

УДК 625.731.82

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-280-287

СТАБИЛИЗАЦИЯ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ: НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И СДЕРЖИВАЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Б. А. Бондарев¹, А. Е. Борисов², А. Н. Канищев², А. А. Быкова²

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия,

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация. Представлено научно-практическое обоснование стабилизации гумусовых грунтов с неблагоприятными физико-механическими свойствами с применением крупнотоннажных промышленных отходов. Детально охарактеризованы физико-механические и химические свойства гумусовых грунтов, предопределяющие их пониженную несущую способность и ограниченную эффективность традиционного цементирования. Предложена функциональная классификация вторичных ресурсов по их роли в формировании структуры геокомпозитов. Выявлены и проанализированы нормативно-экономические и технологические барьеры, сдерживающие внедрение ресурсосберегающих технологий. Разработана комплексная модель оценки применимости отходов, объединяющая технический, экологический, нормативный и экономический блоки. Особое внимание уделено многокомпонентным рецептурам, нейтрализующим ингибирующее действие органики и обеспечивающим требуемые деформационно-прочностные характеристики укрепленного массива. Показано, что ключевым ограничением внедрения является не техническая непригодность материалов, а нормативная нерегулированность и отсутствие действенных экономических стимулов.

Ключевые слова: механика грунтов, органо-минеральные грунты, гумус, укрепление грунтов, вторичные минеральные ресурсы, золошлаковые отходы, нормативные барьеры, геотехническое проектирование

STABILIZATION OF ORGANO-MINERAL SOILS USING INDUSTRIAL WASTE: SCIENTIFIC AND PRACTICAL ASPECTS AND CONSTRAINING FACTORS

B. A. Bondarev¹, A. E. Borisov², A. N. Kanishchev², A. A. Bykova²

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia,

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Annotation. This article presents a scientific and practical substantiation of the stabilization of humus soils with unfavorable physical and mechanical properties using large-tonnage industrial waste. The physical-mechanical and chemical properties of humus soils that determine their reduced bearing capacity and the limited effectiveness of traditional cementation are characterized in detail. A functional classification of secondary resources according to their role in the formation of the structure of geocomposites is proposed. The regulatory, economic, and technological barriers hindering the implementation of resource-saving technologies are identified and analyzed. A comprehensive model for assessing the applicability of waste has been developed, combining technical, environmental, regulatory, and economic blocks. Particular attention is paid to multicomponent formulations that neutralize the inhibitory effect of organic matter and ensure the required deformation and strength characteristics

of the reinforced massif. It is shown that the key constraint to implementation is not the technical unsuitability of the materials, but rather the lack of regulatory regulation and effective economic incentives.

Keywords: *soil mechanics, organomineral soils, humus, soil stabilization, secondary mineral resources, ash and slag waste, regulatory barriers, geotechnical design*

Введение

Развитие транспортной инфраструктуры в условиях роста осевых нагрузок и ужесточения экологических требований выдвигает на первый план задачу эффективного использования местных грунтов в качестве оснований дорожных одежд. Значительная часть территории Российской Федерации сложена грунтами, обладающими неблагоприятными строительными свойствами, среди которых особое место занимают органо-минеральные (гумусовые) разности, а также пылеватые суглинки и глины с высокой пластичностью. Такие грунты обладают пониженной прочностью, высокой сжимаемостью, склонностью к набуханию и морозному пучению, что делает их непригодными для непосредственного применения в конструктивных слоях дорог без специальных мероприятий по стабилизации [1, 2, 7].

Одновременно в России накоплены миллиарды тонн техногенных отходов – золошлаковых смесей, металлургических шлаков, фосфогипса, уровень утилизации которых не превышает 15 % – 20 %. Эти материалы обладают скрытым вяжущим потенциалом и способны заменить привозной щебень и портландцемент при укреплении местных, часто обладающих недостаточной несущей способностью, грунтов. Переход к циркулярной экономике в дорожной отрасли, зафиксированный отраслевыми программами до 2030 г., требует переосмысления роли техногенного сырья: из «отхода» оно должно стать стандартизованным строительным материалом [3–5, 11].

Цель настоящей работы – на основе обобщения ранее выполненных исследований представить целостное геотехническое обоснование стабилизации органо-минеральных грунтов с неблагоприятными свойствами с применением вторичных ресурсов. Для этого детально анализируются физико-механические характеристики грунтового массива, формулируются принципы выбора стабилизирующих добавок, разрабатывается модель комплексной оценки эффективности и предлагаются конкретные рецептурно-технологические решения.

Характеристика грунтов

С позиций механики грунтов наибольшие сложности при строительстве дорог вызывают грунты, в составе которых доминируют пылеватые и глинистые фракции, а также присутствует органическое вещество. Особую группу образуют органо-минеральные (гумусовые) грунты, содержащие от 3 % до 15 % и более гумуса. Их физическое состояние и поведение под нагрузкой кардинально отличаются от минеральных аналогов.

Гумусовые кислоты, присутствующие в составе органики, оказывают ингибирующее действие на процессы гидратации портландцемента: они связывают ионы кальция, препятствуя формированию гидросиликатной матрицы. В результате цементные составы либо вообще не набирают проектную прочность, либо демонстрируют резкое её падение после циклического увлажнения–высушивания. Кроме того, гумусовые грунты характеризуются [7]:

- высокой пластичностью (число пластичности I_p нередко превышает 15–20);
- значительным водопоглощением (коэффициент водонасыщения достигает 0,9–1,0);
- выраженной склонностью к набуханию при увлажнении и усадке при высыхании;
- пониженными значениями сцепления и угла внутреннего трения в нарушенном состоянии.

Вследствие этого расчётные модули деформации таких грунтов редко превышают 5–10 МПа, что существенно ниже требуемых значений для оснований дорожных одежд. Согласно действующим нормативным документам, гумусовые грунты с содержанием органики более 3 % не допускаются использовать в основаниях без предварительной стабилизации [6, 7].

Наряду с гумусовыми разностями, сложности создают *пылеватые суглинки и глины*, обладающие высокой морозоопасностью и низкой водопроницаемостью. Для них главными задачами стабилизации выступают снижение пучинистости, повышение прочности на сдвиг и обеспечение дренирующих свойств.

Учитывая разнообразие грунтовых условий, универсальных решений не существует. Выбор стабилизирующей добавки должен опираться на детальный лабораторный анализ исходного грунта, включающий определение гранулометрического состава, содержания гумуса, pH, пластичности и прочностных характеристик. Только на этой основе возможен целенаправленный подбор компонентов, способных компенсировать природные дефициты грунта.

Геотехническая классификация вторичных ресурсов

С позиции механики грунтов принципиальное значение имеет не происхождение отхода, а та роль, которую он играет в формировании структуры укрепленного грунта. На основании анализа химико-минералогического состава и механизма твердения предложена функциональная классификация, разделяющая все техногенные материалы на три категории [9–13]:

- *Активные (вяжущие) компоненты*. К ним относятся золы-уноса ТЭС с высоким содержанием оксида кальция, гранулированные доменные шлаки, активированный фосфополугидрат. Их главная функция — образование цементирующей матрицы за счёт пуццолановых, гидравлических или

сульфатно-шлаковых реакций, что напрямую определяет рост прочности и водостойкости.

- *Заполнители (инертные и слабоактивные).* Шлаковый щебень, дроблённый бетонный лом, отсеvy горного производства, инертная часть золшлаков. Они формируют жёсткий скелет материала, повышают модуль деформации и снижают усадочные деформации.

- *Модификаторы и активаторы.* В эту группу входят сульфатсодержащие отходы в малых дозах (фосфогипс, фторгипс), щелочные шламы, нефтешламы, лигнин, полимерные дисперсии. Они регулируют скорость схватывания, придают гидрофобность, пластичность, морозостойкость, а в случае волокнистых материалов — выполняют микроармирующую функцию.

Такая классификация позволяет целенаправленно конструировать геокомпозиаты под конкретные грунтовые условия и проектные требования, переводя проектирование из эмпирической плоскости в область управляемого структурообразования.

Системные барьеры внедрения технологий

Несмотря на многолетний положительный опыт (включая практику ЕС и США) [8–10], в России применение ВМР при укреплении грунтов остаётся не значительным. Анализ показал наличие трёх взаимосвязанных групп препятствий, образующих самоподдерживающийся «замкнутый круг»:

- *Технологические риски:* нестабильность состава от партии к партии, отсутствие долгосрочных данных о поведении укреплённых массивов в цикле замораживания-оттаивания, слабая стандартизация подготовки материала.

- *Нормативная неопределённость:* статус «отхода» существенно усложняет согласование проектной документации; федеральные технические регламенты, приравнивающие подготовленные ВМР к строительным материалам, практически отсутствуют, а имеющиеся ГОСТы не носят обязательного характера. Межведомственная разобщённость между регуляторами обращения с отходами и строительного комплекса усугубляет ситуацию.

- *Экономические препятствия:* низкая плата за размещение отходов для их производителей не стимулирует вложения в переработку; для дорожника транзакционные издержки (испытания, логистика, оформление разрешений) делают традиционный щебень и цемент зачастую более предсказуемым и дешёвым решением.

Эти группы барьеров усиливают друг друга: технологическая неоднородность требует сложных испытаний, что увеличивает нормативные издержки, а отсутствие ясных правил и гарантий блокирует экономическую мотивацию. Разорвать этот круг можно только синхронными мерами по всем трём направлениям.

Методика комплексной оценки и алгоритм принятия решений

Для преодоления информационной неопределённости предложена четырёхступенчатая модель, позволяющая на этапе эскизного проектирования объективно оценить целесообразность использования конкретного вида отхода в конкретном грунтовом основании [11–16]:

1. *Техническая оценка.* Лабораторное определение химической активности, оптимальной дозировки, прогнозируемых прочности на сжатие, водонепроницаемости и морозостойкости. Критерий — соответствие нормируемым показателям для рабочего слоя земляного полотна или основания дорожной одежды.

2. *Экологическая экспертиза.* Подтверждение радиационной и токсикологической безопасности, оценка миграции тяжёлых металлов и углеродного следа относительно традиционного цементного аналога.

3. *Анализ нормативного поля.* Возможность разработки технических условий (ТУ/СТО), допустимость внесения изменений в проектную документацию, наличие прецедентов согласования.

4. *Экономический расчёт.* Сопоставление полной стоимости устройства 1 м² укрепленного слоя с использованием ВМР и базового варианта (щебень + цемент) с учётом логистики, подготовки отхода и эффекта от сокращения платы за его размещение.

При отрицательном результате на любой ступени возможна коррекция рецептуры или возврат к другому материалу. Модель апробирована на примере золы-уноса типа II: техническая пригодность высока, экологический риск управляем при входном контроле, нормативная обеспеченность — критически низкая, а экономическая эффективность становится положительной только при одновременном учёте утилизационных платежей и близости источника золы к объекту.

Геотехнические решения для органо-минеральных грунтов

Детальное рассмотрение гумусовых грунтов показывает, что первоочередной задачей является нейтрализация негативного влияния органики. Установлено, что при содержании гумуса более 6 % традиционное цементирование становится практически неэффективным. Решением служит трёхстадийная технология, включающая химическую нейтрализацию, формирование минерального каркаса и гидрофобизацию [7].

Химическая нейтрализация. Предварительное введение гашёной извести (2 % – 4 % от массы сухого грунта) с обязательной выдержкой 24–48 ч. Известь переводит активные органические соединения в нерастворимые гуматы кальция, повышает pH среды и активизирует последующие пуццолановые реакции.

Формирование минерального каркаса. На втором этапе вводится комплексное вяжущее: цемент (4 % – 6 %) в сочетании с золой-уноса (8 % – 12 %) и/или молотым гранулированным доменным шлаком (5 % – 10 %). Такая комбинация обеспечивает прочность на сжатие через 28 суток не менее 3–5 МПа и трещиностойкость.

Гидрофобизация и армирование. Для снижения водонасыщения и повышения морозостойкости в смесь дополнительно вводят битумные эмульсии (3 % – 5 %) или акриловые полимерные дисперсии (1 % – 3 %). Для микроармирования могут применяться полипропиленовые волокна (0,1 % – 0,3 %) либо обработанные известью древесные опилки, выполняющие роль демпфирующих включений и одновременно снижающие усадочные деформации.

В табл. 1 сведены примеры экономичных рецептур, ориентированных на конкретные свойства исходного грунта и региональную доступность отходов. Снижение прямых затрат по сравнению с традиционными цементно-песчаными смесями достигает 20 % – 50 % [5–13].

Таблица 1. Рекомендуемые составы для стабилизации гумусовых грунтов

№	Состав (доля от массы сухого грунта)	Примечание
1	Цемент 5 %, зола-уноса 10 %, известь 3 %, песок 12 %	Замена 30 % – 40 % цемента золой, пригодна для гумуса до 6 %
2	Доменный шлак 12 %, известь 4 %, песок 10 %	Бесцементное вяжущее, высокая сульфатостойкость
3	Цемент 6 %, опилки (известкованные) 6 %, песок 15 %	Армирующий эффект, снижение усадочных деформаций
4	Глина местная 20 %, битумная эмульсия 5 %, щебёночная крошка 25 %, известь 2 %	Для грунтов с низкой несущей способностью; гидрофобная защита

Независимо от выбранной рецептуры обязательным является предварительный лабораторный анализ грунта: содержание гумуса, гранулометрический состав, число пластичности, pH и прочностные характеристики. Механическая модель такого геокомпозита может рассматриваться как трёхфазная среда: минеральный скелет, эластичная связующая матрица и закрытая пористость. Подобный подход позволяет прогнозировать деформационное поведение укрепленного массива и обоснованно назначать толщину конструктивного слоя.

Экономическая и экологическая результативность

Расчётные оценки демонстрируют, что при налаженной логистике замещение привозного щебня и части цемента техногенными материалами способно сократить стоимость устройства 1 км двухполосной дороги на

20 % –60 %. Например, применение золы-уноса в основании позволяет исключить до 40 % цемента, одновременно утилизируя 10–15 тыс. т отхода на каждый километр. С экологической точки зрения, помимо ликвидации пылящих золоотвалов, снижается эмиссия CO₂ (в среднем на 0,6–0,8 т на каждую замещённую тонну цемента) и сохраняются природные ландшафты, выводимые из-под карьеров.

Заключение

Таким образом, ключевым звеном в решении геотехнических задач дорожного строительства является всесторонний учёт свойств грунтов с неблагоприятными характеристиками, прежде всего — степени их гумусированности, пластичности и проницаемости. Предложенная функциональная классификация вторичных ресурсов и комплексная модель оценки позволяют обоснованно выбирать компоненты для стабилизирующих смесей, адаптируя рецептуру под конкретные грунтовые условия. Многокомпонентные составы, включающие известь для нейтрализации органики, пуццолановые или гидравлические вяжущие для формирования каркаса и модификаторы для гидрофобизации, обеспечивают требуемые деформационно-прочностные характеристики и долговечность укреплённого слоя. Однако практическая реализация этих решений сдерживается не техническим несовершенством, а отсутствием синхронизированной нормативно-экономической среды. Для преодоления разрыва необходимы введение федеральных технических регламентов на подготовленные ВМР, обязательность их применения при бюджетном финансировании, экономическое стимулирование генераторов отходов и создание банка типовых геотехнических решений. Только при этих условиях колоссальный потенциал техногенного сырья может быть конвертирован в безопасную и долговечную транспортную инфраструктуру.

Список источников

1. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] : офиц. сайт. — URL: <https://www.fedstat.ru/indicators/search?searchText=отходы+производства+и+потребления> (дата обращения: 02.12.2025).
2. Пичугин, Е. А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций / Е. А. Пичугин // Проблемы региональной экологии. — 2019. — № 4. — С. 77-87.
3. Марьев, В. А. Использование вторичных материальных ресурсов при строительстве и ремонте автомобильных дорог — важный резерв ресурсосбережения / В. А. Марьев, А. В. Руденский // Дороги и мосты. — 2017. — № 1 (37). — С. 11-24.
4. Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022–2030 годы: паспорт отраслевой программы / Утв. Правительством Российской Федерации 10 октября 2022 г. № 11795п-П11. — Москва, 2022. — 48 с.
5. Слободчикова, Н. А. Использование отходов промышленности для получения вяжущих в дорожной отрасли / Н. А. Слободчикова // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2015. — № 1 (12). — С. 116-120.

6. Кочетков, А. В. Применение фосфогипса для строительства монолитных слоев дорожной одежды / А. В. Кочетков, Л. В. Янковский // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2017. – № 4. – С. 91-102.
7. Бондарев, Б. А. Комплексная стабилизация гумусовых грунтов для дорожного строительства: эффективные составы на основе отходов промышленности / Б. А. Бондарев, А. Е. Борисов, А. Н. Канищев // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2025. – Выпуск № 4 (80). – С. 82-90.
8. Золотова, Е. С. Исследования почвенно-растительного покрова в зоне влияния шлаковых отвалов чёрной металлургии / Е. С. Золотова // Известия УГГУ. – 2024. – Вып. 1(73). – С. 97-105.
9. Пухов, С. А. Вовлечение в хозяйственный оборот золошлаковых отходов тепловых электростанций в интересах эколого-ориентированного развития экономики / С. А. Пухов, С. П. Киселева // Отходы и ресурсы. – 2020. – № 4. – URL: <https://resources.today/PDF/10ECOR420.pdf> (дата обращения: 01.02.2026).
10. Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Часть 1 / Г. С. Подгородецкий, В. Б. Горбунов, Е. А. Агапов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61. – № 6. – С. 439-446.
11. Системный анализ причин недостаточного применения вторичных ресурсов в дорожном строительстве / Т. К. Акчурин, Б. А. Бондарев, А. Н. Канищев [и др.] // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2026. – № 1(102). – С. 125-133. – DOI 10.35211/18154360_2026_1_125. – EDN OTIPFI.
12. Пашкевич, М. А. Современные тенденции управления отходами доменного производства / М. А. Пашкевич, Ю. А. Куликова // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 6. – URL: <https://esj.today/PDF/30NZVN622.pdf>.
13. Траутвайн, А. И. Разработка различных видов цементов для устройства конструктивных слоёв дорожной одежды на основе асфальтогранулобетонных смесей / А. И. Траутвайн, Д. Г. Тимофеев // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2023. – № 4. – С. 34-45.
14. Wong, K. C., & Wang, J. Sustainable Urban Construction: The Role of Waste Management. Urban Planning International, 34(3), 37-44, 2019.
15. European Commission. Construction and Demolition Waste: Challenges and Opportunities. Retrieved from, 2020. <https://ec.europa.eu>.
16. Soutsos M., Domone P. Construction Materials: Their Nature and Behaviour. 5th ed. London: CRC Press, 2018. 768 p.

© Бондарев Б. А., Борисов А. Е., Канищев А. Н., Быкова А. А., 2026