

На правах рукописи

Кумов Всеволод Васильевич



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ
ТОННЕЛЕЙ ЩИТОВЫМИ ПРОХОДЧЕСКИМИ
КОМПЛЕКСАМИ В СЛОИСТЫХ МАССИВАХ**

*Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных
пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Протосеня Анатолий Григорьевич

Официальные оппоненты:

Сарычев Владимир Иванович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», кафедра механики материалов и геотехнологий, профессор;

Трофимов Андрей Викторович

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», департамент по исследованиям и разработкам, заместитель директора.

Ведущая организация – Акционерное общество «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **21 сентября 2026 г. в 11:15** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 21 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном мире города расширяются все стремительнее, развитие подземной инфраструктуры, в свою очередь, не остается в стороне. При этом проблемы, связанные со строительством подземных сооружений, становятся всё актуальнее. Одна из основных задач при строительстве подземных сооружений в условиях плотной городской застройки – уменьшение величины оседаний земной поверхности. Добиться результата возможно благодаря снижению влияния строительства на окружающий его грунтовый массив, на что влияет множество факторов: физико–механические свойства грунтов, гидрогеологические условия и структура грунтового массива, а также технологические параметры строительных работ.

Применяемые на сегодняшний день технологические решения в области использования проходческих механизированных щитов с пригрузом забоя для строительства тоннелей имеют достаточную степень механизации и автоматизации для обеспечения безопасности и эффективности строительства. Однако факторы, влияющие на необходимые технологические параметры проходческих щитов с пригрузом забоя, до сих пор недостаточно изучены.

Научная задача обусловлена возможностью создания метода прогноза устойчивости слоистого массива грунта с целью исключения аварийных случаев и снижения влияния строительных работ на окружающий их массив при строительстве перегонных тоннелей метрополитена механизированными щитовыми проходческими комплексами. По этой причине её решение весьма актуально для повышения эффективности и безопасности строительства подземных сооружений в слоистых грунтовых массивах.

Степень разработанности темы исследования. На сегодняшний день существует множество исследований прогноза формы и размеров зоны сдвижения грунтового массива, однако они имеют серьезные недостатки по части упрощенного учета конфигурации каждой инженерно–геологической разности в призабойной зоне грунтового массива.

Вопросам исследования прогноза формы и размеров зоны сдвижения грунтового массива и влиянию строительных работ на

окружающий их грунтовый массив посвятил свои исследования ряд отечественных и зарубежных авторов: Карасев М.А., Волохов Е., Мартиросянц Е., Wang S., Li P., Zhang C., Zhang F, Hu X., Wang J., Zou J., Huang M., Lu X., Pan Q., Mollon G., Guilhem M., Daniel D., Abdul-Hamid S., Shahmoradi J.

Проработкой смежных научных задач занимались такие зарубежные авторы как Li Z.W., Yin X., Lee H., Zhao C., Zhao D., Meng F., Xu Q., Berthoz N, Dang T., Yu H., Wang H., Wu Y., Avunduk E., Zhou X., Liu X., Zhang P., Wang J., Wang L., Zhang X., Meng J., Lei Q., Bal A., Dang T., Meschke G., Shen F., Song Y., Zhao W., Wang J., Zheng J., Shao Z., Hemeda S., Zuo Q., Li X., Li P., Deng M., Adoko A. и другие.

Есть также отечественные исследователи, внесшие значительный вклад в развитие смежных вопросов выбранного научного направления: Протосеня А.Г., Дашко Р.Е., Губин В.Н. и другие. Вместе с тем осталось неизученным влияние структуры слоистого грунтового массива на устойчивость грунтов при строительстве тоннелей щитовыми проходческими комплексами.

Объект исследований – слоистый грунтовый массив, находящийся в зоне влияния перегонного тоннеля метрополитена, строящегося щитовым проходческим комплексом с активным пригрузом забоя.

Предмет исследований – процессы изменения деформированного состояния массива в зоне влияния перегонного тоннеля метрополитена, строящегося щитовым проходческим комплексом с активным пригрузом забоя.

Цель работы – повышение устойчивости забоя тоннеля с изменяющейся структурой слоистого грунтового массива при его сооружении механизированным комплексом с активным пригрузом забоя.

Идея работы – снижение риска потери устойчивости забоя тоннеля при его проходке механизированным комплексом с активным пригрузом забоя достигается путем учета слоистости грунтового массива с дифференцированными прочностными и деформационными параметрами по слоям.

Задачи исследования:

1. Анализ методов и условий строительства двухпутных тоннелей метрополитена и методов прогноза влияния строительства тоннелей на окружающий грунтовый массив.

2. Разработка методики численного конечно-элементного моделирования строительства тоннеля с применением ТПМК с активным пригрузом забоя и методики определения зависимости осадок земной поверхности и размера зоны предельного состояния от изменяющейся структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля при неизменных технологических параметрах ТПМК с активным пригрузом забоя.

3. Численное конечно-элементное моделирование строительства перегонного тоннеля метро с применением ТПМК с активным пригрузом забоя в слоистом грунтовом массиве.

4. Определение влияния структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля на форму и размер мульды сдвижения земной поверхности при строительстве тоннеля ТПМК с активным пригрузом забоя на основе результатов численного моделирования.

5. Разработка практических рекомендаций по определению влияния структуры слоистого массива в забое тоннеля на устойчивость массива и необходимое для его поддержания давление пригруза проходческого щита.

Научная новизна работы:

1. Установлена зависимость площади сечения зоны предельного состояния слоистого грунтового массива от структуры массива в забое тоннеля при воздействии на него щитовыми проходческими комплексами с активным пригрузом забоя.

2. Установлена зависимость значения давления пригруза для поддержания устойчивости тоннеля от площади сечения зоны предельного состояния слоистого грунтового массива.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пунктам:

1. Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород и грунтов в естественных условиях и его изменение во

времени, в том числе в связи с проведением горных выработок, строительством сооружений, газовых и нефтяных скважин, эксплуатацией месторождений.

5. Теоретические основы, математические модели и способы управления состоянием и поведением массивов горных пород и грунтов с целью обеспечения устойчивости горных выработок, подземных и наземных сооружений, предотвращения проявлений опасных горно–геологических явлений.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан метод определения влияния структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля на форму и размер мульды сдвижения земной поверхности при строительстве тоннеля ТПМК с активным пригрузом забоя.

2. Исследовано влияние структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля, строящегося ТПМК с активным пригрузом забоя, на устойчивость тоннеля.

3. Определена зависимость давления пригруза, необходимого для поддержания устойчивости забоя тоннеля, от изменяющейся структуры слоистого грунтового массива.

4. Разработана методика построения численных конечно–элементных моделей строительства перегонного тоннеля с применением ТПМК с активным пригрузом забоя в слоистом грунтовом массиве.

5. Разработано устройство для непрерывного контроля изменения геологической структуры грунтового массива впереди забоя тоннеля для реализации разработанного метода при строительстве тоннелей с применением ТПМК с активным пригрузом забоя.

6. Результаты диссертационной работы использованы при ведении проектной и экспертной работы в деятельности ООО «СПБ-Гипрошахт» (акт о внедрении от 18.04.2025).

Методология и методы исследования. Достижение экспериментальных результатов достигалось благодаря численному конечно–элементному моделированию при комплексном влиянии на отслеживаемые критерии множества параметров, обработка результатов проводилась с применением статистических методов, индуктивного и математических методов анализа результатов моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование установленных нелинейных зависимостей значений критериев ширины, площади поперечного сечения мульды сдвижения земной поверхности, наибольшего значения оседания земной поверхности и площади сечения зоны предельного состояния массива на участке установившихся деформаций от структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля позволяет надёжно описать влияние параметров на устойчивость слоистого грунтового массива.

2. В качестве основного критерия для описания устойчивости слоистого грунтового массива при строительстве тоннелей механизированными комплексами с пригрузом забоя следует принимать площадь сечения зоны предельного состояния слоистого грунтового массива на участке установившихся деформаций.

3. Определение давления пригруза на забое с учетом установленной зависимости площади сечения зоны предельного состояния слоистого грунтового массива на участке установившихся деформаций от значения давления позволяет уменьшить деформации грунтов при строительстве тоннелей механизированными комплексами.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается корректно поставленными целью и задачами исследования, проведением экспериментальных исследований, сочетающих комплексное влияние множества параметров, а также анализом результатов моделирования с использованием признанных методов.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях, в том числе 4 международных. За последние 3 года принято участие в 3 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе 3 международных: ХСIII Международная научно-практическая конференция «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований» (25 ноября 2025 г., г. Новосибирск); ХСИ Международная научно-практическая конференция «Научный форум: технические и физико-математические науки» (04 декабря 2025 г., г. Москва); ХСIV Международная научно-практическая конференция «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований» (13 декабря 2025 г., г. Новосибирск).

Личный вклад автора. Автором были поставлены цель и задачи исследования, проанализирован широкий перечень отечественных и зарубежных научных трудов по тематике исследования. Также автором разработана методика численного конечно-элементного моделирования строительства тоннеля с применением ТПМК с активным пригрузом забоя и методика определения зависимости осадок земной поверхности и размера зоны предельного состояния от изменяющейся структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля при неизменных технологических параметрах ТПМК с активным пригрузом забоя. Выполнено численное конечно-элементное моделирование строительства перегонного тоннеля метро с применением ТПМК с активным пригрузом забоя в слоистом грунтовом массиве. Определено влияние структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля на форму и размер мульды сдвижения земной поверхности при строительстве тоннеля ТПМК с активным пригрузом забоя на основе результатов численного моделирования. Разработаны практические рекомендации по определению влияния структуры слоистого массива в забое тоннеля на устойчивость массива и необходимое для его поддержания давление пригруза проходческого щита.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 85 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков и 33 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна,

теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ современного состояния вопроса строительства перегонных тоннелей метро с применением тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) с активным пригрузом забоя. Проведен анализ методов строительства двухпутных тоннелей метрополитена. Рассмотрены методы определения величины осадок земной поверхности при строительстве тоннелей, а также методы определения формы и размеров зоны сдвижения грунтового массива при строительстве тоннелей. Отдельно изучены методы определения давления пригруза проходческого щита на забой строящегося тоннеля и современные научные методы решения геомеханических задач при строительстве тоннелей щитовыми проходческими комплексами.

Во второй главе представлено обобщение инженерно-геологических условий строительства тоннелей щитовыми проходческими комплексами, в рамках которого рассмотрены стратиграфия и литология, тектоника и гидрогеологические условия, типичные для строительства тоннелей ТПМК с активным пригрузом забоя. В главе разработана методика численного конечно-элементного моделирования строительства тоннеля с применением ТПМК с активным пригрузом забоя и методика определения зависимости осадок земной поверхности и размера зоны предельного состояния от изменяющейся структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля при неизменных технологических параметрах ТПМК с активным пригрузом забоя.

В третьей главе выполнено моделирование тоннеля метро, строящегося с применением ТПМК с активным пригрузом забоя в слоистом грунтовом массиве. Проанализированы результаты моделирования численных конечно-элементных моделей строящегося тоннеля при изменяющейся структуре грунтового массива в забое тоннеля при неизменных технологических параметрах ТПМК для построения аналитических зависимостей. Выполнено моделирование по данным со строительства тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена для последующей верификации результатов исследования.

В четвертой главе определено влияние структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля на форму и размер мульды сдвижения земной поверхности при строительстве тоннеля ТПМК с активным пригрузом забоя. Выполнена верификация результатов исследований на основе результатов моделирования по данным со строительства тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена. Разработаны практические рекомендации по определению влияния структуры слоистого массива в забое тоннеля на устойчивость массива и необходимое для его поддержания давление пригруза проходческого щита. Определено необходимое для устойчивости забоя тоннеля давления пригруза на забой в зависимости от структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля, строящегося ТПМК с пригрузом забоя. Описано устройство для непрерывного контроля изменения геологической структуры грунтового массива впереди забоя тоннеля, необходимое для наиболее эффективного применения разработанного метода при строительстве тоннелей.

В заключении сформулированы основные результаты проведенного исследования, а также направления дальнейших исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Использование установленных нелинейных зависимостей значений критериев ширины, площади поперечного сечения мульды сдвижения земной поверхности, наибольшего значения оседания земной поверхности и площади сечения зоны предельного состояния массива на участке установившихся деформаций от структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля позволяет надёжно описать влияние параметров на устойчивость слоистого грунтового массива.

Для установления закономерностей зависимости формы и размеров мульды сдвижения земной поверхности от структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля, строящегося ТПМК с активным пригрузом забоя в грунтовом массиве, имеющем слоистую и изменяющуюся по трассе тоннеля структуру в забое тоннеля, разработано 225 численных конечно-элементных моделей тоннеля метро.

Модели построены в трехмерной постановке симметрично относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось тоннеля (рисунок 1). Мощность модели равна 57 м. Модель состоит из 3 основных слоев грунта: вмещающий слой мощностью 26,21 м (1), плотные и более прочные слои 5,64 м (3) и 25,24 м (4) (рисунки 1, 2).

Для обеспечения точности анализа влияния структуры массива в забое строящегося тоннеля на деформации грунта необходимо сформировать модель, в которой все параметры, кроме одного, остаются неизменными. Такой подход позволяет оценить изменение результатов при варьировании каждого параметра по отдельности.

В модель включены два основных слоя грунта, воспринимающих нагрузку пригруза в забое: первый - изменяемый слой, у которого варьируются деформационные и прочностные характеристики, а также положение относительно оси забоя; второй - вмещающий слой, обладающий постоянными прочностными и деформационными свойствами.

Для качественной оценки влияния на деформированное состояние массива структуры массива в забое тоннеля мощность изменяемого слоя принята равной 2,18 м, 2,89 м, 3,6 м, что соответствует 0,2, 0,265, 0,33 диаметрам тоннеля (D_T).

Процесс моделирования ведется при 5 вариантах залегания изменяемого слоя грунта.

Для различных мощностей изменяемого слоя за варианты залегания приняты:

- при мощности изменяемого слоя $0,2D_T$ изменяемый слой залегает на глубинах (l) равных $0D_T$ (изменяемый слой в своде тоннеля), $0,2D_T$, $0,4D_T$ (изменяемый слой в центре тоннеля), $0,6D_T$, $0,8D_T$ (изменяемый слой в почве тоннеля) от свода тоннеля;

- при мощности изменяемого слоя $0,265D_T$ изменяемый слой залегает на глубинах (l) равных $0D_T$ (изменяемый слой в своде тоннеля), $0,12D_T$, $0,37D_T$ (изменяемый слой в центре тоннеля), $0,62D_T$, $0,74D_T$ (изменяемый слой в почве тоннеля) от свода тоннеля;

- при мощности изменяемого слоя $0,2D_T$ изменяемый слой залегает на глубинах (l) равных $0D_T$ (изменяемый слой в своде тоннеля), $0,08D_T$, $0,33D_T$ (изменяемый слой в центре тоннеля), $0,58D_T$, $0,67D_T$ (изменяемый слой в почве тоннеля) от свода тоннеля.

Основные рассматриваемые критерии: площадь мульды сдвижения земной поверхности S_{mo} , площадь зоны предельного состояния $S_{зпс}$, ширина мульды сдвижения B_{mo} , наибольшее значение оседания земной поверхности U_{max} (рисунок 3).

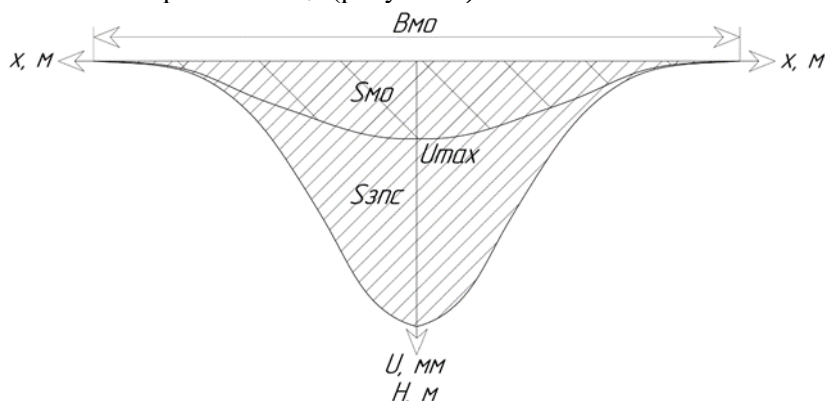


Рисунок 3 - Поперечный профиль мульды сдвижения и описывающие её основные критерии

Для каждого набора моделей выполнено сравнительное моделирование при одинаковых физико-механических характеристиках изменяемого и вмещающего слоёв грунта. Отсутствие различий в отслеживаемых показателях между этими моделями свидетельствует о корректности методики и надёжности сравнения различных серий расчётных схем. На получаемый результат моделирования каждого ряда моделей оказывает влияние лишь один варьируемый показатель.

Каждый принятый к построению ряд моделей, включающий в себя результаты 75 численных конечно-элементных моделей, описывает единая аналитическая зависимость с точностью не менее 98%, за исключением зависимости B_{mo} от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении С слоев массива (таблица 1). Вышеупомянутый ряд моделей хоть и описывается тремя разными аналитическими зависимостями с точностью не менее 98%, однако не имеет решения в виде единой зависимости из-за значительно отличающегося друг от друга характера изменения значений отслеживаемого критерия.

Таблица 1 – Результаты определения аналитических зависимостей критериев S_{mo} , B_{mo} , U_{max} , $S_{зпс}$

Зависимость S_{mo} от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении E слоев массива	RationalTaylor $z = (z_0 + A_{01} \cdot x + B_{01} \cdot y + B_{02} \cdot y^2 + C_{02} \cdot x \cdot y) / (1 + A_1 \cdot x + B_1 \cdot y + A_2 \cdot x^2 + B_2 \cdot y^2 + C_2 \cdot x \cdot y)$
Зависимость S_{mo} от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении ϕ слоев массива	LogNormal2D $z = z_0 + B \cdot \exp(-0.5 \cdot \log(x/C)/D)^2 + E \cdot \exp(-0.5 \cdot \log(y/F)/G)^2 + H \cdot \exp(-0.5 \cdot (\log(x/C)/D)^2 + (\log(y/F)/G)^2)$
Зависимость S_{mo} от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении C слоев массива	Cosine $z = z_0 + A_1 \cdot \cos(x) + B_1 \cdot \cos(y) + A_2 \cdot \cos(2 \cdot x) + C_1 \cdot \cos(x) \cdot \cos(y) + B_2 \cdot \cos(2 \cdot y)$
Зависимость B_{mo} от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении E слоев массива	Rational2D $z = (z_0 + A_{01} \cdot x + B_{01} \cdot y + B_{02} \cdot y^2 + B_{03} \cdot y^3) / (1 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2 + A_3 \cdot x^3 + B_1 \cdot y + B_2 \cdot y^2)$
Зависимость B_{mo} от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении ϕ слоев массива	Cosine $z = z_0 + A_1 \cdot \cos(x) + B_1 \cdot \cos(y) + A_2 \cdot \cos(2 \cdot x) + C_1 \cdot \cos(x) \cdot \cos(y) + B_2 \cdot \cos(2 \cdot y)$
Зависимость B_{mo} от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении C слоев массива	Parabola2D $z = z_0 + a \cdot x + b \cdot y + c \cdot x^2 + d \cdot y^2$
	Cosine $z = z_0 + A_1 \cdot \cos(x) + B_1 \cdot \cos(y) + A_2 \cdot \cos(2 \cdot x) + C_1 \cdot \cos(x) \cdot \cos(y) + B_2 \cdot \cos(2 \cdot y)$
	Rational2D $z = (z_0 + A_{01} \cdot x + B_{01} \cdot y + B_{02} \cdot y^2 + B_{03} \cdot y^3) / (1 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2 + A_3 \cdot x^3 + B_1 \cdot y + B_2 \cdot y^2)$
Зависимость U_{max} от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении E слоев массива	Rational2D $z = (z_0 + A_{01} \cdot x + B_{01} \cdot y + B_{02} \cdot y^2 + B_{03} \cdot y^3) / (1 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2 + A_3 \cdot x^3 + B_1 \cdot y + B_2 \cdot y^2)$

Продолжение таблицы 1

Зависимость $U_{\max}$ от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении φ слоев массива	Exponential2D $z = z_0 + B \cdot \exp(-x/C) \cdot \exp(-y/D)$
Зависимость $U_{\max}$ от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении C слоев массива	Exponential2D $z = z_0 + B \cdot \exp(-x/C) \cdot \exp(-y/D)$
Зависимость $S_{\text{зпс}}$ от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении E слоев массива	RationalTaylor $z = (z_0 + A_{01} \cdot x + B_{01} \cdot y + B_{02} \cdot y^2 + C_{02} \cdot x \cdot y) / (1 + A_1 \cdot x + B_1 \cdot y + A_2 \cdot x^2 + B_2 \cdot y^2 + C_2 \cdot x \cdot y)$
Зависимость $S_{\text{зпс}}$ от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении φ слоев массива	Cosine $z = z_0 + A_1 \cdot \cos(x) + B_1 \cdot \cos(y) + A_2 \cdot \cos(2 \cdot x) + C_1 \cdot \cos(x) \cdot \cos(y) + B_2 \cdot \cos(2 \cdot y)$
Зависимость $S_{\text{зпс}}$ от структуры грунтового массива в забое тоннеля при изменении C слоев массива	Voigt2D $z = z_0 + A \cdot (\mu / ((1 + ((x - xc)/w_1)^2) \cdot (1 + ((y - yc)/w_2)^2)) + (1 - \mu) \cdot \exp(-0.5 \cdot ((x - xc)/w_1)^2 - 0.5 \cdot ((y - yc)/w_2)^2))$

Разработанные зависимости выведены с целью повышения достоверности определения деформированного состояния слоистого грунтового массива и служат основой для корректного прогноза влияния строительства тоннеля на окружающий его грунтовый массив.

2. В качестве основного критерия для описания устойчивости слоистого грунтового массива при строительстве тоннелей механизированными комплексами с пригрузом забоя следует принимать площадь сечения зоны предельного состояния слоистого грунтового массива на участке установившихся деформаций.

Для определения основного критерия для описания устойчивости слоистого грунтового массива при строительстве тоннелей с применением ТПМК с пригрузом забоя использованы результаты разработанных ранее 225 численных конечно-элементных моделей

тоннеля метро, строящегося тоннелепроходческим механизированным комплексом с активным пригрузом забоя в грунтовом массиве.

Рассмотрено влияние изменения структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля с дифференцируемыми значениями физико-механических характеристик на основные рассматриваемые критерии: площадь мульды сдвижения земной поверхности S_{mo} , площадь зоны предельного состояния $S_{зпс}$, ширина мульды сдвижения B_{mo} , наибольшее значение оседания земной поверхности U_{max} .

Наибольшая разница в значениях исследуемых критериев при различных положениях изменяемого слоя на забое (l_i) и мощности слоя (m_i) отображена в таблице 2.

Таблица 2 – Наибольшая разница в значениях при варьируемой структуре грунтового массива в забое тоннеля

Параметр	Наибольшая разница в значениях при различных положениях изменяемого слоя на забое (l_i) и мощности слоя (m_i/D_r): $i = 1$ – значение параметра наименьшего значения, $i = 2$ – параметр наибольшего значения			
	$S_{mo}, \%$ $l_1 \div l_2$ $m_1 \div m_2$	$B_{mo}, \%$ $l_1 \div l_2$ $m_1 \div m_2$	$U_{max}, \%$ $l_1 \div l_2$ $m_1 \div m_2$	$S_{зпс}, \%$ $l_1 \div l_2$ $m_1 \div m_2$
E_{oed}, E_{50}, E_{ur}	96,8 0,58÷0,58 0,33÷0,33	88,4 0,58÷0,58 0,33÷0,33	90,0 0÷0,08 0,33÷0,33	96,8 0,58÷0,58 0,33÷0,33
φ	38,2 0÷0 0,33÷0,33	39,8 0,67÷0,67 0,33÷0,33	35,7 0÷0 0,33÷0,33	53,0 0,67÷0,67 0,33÷0,33
C	15,8 0,58÷0 0,33÷0,33	10,1 0,58÷0,74 0,33÷0,33	14,3 0÷0 0,33÷0,33	6,6 0÷0,67 0,33÷0,33

В ходе исследования установлено, что критерий площади сечения зоны предельного состояния слоистого грунтового массива на участке установившихся деформаций наиболее чувствителен к изменению структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля. В разработанном методе критерий принимается для расчета необходимого для устойчивости забоя тоннеля давления пригруза на забой.

3. Определение давления пригруза на забое с учетом установленной зависимости площади сечения зоны предельного состояния слоистого грунтового массива на участке установившихся деформаций от значения давления позволяет уменьшить деформации грунтов при строительстве тоннелей механизированными комплексами.

Влияние структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля, строящегося ТПМК с пригрузом забоя, на необходимое для устойчивости забоя тоннеля давление пригруза на забой рассматривалось через исследованный критерий площади зоны предельного состояния. В вышеизложенной части исследования доказано, что значение критерия площади зоны предельного состояния зависит от изменения устойчивости забоя.

С целью обеспечения возможности дальнейшего использования результатов разработан ряд моделей с аналогичными характеристиками построенным ранее моделям при верификации результатов исследований: структурой, моделями поведения материалов, физико-механическими свойствами грунтов и обделки.

При рассматриваемом ранее ряде моделей давление пригруза на забое тоннеля изменялось на величину, необходимую для поддержания равновесного состояния между давлением со стороны массива и проходческого щита, что выражалось в отсутствии изменения формы и размеров мульды сдвижения. Площадь зоны предельного состояния при этом оставалась неизменной.

Для определения необходимой зависимости для текущего ряда моделей давление пригруза на забое тоннеля задано как постоянное и равное 220 кН/м^2 . Изменение структуры массива в ряде моделей привело к изменению площади зоны предельного состояния. Посредством использования аналогичного с предыдущими численными моделями метода обработки результатов моделирования построена необходимая зависимость (рисунок 4, таблица 3).

Таблица 3 – Аналитическая зависимость изменения необходимого для устойчивости забоя тоннеля давления пригруза на забой от изменения значения площади зоны предельного состояния

Использованная модель	ExpDec1
Зависимость	$P_{пр} = A \cdot \exp(-S_{зпс}/B) + C$

Продолжение таблицы 3

Эмпирический коэффициент, A	0,08328
Эмпирический коэффициент, B	0,22088
Эмпирический коэффициент, C	-0,08225
Reduced Chi-Sqr	4,26062E-6
Коэффициент детерминации	0,99828
Adj. R-Square	0,99656

Зависимость позволяет определить степень изменения давления пригруза на забой от исходного значения с учетом прогнозного изменения зоны предельного состояния, рассчитанного при условии отсутствия изменения пригруза забоя. Посредством применения зависимости на основе прогноза возможно в режиме реального времени изменять давление пригруза на забое с целью исключения увеличения текущего влияния строительства перегонного тоннеля на слоистый грунтовый массив.

Для расчета коэффициента устойчивости грунтового массива составлена балльная система определения влияния параметров изменяемого слоя в забое тоннеля на устойчивость массива (таблица 4).

Для определения значений балльной системы выбраны крайние значения диапазонов рассматриваемых критериев, выделенные в таблице 3. За устойчивое состояние массива в исследовании принято состояние, при котором максимальные осадки поверхности не превышают предельно допустимых в текущем случае 24 мм.

Значение мощности ($m_{\text{изм}}$) и положения слоя (l) в таблице 4 равны 0 в случае отсутствия изменяемого слоя в забое тоннеля или отсутствия разницы в физико-механических характеристиках между ним и вмещающим массивом. Вместе с этим l в вышеуказанных таблицах – расстояние от свода тоннеля до почвы изменяемого слоя.

Если значение соотношения механических характеристик грунта или мощности и положения слоя на забое не совпадает с табличными, необходимо прибегнуть к расчету баллов с применением интерполяции. Расчетная формула коэффициента устойчивости грунтового массива (1):

$$K_V = A_E \cdot A_\varphi \cdot A_C \cdot A_m \cdot A_l. \quad (1)$$

Предложенный подход позволяет выполнять достоверный прогноз необходимого для поддержания устойчивости давления активного пригруза на забой тоннеля, основываясь на результатах прогнозных значений размера зоны предельного состояния слоистого грунтового массива, а также корректировать давление с учетом изменяющейся структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования геомеханического обоснования устойчивости грунтов при строительстве тоннелей щитовыми проходческими комплексами с пригрузом забоя в слоистых массивах позволили разработать новый метод, адекватно описывающий механизм деформирования грунтового массива в условиях его естественной слоистости при воздействии на него строительных работ:

1. В ходе исследования подтверждены три ключевых научных положения:

1.1. Установлено, что использование установленных нелинейных зависимостей значений критериев ширины, площади поперечного сечения мульды сдвижения земной поверхности, наибольшего значения оседания земной поверхности и площади сечения зоны предельного состояния массива на участке установившихся деформаций от структуры слоистого грунтового массива в забое тоннеля позволяет надёжно описать влияние параметров на устойчивость слоистого грунтового массива. Определены аналитические зависимости, описывающие влияние и диапазоны работы метода.

1.2. Доказано, что для описания устойчивости слоистого грунтового массива при строительстве тоннелей с применением ТПМК с пригрузом забоя следует принимать площадь сечения зоны предельного состояния слоистого грунтового массива на участке установившихся деформаций в качестве основного критерия.

1.3. Установлена зависимость между площадью сечения зоны предельного состояния слоистого грунтового массива на участке установившихся деформаций от значения давления пригруза на забое, описываемая экспоненциальной функцией вида

$$P_{\text{пр}} = A \cdot \exp(-S_{\text{зпс}}/B) + P_{\text{пр}}^0$$

с коэффициентом детерминации 0,99828. Зависимость позволяет определить степень изменения давления пригруза на забой от исходного значения с учётом прогнозного изменения зоны предельного состояния. Использование зависимости позволяет в режиме реального времени изменять давление пригруза для уменьшения деформаций грунтов при строительстве тоннелей с применением ТПМК с пригрузом забоя. Предложена практическая реализация разработанного аналитического метода: предложен балльный критерий учета влияния структуры массива грунтового массива в забое тоннеля на устойчивость массива (K_v). Предложен способ учета критерия K_v в существующих зависимостях.

2. Исследования показали, что при варьировании модулей деформации (E_{oed} , E_{50} , E_{ur}) наибольшая разница в значениях площади мульды сдвижения достигает 96,8%, а площади зоны предельного состояния также составляет 96,8%. Изменение угла внутреннего трения приводит к разнице в 38,2% для мульды сдвижения и 53,0% для зоны предельного состояния. Влияние сцепления грунта выражается в разнице 15,8% и 6,6% соответственно. С увеличением глубины заложения тоннеля происходит увеличение площади зоны сдвижений грунтового массива в призабойной зоне вглубь выработки. При неизменной глубине и различной структуре массива с наличием ослабленного слоя грунта разница в значениях достигает 13%, а при усиленном слое – 22%.

3. Результаты исследования вносят существенный вклад в развитие геомеханики подземного строительства, расширяя возможности прогноза устойчивости слоистых массивов при строительстве тоннелей с использованием ТПМК с активным пригрузом забоя. Разработанный метод заполняет существенный пробел в научном и инженерном обеспечении строительства в условиях многослойного и неоднородного геологического разреза, что является актуальной задачей при развитии подземной инфраструктуры современных городов.

Дальнейшие исследования могут быть посвящены расширению области действия метода на иные критерии мульды сдвижения земной поверхности и зоны предельного состояния грунтового массива.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Протосеня, А.Г. Влияние порового давления на устойчивость забоя при строительстве тоннелей щитовыми проходческими комплексами в смешанных забоях / А.Г. Протосеня, **В.В. Кумов** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 20. – С. 131-141. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-20-131-141.

2. Протосеня, А.Г. Влияние структуры многослойного грунтового массива на его устойчивость при строительстве тоннелей щитовыми проходческими комплексами с пригрузом забоя / А.Г. Протосеня, **В.В. Кумов** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. - 2024. - № 26. – с. 102-111. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-26-102-111.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Протосеня, А.Г. Влияние структуры массива грунта в смешанном забое тоннеля на форму и размер мульды осадок земной поверхности / А.Г. Протосеня, **В.В. Кумов** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 4. – С. 5–21. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_5.

4. Protosenya, A. Geomechanical Substantiation of Soil Stability During Tunnel Construction by Shield Tunneling Complexes in Layered Massifs / A. Protosenya, **V. Kumov** // Eng. – 2026. – Vol. 7, Issue 3. – Article 108. – 17 p. DOI:10.3390/eng7030108.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Патент № 2835416 Российская Федерация, МПК E21D 9/06 (2006.01) E21C 27/02 (2006.01) G01V 3/15 (2006.01). Исполнительный орган проходческого щита для строительства тоннелей в многослойном массиве. Заявка №2024118786: заявл. 05.07.2024: опубл. 25.02.2025 / **В.В. Кумов**, А.Г. Протосеня; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 14 с.

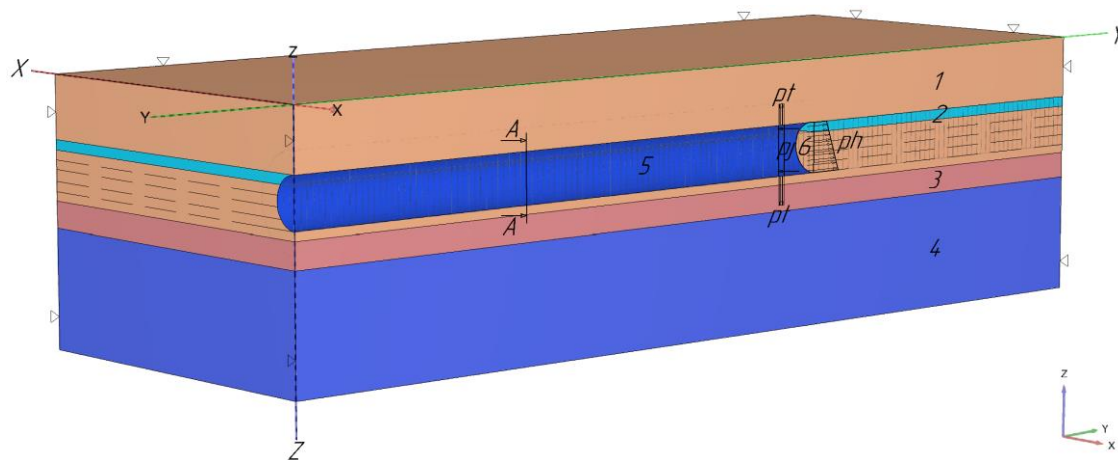


Рисунок 1 – Вид построенных моделей: 1 – вмещающий слой, 2 – изменяемый слой грунта, 3, 4 – прочные слои грунта, 5 – строящийся тоннель, 6 – забой тоннеля, p_h – пригрузка на забое, p_t – давление тампонажа, p_j – давление домкратов, А – участок установившихся деформаций во всех моделях, на котором производится мониторинг изменений отслеживаемых параметров

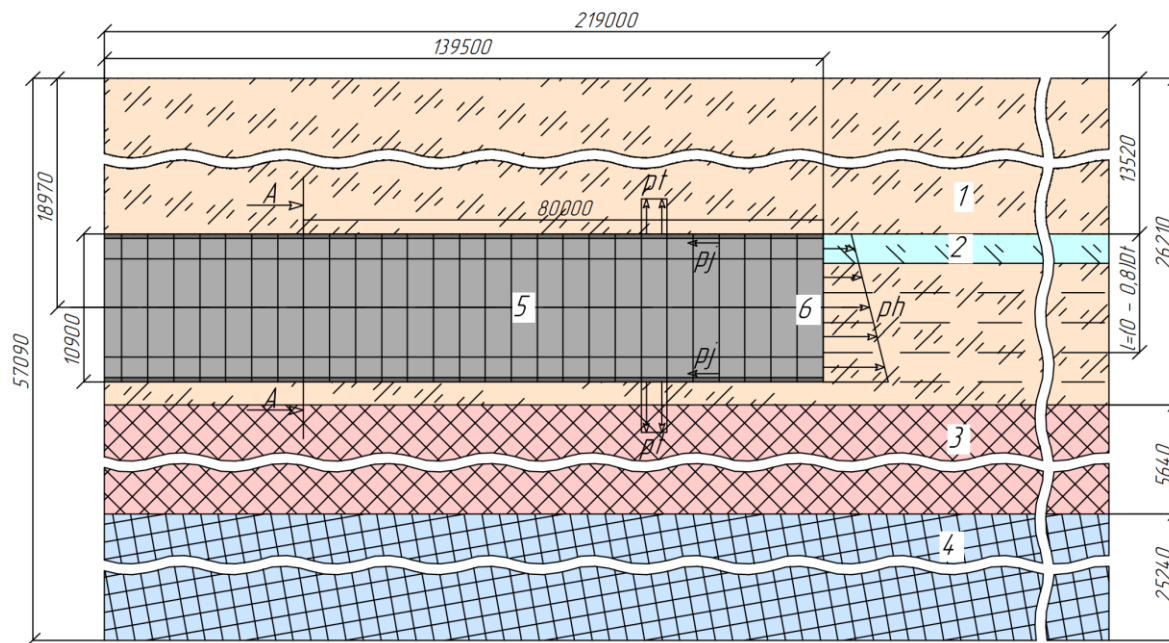


Рисунок 2 - Расчетная схема трехмерной конечно-элементной модели: 1 – вмещающий слой, 2 – изменяемый слой грунта, 3, 4 – прочные слои грунта, 5 – строящийся тоннель, 6 – забой тоннеля, p_h – пригрузка на забое, p_t – давление тампонажа, p_j – давление домкратов, А – участок установившихся деформаций во всех моделях, на котором производится мониторинг изменений отслеживаемых параметров

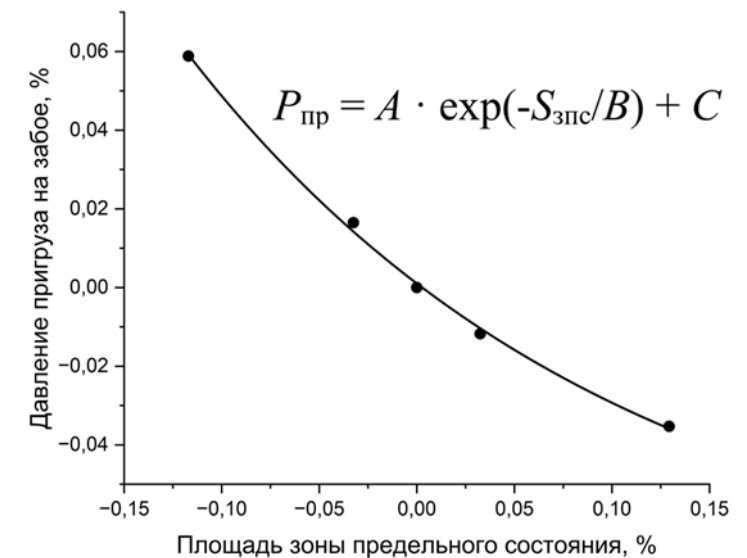


Рисунок 4 – Зависимость изменения необходимого для устойчивости забоя тоннеля давления пригрузки на забой от изменения значения площади зоны предельного состояния

Таблица 4 – Распределение баллов АЕ, Аф, АС, Ам, АІ для расчета коэффициента устойчивости грунтового массива

$E_{изм}/E_{вмещ}$	0,07	0,54	1	1,46	1,93
Балл (A_E)	22,839	11,420	0,000	-0,113	-0,225
$\Phi_{изм}/\Phi_{вмещ}$	0,65	0,825	1	1,175	1,35
Балл (A_Φ)	-0,044	-0,022	0,000	0,516	1,032
$C_{изм}/C_{вмещ}$	0	0,5	1	1,5	2
Балл (A_C)	0,074	0,037	0,000	-0,036	-0,071
$m_{изм}$	0,000	0,083	0,165	0,248	0,330
Балл (A_m)	0,000	22,555	45,110	67,665	90,220
l	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
Балл (A_l)	0,000	34,600	69,200	103,799	138,399