ИНЖЕНЕРНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ЗАЩИТЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТ ВЕТРОВОЙ ЭРОЗИИ В ПУСТЫННЫХ РАЙОНАХ

Лесов Кувандык Сагинович
Ташкентского государственного транспортного университета
к.т.н., профессор
Уралов Акмал шакар угли
Ташкентского государственного транспортного университета
базовый докторант
E-mail: akmaljonoralov1928@gmail.com
Яхъяева Муслимахон Тохирбоевна
Ташкентского государственного транспортного университета
магистрант
E-mail: muslimakhon_yakhyayeva@.mail.ru

Аннотация: В условиях пустынного климата ветровая эрозия и песчаные заносы представляют собой серьёзную угрозу для устойчивости железнодорожной инфраструктуры. Целью настоящего исследования является анализ инженерных и экологических подходов к защите земляного полотна железных дорог от воздействия эоловых процессов. На примере линии Бухара – Мискин проведена оценка природных условий, интенсивности пескопереноса и эффективности защитных мероприятий. Представлены результаты применения дистанционного зондирования, моделирования пескопереноса и полевых испытаний геосинтетических и биотехнических решений. Разработаны рекомендации по комбинированному применению инженерных и природосберегающих методов защиты. Полученные данные позволяют обосновать выбор рациональных конструктивных решений с учётом климатических и геоморфологических особенностей региона.

Ключевые слова: ветровая эрозия; песчаные заносы; земляное полотно; аридные территории; геосинтетические материалы; фитомелиорация; дистанционное зондирование; эоловые процессы; защита инфраструктуры.

Abstract: In arid climates, wind erosion and sand accumulation pose a serious threat to the stability of railway infrastructure. The aim of this study is to analyze engineering and environmental approaches for protecting railway embankments from the impact of aeolian processes. Using the Bukhara–Miskin railway line as a case study, an assessment was conducted of the natural conditions, sand transport intensity, and the effectiveness of protective measures. The study presents the results of remote sensing, sand transport modeling, and field tests of geosynthetic

ISSN 3030-3907

and biotechnical solutions. Recommendations have been developed for the combined use of engineering and nature-based protection methods. The data obtained justify the selection of optimal structural solutions, taking into account the climatic and geomorphological characteristics of the region.

Keywords: wind erosion; sand accumulation; railway embankment; arid regions; geosynthetic materials; phytomelioration; remote sensing; aeolian processes; infrastructure protection.

Annotatsiya: Cho‘l iqlimi sharoitida shamol eroziyasi va qum ko‘chish jarayonlari temiryo‘l infratuzilmasining barqarorligiga sezilarli xavf tug‘diradi. Ushbu ilmiy tadqiqotning asosiy maqsadi – temiryo‘l yer polotnosini eol jarayonlar ta’siridan muhofaza qilishda muhandislik va ekologik yondashuvlarning tizimli tahlilini amalga oshirishdir. Buxoro – Miskin temiryo‘l yo‘nalishi misolida hududning tabiiy-geografik sharoitlari, aeolik moddaning ko‘chish intensivligi hamda qo‘llanilgan muhofaza choralari samaradorligi baholandi. Tadqiqot doirasida masofaviy zondlash texnologiyalari, aeolik modellar orqali qum ko‘chish jarayonlarini simulyatsiya qilish usullari, shuningdek, geosintetik va biotexnik himoya vositalarining dala sharoitidagi amaliy sinovlari qo‘llanildi. Muhandislik va ekologik muhofaza usullarining kombinatsiyalangan qo‘llanilishi bo‘yicha takliflar ishlab chiqildi. Olingan ilmiy natijalar mintaqaning iqlimiy va geomorfologik sharoitlarini inobatga olgan holda optimal konstruktiv yechimlarni tanlashni ilmiy asoslash imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: shamol eroziyasi, qum ko‘chishi, yer polotnosi, arid hududlar, geosintetik materiallar, fitomelioratsiya, masofaviy zondlash, eolik jarayonlar, infratuzilmani himoya qilish.

1. Введение

В условиях аридного климата устойчивость и надёжность железнодорожной инфраструктуры подвергается серьёзному воздействию эоловых процессов, в первую очередь – ветровой эрозии и песчаных заносов [1; 11; 15]. Эти явления представляют особую угрозу для эксплуатационного состояния земляного полотна, особенно на участках, проходящих через пустыни и полупустыни [3; 17]. В Республике Узбекистан протяжённость таких участков велика, особенно в пределах железнодорожных линий Бухара – Мискин, Карши – Термез и Ургенч – Нукус [5; 9].

По данным Агентства по гидрометеорологии Республики Узбекистан, в весенне-летний период на территории южных и центральных регионов наблюдаются устойчивые ветры со скоростью 10–14 м/с и порывами до 18–20 м/с. В сочетании с рыхлой структурой песков и отсутствием устойчивой

ISSN 3030-3907

растительности это создаёт благоприятные условия для дефляции и последующего пескопереноса [12; 16].

Эоловые процессы, включая дефляцию, сальтацию и аккумуляцию песка, приводят к разуплотнению и разрушению структуры насыпи, заиливанию дренажных устройств, повреждению креплений и рельсов, а также увеличению эксплуатационных расходов [6; 13]. Ввиду отсутствия растительности и низкой влагоёмкости песков, устойчивость земляного полотна резко снижается. Возникает риск потери проектной геометрии пути, что влечёт за собой снижение уровня безопасности движения поездов [2; 15].

В связи с этим возникает необходимость в применении адаптированных инженерных и экологических решений, способных обеспечить защиту инфраструктуры при минимальных затратах и с учётом природных условий [4; 7; 13]. Эти решения должны учитывать не только локальные климатические особенности, но и тип подстилающих грунтов, интенсивность пескопереноса, а также возможности применения биотехнических мероприятий [1; 3; 10]. Целью настоящего исследования является анализ существующих подходов, определение их эффективности и разработка комплексных рекомендаций по защите железнодорожной инфраструктуры в условиях аридных пустынных территорий.

2. Материалы и методы

Классификация подвижности песков в аридных условиях

Систематизация типов песчаных массивов по степени их подвижности проводиться на основе физико-механических и биогеоценотических характеристик [11; 12; 15]. Основными классификационными признаками являются:

- содержание пылевато-глинистых фракций (%),
- плотность растительного покрова (%),
- характер растительности,
- тип движения песчаного материала.

Классификация подвижности песков, используемая для предварительной оценки необходимости применения защитных мероприятий приведена в таблице 1 [1; 14].

ISSN 3030-3907

Таблица 1

Классификация подвижности песков в аридных условиях

Подвижность песков	Пылевато-глинистые фракции (%)	Покрытие растительностью (%)	Тип растительности	Тип движения
Подвижные (барханные)	<5	<15	отсутствует или точечное	поступательное
Малоподвижные	5–15	15–35	кустарники, травы	поступательно-колебательное
Неподвижные	>15	>35	сплошной дерн	ветропесчаный поток

На графике (рисунок 1) представлена **линейная зависимость** между годовым объёмом пескопереноса (по оси X, в м³/м в год) и рекомендуемой шириной защитной полосы (по оси Y, в метрах), применяемой для защиты земляного полотна железных дорог от песчаных заносов.

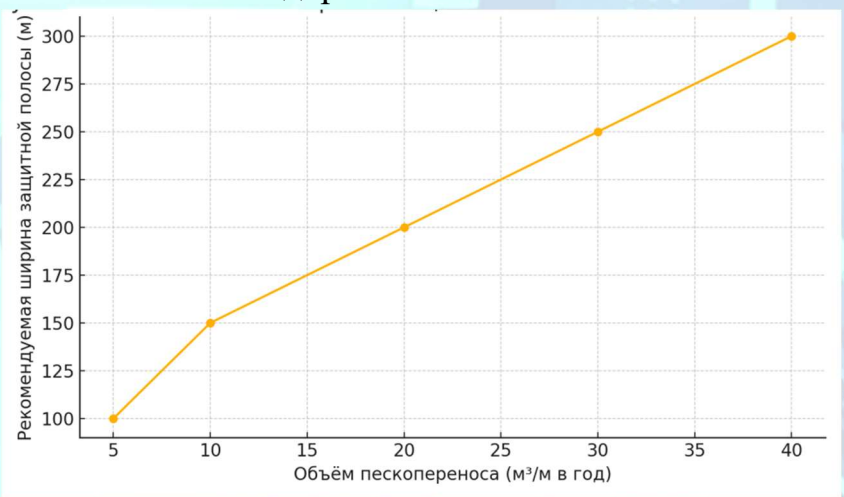


Рисунок 1 – Зависимость ширины защитной полосы от объёма пескопереноса

На графике представлена линейная зависимость между годовым объёмом пескопереноса (м³/м в год) и требуемой шириной защитной полосы (м). Увеличение пескопереноса требует расширения защитной зоны, что обеспечивает рассеивание ветровой энергии и задержание песчаного потока. График используется для обоснования проектных решений при защите земляного полотна в пустынных районах.

ISSN 3030-3907

Таким образом, воздействие ветровой эрозии требует системного и комплексного подхода, основанного на сочетании технических, экологических и мониторинговых решений, адаптированных под локальные климатические и геотехнические условия пустынных территорий [3; 8; 16].

Методика исследования

Исследование проводилось на участке железнодорожной линии Бухара – Мискин, пересекающем три климатические зоны: слабоаридную, среднеаридную и сильноаридную [5; 9]. Методика включала:

1. Климатический анализ:
сбор данных метеонаблюдений и построение розы ветров;
анализ сезонных колебаний скорости и направления ветра.
2. Оценка подвижности песков:
гранулометрический анализ;
определение коэффициента фильтрации, влагосодержания и растительного покрова.
3. Применение дистанционного зондирования и аэросъёмки:
4. Моделирование пескопереноса:
5. Полевые испытания:
6. Сравнительный анализ:
снижение интенсивности пескопереноса;
экономическая эффективность.

3. Результаты

Сравнение различных инженерных и природных методов защиты железнодорожного земляного полотна от песчаных заносов представлена по двум ключевым критериям (таблица 2):

- снижение объёма пескопереноса (%) – степень уменьшения массы песка, поступающего на полотно;
- средняя высота заносов (см) – высота песчаных наносов на откосах или в междупутье, фиксируемая в результате полевых наблюдений.

Таблица 2

Сравнительная эффективность защитных мероприятий

Метод защиты	Снижение объёма пескопереноса (%)	Средняя высота заносов (см)	Комментарии
Без защиты	0	60–80	Активный пескоперенос

ISSN 3030-3907

Геосетки + бермы	50–65	30–40	Эффективно в комбинации с щитами
Фитомелиорация (саксаул, джузгун)	40–55	35–50	Требует времени на формирование
Клеточные барьеры + фитомелиорация	70–80	15–25	Высокая эффективность и устойчивость

На графике (рисунок 2) представлена зависимость между шириной защитной полосы (м) и эффективностью снижения пескопереноса (%). При ширине до 250–300 м достигается наибольший эффект задержания песчаного потока, после чего наблюдается эффект насыщения. График используется для обоснования оптимальной ширины охраняемых зон при проектировании защитных мероприятий вдоль железных дорог в условиях эоловой активности.

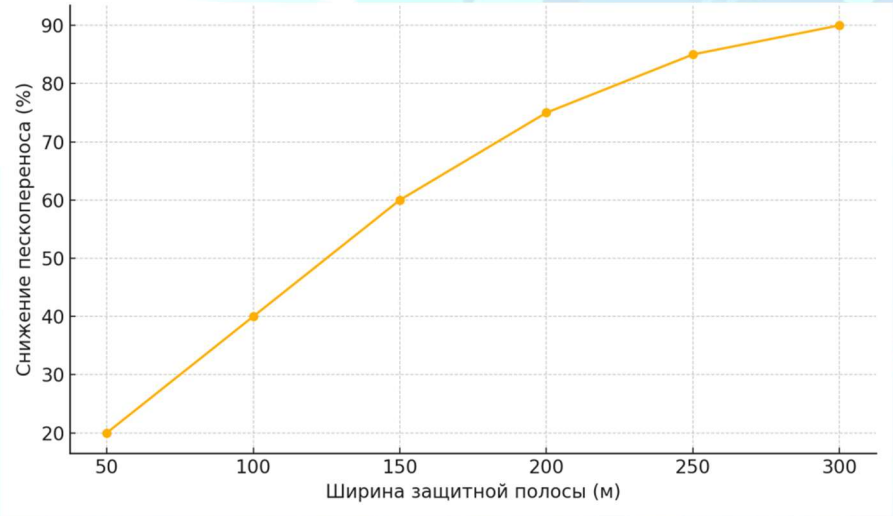


Рисунок 2 – Эффективность защитных мероприятий в зависимости от ширины

Моделирование показало, что защитные полосы шириной 150–250 м наиболее эффективны в снижении потока песка.

4. Обсуждение

Комбинированный подход доказал свою эффективность. Геосинтетики обеспечивают немедленную стабилизацию, в то время как фитомелиорация формирует долговременный защитный барьер [10, 13]. Механические барьеры требуют регулярного обслуживания, но их эффективность значительно выше при совмещении с растительными мерами. Экономическая оценка показала, что инвестиции в комплексную защиту

ISSN 3030-3907

окупаются в течение 3–5 лет [6, 8, 9]. Таким образом, оптимальной является стратегия, включающая поэтапное внедрение инженерных и экологических решений с постоянным мониторингом состояния трассы.

5. Заключение

Проведённое исследование подтвердило эффективность комплексных инженерно-экологических мер защиты железнодорожной инфраструктуры от ветровой эрозии и песчаных заносов. Наиболее надёжные результаты достигнуты при применении геосеток, клеточных конструкций и фитомелиорации. Мониторинг, основанный на данных дистанционного зондирования и моделирования, обеспечивает своевременную корректировку мероприятий. Полученные данные могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих железнодорожных линий в пустынных районах Узбекистана и других регионов с аналогичными условиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаев А.Г. Устойчивость пустынных экосистем и методы борьбы с дефляцией. – Ашхабад: Ылым, 1985. – 186 с.
2. Демьяненко А.Ф. Оптимизация организации земляных и пескоукрепительных работ в аридных регионах // Транспортное строительство. – 1995. – № 8. – С. 35–42.
3. Демьяненко А.Ф., Закиров Р.С., Менг Э.К. Системный подход к пескозакрепительным работам при строительстве дорог в пустынях // Проблемы освоения пустынь. – 1988. – № 6. – С. 74–77.
4. Демьяненко А.Ф., Закиров Р.С., Волгушев В.И. Организация работ при освоении аридных регионов // Транспортное строительство. – 1993. – № 5–6. – С. 7–11.
5. Лесов К.С. Календарное планирование организации строительства железнодорожной линии Бухара–Мискен // Инновационные подходы в современной науке. – 2022. – № 3(12). – С. 12–16.
6. Лесов К.С. Научные основы подготовки производственной базы железнодорожного строительства региона (на примере Средней Азии и Казахстана): дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИИТ, 1993. – 166 с.
7. Лесов К.С., Кенжалиев М.К., Таджибаев Ш.А. Определение устойчивости насыпи земляного полотна железных дорог, возведенного из мелких песков // Международная научно-техническая конференция «Глобальное партнёрство – как фактор развития науки и образования». – 2023.

ISSN 3030-3907

8. Лесов К.С., Мирахмедов М.М., Таджибаев Ш.А. Мировой опыт применения геосинтетических материалов в конструкциях земляного полотна // Архитектура. Строительство. Дизайн. – 2023. – № 1. – С. 194–197.
9. Лесов К.С., Таджибаев Ш.А., Кенжалиев М.К. Противоэрозионная защита земляных сооружений на участке железнодорожной линии Бухара–Мискен // International Conference "Technical and Technological Sciences in the Modern World". – 2023.
10. Лесов К.С., Таджибаев Ш.А., Мавланов А.К., Кенжалиев М.К. Расчет устойчивости насыпи и укрепление откосов земляного полотна с использованием геосинтетических материалов // Транспорт Шелкового пути. – 2021. – С. 78–83.
11. Обручев В.А. Пустыни и их освоение. – М.: Изд-во АН СССР, 1945. – 284 с.
12. Cheng H., He J., Xu X., Zou X., Wu Y. et al. Blown sand motion within the sand-control system in the southern section of the Taklimakan Desert Highway // Journal of Arid Land. – 2015. – Vol. 7, No. 5. – P. 599–611.
13. Gao S., et al. Integrated approaches for sand hazard mitigation along the Heihe–Golmud Railway // Geoscience Frontiers. – 2018. – Vol. 9, No. 5. – P. 1601–1610.
14. International Union of Railways (UIC). Guidelines for Railway Design in Arid Regions. – UIC Publications, 2020.
15. Wang X., Dong Z., Liu L. Aeolian sand movement and the impact on railway infrastructure // Environmental Earth Sciences. – 2006. – Vol. 49, No. 8. – P. 1249–1258.
16. Xu X., et al. Wind dynamics and the effectiveness of gravel barriers in aeolian environments // Aeolian Research. – 2023. – Vol. 64. – Article 100294.
17. Zhang K., Qu J., Liao K. Damage by wind-blown sand and its control measures along the Taklimakan Desert Highway // Journal of Arid Land. – 2020. – Vol. 12, No. 1. – P. 1–10.

ISSN 3030-3907