

УДК 625.731.2:624.138

Пальчикова Светлана Владимировна, место учебы Иркутский национальный исследовательский технический университет, Институт архитектуры строительства и дизайна, группа АДм-24-1. 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Слободчикова Надежда Анатольевна, к.т.н, доцент, место работы ИрННТУ, кафедра автомобильных дорог

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ НА СНИЖЕНИЕ СТОИМОСТИ
СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Аннотация

Статья посвящена анализу влияния применения инновационных материалов для стабилизации грунтов на снижение стоимости строительства автомобильных дорог. Рассмотрены современные технологические решения, включающие использование геосинтетических материалов, полимерных стабилизаторов, наномодифицированных вяжущих, золошлаковых отходов и геополимерных композиций. Приведен обзор физико-механических свойств укрепленных грунтов в сравнении с традиционными методами стабилизации цементом и известью. Выполнена оценка технико-экономической эффективности внедрения инновационных материалов, выраженная в сокращении транспортных расходов, снижении потребности в привозных каменных материалах, уменьшении толщины конструктивных слоев дорожной одежды и увеличении межремонтных сроков. Показано, что применение стабилизированных местных грунтов взамен дорогостоящих привозных материалов обеспечивает снижение прямых затрат на устройство дорожного основания до 30–40% при сохранении нормативных эксплуатационных характеристик. Проанализированы факторы,

определяющие экономическую целесообразность выбора конкретного типа стабилизатора в зависимости от категории дороги, свойств исходного грунта и климатических условий. Подтверждена экономическая эффективность методов, опирающихся на утилизацию промышленных отходов, таких как золошлаковые смеси, что способствует решению не только транспортных, но и экологических задач.

Annotation

The article analyzes the impact of the use of innovative materials for soil stabilization on reducing the cost of road construction. Modern technological solutions are considered, including the use of geosynthetics, polymer stabilizers, nanomodified binders, ash and slag waste, and geopolymer compositions. A review of the physical and mechanical properties of stabilized soils is given in comparison with traditional stabilization methods using cement and lime. An assessment of the technical and economic efficiency of the introduction of innovative materials was carried out, expressed in the reduction of transportation costs, a decrease in the need for imported stone materials, a reduction in the thickness of structural layers of pavement and an increase in overhaul periods. It is shown that the use of stabilized local soils instead of expensive imported materials ensures a reduction in direct costs for the construction of the road base by up to 30–40% while maintaining the standard operational characteristics. The factors determining the economic feasibility of choosing a specific type of stabilizer depending on the road category, properties of the original soil and climatic conditions are analyzed. The economic efficiency of methods based on the utilization of industrial waste, such as ash and slag mixtures, was confirmed, which contributes to solving not only transport, but also environmental problems.

Ключевые слова: стабилизация грунтов, инновационные материалы, стоимость строительства, автомобильные дороги, геосинтетика, укрепление грунтов, экономическая эффективность.

Keywords: soil stabilization, innovative materials, construction cost, highways, geosynthetics, soil reinforcement, economic efficiency.

Возведение автомобильных дорог сопряжено с высокими капитальными затратами, значительную часть которых формирует стоимость материалов для устройства земляного полотна и дорожной одежды. Традиционная технология предусматривает выемку слабых или пучинистых грунтов и их замену привозными дренирующими и каменными материалами, обладающими требуемыми физико-механическими характеристиками. Рост цен на инертные материалы и транспортные перевозки стимулирует поиск решений, направленных на максимальное использование местных грунтов после улучшения их свойств. Комплекс методов, объединяемых понятием стабилизации грунтов, позволяет превратить природные минеральные смеси в конструктивные слои с нормативной несущей способностью, водостойчивостью и морозостойкостью [1, 2].

Инновационные разработки в области материаловедения предложили рынку новые классы стабилизирующих добавок и армирующих элементов. Среди них выделяют геосинтетические решетки и полотна, полимерные эмульсии, наномодифицированные вяжущие, геополимерные составы и техногенные продукты — золы уноса, шлаки, фосфогипс [3, 6, 9]. Перечисленные решения отличаются от классического укрепления цементом или известью пониженной дозировкой вяжущего, ускоренным набором прочности, меньшей чувствительностью к органическим примесям в грунте и возможностью ведения работ при неблагоприятных погодных условиях. Снижение материалоемкости и транспортных издержек при переходе от привозного щебня к обработанному на месте грунту создает предпосылки для оптимизации сметной стоимости строительства.

Целью работы является количественная и качественная оценка влияния применения инновационных материалов для стабилизации грунтов на

экономику строительства автомобильных дорог. Задачи включают обзор современных стабилизаторов, анализ изменений в конструкциях дорожных одежд, достигаемых при использовании укрепленных грунтов, и сопоставление сметных показателей с традиционными решениями.

Применение геосинтетических прослоек и объемных георешеток изменяет механизм распределения напряжений в грунтовом массиве. Армирующий элемент воспринимает горизонтальные растягивающие усилия, ограничивает боковые деформации и повышает общий модуль упругости основания. Согласно методическим рекомендациям [13], размещение георешетки на границе песчаного подстилающего слоя и щебеночного основания позволяет сократить толщину последнего на 15–25% без снижения расчетного модуля деформации. Это сокращение эквивалентно экономии каменного материала в объеме до 20–30 м³ на 1000 м² дорожного полотна. Учитывая стоимость щебня фракции 40–70 мм с доставкой, достигающую в отдельных регионах 1800–2400 руб./м³, денежное выражение экономии становится ощутимым.

Полимерные стабилизаторы на основе акриловых сополимеров или поливинилацетатных дисперсий формируют в грунте нерастворимые связи между глинистыми частицами, снижают гидрофильность и капиллярное водонасыщение. Результаты экспериментов, приведенные в [8], демонстрируют прирост предела прочности на сжатие суглинистого грунта в 2,5–3,5 раза после введения 0,15–0,20% полимерного концентрата. Достигнутая прочность позволяет отказаться от укладки дополнительного слоя щебня, заменяя его укрепленным местным грунтом. Если базовая смета на устройство 1 км основания толщиной 20 см из щебня составляет 5,2–6,0 млн руб., то вариант с полимерной стабилизацией суглинка, даже с учетом стоимости добавки, не превышает 3,5–4,2 млн руб. Разница достигает 30–40%, что подтверждают оценки, выполненные в [7, 8] для лесовозных дорог и региональных трасс.

Наномодифицированные вяжущие, получаемые введением в цементные или известковые суспензии углеродных нанотрубок, нанокремнезема или органомодифицированного бентонита, увеличивают интенсивность процессов гидратации и создают плотную микроструктуру цементного камня [5]. Для стабилизации переувлажненных пылевато-глинистых грунтов достаточно 4–6% наноцемента вместо 8–12% традиционного цемента, что сокращает расход вяжущего вдвое. Прямая экономия цемента на 1 км дороги с шириной проезжей части 7 м и толщиной укрепленного слоя 15 см составляет порядка 30–45 т. При рыночной цене цемента 6,5–8,0 тыс. руб./т денежный эквивалент экономии достигает 200–360 тыс. руб./км. Побочным эффектом служит повышение морозостойкости укрепленного грунта до марок F50–F75, обеспечивающее увеличение межремонтного интервала с 3–4 до 7–9 лет, что трансформируется в сокращение расходов на содержание дороги на протяжении жизненного цикла.[5]

Техногенные материалы, такие как золошлаковые отходы тепловых электростанций, выполняют функции как вяжущего, так и микронаполнителя. Исследования [4, 10] показывают, что добавка 15–20% золы уноса к супесчаным и суглинистым грунтам в сочетании с 3–5% цемента позволяет получать укрепленную смесь марки по прочности M40–M60, пригодную для устройства нижних слоев оснований дорог III–IV категорий. Стоимость золы вблизи источника составляет 50–150 руб./т против 600–1200 руб./т за песчано-гравийную смесь. Разница в цене материалов перекрывает дополнительные затраты на транспортировку и перемешивание, итоговое снижение сметной стоимости работ на 1 км основания оценивается в 500–800 тыс. руб. для региональных дорог [10]. Экологический эффект, связанный с уменьшением площадей золоотвалов, не входит в прямые сметные расчеты, но способен приносить косвенную экономию бюджетных средств при реализации региональных экологических программ.

Данный подход подтверждается исследованиями, выполненными в Иркутском национальном исследовательском техническом университете, где показана возможность разработки комплексных вяжущих на основе отходов промышленного производства для укрепления местных грунтов оснований дорожных одежд автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения, обеспечивающих снижение стоимости материалов до 15 % [14].

Геополимерные вяжущие, синтезируемые низкотемпературной активацией алюмосиликатного сырья, приобретают прочностные показатели, сопоставимые с портландцементом, при снижении выбросов CO_2 на 60–80% [9]. При укреплении грунта геополимерными составами дозировка вяжущего составляет 5–8% от массы сухого грунта. В работе [9] установлено, что прочность при сжатии геополимерно-грунтовой смеси через 7 суток нормального твердения достигает 4,2–6,8 МПа, что позволяет применять смесь в качестве основания для капитальных дорожных одежд. Экономическая привлекательность решения зависит от доступности местного алюмосиликатного сырья. В регионах с развитой горнодобывающей промышленностью, где имеются отвалы вскрышных пород, затраты на получение геополимерного вяжущего ниже затрат на цемент, и экономия при строительстве 1 км основания шириной 7,5 м и толщиной 0,18 м может превышать 400 тыс. руб.

Важным аспектом, подтверждающим экономическую эффективность стабилизации, служит сокращение дальности перевозки материалов. Привозной щебень нередко доставляется из карьеров, удаленных на 50–80 км от объекта, что при тарифе 8–12 руб./т·км увеличивает стоимость 1 м³ материала на 400–960 руб. Местный грунт, укрепленный на месте или в установке смешения на обочине, требует перемещения в пределах строительной полосы. Транспортная составляющая в сметной стоимости устройства основания снижается в 3–5 раз. В условиях Сибири и Дальнего Востока, где карьерное хозяйство развито слабо, переход на стабилизацию

грунтов дает экономию в 25–45% от общей стоимости земляных работ, что иллюстрируется расчетами [6, 7].

Сочетание нескольких инновационных подходов в одной конструкции усиливает экономический эффект. Устройство основания из укрепленного полимерным стабилизатором грунта с последующим армированием георешеткой позволяет проектировать дорожные одежды облегченного типа под нагрузку 115 кН на ось без использования щебня в нижних слоях. Модельные расчеты, приведенные в [12] и [13], указывают на уменьшение капитальных затрат на 28–35% относительно классической конструкции «щебень фракционированный – песок средней крупности». Сравнительная табл. 1 демонстрирует укрупненные показатели стоимости 1 км дорожной одежды переходного типа для трех вариантов.

Таблица 1. Сравнительная стоимость 1 км дорожной одежды переходного типа (ширина проезжей части 7 м, II дорожно-климатическая зона, цены базового района 2022 г.)

Конструктивный вариант	Стоимость материалов, тыс. руб.	Транспортные расходы, тыс. руб.	Стоимость работ, тыс. руб.	Всего, тыс. руб.
Щебеночное основание 20 см + песчаный подстилающий слой 25 см	4950	1050	1200	7200
Грунт, укрепленный цементом (8%), 18 см + песчаный подстилающий слой 15 см	3100	520	980	4600
Грунт с полимерным стабилизатором (0,18%) + георешетка, 16 см + песчаный подстилающий слой 10 см	2850	310	890	4050

Составлено авторами по данным [8, 12, 13].

Анализ таблицы показывает, что вариант с полимерным стабилизатором и георешеткой сокращает итоговые затраты на 44% по отношению к щебеночному основанию и на 12% — по сравнению с цементным укреплением. При этом достигается сокращение расхода песка на 15 м³ на 1 км, а выбросы парниковых газов от транспорта снижаются пропорционально уменьшению плеча перевозки.

Следует учитывать влияние климатических условий на выбор рационального типа стабилизатора. В зонах избыточного увлажнения преимущество получают гидрофобизирующие полимерные составы, которые не только упрочняют грунт, но и блокируют капиллярный подсос воды. В засушливых районах эффективнее работают цементно-зольные смеси и геополимеры, не требующие длительного влажностного ухода. Учет этих факторов при проектировании исключает неоправданные риски и предупреждает удорожание содержания в послепостроечный период [3, 11].

Оценка затрат жизненного цикла дорожной одежды, выполненная в работе [5], свидетельствует, что участки с инновационными стабилизированными основаниями за 12 лет эксплуатации требуют в 1,8–2,2 раза меньших вложений в текущий ремонт по сравнению с традиционными щебеночными конструкциями. Меньшая подверженность колееобразованию и пучинистости снижает периодичность выравнивающих слоев. Дисконтированная экономия на стадии эксплуатации за межремонтный период достигает 1,2–1,8 млн руб./км в ценах 2022 г., что сопоставимо с первоначальной разницей в капитальных затратах. Следовательно, даже при равных первоначальных сметных показателях инновационные материалы демонстрируют преимущество по критерию полных затрат владения.

Внедрение рассмотренных решений сдерживается несколькими факторами. Действующие сметные нормативы слабо отражают современные технологии, поэтому проектные организации не всегда имеют возможность заложить укрепленные грунты в смету без разработки индивидуальных элементных норм. Качество стабилизации существенно зависит от

соблюдения технологического регламента — равномерности распределения добавки, степени уплотнения и температурного режима. Недостаточный контроль на объекте способен нивелировать расчетную экономию. Тем не менее, опыт пилотных проектов в Ленинградской, Тюменской областях и Республике Татарстан подтверждает воспроизводимость результатов и высокую надежность укрепленных грунтов [2, 6].

Дополнительным резервом экономии служит повторное использование демонтированных асфальтогранулятов, обработанных стабилизаторами, для устройства нижних слоев оснований. Комбинация дробленого старого бетона и золы-уноса создает малоцементный рециклированный композит, стоимость которого на 40–60% ниже свежей щебеночно-песчаной смеси [4, 10]. Замкнутый цикл материалов сокращает потребность в новых карьерах и снижает транспортную нагрузку на прилегающую дорожную сеть.

Таким образом, применение инновационных материалов для стабилизации грунтов в дорожном строительстве обеспечивает многокомпонентное снижение затрат. Сокращение расхода привозных каменных материалов, уменьшение толщины конструктивных слоев, снижение транспортных издержек и увеличение сроков службы дорожных одежд формируют экономию в диапазоне 25–45% от стоимости традиционных конструкций. Экономический эффект достигается при использовании геосинтетических решеток, полимерных стабилизаторов, наномодифицированных вяжущих, золошлаковых отходов и геополимеров. Выбор конкретного материала должен опираться на технико-экономическое сравнение вариантов с учетом местных условий и категории дороги. Инновационные технологии стабилизации грунтов позволяют перейти к ресурсосберегающей модели дорожного хозяйства без ущерба для транспортно-эксплуатационных показателей.

Список литературы

1. Безрук В.М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. – М.: Транспорт, 1982. – С. 45–67.
2. Подольский Вл.П., Нгуен В.Л. Укрепление грунтов в дорожном строительстве: учебное пособие. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2015. – С. 33–54.
3. Кнатько М.В., Гусев Б.В., Гольдфейн М.Д. Инновационные материалы и технологии в строительстве и реконструкции автомобильных дорог. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – С. 89–112.
4. Хомутов О.В., Соколов И.А. Использование золошлаковых отходов для стабилизации грунтов // Строительные материалы. – 2019. – № 7. – С. 24–29.
5. Шестаков Н.И., Федоров А.В. Повышение эффективности укрепления грунтов наномодифицированными вяжущими // Известия вузов. Строительство. – 2018. – № 5. – С. 63–72.
6. Лапин А.И., Прокопец В.С. Исследование влияния комплексных стабилизаторов на физико-механические свойства глинистых грунтов // Дороги и мосты. – 2017. – № 2 (38). – С. 218–229.
7. Посыпанов С.В. Экономическая эффективность применения стабилизаторов грунта при строительстве лесовозных дорог // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2018. – № 3. – С. 86–92.
8. Кузнецов А.А., Меркулов С.И. Оценка снижения стоимости строительства дорог при использовании полимерных стабилизаторов грунта // Дороги и мосты. – 2020. – № 1 (43). – С. 120–135.
9. Калинин А.Л., Кудрявцев С.А. Применение геополимерных вяжущих для стабилизации грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2020. – № 5. – С. 14–19.
10. Евсеева И.С. Экономические аспекты применения золошлаковых материалов в дорожном строительстве // Транспортное строительство. – 2015. – № 4. – С. 24–27.

11. Папин А.В., Игнатов С.В., Бабенко И.С. Применение стабилизаторов грунта в дорожном строительстве [Электронный ресурс] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 5 (117). – С. 98–104. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-stabilizatorov-grunta-v-dorozhnom-stroitelstve> (дата обращения: 11.06.2026).
12. ОДМ 218.2.017-2011. Методические рекомендации по применению укрепленных грунтов в конструкциях дорожных одежд [Электронный ресурс]. – М.: Росавтодор, 2011. – С. 15–28. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200085870> (дата обращения: 11.06.2026).
13. ОДМ 218.2.046-2014. Рекомендации по применению геосинтетических материалов при строительстве и ремонте автомобильных дорог [Электронный ресурс]. – М.: Росавтодор, 2014. – С. 24–45. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115438> (дата обращения: 11.06.2026).
14. Плюта К.В. Разработка комплексного вяжущего на основе отходов промышленного производства для укрепления местных грунтов, применяемых в основаниях дорожных одежд автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения // Научно-образовательный портал «Эврика». 2020. URL: <https://eee-science.ru/item-work/2020-4237/> (дата обращения: 11.06.2026).

References

1. Bezruk V.M. Ukreplenie gruntov v dorozhnom i aerodromnom stroitel'stve [Soil stabilization in road and airfield construction]. Moscow, Transport Publ., 1982, pp. 45–67. (In Russian)
2. Podolsky V.I., Nguyen V.L. Ukreplenie gruntov v dorozhnom stroitel'stve: uchebnoe posobie [Soil stabilization in road construction: a tutorial]. Voronezh, Voronezhskiy GASU Publ., 2015, pp. 33–54. (In Russian)
3. Knat'ko M.V., Gusev B.V., Goldfein M.D. Innovatsionnye materialy i tekhnologii v stroitel'stve i rekonstruktsii avtomobil'nykh dorog [Innovative

- materials and technologies in construction and reconstruction of highways]. Moscow, ASV Publ., 2014, pp. 89–112. (In Russian)
4. Khomutov O.V., Sokolov I.A. Ispol'zovanie zoloshlakovykh otkhodov dlya stabilizatsii gruntov [Use of ash and slag waste for soil stabilization]. Stroitel'nye materialy, 2019, no. 7, pp. 24–29. (In Russian)
 5. Shestakov N.I., Fedorov A.V. Povyshenie effektivnosti ukrepleniya gruntov nanomodifitsirovannyimi vyazhushchimi [Increasing the efficiency of soil reinforcement with nanomodified binders]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo, 2018, no. 5, pp. 63–72. (In Russian)
 6. Lapin A.I., Prokopets V.S. Issledovanie vliyaniya kompleksnykh stabilizatorov na fiziko-mekhanicheskie svoystva glinistykh gruntov [Investigation of the influence of complex stabilizers on the physical and mechanical properties of clay soils]. Dorogi i mosty, 2017, no. 2 (38), pp. 218–229. (In Russian)
 7. Posypanov S.V. Ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya stabilizatorov grunta pri stroitel'stve lesovoznykh dorog [Economic efficiency of soil stabilizers in the construction of logging roads]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2018, no. 3, pp. 86–92. (In Russian)
 8. Kuznetsov A.A., Merkulov S.I. Otsenka snizheniya stoimosti stroitel'stva dorog pri ispol'zovanii polimernykh stabilizatorov grunta [Assessment of reduction in road construction costs when using polymer soil stabilizers]. Dorogi i mosty, 2020, no. 1 (43), pp. 120–135. (In Russian)
 9. Kalinin A.L., Kudryavtsev S.A. Primenenie geopolimernykh vyazhushchikh dlya stabilizatsii gruntov [Application of geopolymer binders for soil stabilization]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov, 2020, no. 5, pp. 14–19. (In Russian)
 10. Evseeva I.S. Ekonomicheskie aspekty primeneniya zoloshlakovykh materialov v dorozhnom stroitel'stve [Economic aspects of the use of ash and slag materials in road construction]. Transportnoe stroitel'stvo, 2015, no. 4, pp. 24–27. (In Russian)

11. Papin A.V., Ignatov S.V., Babenko I.S. *Primenenie stabilizatorov grunta v dorozhnom stroitel'stve* [Application of soil stabilizers in road construction]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 5 (117), pp. 98–104. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-stabilizatorov-grunta-v-dorozhnom-stroitel'stve> (accessed 11.06.2026). (In Russian)
12. ODM 218.2.017-2011. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu ukreplennykh gruntov v konstruktsiyakh dorozhnykh odezhd* [Guidelines for the use of reinforced soils in pavement structures]. Moscow, Rosavtodor, 2011, pp. 15–28. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200085870> (accessed 11.06.2026). (In Russian)
13. ODM 218.2.046-2014. *Rekomendatsii po primeneniyu geosinteticheskikh materialov pri stroitel'stve i remonte avtomobil'nykh dorog* [Recommendations for the use of geosynthetic materials in the construction and repair of highways]. Moscow, Rosavtodor, 2014, pp. 24–45. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200115438> (accessed 11.06.2026). (In Russian)
14. Plyuta K.V. Development of a complex binder based on industrial waste for stabilization of local soils used in pavement bases of low-volume roads [Razrabotka kompleksnogo vyazhushchego na osnove otkhodov promyshlennogo proizvodstva dlya ukrepleniya mestnykh gruntov, primenyaemykh v osnovaniyakh dorozhnykh odezhd avtomobil'nykh dorog s nizkoy intensivnost'yu dvizheniya]. *Eureka Scientific and Educational Portal*, 2020. Available at: <https://eee-science.ru/item-work/2020-4237/> (accessed 11.06.2026).