на данный момент существует недостаток исследований, посвящённых созданию принципиально новых композиционных материалов для дорожного строительства. Изучение методик укрепления глинистых грунтов, исследование существующих модификаторов, поиски новых, имеют большой потенциал для строительства автомобильных дорог на территории Хабаровского края.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Худайкулов, Р.М.** Укрепление земляного полотна автомобильных дорог с применением цемента / Р.М. Худайкулов, Т.Л. Мирзаев // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. — 2019. — № 1. — С. 7–11. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42417428>. — EDN VUAIAO. (дата обращения: 11.08.2024).
2. **Матуа, В.П.** Использование укрепленных грунтов при строительстве слоев основания / В.П. Матуа, А.Г. Акопян // Строительство — 2015: Строительство. Дороги. Транспорт: материалы Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 16–17 мая 2015 года. Том 3 / Ростов-на-Дону: Редакционно-издательский центр РГСУ, 2015. — С. 9–10. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24981532>. — EDN VARLHN. (дата обращения: 18.09.2024).
3. **Гусев, Н.К.** Строительство конструктивных слоев аэродромных и дорожных одежд из местных материалов / Н.К. Гусев // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2013. — № 2. — С. 21–22. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19065550>. — EDN QBFMTV. (дата обращения: 11.08.2024).
4. **Безрук, В.М.** Основные принципы укрепления грунтов / В.М. Безрук. — Москва: Транспорт, 1987. — 346 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001362674>. (дата обращения: 11.08.2024).
5. **Качурин, В.В.** Повышение качества органоминеральной смеси при использовании дезинтегратора-смесителя сыпучих материалов / В.В. Качурин, М.В. Запевалов, Н.С. Сергеев, Е.С. Наруков. — DOI <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-10-28-37> // Вестник НГИЭИ. — 2022. — № 10. — С. 28–37. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49611249>. — EDN CJAXUR. (дата обращения: 11.08.2024).
6. **Егоров, Г.В.** Укрепление местных грунтов стабилизатором при строительстве автомобильных дорог в условиях Севера / Г.В. Егоров, А.В. Андреева, О.Н. Буренина // Дороги и мосты. — 2013. — № 1. — С. 021–028. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20160239>. — EDN QZEIKV. (дата обращения: 11.08.2024).
7. **Кочеткова, Р.Г.** Современные методы улучшения свойств глинистых грунтов вяжущими и добавками / Р.Г. Кочеткова. — Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2014. — 132 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21663458>. — EDN SGBPJF. (дата обращения: 11.08.2024).
8. **Чудинов, С.А.** Повышение эффективности укрепления грунтов портландцементом со стабилизирующей добавкой / С.А. Чудинов // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 5. — С. 163. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22566508>. — EDN SZVKCD. (дата обращения: 11.08.2024).
9. **Вдовин, Е.А.** Анализ возможности модификации укрепленных грунтов для дорожных одежд активированными минеральными добавками / Е.А. Вдовин, Н.В. Коновалов, Д.Р. Сафин // Техника и технология транспорта. — 2019. — № S(11). — С. 24. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38206116>. — EDN XAYDRD. (дата обращения: 11.08.2024).



10. **Катасонов, М.В.** Подбор составов органоминеральных смесей для устройства слоя основания дорожной одежды из материалов, обработанных цементом совместно с ПМК NICOFLOK / М.В. Катасонов, А.В. Кочетков, Д.И. Гофман [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/11SATS418> // Транспортные сооружения. — 2018. — Т 5. — № 4. — С. 11SATS418. — URL: <https://t-s.today/11SATS418.html>. — EDN YURQXR. (дата обращения: 11.08.2024).
11. **Павликов, А.Б.** Целесообразность использования битума при укреплении цементогрунта / А.Б. Павликов, А.В. Каменчуков, Г.О. Николаева // Инженерный вестник Дона. — 2024. — № 6. — С. 479–488. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68503070>. — EDN KUNYTI. (дата обращения: 16.08.2024).
12. **Безрук, В.М.** Укрепленные грунты: (Свойства и применение в дор. и аэродром. стр-ве) / В.М. Безрук, И.Л. Гурячков, Т.М. Луканина, Р.А. Агапова. — Москва: Транспорт, 1982. — 231 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001108473>. (дата обращения: 16.08.2024).
13. **Панков, П.П.** Использование стабилизирующих добавок в составах цементогрунтов, модифицированных отходами теплоэнергетики / П.П. Панков, Н.А. Коновалова, О.Н. Дабижа // Современные наукоемкие технологии. — 2017. — № 11. — С. 52–57. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30725884>. — EDN ZWJSXR. (дата обращения: 16.08.2024).
14. **Шуваев, А.Н.** Применение цементогрунта при строительстве дорожных одежд автомобильных дорог / А.Н. Шуваев, С.А. Куюков, М.В. Панова, А.А. Жигайлов // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО ГИПРОДОРНИИ. — 2013. — № 4. — С. 130–137. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21074533>. — EDN RTENLP. (дата обращения: 16.08.2024).
15. **Евсеева, Е.А.** Цементогрунт для дорожного строительства / Е.А. Евсеева, Н.А. Кречко, Ю.В. Шагойко // Инновационные технологии и образование: Материалы международной научно-практической конференции. В 2 частях, Минск, 28 апреля 2022 года. Том Часть 1 / Минск: Белорусский национальный технический университет, 2022. — С. 250–253. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49529800>. — EDN EFGCHJ. (дата обращения: 18.09.2024).
16. **Безрук, В.М.** Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве / В.М. Безрук. — Москва: Транспорт, 1971. — 246 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007270924>. (дата обращения: 16.08.2024).
17. **Чубцов, В.Ф.** Оценка надежности работы автомобильных дорог с основаниями из цементогрунтов в условиях Дальнего Востока / В.Ф. Чубцов // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. — 2010. — Т 2. — С. 252–256. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18964308>. — EDN PYZXCP. (дата обращения: 16.08.2024).
18. **Голубева, Е.А.** Прогноз эффективности дорожных конструкций с применением инновационных дорожно-строительных материалов отечественного производства / Е.А. Голубева, П.А. Чусовитин // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: Сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции, Омск, 22–23 апреля 2021 года / Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. — С. 682–686. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46355645>. — EDN TMWWPJ. (дата обращения: 18.09.2024).
19. **Ядыкина, В.В.** Влияние стабилизирующих добавок на свойства укрепленных портландцементом грунтов / В.В. Ядыкина, Е.А. Лукаш, Д.С. Кондрашов. — DOI [https://doi.org/10.12737/article\\_5a001aaaaee4b3.57860955](https://doi.org/10.12737/article_5a001aaaaee4b3.57860955) // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. — 2017. — № 11. — С. 6–10. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30634793>. — EDN ZUJXKR. (дата обращения: 16.08.2024).
20. **Матуа, В.П.** Влияние добавок "ANT" и "nanoSTAB" на усадочные деформации щебеночно-песчаных смесей / В.П. Матуа, С.В. Сизонец, Р.В. Матуа // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2013. — № 1. — С. 13–16. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18901587>. — EDN PXQFHD. (дата обращения: 16.08.2024).
21. **Булдаков, С.И.** Технология устройства основания автомобильной дороги с применением цементогрунта / С.И. Булдаков, С.А. Мурзич // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО ГИПРОДОРНИИ. — 2014. — № 5. — С. 62–66. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22664894>. — EDN TBZJMX. (дата обращения: 16.08.2024).
22. **Шуваев, А.Н.** Надежность и долговечность автомобильных дорог в сложных природных условиях / А.Н. Шуваев, М.В. Панова // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО ГИПРОДОРНИИ. — 2013. — № 4. — С. 14–19. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21074518>. — EDN RTENFV. (дата обращения: 16.08.2024).

23. **Голубева, Е.А.** Практика применения дорожного полимерцементогрунта на федеральной трассе "Амур" / Е.А. Голубева, А.Б. Плахотный // Техника и технологии строительства. — 2017. — № 3. — С. 45–49. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30398064>. — EDN ZPFFNB. (дата обращения: 16.08.2024).
24. **Чудинов, С.А.** Повышение эффективности укрепления глинистых грунтов портландцементом с добавкой полиэлектролита / С.А. Чудинов // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО ГИПРОДОРНИИ. — 2013. — № 4. — С. 121–129. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21074532>. — EDN RTENLF. (дата обращения: 16.08.2024).
25. **Коновалова, Н.А.** Структурообразование цементогрунтов в присутствии стабилизирующей добавки Криогелит / Н.А. Коновалова, О.Н. Дабижа, П.П. Панков // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2017. — № 8. — С. 63–73. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30724915>. — EDN XHDBNM. (дата обращения: 16.08.2024).
26. **Loehr, J.** Specimen Size Effects for Fiber-Reinforced Silty Clay in Unconfined Compression / E. Ang, J. Loehr. — DOI <https://doi.org/10.1520/GTJ11320J> // Geotechnical Testing Journal. — 2003. — Т 26. — № 2. — С. 191–200. — URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/geotechnicaltesting/article-abstract/26/2/191/1176057/Specimen-Size-Effects-for-Fiber-Reinforced-Silty?redirectedFrom=fulltext>. (дата обращения: 16.08.2024).
27. **Марков, Л.А.** Улучшение свойств грунтов поверхностноактивными и структурообразующими веществами / Л.А. Марков, А.П. Парфенов, А.П. Петрашев и др. — Москва: Автотрансиздат, 1963. — 176 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006490929>. (дата обращения: 16.08.2024).
28. **Aryafar, M.** Intelligent Estimation of Compressive Strength of the Pavement Layers Stabilized by the Combination of Bitumen Emulsion and Cement / M. Aryafar, A.R. Ghotbi, A. Avaei. — DOI <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2008.389.392> // American Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2008. — Т 1. — № 4. — С. 389–392. — URL: <https://thescpub.com/abstract/ajeassp.2008.389.392>. (дата обращения: 16.08.2024).
29. **Дабижа, О.Н.** Повышение прочности дорожных цементогрунтов за счет модифицированной минеральной добавки / О.Н. Дабижа, П.П. Панков, Д.В. Бесполитов // Образование — Наука — Производство: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 24 декабря 2020 года. Том 2 / Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта — филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Иркутский университет путей сообщения", 2020. — С. 127–131. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44878382>. — EDN NYJVDD. (дата обращения: 16.08.2024).
30. **Коновалов, Н.В.** Модификация цементогрунтов отходами металлургического производства / Н.В. Коновалов, Е.А. Вдовин // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. — 2023. — № 1. — С. 18–23. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54704199>. — EDN PDHLIO. (дата обращения: 16.08.2024).
31. **Жигайлов, А.А.** Техничко-экономическое обоснование метода повышения физико-механических характеристик модифицированного цементогрунта дорожного назначения / А.А. Жигайлов, С.А. Куюков, А.А. Тестешев, В.В. Шматок // Путьевой навигатор. — 2020. — № 42. — С. 24–29. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42620118>. — EDN ERAGGC. (дата обращения: 16.08.2024).
32. **Подольский, В.П.** Исследование влияния модификатора "Дорцем ДС-1" на свойства цемента и физико-механические характеристики цементогрунта / В.П. Подольский, Ф.В. Матвиенко, А.С. Строкин, А.Е. Борисов // Научный журнал строительства и архитектуры. — 2017. — № 1. — С. 84–92. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29187257>. — EDN YOSIEB. (дата обращения: 16.08.2024).
33. **Жигайлов, А.А.** Влияние степени уплотнения на основные характеристики цементогрунта с полимерной добавкой / А.А. Жигайлов, С.А. Куюков, А.Н. Шуваев // Научно-технический вестник Поволжья. — 2011. — № 5. — С. 131–134. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17101722>. — EDN OKGEBJ. (дата обращения: 16.08.2024).
34. **Gimhan, P.G.S.** Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material / P.G.S. Gimhan, J.P.B. Disanayaka, M.C.M. Nasvi. — DOI <https://doi.org/10.4038/engineer.v51i1.7287> // Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka. — 2018. — Т 51. — № 1. — С. 49–57. — URL: <https://engineer.sljol.info/articles/10.4038/engineer.v51i1.7287>. (дата обращения: 16.08.2024).



35. **Muhunthan, B.** Geotechnical engineering properties of incinerator ash mixes / B. Muhunthan, R. Taha, J. Said. — DOI <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470959> // Journal of the Air & Waste Management Association. — 1995. — Т 54. — № 8. — С. 985–991. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15373366/>. (дата обращения: 16.08.2024).
36. **Коновалова, Н.А.** Минимизация воздействия отходов щебеночного производства на окружающую среду путем их вовлечения в составы дорожно-строительных материалов / Н.А. Коновалова, П.П. Панков, Д.В. Бесполитов. — DOI <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2021-29-1-82-91> // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2021. — Т 29. — № 1. — С. 82–91. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47311965>. — EDN GYKKGQ. (дата обращения: 16.08.2024).
37. **Сигачев, Н.П.** Эффективность использования золошлаковых отходов Забайкальского края в производстве дорожных цементогрунтов / Н.П. Сигачев, Н.А. Коновалова, В.И. Коннов [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-11-24-27> // Экология и промышленность России. — 2015. — Т 19. — № 11. — С. 24–27. — URL: <https://www.ecology-kalvis.ru/jour/article/view/665>. — EDN UXLCAN. (дата обращения: 16.08.2024).

---

#### Сведения об авторах:

**Павликов Алексей Борисович** — ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 012429@pnu.edu.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2212-9281>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1122865](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1122865)  
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58135081100>

**Каменчуков Алексей Викторович** — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 006641@pnu.edu.ru  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=767839](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=767839)

---

Статья получена: 03.09.2024. Принята к публикации: 13.11.2024. Опубликовано онлайн: 25.12.2024.

## REFERENCES

1. Zhigailov A.A., Kuyukov S.A., Shuvaev A.N. Influence of Degree of Consolidation on The Basic Characteristics Ground Strengthened by Cement with The Polymeric Additive. *Scientific And Technical Volga Region Bulletin*. 2019;(1): 7–11. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42417428> (accessed 11th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Matua V.P., Akopyan A.G. [Use of reinforced soils in the construction of foundation layers]. In: *Construction — 2015: Construction. Roads. Transport: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, May 16–17, 2015. Volume 3*. Rostov-on-Don: Editorial and Publishing Center of Rostov State University of Civil Engineering; 2015. p. 9–10. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24981532> (accessed 18th September 2024). (In Russ.).
3. Gusev N.C. Construction of the Structural Layers of Airfield and Road Pavements from Local Materials. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2013;(2): 21–22. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19065550> (accessed 11th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Bezruk V.M. [Basic principles of soil stabilization]. Moscow: Transport; 1987. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001362674> (accessed 11th August 2024). (In Russ.).
6. Egorov G.V., Andreyeva A.V., Burenina O.N. [Strengthening local soils with a stabilizer during the construction of highways in the North]. *Roads and bridges*. 2013;(1): 021–028. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20160239> (accessed 11th August 2024). (In Russ.).
5. Kachurin V.V., Zapevalov M.V., Sergeev N.S., Narukov E.S. Improving the Quality of The Organo-Mineral Mixture When Using a Disintegrator-Mixer of Bulk Materials. *Bulletin NGIEI*. 2022;(10): 28–37. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-10-28-37>.
7. Kochetkova R.G. [Modern methods of improving the properties of clay soils with binders and additives]. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); 2014. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21663458> (accessed 11th August 2024). (In Russ.).
8. Chudinov S.A. Increase Productivity Soil Reinforcement of Portland Cement with A Stabilizing Additive. *Modern problems of science and education*. 2014;(5): 163. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=2566508> (accessed 11th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

9. Vdovin E.A., Kononov N.V., Safin D.R. Modification of Fortified Soil with Activated Mineral Fillers. *Technique and Technology of Transport: a scientific Internet journal*. 2019;(S(11)): 24. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38206116> (accessed 11th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
10. Katasonov M.V., Kochetkov A.V., Gofman D.I., Kuxhausen V.V. Selection of compositions of organomineral mixes for the device of the layer of the basis of road clothes from the materials processed by cement together with PMK NICO FLOK. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018;5(4): 11SATS418. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/11SATS418>.
11. Pavlikov A.B., Kamenchukov A.V., Nikolaeva G.O. The Feasibility of Using Bitumen When Strengthening Cement Soil. *Engineering Journal of Don*. 2024;(6): 479–488. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68503070> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Bezruk V.M., Guryachkov I.L., Lukanina T.M., Agapova R.A. [Reinforced soils: (Properties and application in road and airfield construction)]. Moscow: Transport; 1982. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001108473> (accessed 16th August 2024). (In Russ.).
13. Pankov P.P., Kononova N.A., Dabizha O.N. The Use of Stabilizing Additives in Compositions of Cementogronits Modified by Waste of Heat-Power Engineering. *Modern high technologies*. 2017;(11): 52–57. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30725884> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Shuvayev A.N., Kuyukov S.A., Panova M.V., Zhigailov A.A. Soil Cement Application for Construction of Highway Pavements. *Aktual'nyye voprosy proyektirovaniya avtomobil'nykh dorog. Sbornik nauchnykh trudov OAO Giprodornii = Current issues of highway design. Collection of scientific papers of JSC Giprodornii*. 2013;(4): 130–137. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21074533> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Evseyeva E.A., Krechko N.A., Shagoyko Yu.V. [Cement soil for road construction]. In: *Innovative technologies and education: Proceedings of the international scientific and practical conference. In 2 parts, Minsk, April 28, 2022. Volume Part 1*. Minsk: Belarusian National Technical University; 2022. p. 250–253. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49529800> (accessed 18th September 2024). (In Russ.).
16. Bezruk V.M. [Soil stabilization in road and airfield construction]. Moscow: Transport; 1971. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007270924> (accessed 16th August 2024). (In Russ.).
17. Chubtsov V.F. Estimation of Reliability of Work of Highways with The Bases from Soil Cement in Conditions Of the Far East. *Novyye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii FAD TOGU = New ideas of the new century: materials of the international scientific conference of the FAD TNU*. 2010;2: 252–256. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18964308> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
18. Golubeva E.A., Chusovitin P.A. Forecast of the Efficiency of Road Structures with The Use of Innovative Road-Building Materials of Domestic Production. In: *[Education. Transport. Innovations. Construction: Collection of materials of the IV National scientific and practical conference, Omsk, April 22–23, 2021]*. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI); 2021. p. 682–686. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46355645> (accessed 18th September 2024). (In Russ.).
19. Yadykina V.V., Lukash E.A., Kondrashov D.S. The Influence of Stabilizing Additives on The Properties of The Ground Strengthened by Cement. *Bulletin of BSTU Named after V.G. Shukhov*. 2017;(11): 6–10. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5a001aaaaee4b3.57860955](https://doi.org/10.12737/article_5a001aaaaee4b3.57860955).
20. Matua V.P., Sizonets S.V., Matua R.V. Effect of "ANT", and "nanoSTAB" Additives on Shrinkage Deformation of Crushed Stone-Sand Mixture. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2013;(1): 13–16. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18901587> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
21. Buldakov S.I., Murzich S.A. Highway Roadbed Technology Using Soil Cement. *Aktual'nyye voprosy proyektirovaniya avtomobil'nykh dorog. Sbornik nauchnykh trudov OAO Giprodornii = Current issues of highway design. Collection of scientific papers of JSC Giprodornii*. 2014;(5): 62–66. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22664894> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
22. Shuvayev A.N., Panova M.V. Reliability and Durability of Highways in Difficult Environmental Conditions. *Aktual'nyye voprosy proyektirovaniya avtomobil'nykh dorog. Sbornik nauchnykh trudov OAO Giprodornii = Current issues of highway design. Collection of scientific papers of JSC Giprodornii*. 2013;(4): 14–19. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21074518> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

23. Golubeva E.A., Plakhotny A.B. Practice the Use of Road Polimertsementnogo Onthe Federal Highway "Amur". *SibADI Journal*. 2017;(3): 45–49. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30398064> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
24. Chudinov S.A. Improving the Efficiency of Clay Soils Stabilization with Portland Cements by Introducing Polyelectrolyte. *Aktual'nyye voprosy proyektirovaniya avtomobil'nykh dorog. Sbornik nauchnykh trudov OAO Giprodornii = Current issues of highway design. Collection of scientific papers of JSC Giprodornii*. 2013;(4): 121–129. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21074532> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
25. Konovalova N.A., Dabizha O.N., Pankov P.P. Structural Formation of Cementogronts in The Presence of Stabilizing Additive Cryogelite. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2017;(5): 63–73. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30724915> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
26. Ang E., Loehr J. Specimen Size Effects for Fiber-Reinforced Silty Clay in Unconfined Compression. *Geotechnical Testing Journal*. 2003;26(2): 191–200. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ11320J>.
27. Markov L.A., Parfenov A.P., Petrashev A.P. [Improving the properties of soils with surface-active and structure-forming substances]. Moscow: Avtotransizdat; 1963. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006490929> (accessed 16th August 2024). (In Russ.).
28. Aryafar M., Ghotbi A.R., Avaei A. Intelligent Estimation of Compressive Strength of the Pavement Layers Stabilized by the Combination of Bitumen Emulsion and Cement. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2008;1(4): 389–392. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2008.389.392>.
29. Dabizha O.N., Pankov P.P., Bespolitov D.V. [Increasing the strength of road cement soils due to a modified mineral additive]. In: *[Education — Science — Production: Proceedings of the IV All-Russian scientific and practical conference, Chita, December 24, 2020. Volume 2]*. Chita: Transbaikal Institute of Railway Transport — branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Irkutsk University of Railway Engineering"; 2020. p.127–131. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44878382> (accessed 16th August 2024). (In Russ.).
30. Konovalov N.V., Vdovin E.A. Modification of Cementitious Soils by Metallurgical Wastes. *[Roads and transport infrastructure]*. 2023;(1): 18–23. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54704199> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
31. Zhigaylov A.A., Kuyukov S.A., Testeshev A.A., Shmatok V.V. [Feasibility study of the method for improving the physical and mechanical characteristics of modified cement soil for road purposes]. *Putevoi Navigator*. 2020;(42): 24–29. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42620118> (accessed 16th August 2024). (In Russ.).
32. Podol'skii V.I., Matvienko F.V., Strokin A.S., Borisov A.E. Study of the Effect of the "Dorcem DS-1" Modifier on The Properties of Cement and Physical and Mechanical Characteristics of Cement Foundations. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2017;(1): 84–92. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29187257> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
33. Zhigailov A.A., Kuyukov S.A., Shuvaev A.N. Influence of Degree of Consolidation on The Basic Characteristics Ground Strengthened by Cement with The Polymeric Additive. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2011;(5): 131–134. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17101722> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
34. Gimhan P.G.S., Disanayaka J.P.B., Nasvi M.C.M. Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*. 2018;51(1): 49–57. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4038/engineer.v51i1.7287>.
35. Muhunthan B., Taha R., Said J. Geotechnical engineering properties of incinerator ash mixes. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 1995;54(8): 985–991. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470959>.
36. Konovalova N.A., Pankov P.P., Bespolitov D.V. Minimization of The Impact of Rubble Production Wastes on The Environment by Their Involvement in The Compositions of Roadbuilding Materials. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2021;29(1): 82–91. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2021-29-1-82-91>.

37. Sigachev N., Konovalova N., Konnov V., Pankov P., Yefimenko N. The Effectiveness of the Use of the Zabaykalsky Territory Ash and Slag Waste in the Production of Road Cement Soils. *Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(11): 24–27. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-11-24-27>.
- 

**Information about the authors:**

**Aleksej B. Pavlikov** — Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 012429@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2212-9281>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1122865](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1122865)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58135081100>

**Aleksej V. Kamenchukov** — Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 006641@pnu.edu.ru

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=767839](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=767839)

---

Submitted: 3rd September 2024. Revised: 13th November 2024. Published online: 25th December 2024.