

PROTECTIVE FOREST PLANTATIONS AS A FACTOR IN ENHANCING THE STABILITY OF RAILWAY ECO-TECHNICAL SYSTEMS IN AREAS WITH SHIFTING SANDS

A.Sh. O'ralov^{1a}

D.K. Kenjalieva^{1b}

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan,

E-mail: akmaloralov211@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.22143334>

Abstract: The article examines protective forest plantations as a factor contributing to the stability of railway ecotechnical systems under conditions of mobile sands. It is established that, in arid regions, the stability of railway infrastructure is largely determined by the intensity of deflation processes, the level of sand transport, and the degree of protection of the railway right-of-way. The study considers the role of protective forest plantations in reducing wind speed, decreasing deflation load, stabilizing sandy surfaces, and improving the operational stability of railway tracks. It is shown that the combined use of protective forest belts and engineering measures reduces sand accumulation on railway tracks and improves the reliability of railway operation under adverse natural and climatic conditions. The article concludes that protective forest plantations are an important factor in enhancing the stability of railway ecotechnical systems in areas affected by mobile sands.

Key words: Protective forest plantations, Railways; Ecotechnical systems, Railway infrastructure stability, Mobile sands, Deflation, Sand transport, Railway right-of-way, Arid conditions, Engineering and biological protection.

ЗАЩИТНЫЕ ЛЕСНЫЕ НАСАЖДЕНИЯ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭКОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В УСЛОВИЯХ ПОДВИЖНЫХ ПЕСКОВ

А.Ш. Уралов

Д.К. Кенжалиева

Ташкентский государственный транспортный университет,

Ташкент, Узбекистан

E-mail: akmaloralov211@gmail.com

Аннотация: Статья посвящена исследованию защитных лесных насаждений как фактора повышения устойчивости экотехнических систем железных дорог в условиях подвижных песков. Установлено, что в аридных районах устойчивость железнодорожной инфраструктуры в значительной степени определяется интенсивностью дефляционных процессов, уровнем пескопереноса и степенью защищённости полосы отвода. Рассмотрено влияние защитных лесных насаждений на снижение скорости ветра, уменьшение дефляционной нагрузки, закрепление песчаной поверхности и повышение эксплуатационной устойчивости железнодорожного пути. Показано, что использование защитных лесных полос в сочетании с инженерными

^a<https://orcid.org/0000-0002-9434-0713>

^b<https://orcid.org/0000-0003-4622-5937>

мероприятиями способствует снижению заносимости пути и повышению надёжности функционирования железных дорог в неблагоприятных природно-климатических условиях. Сделан вывод о том, что защитные лесные насаждения являются значимым фактором повышения устойчивости экотехнических систем железных дорог в зонах распространения подвижных песков.

Ключевые слова: Защитные лесные насаждения, Железные дороги, Экотехнические системы, Устойчивость железнодорожной инфраструктуры, Подвижные пески, Дефляция, Пескоперенос, Полоса отвода, Аридные условия, Инженерно-биологическая защита.

1. Введение/ Introduction

В аридных и полуаридных районах подвижные пески являются одним из основных природных факторов, снижающих устойчивость железнодорожной инфраструктуры. Ветровая эрозия, дефляция и пескоперенос вызывают заносимость пути, ухудшение состояния земляного полотна, нарушение работы объектов полосы отвода и увеличение эксплуатационных затрат. Особенно актуальна данная проблема для железнодорожных линий, проходящих через пустынные территории, включая районы Кызылкума и направление Бухара–Мискин–Ургенч–Хива.

Мировые научные исследования показывают, что интенсивность пескопереноса определяется скоростью ветра, гранулометрическим составом песка, влажностью, шероховатостью поверхности и состоянием растительного покрова [11–13]. Современные исследования по Центральной Азии и региону Аральского моря подтверждают усиление пыле- и пескопереноса в условиях аридизации климата, деградации природных ландшафтов и активизации дефляционных процессов [14, 15].

В мировой практике защита транспортной инфраструктуры от подвижных песков основывается на сочетании инженерных, биологических и организационно-технологических мероприятий. К ним относятся устройство механических барьеров, укрепление песчаной поверхности, применение геосинтетических материалов, фитомелиорация и создание защитных лесных насаждений. Комплексное применение указанных решений позволяет снижать скорость ветра, уменьшать дефляционную нагрузку и ограничивать поступление песка на железнодорожный путь [11–15].

Вопросы защиты железных дорог от песчаных заносов получили развитие в работах по эксплуатации железных дорог в песчаных пустынях, методам закрепления подвижных песков, организационно-технологическим решениям пескозакрепительных работ, эколого-технической защите природно-технических систем, а также опасным природным процессам в районах прохождения железных дорог Узбекистана [1–6, 10]. Современные исследования также посвящены укреплению земляного полотна из песчаных грунтов, климатическому районированию линии Бухара–Мискин и инженерно-экологическим подходам к защите железнодорожной инфраструктуры от ветровой эрозии [7–9].

Анализ опубликованных работ показывает, что защита железных дорог в условиях подвижных песков требует комплексного подхода. Ранее были рассмотрены методы закрепления песков, расчётные основы мелиорации полосы отвода и параметры защитных лесных насаждений. Вместе с тем недостаточно полно раскрыт вопрос о защитных лесных насаждениях как факторе повышения устойчивости всей

экотехнической системы железной дороги, включающей земляное полотно, полосу отвода, песчаный массив, ветровой поток и растительный покров.

Актуальность исследования определяется необходимостью повышения устойчивости железнодорожной инфраструктуры в зонах распространения подвижных песков на основе системного использования защитных лесных насаждений. Такие насаждения снижают скорость ветра, уменьшают дефляционную нагрузку, способствуют осаждению переносимых песчаных частиц и закреплению песчаной поверхности. В сочетании с инженерными мероприятиями они формируют долговременную систему защиты железнодорожного пути от песчаных заносов.

Предметом исследования являются защитные лесные насаждения вдоль железных дорог и их влияние на устойчивость экотехнических систем железнодорожной инфраструктуры в условиях подвижных песков.

Цель исследования – обосновать роль защитных лесных насаждений как фактора повышения устойчивости экотехнических систем железных дорог в условиях подвижных песков.

Задачи исследования: рассмотреть железнодорожную инфраструктуру в условиях подвижных песков как экотехническую систему; обобщить научные подходы к защите железных дорог от дефляции и пескопереноса; определить факторы устойчивости железнодорожной экотехнической системы; раскрыть защитные функции лесных насаждений и обосновать необходимость их сочетания с инженерными мероприятиями.

2. Методы исследования / Research Methods

Исследование выполнено на основе системного расчётно-аналитического подхода, при котором железнодорожная инфраструктура в условиях подвижных песков рассматривается как экотехническая система, объединяющая земляное полотно, полосу отвода, песчаный массив, ветровой поток и защитные лесные насаждения. В отличие от подхода, ориентированного преимущественно на расчёт конструктивных параметров лесных полос, в настоящей работе основное внимание уделено оценке их влияния на устойчивость системы «железная дорога – природная среда – защитные насаждения».

Объектом исследования являются участки железнодорожной инфраструктуры, расположенные в аридных условиях пустыни Кызылкум, включая направление Бухара–Мискин–Ургенч–Хива. Для таких территорий характерны высокая повторяемость ветров, низкая влажность песчаных грунтов, слабое развитие естественного растительного покрова и наличие слабозакреплённых песчаных массивов. Совокупность этих факторов создаёт условия для развития дефляции, сальтационного переноса песка и формирования заносов в пределах полосы отвода.

Исходными материалами исследования послужили данные о природно-климатических условиях рассматриваемого района, сведения о ветровом режиме и пороговых скоростях начала движения песчаных частиц, расчётные зависимости механики эолового переноса, материалы по мелиорации подвижных песков в полосе отвода железных дорог, а также результаты ранее опубликованных исследований по защите железных дорог от песчаных заносов и укреплению земляного полотна в песчаных грунтах [1–10]. Теоретическая база расчётов опиралась на классические и современные положения физики ветровой эрозии и эолового транспорта песка [11–13],

а также на исследования пыле- и пескопереноса в Центральной Азии и регионе Аральского моря [14, 15].

Методика исследования включала четыре последовательных этапа.

На первом этапе выполнялась оценка природно-климатических и инженерно-географических условий района. Учитывались повторяемость ветров, характер песчаного рельефа, состояние растительного покрова, степень подвижности песчаной поверхности и расположение уязвимых участков относительно оси железнодорожного пути. Такой анализ позволил определить участки, где дефляционные процессы способны оказывать наибольшее влияние на устойчивость полосы отвода и земляного полотна.

На втором этапе проводилась расчётная оценка потенциальной дефляционной нагрузки. Для перехода от наблюдаемой скорости ветра к параметрам ветрового потока использовалась зависимость логарифмического профиля скорости:

$$u_* = \frac{kU_z}{\ln(z/z_0)}$$

где u_* – динамическая скорость трения ветрового потока, м/с;

k – постоянная Кармана ($\approx 0,4$);

U_z – скорость ветра на высоте z , м/с;

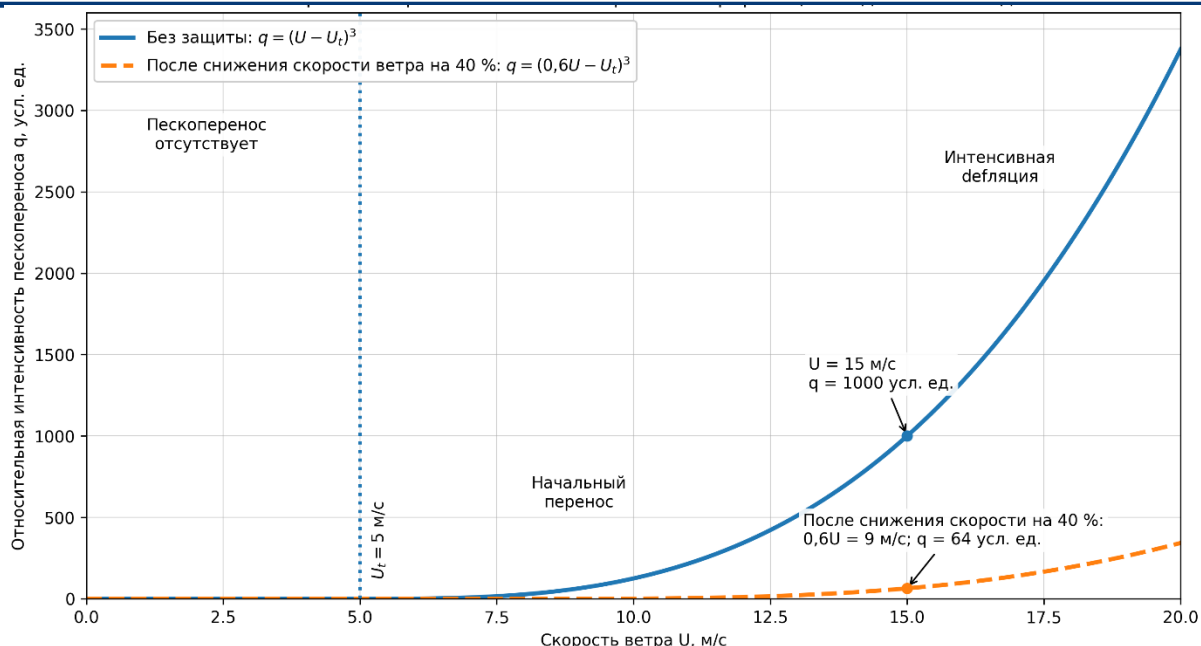
z_0 – параметр шероховатости поверхности. Для открытых песчаных поверхностей значение z_0 принималось в пределах 0,001–0,005 м, что соответствует условиям слабозакреплённых песков.

Интенсивность пескопереноса рассматривалась как функция превышения фактической скорости ветра над пороговой скоростью начала движения частиц. В инженерной форме эта зависимость была представлена выражением:

$$q = (U - U_t)^3$$

где q – интенсивность пескопереноса; U – фактическая скорость ветра; U_t – пороговая скорость начала движения песчаных частиц. Данная зависимость отражает нелинейный характер дефляционного процесса: даже относительно небольшое снижение скорости ветра приводит к существенному уменьшению объёма переносимого песка [11, 12]. Графическая интерпретация этой зависимости приведена на рисунке 1.

Рис.1. Зависимость относительной интенсивности пескопереноса от скорости ветра согласно инженерной интерпретации модели Бэгнольда.



На рисунке 1 показано, что при скорости ветра ниже порогового значения $U_t = 5$ м/с пескоперенос практически отсутствует. После превышения пороговой скорости относительная интенсивность пескопереноса возрастает нелинейно по зависимости $q = (U - U_t)^3$. Пунктирная кривая отражает расчётное снижение интенсивности пескопереноса при уменьшении скорости ветра на 40 % под влиянием защитных лесных насаждений.

На третьем этапе оценивалось влияние защитных лесных насаждений на изменение ветрового режима и дефляционной нагрузки. В качестве основного критерия эффективности использовалось относительное снижение пескопереноса после уменьшения скорости ветра в приземном слое:

$$E_q = \left(1 - \frac{q_1}{q_0}\right) * 100\%$$

где E_q – эффективность снижения пескопереноса, %;

q_0 – интенсивность пескопереноса до устройства защитных насаждений;

q_1 – интенсивность пескопереноса после формирования защитного воздействия.

Такой критерий позволяет оценить не только аэродинамический эффект лесных насаждений, но и их вклад в снижение эксплуатационной заносимости пути.

На четвёртом этапе выполнялась системная интерпретация полученных данных. Защитные лесные насаждения рассматривались как элемент инженерно-биологической защиты, обеспечивающий три взаимосвязанных эффекта: аэродинамический – снижение скорости ветра; дефляционный – уменьшение интенсивности пескопереноса; экотехнический – повышение устойчивости полосы отвода и железнодорожного пути. Такой подход позволяет перейти от оценки отдельных параметров защитных полос к определению их роли в устойчивости железнодорожной экотехнической системы.

В качестве расчётных ориентиров были приняты: потенциальный объём пескопереноса на неблагоприятных участках 55–60 м³/км·год; допустимый эксплуатационный уровень заносимости около 20 м³/км·год; требуемое снижение скорости ветра в защищённой зоне 30–60 %; средняя высота защитных насаждений 4–5 м. Эти показатели использовались не как самостоятельная цель расчёта параметров

насаждений, а как исходные критерии оценки их влияния на устойчивость железнодорожной инфраструктуры.

3. Результаты и обсуждение /Results and discussion

Проведённое исследование показало, что в условиях подвижных песков устойчивость железнодорожной инфраструктуры определяется не только состоянием земляного полотна, но и интенсивностью взаимодействия железнодорожного объекта с окружающей песчаной средой. Наиболее значимыми факторами риска являются скорость ветра, степень закреплённости песчаной поверхности, направление господствующих ветров, близость источников пескопереноса к железнодорожному пути и состояние растительного покрова в полосе отвода.

Расчётная оценка показала, что при скоростях ветра ниже 4–6 м/с перенос песчаных частиц практически не проявляется. После превышения пороговой скорости начинается сальтационное движение песка, а при скоростях 10–15 м/с формируется режим интенсивной дефляции. Это подтверждает положения классической теории эолового транспорта песка, согласно которой интенсивность переноса резко возрастает при превышении пороговых скоростей [11, 12].

Для неблагоприятных участков железнодорожного направления Бухара–Мискин потенциальный объём пескопереноса при отсутствии защитных мероприятий оценивается на уровне 55–60 м³/км·год. При допустимом эксплуатационном уровне около 20 м³/км·год это означает превышение приемлемой заносимости примерно в 2,5–3 раза. Следовательно, без защитных мероприятий такие участки относятся к зоне высокой дефляционной опасности и требуют применения инженерно-биологической защиты.

Расчёты показали, что снижение скорости ветра на 40 % уменьшает скорость потока до 60 % от исходного значения. Как видно из рисунка 1, снижение скорости ветра существенно уменьшает относительную интенсивность пескопереноса. Например, при $U=15$ м/с расчётное значение q составляет 1000 усл. ед., а после снижения скорости ветра на 40 % – 64 усл. ед., что подтверждает высокую чувствительность дефляционного процесса к изменению скорости ветра. С учётом кубической зависимости интенсивности пескопереноса от скорости ветра относительный объём переноса составляет:

$$(0.6)^3 = 0,216$$

Следовательно, объём пескопереноса уменьшается примерно на 75–80 %. При исходной дефляционной нагрузке 55–60 м³/км·год расчётный объём заносов после формирования защитного эффекта составляет около 13–15 м³/км·год. Это ниже допустимого эксплуатационного уровня и свидетельствует о возможности перевода участка из состояния высокой заносимости в эксплуатационно устойчивое состояние. Расчётная оценка изменения дефляционной нагрузки под влиянием защитных лесных насаждений приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка влияния защитных лесных насаждений на дефляционную нагрузку железнодорожного пути

Показатель	Без защитных мероприятий	После снижения скорости ветра на 40 %
------------	--------------------------	---------------------------------------

Потенциальный пескоперенос, м ³ /км·год	55–60	13–15
Относительный объём пескопереноса	1,00	0,216
Снижение пескопереноса, %	–	75–80
Допустимый эксплуатационный уровень, м ³ /км·год	20	20
Оценка состояния участка	высокая дефляционная опасность	эксплуатационно допустимое состояние

Полученные значения показывают, что защитные лесные насаждения оказывают на железнодорожную инфраструктуру не только пескозадерживающее, но и системное стабилизирующее воздействие. Их основной эффект связан с изменением энергетического состояния приземного воздушного потока. В результате снижается способность ветра вовлекать песчаные частицы в движение, уменьшается объём сальтационного переноса и ограничивается поступление песка на путь.

Анализ пространственного действия защитных насаждений показал, что при высоте 4–5 м формируется зона устойчивого аэродинамического влияния порядка 60–100 м. Эта зона имеет важное значение не только для размещения лесных полос, но и для общей организации защитного пространства в полосе отвода. В пределах такой зоны могут последовательно размещаться ветроослабляющие, пескозадерживающие и почвоукрепительные элементы, формирующие комплексную систему защиты.

Систематизация результатов позволила выделить три уровня влияния защитных лесных насаждений на устойчивость железнодорожной экотехнической системы: аэродинамический, дефляционный и экотехнический. Их содержание и результат для железнодорожной инфраструктуры представлены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, защитное действие лесных насаждений проявляется не только в снижении скорости ветра, но и в уменьшении заносимости пути, закреплении песчаной поверхности и повышении долговременной устойчивости железнодорожной экотехнической системы.

Таблица 2 – Уровни защитного воздействия лесных насаждений на железнодорожную экотехническую систему

Уровень воздействия	Механизм влияния	Результат для железнодорожной инфраструктуры
Аэродинамический	Снижение скорости ветра и ослабление турбулентности	Уменьшение энергии ветропесчаного потока
Дефляционный	Сокращение интенсивности сальтации и осадение песчаных частиц	Снижение заносимости пути и полосы отвода

Экотехнический	Закрепление поверхности корневой системой и восстановление растительного покрова	Повышение долговременной устойчивости системы «путь – полоса отвода – песчаный массив»
----------------	---	---

Полученные результаты согласуются с ранее опубликованными исследованиями, в которых обоснована необходимость специальных мероприятий по защите железных дорог в песчаных пустынях [1, 2], раскрыты организационно-технологические основы пескозакрепительных работ и эколого-технической защиты природно-технических объектов [3–5], а также показана значимость учёта опасных природных процессов, ветровой эрозии, климатических условий и инженерного укрепления земляного полотна в песчаных грунтах [6–9]. В отличие от указанных исследований, в настоящей работе защитные лесные насаждения рассматриваются прежде всего, как фактор устойчивости всей железнодорожной экотехнической системы.

Классические и современные исследования эолового транспорта объясняют резкое увеличение пескопереноса при росте скорости ветра, а также подчёркивают значение пороговой скорости, динамической скорости трения и состояния поверхности [11–13]. Публикации по региону Аральского моря показывают усиление пыле- и пескопереноса в Центральной Азии под влиянием аридизации и деградации ландшафтов [14, 15]. На этом фоне полученные расчётные данные подтверждают необходимость применения защитных лесных насаждений как долговременного элемента устойчивости железных дорог в аридных районах.

Таким образом, результаты исследования показывают, что снижение скорости ветра на 30–40 % способно уменьшить объём пескопереноса примерно на 75–80 %, а формирование защитной зоны шириной 60–100 м обеспечивает условия для снижения дефляционной нагрузки до эксплуатационно допустимого уровня. Это подтверждает значимость защитных лесных насаждений как фактора повышения устойчивости экотехнических систем железных дорог.

Полученные результаты позволяют уточнить роль защитных лесных насаждений в системе защиты железных дорог от подвижных песков. Их значение не ограничивается механическим задержанием песчаных частиц. Более существенным является то, что насаждения изменяют аэродинамические условия в полосе отвода, снижают энергию ветропесчаного потока и создают предпосылки для долговременного закрепления песчаной поверхности. Поэтому защитные лесные насаждения следует рассматривать как элемент управления устойчивостью железнодорожной экотехнической системы.

Особое значение имеет нелинейный характер связи между скоростью ветра и интенсивностью пескопереноса. Расчёты показывают, что снижение скорости ветра на 40 % приводит к уменьшению объёма пескопереноса примерно на 75–80 %. Это подтверждает, что даже частичное ослабление ветрового потока может существенно снизить дефляционную нагрузку на железнодорожный путь. Данный результат согласуется с теоретическими положениями механики эолового переноса песка [11, 12] и объясняет высокую эффективность лесомелиоративных мероприятий в аридных районах.

Важным отличием настоящего исследования является перенос акцента с расчёта отдельных параметров защитных лесных полос на оценку их системного эффекта. Если

параметры высоты, ширины, просветности и размещения насаждений характеризуют конструктивную сторону защиты, то их влияние на устойчивость экотехнической системы проявляется через снижение заносимости пути, стабилизацию песчаной поверхности и повышение надёжности функционирования железнодорожной инфраструктуры. Такой подход позволяет рассматривать защитные насаждения как часть единой природно-технической системы, а не как изолированный элемент озеленения или пескозащиты.

Сопоставление с региональными исследованиями показывает, что полученные результаты развивают ранее обоснованные подходы к защите железных дорог от песчаных заносов в пустынных условиях [1, 2], к организации пескозакрепительных работ и эколого-технической защите природно-технических объектов [3–5], а также к учёту опасных природных процессов, ветровой эрозии, климатического районирования и укрепления земляного полотна в песчаных грунтах [6–9]. Настоящее исследование дополняет эти работы тем, что связывает защитный эффект лесных насаждений с устойчивостью всей экотехнической системы железной дороги.

Сравнение с мировыми исследованиями также подтверждает обоснованность полученных выводов. В работах по физике ветровой эрозии подчёркивается, что интенсивность эолового переноса зависит от пороговых условий начала движения частиц, шероховатости поверхности и растительного покрова [11–13]. Современные исследования по региону Аральского моря показывают, что в Центральной Азии сохраняется высокая актуальность проблемы пыле- и пескопереноса в связи с аридизацией климата и деградацией природных ландшафтов [14, 15]. Это усиливает необходимость применения долговременных инженерно-биологических решений, способных стабилизировать песчаные территории вдоль транспортной инфраструктуры.

Практическая значимость результатов заключается в возможности их использования при оценке дефляционной опасности и выборе состава защитных мероприятий для железных дорог, проходящих через подвижные пески. Расчётные ориентиры – допустимый уровень пескопереноса около $20 \text{ м}^3/\text{км}\cdot\text{год}$, снижение скорости ветра на 30–60 %, формирование защитной зоны 60–100 м – могут применяться как предварительная основа для проектирования. При этом окончательные решения должны уточняться с учётом местного ветрового режима, морфологии песчаного рельефа, состояния растительного покрова, водообеспеченности и эксплуатационных требований к полосе отвода.

Следует учитывать, что полученные результаты имеют расчётно-аналитический характер. Фактическая эффективность защитных лесных насаждений зависит от их приживаемости, возраста, породного состава, плотности, просветности, сезонной изменчивости ветрового режима и степени антропогенного нарушения песчаной поверхности. Поэтому дальнейшие исследования целесообразно направить на натурные измерения скорости ветра и интенсивности пескопереноса до и после формирования защитных насаждений, а также на уточнение критериев устойчивости для участков различной степени дефляционной опасности.

Таким образом, результаты исследования показывают, что защитные лесные насаждения выполняют не только пескозадерживающую, но и системообразующую

функцию в полосе отвода железных дорог. Их применение позволяет перейти от локального устранения последствий пескопереноса к управлению дефляционными процессами и повышению устойчивости железнодорожной экотехнической системы.

4. Заключение / Conclusions

Выполненное исследование подтвердило, что защитные лесные насаждения в условиях подвижных песков следует рассматривать как элемент устойчивости железнодорожной экотехнической системы, а не только как средство задержания песка. Их роль заключается в изменении аэродинамического режима полосы отвода, снижении дефляционной нагрузки и создании условий для закрепления песчаной поверхности.

Установлено, что без защитных мероприятий потенциальный объём пескопереноса на неблагоприятных участках может достигать 55–60 м³/км·год, что превышает допустимый эксплуатационный уровень около 20 м³/км·год. При снижении скорости ветра на 40 % расчётный объём пескопереноса уменьшается примерно на 75–80 % и составляет около 13–15 м³/км·год. Это свидетельствует о возможности перевода участков высокой заносимости в эксплуатационно допустимое состояние.

Показано, что защитный эффект лесных насаждений проявляется на трёх уровнях: аэродинамическом, дефляционном и экотехническом. Аэродинамический эффект связан со снижением скорости ветра, дефляционный – с уменьшением сальтационного переноса и заносимости пути, экотехнический – с повышением долговременной устойчивости системы «железнодорожный путь – полоса отвода – песчаный массив».

Научная значимость работы состоит в рассмотрении защитных лесных насаждений как фактора системной устойчивости железнодорожной инфраструктуры в аридных условиях. Практическая значимость заключается в возможности использования расчётных ориентиров при выборе состава инженерно-биологических мероприятий.

Таким образом, применение защитных лесных насаждений в сочетании с инженерными решениями обеспечивает переход от локальной защиты пути от песчаных заносов к системному регулированию дефляционных процессов в полосе отвода железных дорог.

Adabiyotlar, References, Литературы:

1. Закиров, Р. С. Железные дороги в песчаных пустынях. Проектирование, сооружение земляного полотна и эксплуатация пути / Р. С. Закиров. – Москва: Транспорт, 1980. – 221 с.
2. Закиров, Р. С. Теория и практика защиты железных дорог от песчаных заносов / Р. С. Закиров. – Ташкент: Фан, 1987. – 128 с.
3. Мирахмедов, М. М. Основы методологии организации пескозакрепительных работ и защита природно-технических объектов от песчаных заносов / М. М. Мирахмедов. – Ташкент: Фан ва технологиялар, 2008. – 248 с.
4. Мирахмедов, М. М. Ресурсосберегающие организационно-технологические решения борьбы с проявлениями экзогенных процессов на железных дорогах / М. М. Мирахмедов. – Ташкент: Ta’lim, 2016. – 424 с.

5. Мирахмедов, М. М. Методические аспекты проблемы эколого-технической защиты природно-технических систем / М. М. Мирахмедов // Вестник ТашИИТ. – 2006. – № 1. – С. 21–29.
6. Лесов, К. С. Опасные природные процессы в районах прохождения железных дорог Узбекистана / К. С. Лесов, В. Е. Мольдерф // Строительство и эксплуатация транспортных сооружений в районах развития опасных геологических процессов: труды научно-технической конференции. – Москва, 2003.
7. Лесов, К. С. Технология укрепления откосов земляного полотна железных дорог из песчаных грунтов с применением геосинтетических материалов / К. С. Лесов, Ш. А. Таджибаев, М. К. Кенжалиев // Проблемы архитектуры и строительства. – 2019. – № 4. – С. 15–18.
8. Лесов, К. С. Конструктивно-технологические решения на основе климатического районирования железнодорожной линии Бухара–Мискин / К. С. Лесов, А. Ш. Уралов, М. Т. Яхяева // Journal of Transport. – 2025. – Т. 2, № 2. – С. 159–163. – DOI: 10.56143/2181-2438-2025-2-159-163.
9. Лесов, К. С. Инженерные и экологические подходы к защите железнодорожной инфраструктуры от ветровой эрозии в пустынных районах / К. С. Лесов, А. Ш. Уралов, М. Т. Яхяева // Development of Science. – 2025. – С. 366–373.
10. Поляков, В. П. Опыт борьбы с песчаными заносами на Среднеазиатской железной дороге / В. П. Поляков, Д. И. Песвианидзе, В. Ф. Горбачева. – Ташкент: УЗИНТИ, 1966. – 72 с.
11. Bagnold, R. A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes / R. A. Bagnold. – London: Methuen, 1941. – 265 p.
12. Shao, Y. Physics and Modelling of Wind Erosion / Y. Shao. – Dordrecht: Springer, 2008. – 452 p.
13. Goudie, A. S. Desert Dust in the Global System / A. S. Goudie, N. J. Middleton. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2006.
14. Banks, J. R. Impacts of the Desiccation of the Aral Sea on the Central Asian Dust Life-Cycle / J. R. Banks, B. Heinold, K. Schepanski // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2022. – Vol. 127. – e2022JD036618. – DOI: 10.1029/2022JD036618.
15. Chen, Z. Dust emission and transport in the Aral Sea region / Z. Chen, X. Gao, J. Lei // Geoderma. – 2022. – Vol. 428. – Article 116177. – DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116177.