

На правах рукописи

КАРАСЕВ Максим Анатольевич



**ПРОГНОЗ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В СЛОИСТЫХ ПОРОДНЫХ МАССИВАХ
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ
СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ В
УСЛОВИЯХ ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ**

*Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная
теплофизика*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт–Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный консультант -

доктор технических наук, профессор

Протосеня Анатолий Григорьевич

Официальные оппоненты:

Барях Александр Абрамович,
член-корр. РАН, доктор технических наук, профессор, ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», директор

Панкратенко Александр Никитович,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра «Строительство подземных сооружений и горных предприятий», заведующий кафедрой

Саммаль Андрей Сергеевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», кафедра «Механика материалов», профессор

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

Защита диссертации состоится 15 декабря 2017 г. в 13 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.224.06 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

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

Автореферат разослан 15 сентября 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СИДОРОВ
Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие крупных городов связано с комплексным освоением подземного пространства. Это объекты метрополитена, транспортные и сервисные тоннели, подземные склады и хранилища, объекты инфраструктуры, магазины и другие подземные сооружения. Использование подземного пространства мегаполисов создает условия для значительного снижения негативных воздействий промышленной и служебной инфраструктур, а также решает проблему городского транспорта, ряд социальных и экологических проблем. В то же время строительство подземных сооружений может оказать и негативное воздействие на здания и объекты городской инфраструктуры, расположенные в зоне их подработки горно-строительными работами, которое проявляется в виде значительных осадок, повреждений и разрушений зданий, сооружений и инженерных коммуникаций, особенно при строительстве станций метрополитенов и наземно-подземных транспортных узлов. Это требует расселения домов, попадающих в зону влияния, что в современных экономических условиях недопустимо.

Строительство любого подземного сооружения приводит к изменению напряженного состояния вмещающего массива, сопровождающегося его деформациями, которые распространяются до земной поверхности; их величина и характер зависят от многих факторов и определяются на основании геомеханического анализа. Решение таких важных задач подземного строительства, как обоснование устойчивости подземного сооружения, выбор типа и рациональных параметров обделок, прогноз развития деформаций земной поверхности, невозможно без достоверного прогноза геомеханических процессов, проявляющихся в виде деформаций породного массива.

Специфика геомеханических процессов, возникающих при строительстве подземных сооружений, определяется инженерно-геологическими условиями, закономерностями деформирования вмещающих пород, а также конфигурацией подземного сооружения и последовательностью ведения строительных работ. Полнота учета этих данных предопределяет достоверность прогноза геомеханических

процессов в породном массиве при строительстве подземных сооружений.

Большой вклад в разработку методов прогноза геомеханических процессов в слоистых средах внесли Д.В. Амшихтин, А.А. Барях, В. Виттке, В.В. Зубков, С.Г. Лехникий, Ю.А. Кашников, А.Г. Оловянный, О. Зенкевич, Z. Mroz, B. Schadlich и др., исследованием процессов деформирования породных массивов в окрестности подземных сооружений занимались И.В. Баклашов, Н.С. Булычев, Д.М. Голицинский, М.Г. Зерцагов, Б.А. Картозия, М.В. Корнилков, А.В. Корчак, Н.И. Кулагин, М.О. Лебедев, В.Е. Меркин, А.Н. Панкратенко, А.Г. Протосеня, А.С. Саммаль, Н.Н. Фотиева, Ю.С. Фролов и др. Исследования механического поведения аргилитоподобных глинистых пород проводили К.П. Безродный, А.К. Бугров, Р.Э. Дашко, Ю.А. Карташов, В.И. Осипов, А.Н. Ставрогин, Y. Nicher и др., а прогноз деформаций земной поверхности от строительства подземных сооружений в условиях плотной городской застройки Е.М. Волохов, М.В. Долгих, Ю.А. Лиманов, В.Ф. Подаков, В.П. Хуцкий и др.

Первые попытки прогноза деформаций земной поверхности в основном базировались на результатах натурных наблюдений, которые были обобщены в виде эмпирических зависимостей. Общим недостатком данных методов является неопределенность при выборе параметров аналитических зависимостей, диапазон изменения которых достаточно широк, а четких рекомендаций по выбору численных показателей авторами работ не предлагается. В итоге данные методы используются либо для предварительного прогноза деформаций земной поверхности, что позволяет выявить зоны влияния строительства подземных сооружений, либо на хорошо изученных участках строительства, где имеется задел по натурным исследованиям.

Значительное внимание было уделено и развитию аналитических методов прогноза деформаций земной поверхности. Основным ограничением таких методов является упрощенный подход как к учету процесса строительства подземных сооружений, так и к особенностям механического состояния вмещающего породного массива. В последние годы были предприняты попытки учесть различные осо-

бенности поведения пород, однако модели поведения сред так и остались достаточно простыми и не позволяли полностью преодолеть недостатки, присущие первым работам в этой области.

В целом можно отметить, что существующие методы прогноза деформаций породного массива и земной поверхности, основанные на полуэмпирических или аналитических методах расчета, не позволяют в полной мере описать геомеханические процессы, происходящие при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации.

В существующих нормативных документах как федерального (СНиП, СП), так и регионального значения (ТСН), регламентирующих вопросы проектирования подземных сооружений в условиях плотной городской застройки, проблема прогноза деформаций земной поверхности при строительстве подземных сооружений рассматривается весьма условно, на основании эмпирических или полуаналитических зависимостей, некоторые из которых весьма спорны. Основным недостатком предложенных в нормативной литературе методик прогноза оседания земной поверхности является косвенный учет особенностей строительства подземных сооружений, что не позволяет адаптировать их под так называемые малоосадочные технологии строительства, получившие в последнее время широкое распространение. Учет сложной пространственной конфигурации подземных сооружений в положениях существующих нормативных документов отсутствует, что ведет к искажению результатов прогноза деформаций земной поверхности.

Прогноз деформаций породного массива и поверхности земли в основном должен выполняться на основании использования результатов численного моделирования строительства подземных сооружений. Этому способствует как развитие представлений о процессах деформирования пород, так и появление проработанных геомеханических моделей поведения породных массивов.

Применение численных методов анализа позволяет избежать ряда недостатков эмпирических, полуэмпирических и аналитических методов, однако научные исследования, выполненные в этом направлении, разрознены, требуют обобщения и дополнения и практически

не затрагивают прогноза геомеханических процессов при строительстве сооружений сложной пространственной конфигурации. Особое внимание необходимо уделить вопросам разработки геомеханических моделей поведения твердых аргиллитоподобных глинистых пород, что позволит повысить достоверность прогноза геомеханических процессов при строительстве подземных сооружений, расположенных в таких средах, а также способствует развитию методологических вопросов прогноза деформаций земной поверхности при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации.

Предлагаемая работа направлена на изучение развития геомеханических процессов в породном массиве при строительстве сложных пространственных подземных сооружений (станционных комплексов метрополитенов, пересадочных узлов станционных комплексов и др.) в твердых аргиллитоподобных глинистых породах, механическое поведение которых в немалой степени определяется их слоистой структурой. При этом основной практический акцент в работе смещен в сторону прогноза деформаций земной поверхности.

Обобщая вышесказанное, можно отметить, что достоверный прогноз геомеханических процессов и деформаций земной поверхности, возникающих при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации в условиях плотной городской застройки, следует признать актуальной научной проблемой при освоении подземного пространства мегаполисов.

Цель работы заключается в разработке и обосновании теоретических положений прогноза геомеханических процессов в породном массиве в окрестности подземных сооружений сложной пространственной конфигурации, расположенных в твердых аргиллитоподобных глинистых породах, обеспечивающих сохранность зданий и сооружений при их подработке горно-строительными работами.

Идея работы. Прогноз геомеханических процессов должен основываться на моделях среды, учитывающих анизотропию и нелинейность породного массива, создании пространственных численных моделей подземных комплексов с учетом стадийности их строительства и реализации численных экспериментов на основе взаимоувязанных глобальных и локальных вычислительных алгоритмов.

Основные задачи исследований:

- обзор предыдущих исследований по заявленной тематике, а также результатов мониторинга деформаций породного массива в окрестности подземных сооружений и оседания земной поверхности;
- изучение влияния анизотропии на закономерности деформирования твердых аргиллитоподобных глинистых пород в диапазоне от очень малых до больших деформаций;
- анализ наиболее распространенных концепций разработки геомеханических моделей трансверсально-изотропных сред;
- разработка численных моделей деформирования и разрушения твердых аргиллитоподобных глинистых пород в рамках метода конечно-дискретных элементов;
- разработка геомеханической модели слоистой среды, учитывающей естественную и сформировавшуюся в результате деформирования анизотропию прочностных и деформационных свойств, а также изменение механических свойств от достигнутых напряжений и деформаций;
- разработка концепции проведения геомеханического анализа для прогноза деформаций породного массива при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации;
- разработка методологии прогноза геомеханических процессов в породном массиве и деформаций земной поверхности при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации с применением численных методов анализа;
- апробация предложенного метода прогноза оседания земной поверхности на объектах подземного пространства крупных мегаполисов.

Объектом исследования является подземное пространство мегаполисов при взаимодействии породных массивов, сложенных слоистыми породами средней и высокой степени литификации с подземными сооружениями.

Практическая значимость работы:

- разработан новый подход и метод расчета деформаций породного массива при строительстве подземных сооружений, что позво-

лит повысить достоверность прогноза и последующую оценку негативного влияния деформаций на здания, сооружения и объекты городской инфраструктуры;

- разработаны численные модели прогноза деформирования и разрушения твердых аргиллитоподобных глинистых пород, позволяющие изучать процессы развития геомеханических процессов в окрестности породного обнажения, проявляющиеся в виде деформаций, формирования и развития микротрещин, а также обрушения пород;

- разработана геомеханическая модель твердых аргиллитоподобных глинистых пород и предложен алгоритм ее численной реализации в существующих программных комплексах для выполнения численного анализа в рамках механики сплошной среды, что позволит повысить точность прогноза деформаций породного массива в окрестности подземного сооружения и оседания земной поверхности при строительстве подземных сооружений в слоистых средах;

- разработаны методы расчета зоны влияния строительства сложных пространственных подземных сооружений, метрополитенов и прогноза деформаций земной поверхности с целью установления необходимости применения мер защиты к зданиям и объектам инфраструктуры городской застройки;

- сформулирована концепция научно-технического обоснования геомеханически безопасного освоения подземного пространства городов при строительстве подземных сооружений.

Методы исследований. Использовалось современное лабораторное оборудование для испытаний пород при различном напряженном состоянии, результаты натурных исследований за деформациями земной поверхности при строительстве станционных комплексов метрополитенов, обоснованные, общепринятые и новые методы математического описания механических процессов при деформировании и разрушении пород, включающие уравнения теории упругости, пластичности и элементы механики разрушения, а также способы решение задач прогноза геомеханических процессов в окрестности подземных сооружений численными методами анализа.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- установлена взаимосвязь между деформационными характеристиками твердых аргиллитоподобных глинистых пород и достигнутыми напряжениями и деформациями, которая заключается в увеличении жесткости среды с ростом средних напряжений и ее снижением с увеличением уровня достигнутых деформаций;

- разработаны численные модели слоистой среды, которые в явном виде позволяют прогнозировать зарождение и рост микро- и макротрещин по заранее не определенным, а формируемым в процессе деформирования плоскостям ослабления, анизотропия свойств которой задается с помощью функции распределения;

- разработана геомеханическая модель твердых аргиллитоподобных глинистых пород, учитывающая зависимость деформационных характеристик среды от достигнутого уровня напряжений и деформаций, а также влияние напряжений на анизотропию механических свойств;

- выполнена численная реализация геомеханической модели твердых аргиллитоподобных глинистых пород, в рамках концепции многослойной среды, на основании теории пластического течения, позволяющая учесть естественную анизотропию прочностных и деформационных свойств пород и деформационную анизотропию механических свойств, а также наличие в породном массиве поверхностей ослабления и неоднородностей;

- предложена и реализована концепция численного моделирования прогноз напряженно-деформированного состояния при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации, где глобальная модель разделяется на подмодели, в рамках которых выполняется детальный геомеханический анализ, а общую картину деформирования породного массива и деформаций земной поверхности получают суммированием локальных деформаций по определенному правилу.

Основные защищаемые положения:

1. Исследование процессов деформирования и разрушения слоистых породных массивов необходимо выполнять на основании

представления их в виде конечно-дискретных элементов с ориентированным распределением механических показателей элементов, что позволяет моделировать зарождение и распространение трещин, а также определять зоны дополнительной нарушенности породного массива, вызванные строительством подземных сооружений.

2. Прогноз деформаций в окрестности подземного сооружения, вызванных его строительством в слоистых породных массивах, и оседания земной поверхности должен выполняться на основании геомеханической модели среды, учитывающей анизотропию механических свойств, а также влияние достигнутого уровня напряжений и деформаций на ее механические характеристики.

3. Прогноз осадок земной поверхности при строительстве сложных пространственных сооружений должен выполняться с учетом стадийности строительства, при этом высокая информационная детализация технологии строительства обеспечивается за счет применения локальных и глобальной моделей, взаимосвязь между которыми осуществляется через передачу расчетных данных о напряжениях и деформациях участков породного массива на всех рассматриваемых стадиях строительства.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов натурных наблюдений и прогнозных деформаций земной поверхности при строительстве сложных пространственных сооружений (станционные комплексы “Обводный канал”, “Волковская”, “Адмиралтейская”, “Международная”, “Бухаресткая”), применением строгих методов математического анализа для построения геомеханических моделей слоистой среды и численных моделей строительства подземных сооружений. Прогнозные расчеты деформаций земной поверхности, выполненные с учетом результатов работы, вошли проектную документацию по объектам Санкт-Петербургского метрополитена и получили практическую апробацию.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований освещались на научно-практических конференциях и выставках: международная конференция “Современные проблемы геомеханики, горного производства и недропользования”, Санкт-Петербург, Горный институт, 2009 г; международный форум “Инженерные

системы 2013”, Москва, 2013 г.; международная научная школа академика К.Н. Трубецкого (Институт проблем комплексного освоения недр) “Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр”, Москва, 2014 г.; международный форум “Инженерные системы 2014”, Москва, 2014 г.; международная научно-практическая конференция “Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий”, Санкт-Петербург, 2015 г.; международная научно-техническая конференция “Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья”, Санкт-Петербург, 2015 г.; международная научно-практическая конференция “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”, Санкт-Петербург, 2015 г.; международная научно-практическая конференция “Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий”, Санкт-Петербург, 2016 г., а также обсуждались на заседаниях научно-технического совета по работе с докторантами Санкт-Петербургского горного университета, на заседаниях кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений и получили одобрение.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследований; обработке результатов натурных замеров оседания земной поверхности, полученных по данным маркшейдерских служб метрополитена; разработки программы проведения лабораторных исследований с целью определения механического поведения аргиллитоподобных глинистых пород и обработке и обобщению полученных результатов; разработке численных моделей прогноза деформирования и разрушения изотропных и трансверсально-изотропных сред как на уровне элементарного образца породы, так и в окрестности подземных сооружений, реализация которых выполнялась в рамках метода конечно-дискретных элементов; обосновании подхода к описанию механического поведения породного массива представленного слоистой породой, выводе основных уравнения для математического описания поведения слоистой среды и ее внедрение в программное решение для выполнения прочностных расчетов используя один из существующих численных методов анализа; разработка алгоритма для выполнения расчетов прогноза деформаций земной поверхности

основанного на разделении рассматриваемого объекта на глобальную и локальные численные модели; разработке численных моделей прогноза развития геомеханических процессов в окрестности подземных сооружений сложной пространственной конфигурации учитывающих взаимодействия внутри системы “породный массив – подземное сооружение”; апробация результатов научных исследований на объектах подземного строительства Санкт-Петербургского метрополитена.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 научных работ, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 16 статей.

Использование результатов работы. Результаты научных исследований использовались при проектировании новых станций Санкт-Петербургского метрополитена и включены в состав проектной документации. Проекты сооружений станций метрополитена “Театральная”, “Горный институт”, “Путиловская” получили положительное заключение главной государственной экспертизы и находятся на стадии практической реализации.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 307 страницах машинописного текста. Состоит из введения, семи разделов, заключения, списка литературы из 284 наименований. Включает 150 рисунков и 59 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, ставятся цель и задачи исследований, сформулированы идея работы, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

В первом разделе диссертации представлено состояние вопроса прогнозирования деформаций породного массива при строительстве подземных сооружений в условиях плотной городской застройки. Выполнен анализ причин развития оседания земной поверхности и рассмотрены существующие методы прогноза деформаций породного массива и земной поверхности.

Во втором разделе представлены методологические основы прогноза развития геомеханических процессов при строительстве подземных сооружений. Рассмотрены вопросы разработки концепции взаимодействия между различными элементами системы при прогнозе геомеханических процессов, вызванных строительством подземных сооружений

В третьем разделе представлены результаты исследований механического поведения твердых аргилитоподобных глинистых пород. Установлены закономерности деформирования глинистых пород при различных видах напряженного состояния. Сформулирована физическая модель поведения твердых аргилитоподобных глинистых пород.

В четвертом разделе представлены вопросы разработки численных моделей прогноза геомеханических процессов при строительстве подземных сооружений в твердых аргилитоподобных глинистых породах, характеризующихся анизотропией прочностных и деформационных свойств. Разработка численных моделей выполнена в рамках метода конечно-дискретных элементов.

В пятом разделе представлены аспекты разработки моделей деформирования аргилитоподобных глинистых пород, учитывающих естественную и сформировавшуюся в результате деформирования анизотропию механических свойств. Реализация моделей деформирования такой среды выполнена в рамках концепции многослойной среды и учитывает различные аспекты ее деформирования.

В шестом разделе представлена методика прогноза деформаций земной поверхности при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации. Предложенная методика основана на разделении рассматриваемого объекта на глобальную и локальные модели между которыми обеспечивается двухсторонняя связь.

В седьмом разделе представлены примеры апробации методики прогноза деформаций земной поверхности на объектах подземного строительства Санкт-Петербургского метрополитена.

В заключении приводятся основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Основные результаты исследований отражены при доказательстве следующих защищаемых положениях:

1. Исследование процессов деформирования и разрушения слоистых породных массивов необходимо выполнять на основании представления их в виде конечно-дискретных элементов с ориентированным распределением механических показателей элементов, что позволяет моделировать зарождение и распространение трещин, а также определять зоны дополнительной нарушенности породного массива, вызванные строительством подземных сооружений.

Процессы деформирования и разрушения слоистых сред, представленных в работе твердыми аргиллитоподобными глинистыми породами, сопровождаются формированием, развитием и распространением микротрещин, поверхности которых по мере их роста взаимодействуют между собой, формируя сложную систему взаимосвязанных элементов.

Выполненные лабораторные исследования показали, что в процессе испытания образцов протерозойской глины их разрушение, в условиях одноосного сжатия зачастую происходило в виде раскалывания образца за счет формирования продольных поверхностей разрыва. При этом данный процесс более ярко проявлялся при испытаниях в направлении, совпадающем со слоистостью. Качественный анализ результатов лабораторных испытаний в условиях объемного сжатия позволил установить, что картина разрушения образца зависит от направления его нагружения. Так, в образцах, нагрузка к которым прикладывалась в направлении, совпадающем с направлением слоистости, преимущественно формировались вертикальные трещины отрыва – по слоям. При испытании в направлении перпендикулярно слоистости разрушение сопровождалось формированием одновременно трещин отрыва и преимущественно трещин сдвига. И в одном, и в другом вариантах испытаний характер разрушения хрупкий. По мере увеличения бокового давления все больше проявлялись пластические свойства аргиллитоподобной глинистых пород, а процесс разрушения образцов в основном сопровождался развитием трещин сдвига.

Обобщенные огибающие прочности протерозойской глины в направлениях перпендикулярно и параллельно слоистости (рисунок 1) были получены на основании обработки результатов прямых (одноосное сжатие, объемное сжатие) и косвенных (чистый сдвиг, сжатие по образующим, раскалывание сферическими инденторами) методов лабораторных испытаний.

Анализируя паспорта прочности протерозойской глины, можно отметить, что независимо от направления нагружения, огибающая прочности представляет собой нелинейную зависимость между пределом прочности и действующими нормальными напряжениями. Прочность протерозойской глины в направлении перпендикулярно и параллельно слоистости различна. При этом максимальная разница в прочности, определяется коэффициентом анизотропии, характерна для условий действия только растягивающих напряжений, и постепенно уменьшается по мере роста нормальных сжимающих напряжений (таблица 1). По мере увеличения минимальных главных напряжений влияние слоистой структуры протерозойских глин снижается, и, по-видимому, последующее увеличение минимальных главных напряжений позволит рассматривать протерозойскую глину в таких условиях как изотропную среду.

Таблица 1 – Влияние структурной анизотропии протерозойской глины на ее прочность при разных видах напряженного состояния

Отношение прочности перпендикулярно слоистости к прочности параллельно слоистости					
Одноосное растяжение	Чистый сдвиг	Одноосное сжатие	Объемное сжатие 0.5 МПа	Объемное сжатие 2.5 МПа	Объемное сжатие 5.0 МПа
2.2	2.1	1.6	1.3	1.2	1.1

Представленные огибающие прочности (рисунок 1) можно разделить на линейные участки, каждый из которых по своему характеризует разрушение породы. Для первого участка характерно разрушение породы за счет преимущественно формирования трещин отрыва. Разрушение на втором участке сопровождается формированием как трещин отрыва, так и сдвига, в то время как разрушение на третьем участке в основном вызвано формированием трещин сдвига. Таким

образом, процесс деформирования и разрушения при напряжениях, близких к предельным, и на запредельной стадии сопровождается формированием новых и развитием существующих микро- и макротрещин. Для прогнозирования процесса требуется разработать определенный расчетный метод. Физическое обоснование механизма необратимой деформации пород за счет формирования и роста макротрещин детально рассмотрено в работах А.Н. Ставрогина и обобщено в виде модели развития деформаций в неоднородном твердом теле. В диссертации представлена механико-математическая интерпретация данного процесса для слоистых сред. Для прогнозирования сложных геомеханических процессов, связанных с деформированием и разрушением пород, принят метод конечно-дискретных элементов (finite-discrete element method), который представляет собой комбинацию теории сплошной среды с элементами механики дискретных сред и впервые был предложен в работах А. Мунижа и в последующем был расширен в работах Б.Т. Ильясова, О. Махабади, А.Б. Лисьяк и др. для решения конкретных геомеханических задач. Автором разработан алгоритм его реализации в существующие программные комплексы для выполнения численного анализа, реализующие явную схему интегрирования по времени и метод дополнения применительно к слоистым средам, твердым аргиллитоподобным глинистым породам с целью прогноза геомеханических процессов в окрестности подземных сооружений.

В данном методе в рамках механики сплошной среды выполняется описание механических процессов на допредельной стадии деформирования. В рамках механики разрушения рассматривается возможность формирования и распространения трещин отрыва или трещин сдвига либо их комбинация. Формирование поверхностей ослабления (трещин) и их развитие, приводит к постепенному переходу материала от допредельной стадии деформирования к запредельной.

Принятый подход, который заключается в создании конечно-элементной сетки, включающей два типа конечных элементов. Первый тип конечных элементов, сплошной элемент, отвечает за деформации материала в допредельной стадии деформирования, при этом закон поведения может быть произвольным. Взаимосвязь между при-

ращениями напряжений и деформаций может быть задана как функция от напряжений, деформаций или других переменных. Такой подход дает возможность использовать уже существующие модели поведения материала, разработанные в рамках теории линейной или нелинейной упругости, теории пластического течения и др. Второй тип конечных элементов, когезионный (контактный) элемент, моделирует зарождение и развитие микротрещин и позволяет реализовать работу материала в запредельной стадии деформирования за счет формирования ослаблений на границе сплошных элементов. До достижения напряжениями или деформациями предельной величины, данный тип элемента оказывает незначительное влияние на поведение рассматриваемого объекта в целом и обеспечивает связь между сплошными элементами. Однако, после достижения предельных величин напряжений или деформаций, жесткость когезионных элементов снижается от полной до нулевой согласно определенному закону, сами элементы исключаются из расчета и формируются поверхности ослабления внутри материала (микротрещины). Формирование новых поверхностей ослабления постепенно уменьшает жесткость материала на глобальном уровне и позволяет моделировать процесс зарождения и распространения трещин, то есть разрушение материала. Основное достоинство такого подхода заключается в возможности его реализации практически в любом программном комплексе общего назначения для выполнения конечно-элементного анализа. Основным недостатком такого подхода являются повышенные требования к формированию элементной сетки и размерам конечных элементов. Элементная сетка должна быть максимально неупорядоченная, что позволит поверхностям ослабления развиваться в произвольном направлении, а не предзаданном. Размеры элементов должны быть достаточно малыми по сравнению с рассматриваемым объектом, что в значительной степени сказывается на продолжительности вычисления.

Механизм разрушения когезионных связей основывается на уравнениях механики разрушения, где процесс формирования, раскрытия и распространения микротрещин связан с энергией разрушения. Достижение предельного напряженного состояния в когезионном элементе определяет процесс начала формирования трещины, в

то время как достижение предельной величины нормальных, касательных перемещений или их комбинации в плоскости когезионного элемента определяют полную величину раскрытия трещины.

В качестве критерия прочности когезионных связей принято модифицированное условие Кулона - Мора, и условие прочности по максимальным растягивающим напряжениям

$$\tau_{\text{пр}} = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi ; \sigma_{\text{пр.р}} = R_p, \quad (1)$$

где c – сцепление; φ – угол внутреннего трения; R_p – прочность при одноосном растяжении.

Параметры условия прочности Кулона - Мора являются функцией от достигнутой величины нормальных напряжений на площадке сдвига $c, \varphi = f(\sigma_n)$. Нелинейная форма огибающей прочности, полученная по данным лабораторных испытаний, задается за счет изменения параметров c и φ для каждого из трех линейных участков.

Анизотропия механического поведения слоистой среды на уровне сплошных элементов учитывается через трансверсально-изотропную матрицу упругости, коэффициенты которой определяются через пять независимых друг от друга деформационных констант. Прочностная анизотропия формулируется на уровне когезионных элементов за счет геометрического ориентирования отдельных когезионных элементов в направлении слоистости глинистых пород (рисунки 2а), задания распределения прочностных показателей (прочность на одноосное растяжение, нелинейная диаграмма изменения прочности сдвигу от величины нормальных напряжений, действующих в плоскости когезионного материала) и показателей, характеризующих энергию, требуемую для разрушения когезионных связей, через функцию распределения, представленную в работах А.Г. Протосени, или микроструктурный тензор, представленный в работах Z. Mroz, которые определяют величину рассматриваемых прочностных показателей от угла поворота когезионного элемента относительно плоскости слоистости ω (рисунки 2б).

Топология элементной сетки численных моделей включает слои когезионных элементов, направление которых совпадает с направлением слоистости, а также набор когезионных и сплошных

элементов, которые заполняют внутренний слой между двумя слоями когезионных элементов. Расположение элементов внутреннего слоя преимущественно должно быть неупорядоченным. Количество сплошных элементов по толщине внутреннего слоя, как показали численные эксперименты, должно быть не менее трех. Расстояние между слоями когезионных элементов с теоретической точки зрения определяется толщиной элементарного слоя. Для глинистых пород такое условие не может быть соблюдено даже на уровне образца, и тем более на уровне подземного сооружения. Однако, результаты исследований показали, что расстояние между двумя слоями когезионных элементов связаны с размерами моделируемого объекта и, начиная с определенной величины, больше не оказывают влияния на результаты расчетов и определяются для каждой конкретной геомеханической задачи отдельно.

Степень анизотропии прочностных свойств регулируется через параметр анизотропии A_r , который в общем виде показывает соотношение между показателем прочности перпендикулярно и параллельно слоистости.

Апробация предложенного метода прогноза деформаций и разрушения слоистых сред выполнялась на основании сравнения результатов численного моделирования и испытания образцов аргиллитоподобных глинистых пород (рисунок 3), а также с аналитическими решениями, полученными другими исследователями в рамках механики разрушения твердого тела.

Возможность использования предложенного метода для прогноза геомеханических процессов в окрестности подземного сооружения выполнялась на основании сравнения с известным аналитическим решением упругопластической задачи, полученным А.Г. Протосеней для выработки кругового очертания. Для сопоставимости результатов решение данной задачи в рамках предложенного метода было несколько упрощено, процесс повреждения когезионных связей, при достижении критерия прочности был заменен на идеально пластическое течение. Результаты сравнения показали, что размер зоны предельного состояния в окрестности породного обнажения кругового очертания качественно и количественно совпадает с результатами

аналитических расчетов. Выполненные верификационные расчеты позволяют говорить о корректности реализации теоретических подходов в численных моделях в рамках метода дискретно-сплошной среды и возможности использования данного метода для решения практических задач.

В соответствии с расчетной схемой, представленная на рисунке 4а, выполнялась разработка численной модели. При создании модели помимо стандартных граничных условий принятых при решении задач геомеханики, на внешнем контуре создавался буферная зона, для исключения отражения сейсмических волн от внешних граница модели, а граничные условия формулировались таким образом, чтобы минимизировать возникновение инерционных сил. Принципиальная схема зоны предельного состояния в окрестности породного обнажения, расположенного в слоистой среде, полученная на основании расчетов выполненных в рамках метода конечно-дискретных элементов приведена на рисунке 4б. Полученные результаты качественно совпадают с наблюдениями, полученными при строительстве подземных сооружений в твердых аргиллитоподобных глинистых породах (Санкт-Петербургский метрополитен, подземная лаборатория во Франции на участке строительства подземного хранилища радиоактивных отходов).

Таким образом, применение метода конечно-дискретных элементов позволяет изучать процессы деформирования и разрушения слоистых сред, вызванные формированием трещин отрыва и сдвига, и выполнять прогноз развития зон предельного состояния, а также геомеханических процессов, которые могут привести к потере устойчивости породного обнажения и обрушению пород. Применение других численных методов анализа, для решения данного класса задач невозможно или весьма ограничено.

2. Прогноз деформаций в окрестности подземного сооружения, вызванных его строительством в слоистых породных массивах, и оседания земной поверхности должен выполняться на основании геомеханической модели среды, учитывающей анизотропию механических свойств, а также влияние достигнутого

уровня напряжений и деформаций на ее механические характеристики.

Прогноз деформаций земной поверхности при строительстве подземных сооружений традиционно выполняется с ограничением размера сжимаемой толщи относительно поверхности рассматриваемого сооружения. Такой подход вносит условности в создание численных моделей, а для подземных сооружений сложной пространственной конфигурации не всегда применим. Искусственное ограничение на размер сжимаемой толщи можно убрать за счет введения в геомеханическую модель среды уравнений, которые бы учитывали влияние напряженного состояния и достигнутых деформаций на ее жесткость, что может быть реализовано через переменный модуль сдвига (Т. Бенц) или зависимость вязкости среды от действующих касательных напряжений (А.Г. Шашкин).

Изучение механизма деформирования твердых аргиллитоподобных глинистых пород было выполнено в лабораторных условиях на образцах протерозойской глины, подготовка которых осуществлялась из монолитов, отобранных из забоев строящихся станций Санкт-Петербургского метрополитена.

Анализ результатов лабораторных испытаний образцов протерозойской глины в условиях одноосного сжатия позволил установить следующее. Нелинейная зависимость между напряжениями и деформациями установлена на начальной стадии деформирования образца в диапазоне очень малых - малых деформаций ($2 \cdot 10^{-6}$ - $2 \cdot 10^{-4}$ д.е.) и на заключительном участке допредельной стадии деформирования. Коэффициент анизотропии деформационных свойств, выраженный через отношение модуля деформации параллельно слоистости к модулю деформации перпендикулярно слоистости, равен 2.05. Коэффициент анизотропии деформационных свойств, выраженный через отношение модуля упругости параллельно слоистости к модулю упругости перпендикулярно слоистости, равен 1.91. Отношение модуля упругости к модулю деформации протерозойской глины в направлении перпендикулярно и параллельно слоистости соответственно равно 2.20 и 2.06.

В диапазоне малых деформаций наблюдалось нелинейное поведение глинистых пород (рисунок 5), которое удобно представить в виде зависимости относительного касательного модуля деформаций (отношение фактического модуля деформации к модулю деформации на верхней границе рассматриваемых относительных продольных деформаций) от достигнутых продольных относительных деформаций. Относительный касательный модуль деформаций имеет наибольшее значение в начальной стадии деформирования с постепенным его уменьшением до постоянного значения, соответствующего модулю деформации при величине напряжений, равных 50% от предела прочности. При этом начальное значение модуля деформации отличалось от модуля деформации на уровне 50% от предела прочности примерно в 4-7 раз. Граничная величина деформаций, после которой касательный модуль деформации в диапазоне малых деформаций не изменяется, приблизительно равна 0.0002-0.00025 долей единиц.

Результаты обработки трехосных испытаний протерозойских глин представлены в виде диаграмм изменения модуля деформации от минимальных главных напряжений (рисунок 6). Из представленных зависимостей видно, что при увеличении напряжений, способствующих обжатию пород, показатели деформационных свойств возрастают. Данный эффект характерен как для испытаний, проводимых в направлении перпендикулярно слоистости, так и для испытаний в направлении параллельно слоистости. Так, повышение минимальных главных напряжений с 0.5 до 5.0 МПа привело к увеличению модуля деформации в 2.2 раза в направлении перпендикулярно слоистости, в 1.35 раза в направлении параллельно слоистости.

Обобщая представленные выше результаты, можно отметить, что взаимосвязь между средними напряжениями и модулем деформации протерозойских глин может быть достаточно хорошо описана следующим общепринятым аналитическим выражением

$$E_0 = E_0^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^n, \quad (2)$$

где E_0^{ref} –модуль деформации, полученный при средних напряжениях равных p^{ref} ; n – степенной показатель, который характеризует взаимосвязь между средними напряжениями и модулем деформации.

Параметры уравнения c и φ соответствуют огибающей прочности в условиях трехосного сжатия. Показатель n для протерозойских глин в направлении перпендикулярно слоистости изменяется от 0.70 до 0.75, параллельно слоистости от 0.30 до 0.35.

Таким образом, можно отметить, что характерная особенность, присущая слабым грунтам, уменьшать жесткость по мере накопления деформаций формоизменения и увеличивать ее с увеличением средних напряжений присуща и твердым аргиллитоподобным глинистым породам. Параметры аналитической зависимости, могут быть уточнены по мере накопления результатов лабораторных испытаний.

Достоверность прогноза деформаций породного массива в окрестности подземных сооружений и оседания земной поверхности базируется на способности модели деформирования геоматериала адекватно представлять механическое поведение рассматриваемой среды, численной модели - учитывать конструктивные и технологические их особенности, качество исходных данных и другие факторы. Основное внимание должно быть уделено модели поведения среды. Для твердых аргиллитоподобных глинистых пород такими особенностями являются: изменение деформационных свойств в диапазоне очень малых - малых деформаций; зависимость деформационных свойств от достигнутых средних напряжений; естественная анизотропия деформационных свойств на всех стадиях деформирования; естественная и деформационная анизотропия прочностных свойств.

Наиболее полно представленные выше требования к модели поведения геоматериала можно реализовать в рамках концепции многослойной среды (Multilaminate model), где процесс деформирования породы рассматривается на локальных площадках. Данная концепция достаточно полно представлена в работах О. Зенкевича, А.Г. Оловянного, С. Witafsky и др. Согласно концепции многослойной среды, порода рассматривается как дискретное тело, которое содержит бесконечное количество частиц/кластеров, между которыми действуют

контактные силы, а сами частицы могут обладать связями между собой. Когда нагрузка прикладывается к породе, напряжения на контакте между частицами увеличиваются, что приводит к их деформированию. Если напряжения превышают предельное значение, связи между частицами нарушаются, а у самих частиц появляется возможность перемещаться относительно друг друга, что вызывает развитие пластических деформаций. Этот процесс и рассматривается в рамках концепции многослойной среды.

Как было показано в работах Y. Nicheg глинистые породы на микроуровне представляют собой набор частиц, объединенных в кластеры, взаимодействие между которыми можно представить через набор контактирующих поверхностей. Тогда, уравнения деформирования среды справедливо формировать на локальных площадках интегрирования (контактных площадках). Поскольку деформации рассчитываются на каждой площадке интегрирования и их величина зависит от достигнутых напряжений и деформаций, можно в явном виде учитывать деформационную анизотропию механических свойств среды без введения каких-либо дополнительных искусственных параметров. Естественная анизотропия, которая характеризует различие в свойствах среды по направлениям, также может быть легко учтена в модели за счет задания на начальный момент времени механических параметров среды для каждой локальной площадки интегрирования.

В работе рассмотрена реализация нескольких моделей поведения слоистой среды, которые отличаются возможностью учета различных аспектов механического поведения таких сред и могут быть использованы для решения разных классов задач. Все модели поведения среды сформулированы в рамках теории нелинейной упругости или упругопластического течения и представляют собой набор уравнений для описания деформирования слоистой среды. Модели отличаются с точки зрения расчета упругих деформаций, которые могут быть определены либо на глобальном, либо на локальном уровнях, в то время как пластические деформации всегда определяются на локальном и затем уже суммируются для получения полных пластических деформаций. Таким образом, часть механического поведения среды (только упругие или только пластические деформации) или

полное механическое поведение среды (упругие и пластические деформации) определяется на локальном уровне в рамках концепции многослойной среды.

При освоении подземного пространства мегаполисов прогноз геомеханических процессов может быть выполнен с разной степенью детализации в зависимости от рассматриваемой задачи. Так, например, при определении размеров зоны предельного состояния достоверный прогноз деформаций породного контура, а тем более деформаций земной поверхности не является приоритетным. Таким образом, нелинейное деформирование материала в диапазоне очень малых – малых деформаций можно не рассматривать, и это не скажется на точности прогноза. В то же время, прогноз деформаций земной поверхности, при известных деформациях породного контура, можно

Таблица 2 – Варианты моделей деформирования твердых аргиллитоподобных глинистых пород

Наименование модели	Схема расчета упругих деформаций	Схема расчета пластических деформаций	Возможная область практического применения
Изотропная нелинейно-деформируемая среда (ИН)	Деформации определяются на глобальном уровне. Линейная связь между напряжениями и деформациями. Среда изотропная.		Прогноз деформаций земной поверхности при известных величинах смещения породного контура подземного сооружения и строительстве подземного сооружения преимущественно в изотропной среде
Анизотропная нелинейно-деформируемая среда (ТН)	Деформации определяются на локальном уровне. Нелинейная связь между напряжениями и деформациями. Среда трансверсально-изотропная		Прогноз деформаций земной поверхности при известных величинах смещения породного контура подземного сооружения и строительстве подземного сооружения преимущественно в анизотропной среде

Продолжение таблицы 2

Изотропная линейно-деформируемая среда с анизотропией прочностных свойств (ИЛАП)	Деформации определяются на глобальном уровне. Линейная связь между напряжениями и деформациями. Среда изотропная	Деформации определяются на локальных площадках. Учитывается естественная (слоистая среда) и деформационная анизотропия прочностных свойств на локальных площадках. Среда анизотропная. Начальное распределение анизотропии прочностных свойств задается через функцию распределения или микроструктурный тензор.	Прогноз формирования зон предельного состояния в окрестности подземных сооружений на стадии их строительства. Определение устойчивости лба забоя тоннелей/устойчивости породных обнажений
Изотропная нелинейно-деформируемая среда с анизотропией прочностных свойств (ИНАП)	Деформации определяются на локальном уровне. Нелинейная связь между напряжениями и деформациями. Среда изотропная		Прогноз деформаций земной поверхности при строительстве подземного сооружения в слоистых средах с анизотропией прочностных свойств
Трансверсально-изотропная линейно-деформируемая среда с анизотропией прочностных свойств (ТЛАП)	Деформации определяются на глобальном уровне. Линейная связь между напряжениями и деформациями. Среда трансверсально-изотропная		Прогноз развития деформаций в породном массиве в окрестности подземных сооружений, расположенных в слоистых средах с ярко выраженной анизотропией деформационных свойств. Определение нагрузки на обделку подземных сооружений
Трансверсально-изотропная нелинейно-деформируемая среда с анизотропией прочностных свойств (ТНАП)	Деформации определяются на локальном уровне. Нелинейная связь между напряжениями и деформациями. Среда трансверсально-изотропная		Все, что представлено выше, и прогноз деформаций земной поверхности при строительстве подземного сооружения в слоистых средах с ярко выраженной анизотропией деформационных свойств.

выполнить, не рассматривая детально процесс пластического деформирования породного массива в окрестности подземного сооружения. Однако в этом случае необходимо учесть влияние достигнутых напряжений и деформаций на деформационные свойства пород. При прогнозировании деформаций породного массива в окрестности подземного сооружения и деформаций земной поверхности в рамках единой численной модели необходимо учитывать особенности механического поведения породы во всем рассматриваемом диапазоне деформаций. Следовательно, в зависимости от принятой схемы расчета, прогноз деформаций которой может быть выполнен как в рамках единой численной модели, так и в рамках нескольких сопряженных между собой моделей, выбирается и модель деформирования геоматериала. Для предложенных вариантов моделей среды (таблица 2), представлены области их применения для практических геомеханических расчетов. Так как повышение функционала модели поведения среды всегда увеличивает требования к исходным данным, а также объем вычислительных операций, предложенный модульный подход позволяет выбрать сбалансированное решение для рассматриваемой практической задачи.

Общий алгоритм численной реализации геомеханических моделей среды представлен на рисунке 7. Взаимосвязь между напряжениями $\sigma_{loc,i}$ и деформациями $\epsilon_{loc,i}$ на локальном уровне осуществляется через локальную матрицу податливости $C_{loc,i}$

$$\sigma_{loc,i} = C_{loc,i} \epsilon_{loc,i}, \quad (3)$$

при этом вектор напряжений на локальном уровне складывается из напряжений, которые отвечают за изменение объема среды $\sigma_{loc,i}^{vol}$ и изменение формы среды $\sigma_{loc,i}^{dev}$

$$\sigma_{loc,i} = \sigma_{loc,i}^{vol} + \sigma_{loc,i}^{dev}.$$

Количество компонент локальных векторов напряжений и деформаций зависит от типа среды. Так, для изотропной среды их четыре, для трансверсально-изотропной среды шесть. Тип среды определяет и значение коэффициентов локальной матрицы податливости.

Взаимосвязь между деформационными свойствами на глобальном и локальном уровнях для трансверсально-изотропной нелинейно-деформируемой среды осложняется тем, что нормальные напряжения и сдвиговые деформации на локальном уровне связаны друг с другом. При разработке анизотропного материала допущение, что нормальные деформации вызваны только нормальными напряжениями, а касательные деформации вызваны только касательными напряжениями и значение коэффициентов матрицы податливости за пределами главной диагонали равны нулю, не могут быть приняты к рассмотрению. Формирование локальной матрицы податливости для трансверсально-изотропной среды выполнено по методике, изначально предложенной Р. Теосатис и G. Cusatis, в дальнейшем, адаптированной для концепции многослойной среды В. Schadlich. Она заключается в спектральном разложении глобальной матрицы податливости среды с ее последующим проецированием на локальные плоскости интегрирования. Такой метод позволяет напрямую получить локальные матрицы податливости на i -й площадке интегрирования.

Приращение пластических деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}_{loc,i}^p$ на i -й локальной площадке интегрирования определяются как

$$\begin{aligned} d\boldsymbol{\varepsilon}_{loc,i}^p &= d\lambda_i \frac{\partial \mathbf{g}_i}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{loc,i}}; \\ d\lambda_i &= \frac{\frac{\partial f_{d,i}}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{loc,i}} \mathbf{C}_{loc,i}^{-1} d\boldsymbol{\varepsilon}_{loc,i}}{\frac{\partial f_{d,i}}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{loc,i}} \mathbf{C}_{loc,i}^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}_{d,i}}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{loc,i}} + A_i}; \\ A_i &= \frac{\partial f_{d,i}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_{loc,i}^p} \frac{\partial \mathbf{g}_{d,i}}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{loc,i}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где λ_i – пластический множитель; $\mathbf{C}_{loc,i}^{-1}$ – матрица упругости; $\boldsymbol{\sigma}_{loc,i}$ – вектор напряжений; A_i – параметр упрочнения; $d\boldsymbol{\varepsilon}_{loc,i}$ – приращение полных деформаций.

Частные производные по функции пластического течения $f_{d,i}$ и пластического потенциала $\mathbf{g}_{d,i}$, для принятого условия прочности Кулона - Мора и неассоциированного закона пластического течения следующие

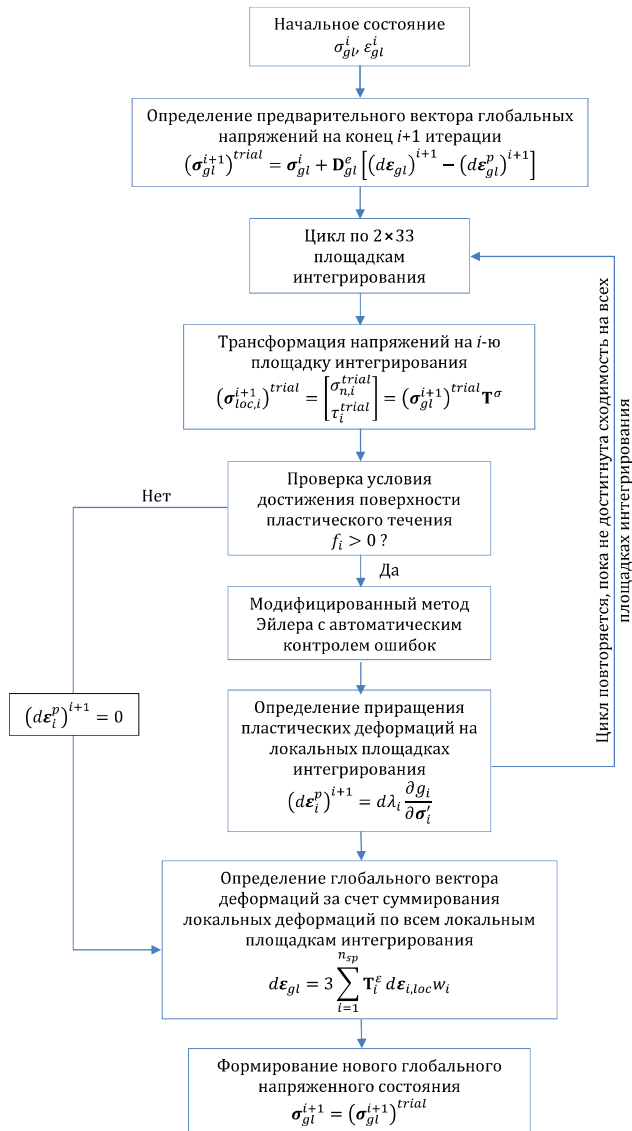


Рисунок 7 – Алгоритм численной реализации геомеханической модели в рамках концепции многослойной среды

$$\frac{\partial f_{d,i}}{\partial \sigma_{loc,i}} = \left(\frac{\frac{\tan \varphi_i}{\tau_{s,i}}}{\sqrt{\tau_{s,i}^2 + \tau_{t,i}^2}}; \frac{\frac{\tan \psi_i}{\tau_{s,i}}}{\sqrt{\tau_{s,i}^2 + \tau_{t,i}^2}} \right). \quad (5)$$

Численная реализация моделей поведения среды выполнена на основании явного модифицированного метода интегрирования уравнений Эйлера с автоматическим контролем ошибок.

Представленные модели являются моделями общего вида, которые позволяют учесть естественную структурную нарушенность пород. При этом особенность формулировки модели позволяет учесть структурную нарушенность как на глобальном уровне, так и на локальных площадках интегрирования. В работе оценка влияния трещиноватости принята по методике Р.Э. Дашко, которая была разработана непосредственно для оценки структурной нарушенности протерозойских глин.

Апробация предложенной модели выполнена на основании сопоставления прогнозных значений деформаций земной поверхности с результатами наблюдения за оседанием земной поверхности, полученными при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации (станции метрополитена, пересадочные комплексы). Рассматривались станции метрополитена пилонного типа (“Обводный канал”, “Бухаресткая”, “Волковская”) и колонного типа (“Адмиралтейская”, “Международная”), при строительстве которых был организован детальный геотехнический мониторинг за оседанием земной поверхности. Результаты сравнения прогнозных и фактических замеров оседания земной поверхности над участками строительства станций метрополитена, позволяют говорить о их хорошей сходимости (рисунок 8). Апробация предложенного в работе подхода выполнялась на основании сравнения прогнозных и натурных данных оседания земной поверхности по четырем уже построенным станциям метрополитена.

Разработанные модели поведения твердых аргиллитоподобных глинистых пород позволяют учесть основные особенности поведения

таких сред, повысить достоверность расчета геомеханических процессов, развивающихся в окрестности подземного сооружения, расположенного в таких породах, и снизить влияние параметров численных моделей на прогнозируемые значения деформаций земной поверхности.

3. Прогноз осадок земной поверхности при строительстве сложных пространственных сооружений должен выполняться с учетом стадийности строительства, при этом высокая информационная детализация технологии строительства обеспечивается за счет применения локальных и глобальной моделей, взаимосвязь между которыми осуществляется через передачу расчетных данных о напряжениях и деформациях участков породного массива на всех рассматриваемых стадиях строительства.

Величина деформаций земной поверхности и конфигурация мульды оседания зависят от многих факторов, из которых наиболее важными являются глубина заложения, размеры и форма поперечного сечения подземного сооружения, принятая технология строительства подземного сооружения, геологические и гидрогеологические условия строительства и особенности механического поведения породы, влияние которых легко учесть при выполнении численного моделирования. В то же время учет последовательности строительства сложных пространственных подземных сооружений, таких как станционные комплексы метрополитенов, и учет особенностей механического поведения породы представляются интересными и не до конца решенными вопросами.

Численное моделирование строительства подземных сооружений должно выполняться с учетом особенностей технологии их строительства, что позволит детально отслеживать траекторию изменения напряженного состояния вмещающего породного массива и элементов несущих конструкций крепи, изменение механических свойств, учитывать момент ввода обделки в работу и т.д. Для этого необходимо выполнить разделение рассматриваемой задачи на этапы, количество которых зависит от необходимой детализации при учете особенностей ведения строительных работ.

В настоящей работе основное внимание уделено альтернативному подходу к задаче прогноза деформаций земной поверхности при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации. Такое решение выполняется за счет создания нескольких численных моделей, между которыми формируется двухсторонняя связь (рисунок 9а). Предварительно выполняется разделение исследуемого объекта на отдельные подземные сооружения таким образом, чтобы их взаимное влияние было максимально ограниченным. После этого определяется последовательность строительства таких подземных сооружений в соответствии с технологической схемой строительства всего объекта в целом. Для каждого из сооружений разрабатываются локальные численные модели с высокой детализацией моделирования технологии их строительства (рисунок 9б). Для сооружений, имеющих большую протяженность и незначительно изменяющих свою конфигурацию по длине, допустимо рассматривать строительство только части сооружения по длине.

Далее выполняется построение численной модели всей станции метрополитена и породного массива (глобальная модель). В глобальной модели процесс строительства станции моделируется укрупненно, выделяются важнейшие стадии строительства и выполняется прогноз деформаций земной поверхности на момент окончания каждой стадии. Обычно за стадию строительства принимается сооружение одного из основных элементов станции, например станционного тоннеля, камеры, вспомогательного тоннеля, участка сопряжения тоннелей и т.д. Такой подход позволяет значительно сократить продолжительность расчета, так как количество расчетных этапов обычно не превышает 20.

Взаимосвязь между локальными моделями и глобальной моделью осуществляется в двух направлениях. На начальном этапе с учетом геологического разреза в районе строительства и геометрии станции метрополитена создается глобальная модель и формируется начальное поле напряженного состояния. Далее выполняется построение локальной численной модели строительства одного из сооружений станции метрополитена. Условия на границах локальной модели, начальное напряженное состояние и фактические (с учетом достигну-

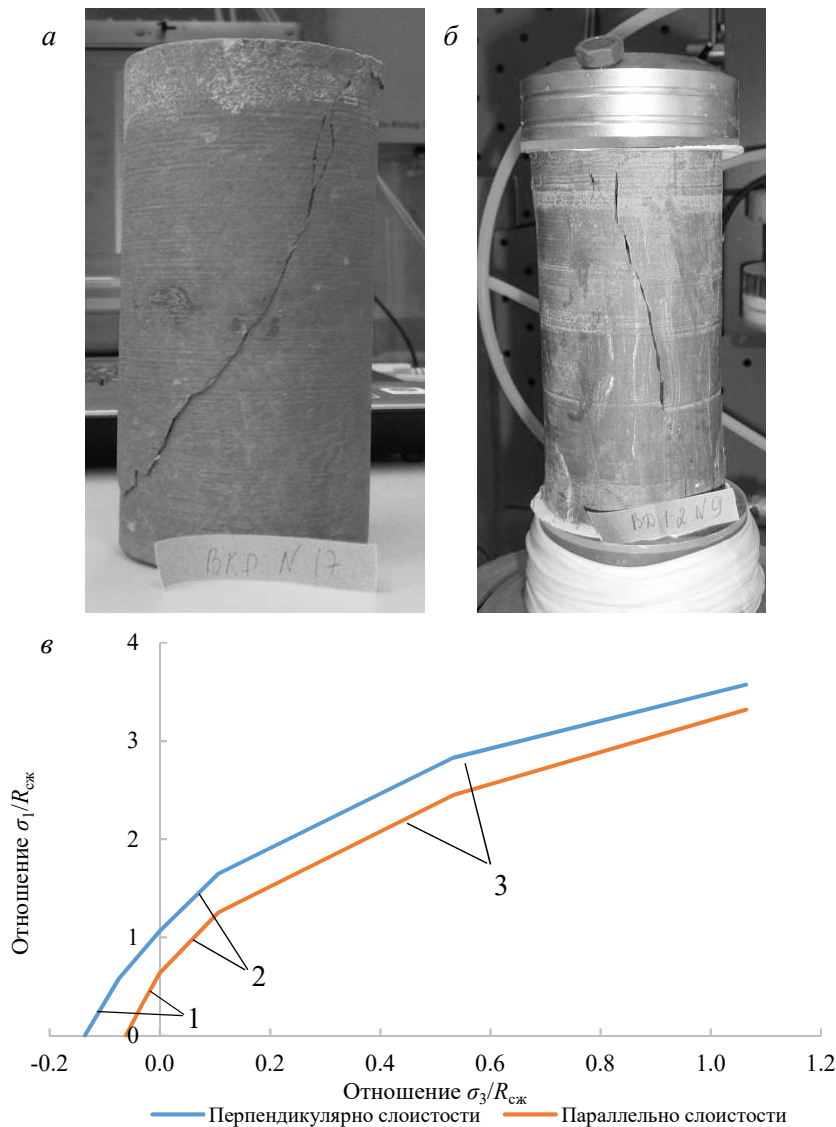


Рисунок 1 – Характерная форма разрушения образцов протерозойской глины в направлении перпендикулярно слоистости (а), параллельно слоистости (б) и паспорт прочности протерозойской глины (в) в осях главных напряжений (σ_1 , σ_3 , - главные максимальные и минимальные напряжения; $R_{сж}$ - прочность при одноосном сжатии): 1-3 – характерные участки огибающей

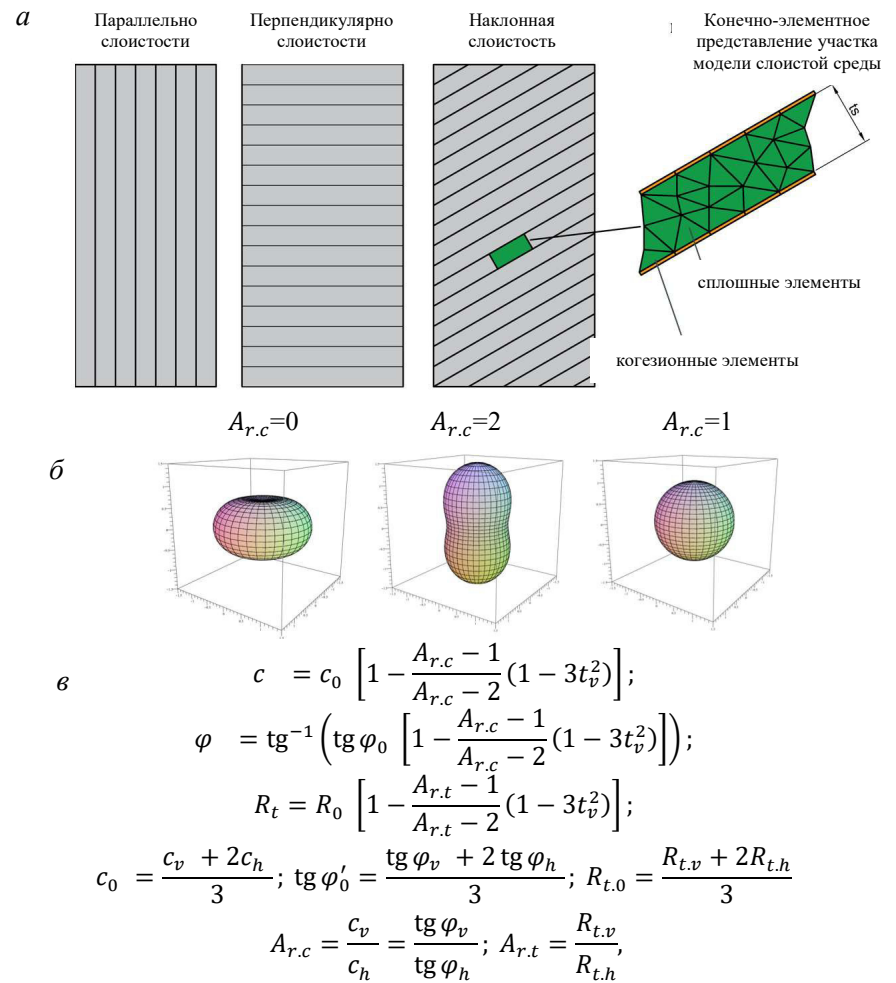


Рисунок 2 – Задание естественной структурной анизотропии прочностных свойств: а – геометрическое представление численной модели слоистой среды; б – графическое представление функции распределения; в – функция распределения. c_v , c_h - сцепление при испытании образца соответственно перпендикулярно и параллельно слоистости; φ_v , φ_h - угол внутреннего трения при испытании образца соответственно перпендикулярно и параллельно слоистости; $A_{r.c}$, $A_{r.t}$ - показатель анизотропии прочности соответственно при действии касательных и нормальных растягивающих напряжений; t_s - расстояние между слоями когезионных элементов

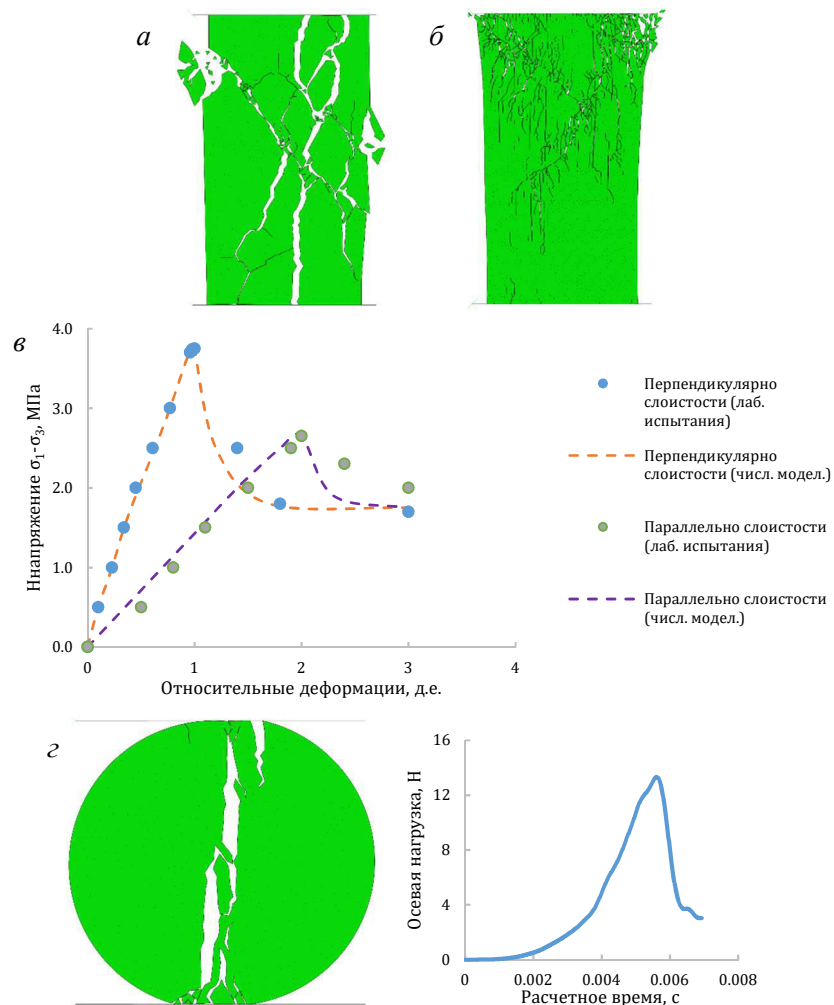


Рисунок 3 – Моделирование разрушения образцов протерозойской глины в рамках дискретно-сплошного представления среды: *а, б* – испытания в условиях одноосного сжатия в направлении перпендикулярном и параллельном слоистости; *в* - диаграммы деформирования породы полученные на основании лабораторных испытаний и численного моделирования в условиях трехосного сжатия; *г* – разрушение образца сжатием по образующим.

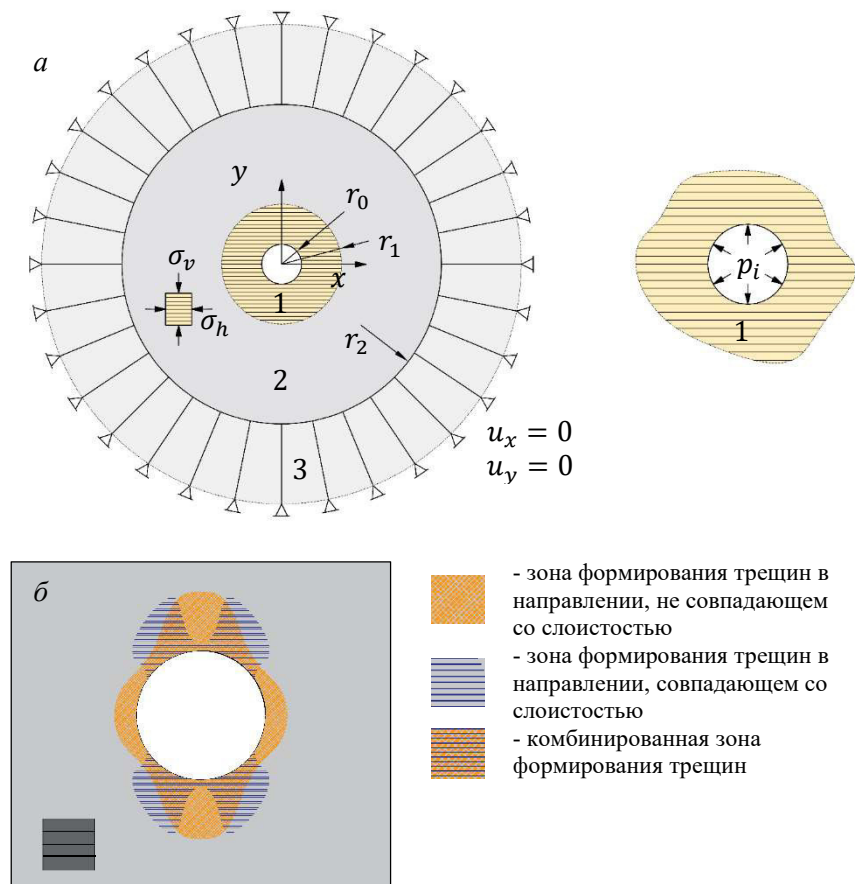


Рисунок 4 – Прогноз зоны предельного состояния в окрестности подземного сооружения, расположенного в слоистых средах: *а* – постановка задачи; *б* – формирование зоны предельного состояния (зоны трещиноватости) при гидростатическом поле напряженного состояния; 1 – область конечно-дискретных элементов; 2 – область конечных элементов; 3 – буферная область конечных элементов; r_0 – радиус породного обнажения; r_1 – радиус зоны конечно-дискретных элементов; r_2 – радиус зоны конечных элементов; σ_v – вертикальные напряжения; σ_h – горизонтальные напряжения; p_i – внутреннее давление.

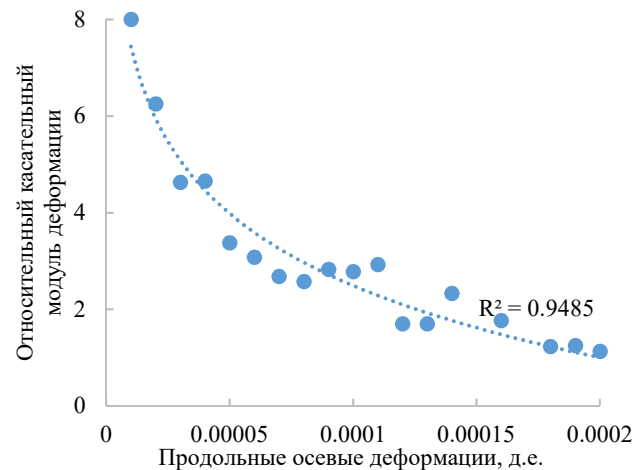


Рисунок 5 – Изменение касательного модуля деформации протерозойской глины в зависимости от достигнутой величины относительных продольных деформаций (приведена типовая зависимость)

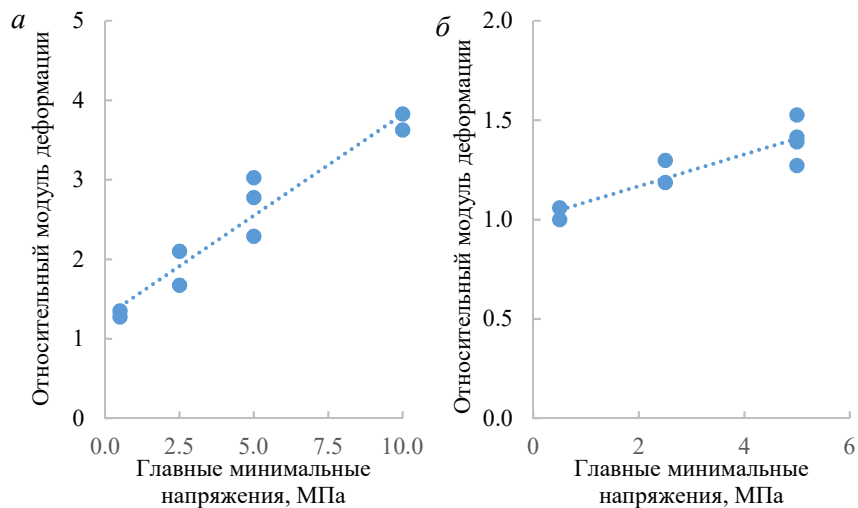


Рисунок 6 – Зависимость модуля деформации породы от всестороннего обжатия: *а* – испытания в направлении перпендикулярно слоистости; *б* – в направлении параллельно слоистости

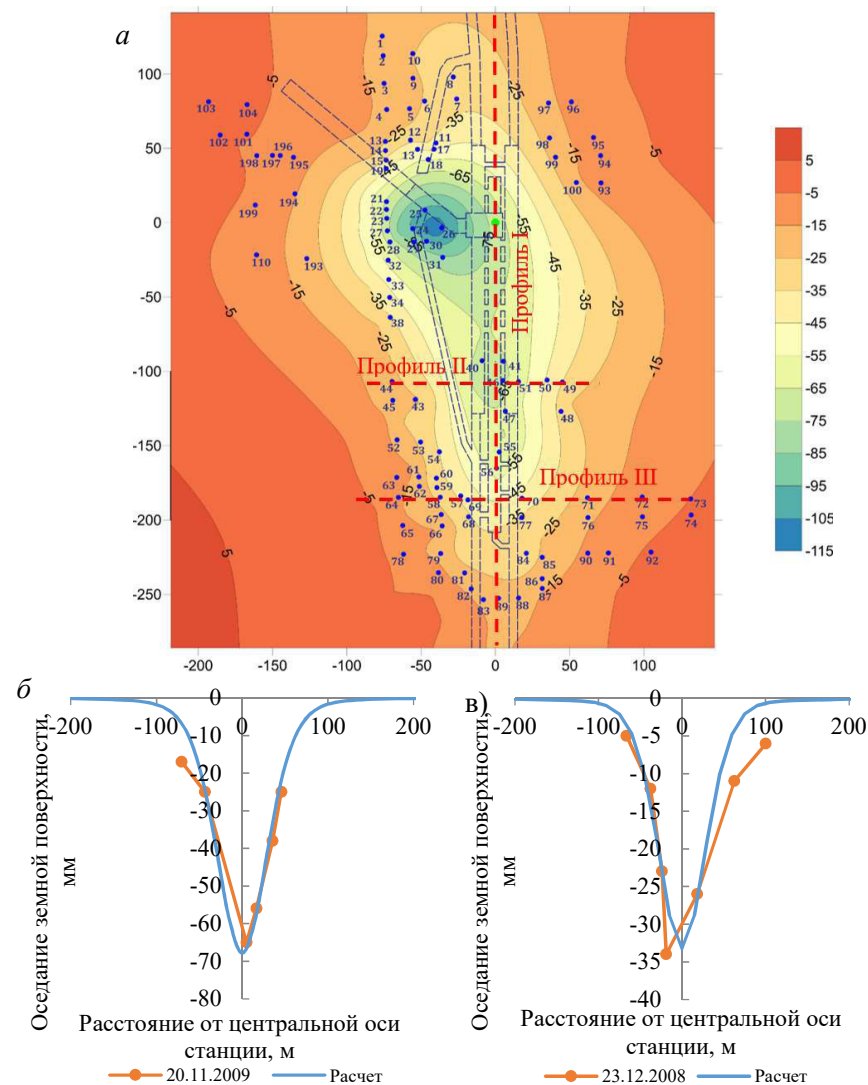


Рисунок 8 – Сопоставление прогнозных значений оседания земной поверхности с результатами натурных наблюдений: *а* – картина оседания земной поверхности над станцией метрополитена (мм); *б* – оседания по профилю II-II; *в* – оседание по профилю III-III

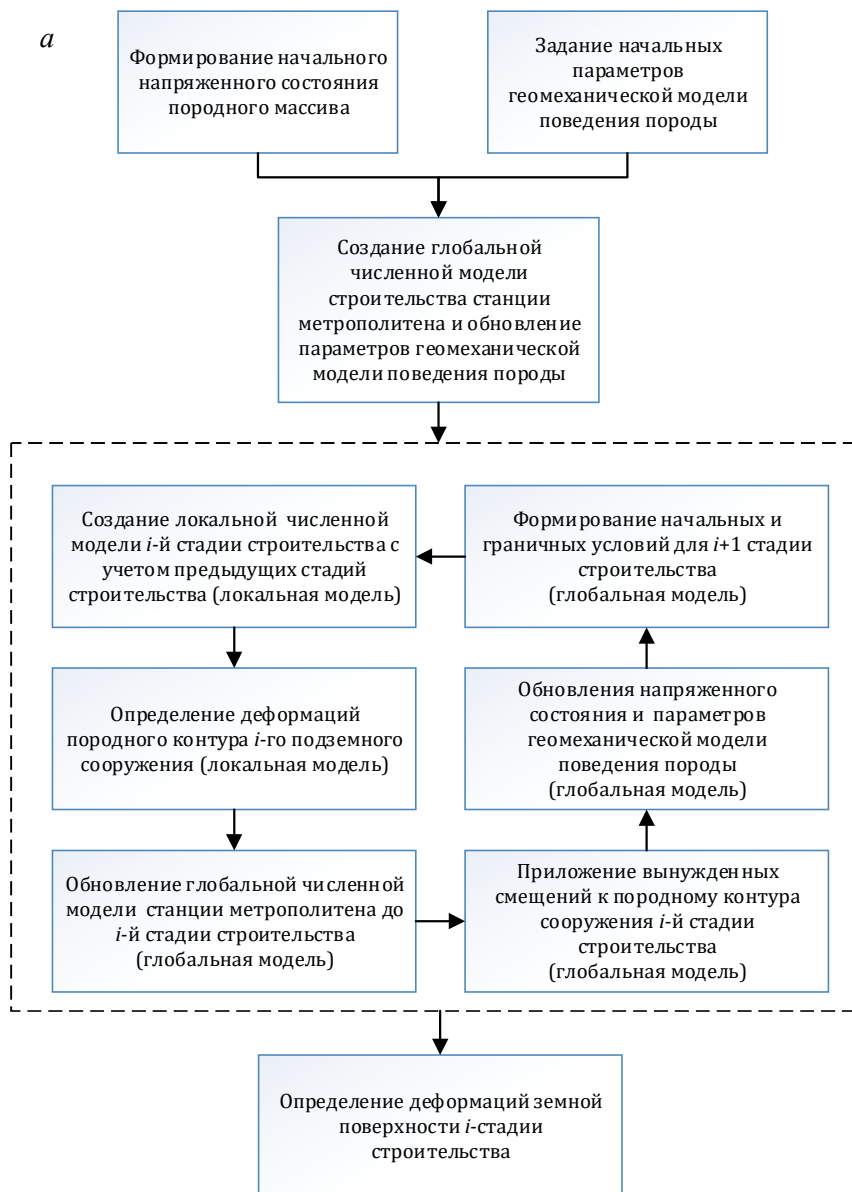
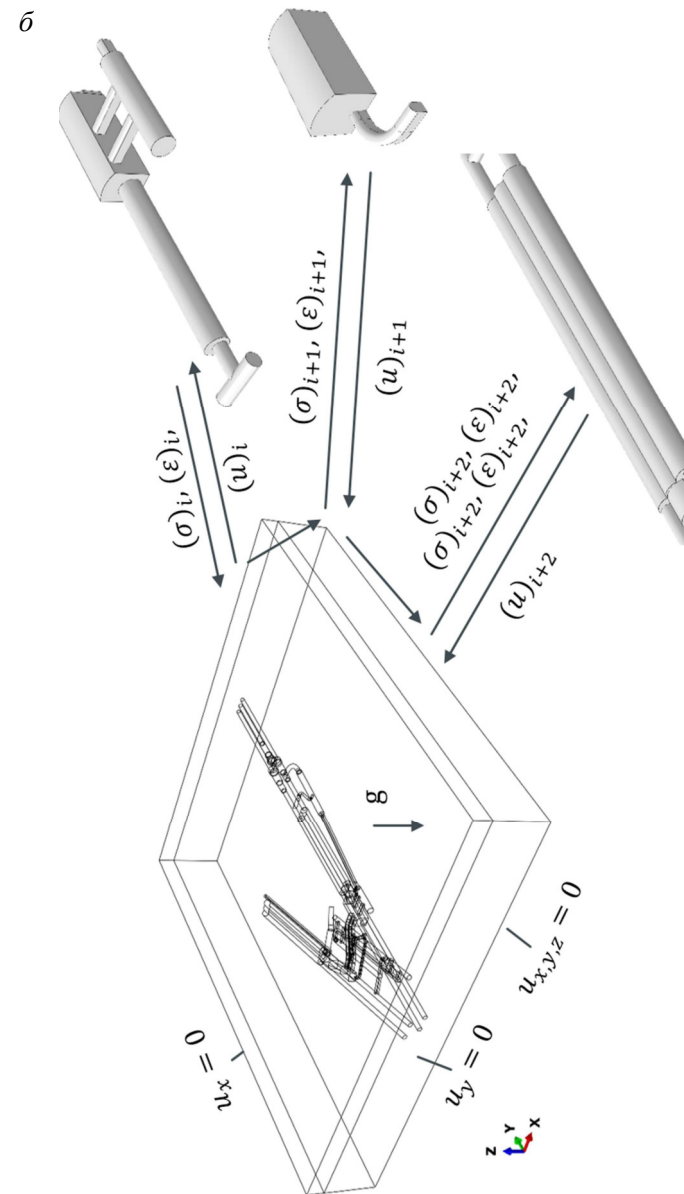


Рисунок 9 – Принципиальная схема проведения численного моделирования с целью прогноза деформаций земной поверхности (а)



Продолжение рисунка 9 – схема взаимосвязи между глобальной и локальными численными моделями (последовательность строительства показана условно) (б)

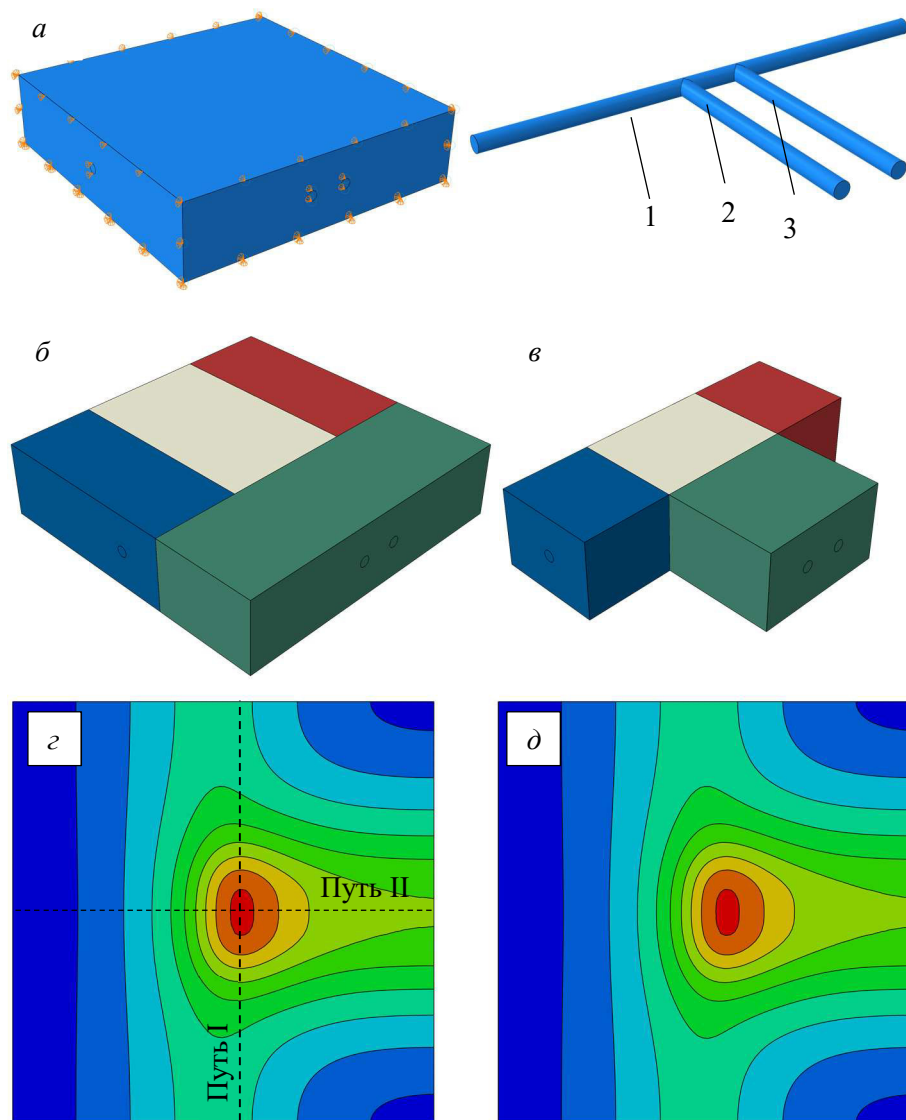
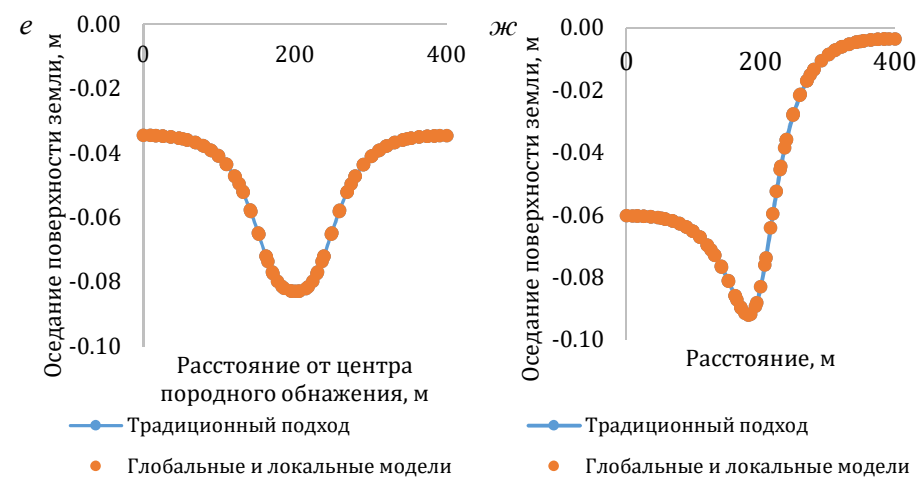


Рисунок 10 – Геометрическое представление модели взаимодействующих тоннелей (а), разделение глобальной модели на расчетные участки (б) и на участки, на основе которых формируются локальные модели (в) и развитие деформаций земной поверхности, полученное на основании традиционного подхода (г) и разделения на глобальную и локальные модели (д): 1-3 – тоннели.



Продолжение рисунка 10 - диаграммы развития вертикальных деформаций по пути I (е) и по пути II (ж)

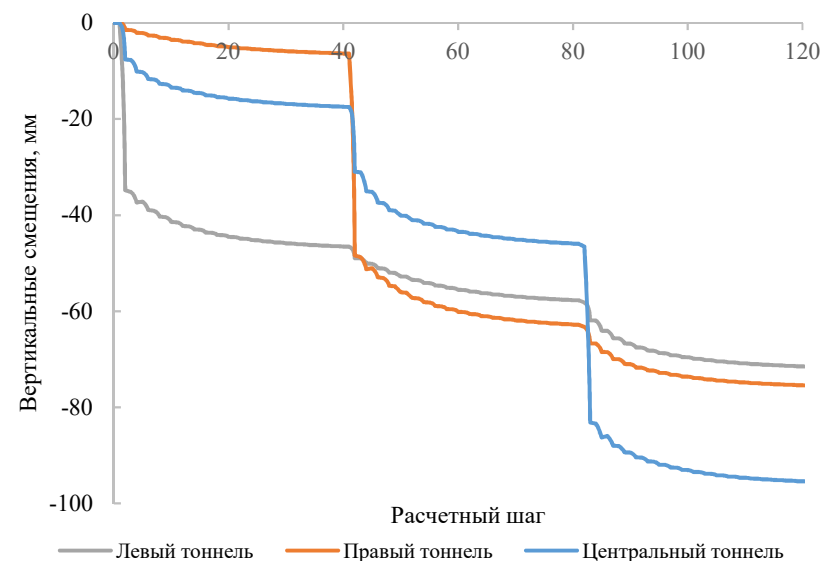


Рисунок 11 – Пример диаграммы развития вертикальных смещений, полученных на основании локальной модели, в свде станционных тоннелей метрополитена по мере их строительства

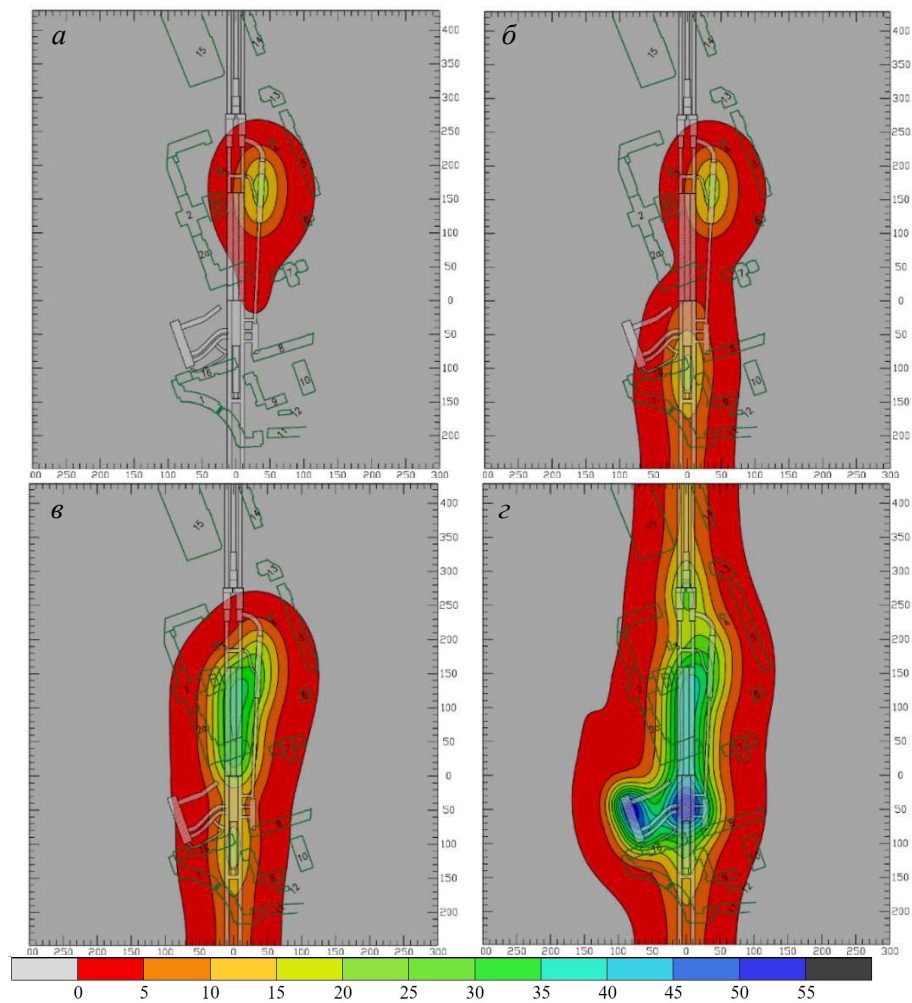


Рисунок 12 – Прогноз оседания земной поверхности (мм) на различных стадиях сооружения пересадочного узла станций метрополитена: *a* – строительство выработок околостовольного двора; *б* – строительство тягово-понижительной подстанции и примыкающих перегонных тоннелей; *в* – строительство левого станционного тоннеля; *г* - после завершения строительства всех подземных сооружений

тых напряжений и деформаций) механические свойства пород переносятся из глобальной модели. По результатам численного моделирования строительства одного из сооружений станции метрополитена (локальная модель) определяются радиальные и тангенциальные смещения контура подземного сооружения. Эти смещения прикладываются в виде вынужденных смещений к контуру подземного сооружения в рамках глобальной модели. Одновременно с этим выполняется «отключение» конечных элементов, отвечающих за породу внутри подземного сооружения. Таким образом, после завершения данной процедуры обновляются напряженное состояние и параметры механических свойств породы глобальной модели, с учетом уже построенного подземного сооружения. Эти параметры в дальнейшем используются в качестве начальных и граничных условий для следующей локальной модели. Далее процесс повторяется и рассматривается строительство следующего подземного сооружения в составе станции.

Пример апробации предложенной методики прогноза деформаций земной поверхности на основании разделения глобальной на локальные модели представлен на рисунке 10.

Предложенная методика прогноза деформаций земной поверхности использовалась и при обосновании технических решений и выборе оптимальных параметров технологии строительства станционных комплексов Санкт-Петербургского метрополитена (“Театральная”, “Путиловская” (рисунок 11, 12), “Горный институт”, “Шкиперская”), с целью прогноза и снижения негативного влияния объектов подземного строительства на здания, сооружения и объекты инфраструктуры, расположенные на поверхности земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в диссертационной работе исследования посвящены решению крупной научной проблемы разработки методологии проектирования подземных комплексов сложной конфигурации в пространственной постановке, базирующейся на установленных закономерностях изменения напряженно-деформированного состояния породного массива при этапном ведении горно-строительных работ с

учетом нелинейности и анизотропии сред, имеющей большое народнохозяйственное значение для освоения подземного пространства мегаполисов.

Основные результаты выполненных исследований:

1. Механизм деформирования и разрушения аргиллитоподобных глинистых пород, основанный на формировании новых или развитии существующих микротрещин, позволяет моделировать формирование макротрещин и фрагментацию породы. Математическое описание данного процесса выполнено на основании физической модели, предложенной А.Н. Ставрогиным, в рамках метода конечно-дискретных элементов, где упругие деформации описываются на уровне сплошных элементов, а формирование и развитие микротрещин – на уровне когезионных элементов.

2. Естественная анизотропия механического поведения аргиллитоподобных глинистых пород в рамках метода конечно-дискретных элементов учитывается за счет ориентации основных слоев когезионных элементов в направлении слоистости и заполнения межслоевого слоя набором из сплошных и когезионных элементов, а распределение прочности отрыву и сдвигу когезионных элементов в зависимости от направления определяется через микроструктурный тензор. Анизотропия деформационных свойств учитывается на уровне сплошных элементов через трансверсально-изотропную матрицу податливости.

3. Численные модели, разработанные в рамках предложенного метода конечно-дискретных элементов, позволяют в явном виде определять зоны трещиноватости пород, участки расслоения породы и ее фрагментации. Деформационная анизотропия, формируемая по мере накопления повреждений в рассматриваемой среде, учитывается в явном виде за счет изменения механического поведения отдельных когезионных элементов в процессе выполнения моделирования.

4. Выполненные лабораторные исследования позволили установить влияние достигнутых напряжений и деформаций на деформационные характеристики аргиллитоподобных глинистых пород. Деформационные характеристики аргиллитоподобных глини-

стых пород тем выше, чем меньше достигнутые сдвиговые деформации и чем выше средние напряжения. Установлена количественная взаимосвязь между значениями напряжений и деформаций и показателями деформационных свойств.

5. Разработанная геомеханическая модель аргиллитоподобных глинистых пород в рамках концепции многослойной среды позволяет учитывать такие важные особенности ее деформирования, как нелинейность поведения в диапазоне малых деформаций, зависимость деформационных свойств от достигнутых напряжений и деформаций, естественная и деформационная анизотропия механических свойств. Модель разработана в рамках теории пластического течения, а сами напряжения и деформации определяются на локальных площадках интегрирования.

6. Предложенная геомеханическая модель поведения аргиллитоподобных глинистых пород позволяет естественным образом ограничить зону активных деформаций в окрестности подземных сооружений за счет введения функциональной зависимости между деформационными свойствами и достигнутыми напряжениями и деформациями, что позволяет в рамках единой модели рассматривать объекты, зона активных деформаций в окрестности которых не совпадает и не может быть представлена единой границей.

7. Предложена методология расчета напряженно-деформированного состояния конструкций подземных комплексов сложной пространственной конфигурации при взаимодействии их с породным массивом путем разделения объекта на глобальную и локальные модели, что позволяет повысить достоверность прогноза геомеханических процессов за счет повышения степени детализации этапов строительства подземных сооружений на уровне локальных моделей, в то время как прогноз деформаций земной поверхности выполняется на уровне глобальной модели.

8. Численное моделирование и прогноз геомеханических процессов при строительстве подземных сооружений, и оценкой их влияния на элементы городской застройки и инфраструктуры являются неотъемлемой частью научно-практического сопровождения таких объектов. Применение предложенных в работе подходов с ис-

пользованием новых геомеханических моделей массивов, пространственной постановки решения задач, повышения детализации моделирования процессов строительства подземных сооружений за счет их разделения на уровни локальных моделей и глобальной модели позволит создать эффективный инструмент для снижения или предотвращения негативных последствий нового строительства на объекты существующей застройки.

9. Результаты диссертационной работы внедрены в виде разделов проектной документации на сооружение станционных комплексов Санкт-Петербургского метрополитена и в учебный процесс Санкт-Петербургского горного университета при подготовке специалистов по направлению “Горное дело” специализации “Шахтное и подземное строительство” по дисциплинам “Моделирование физических процессов в горном деле”, “Геомеханика”, “Механика подземных сооружений”, “Строительство тоннелей и метрополитенов”.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Минобрнауки России:

1. **Протосеня А.Г.** Проблемы прогноза нагрузок на обделки и устойчивость эксплуатируемых тоннелей / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев, Е.Г. Козин // Записки Горного института. 2007, том 172, с. 5-13.
2. **Карасев М.А.** Эффективное применение численных методов анализа для решения задач геомеханики / М.А. Карасев // Записки Горного института. 2010, том 185, с. 161-165.
3. **Деменков П.А.** Геомеханическая оценка поэтапного строительства пилонной станции метрополитена глубокого заложения. / П.А. Деменков, М.А. Карасев, Д.А. Потемкин // Записки Горного института. 2011, том 190, с. 220-225.
4. **Карасев М.А.** Анализ причин деформации земной поверхности и характер формирования мульды оседания, вызванной строительством транспортных тоннелей / М.А. Карасев // Записки Горного института. 2011, том 190, с. 163-171.
5. **Карасев М.А.** Численное моделирование строительства железнодорожного тоннеля щитовым комплексом в условиях плотной городской застройки / М.А. Карасев // Серия: Науки о земле. Известия Тульского государственного университета. 2011, выпуск 1, с. 282-290.
6. **Карасев М.А.** Прогноз осадки земной поверхности, вызванный строительством подземной скоростной железной дороги на участке Sants – La Sagrera / М.А. Карасев // Известия вузов. Горный журнал. 2011, № 6, с. 74–79.
7. **Протосеня А.Г.** Проектирование конструкций пилонной станции метрополитена с малоосадочной технологией строительства / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев, П.А. Деменков, Н.А. Беяков, К.П. Безродный, В.А. Маслак // Записки Горного института. 2012, том 195, с. 123-128.

8. **Карасев М.А.** Механическое взаимодействие между частицами грунта на микроструктурном уровне / М.А. Карасев // Записки Горного института. 2012, том 198, с. 202-206.

9. **Карасев М.А.** Теоретические предпосылки к созданию модели поведения грунтов, учитывающих анизотропию механических свойств / М.А. Карасев // Записки Горного института. 2013, том 204, с. 226-233.

10. **Карасев М.А.** Обоснование геомеханической модели среды для прогноза деформаций грунтового массива в окрестности глубокого котлована / М.А. Карасев, Д.А. Потемкин // Записки Горного института. 2013, том 204, с. 263-268.

11. **Карасев М.А.** Прогноз оседания земной поверхности при строительстве подземных сооружений глубокого заложения в условиях города Санкт-Петербург / М.А. Карасев // Записки Горного института. 2014, том 204, с. 248-254.

12. **Карасев М.А.** Разработка численной модели прогноза деформаций грунтового массива при строительстве полуглубленных сооружений в программном комплексе Abaqus / М.А. Карасев, А.Г. Протосеня // Основания фундаментов и механика грунтов, Springer New York LLC, 2014, №2, с. 2-6.

13. **Беляков Н.А.** Разработка численной модели прогноза предельного состояния массива с использованием критерия прочности Ставрогина / Н.А. Беляков, М.А. Карасев, А.Г. Протосеня // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015, №1, с. 3-11.

14. **Карасев М.А.** Влияние крепления лба забоя тоннеля на развитие геомеханических процессов в породном массиве. / Н.А. Беляков, М.А. Карасев, М.О. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2016, №3, с. 24-32.

15. **Протосеня А.Г.** Упругопластическая задача для выработка различных форм поперечных сечений при условии предельного равновесия Кулона / Н.А. Беляков, М.А. Карасев, А.Г. Протосеня // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016, №1, с. 71-81.

16. **Карасев М.А.** Прогноз деформаций земной поверхности при строительстве станций метрополитенов в твердых глинах. / М.А.

Карасев, Н.А. Беляков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016, №1, с. 139-155.

Монографии:

17. **Протосеня А.Г.** Механика подземных сооружений. Пространственные модели и мониторинг / А.Г. Протосеня, Ю.Н. Огородников, П.А. Деменков, М.А. Карасев, М.О. Лебедев, Д.А. Потемкин, Е.Г. Козин. СПбГУ-МАНЭБ. СПб: 2011, 355 с./54 с.

Статьи в журналах и материалах конференций:

18. **Karasev M.A.** Experimental observation and numerical simulation of tunnel lining located at different geological condition of Saint-Petersburg Metro / М.А. Karasev // Proceedings of Conference Innovations in Geoscience, geoengineering. Freiburger Forschungsforum 59. Technische Universitat Bergakademie Freiberg. 2008, pp. 272-280.

Карасев М.А. Экспериментальные наблюдения и численное моделирование развития напряженно-деформированного состояния обделки перегонных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена расположенной в различных инженерно-геологических условиях / М.А. Карасев // Труды конференции “Инновации в геонауке, геоинженерии”. 59 Фрайбергский научный форум. Технический университет Фрайберга. 2008 г. С. 272-280.

19. **Деменков П.А.** Формирование напряженно-деформированного состояния объектов при интенсивной застройке и освоении городского подземного пространства / П.А. Деменков, М.А. Карасев, Д.А. Потемкин // Gornictwoi geologia, Kwartalnik. 2010, vol. 5, pp. 159-168.

20. **Карасев М.А.** Напряженное состояние обделки транспортного тоннеля при ведении проходческих работ вблизи существующих сооружений / М.А. Карасев // “Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: труды 9-й межрегиональной научно-практической конференции”. Воркута, 2011, с. 62-67.

21. **Деменков П.А.** Оценка напряженно-деформированного состояния многофункционального подземного комплекса, совмещенного со станцией метрополитена / П.А. Деменков, М.А. Карасев, М. Jendris // Gornictwoi geologia, Kwartalnik. 2011, vol. 6, pp. 39-46.

22. **Карасев М.А.** Анализ формирования мульды оседания при строительстве тоннелей в городских условиях / М.А. Карасев,

А.Г. Протосеня, Е.А. Карасев // “Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: труды 10-й межрегиональной научно-практической конференции”. Воркута: 2012 г., стр. 123-127.

23. **Карасев М.А.** Влияние анизотропии горной породы на характер деформаций в окрестности подземных сооружений. / М.А. Карасев // “Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: труды 10-й межрегиональной научно-практической конференции”. Воркута: 2012., с. 48-52.

24. **Деменков П.А.** Численное моделирование оседания земной поверхности при строительстве станции «Волковская» Санкт-Петербургского метрополитена / П.А. Деменков, М.А. Карасев // “Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: труды 11-й межрегиональной научно-практической конференции”. Воркута: 2013, с. 37-41.

25. **Карасев М.А.** Расчет мульды оседания земной поверхности при строительстве пилонной станции метрополитена глубокого заложения / Карасев М.А., Деменков П.А. // “Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: труды 11-й межрегиональной научно-практической конференции”. Воркута: 2013, с. 76-79.

26. **Karasev M.A.** Investigating Mechanical Properties of Argillaceous Grounds in Order to Improve Safety of Development of Megapolis Underground Space. / M.A. Karasev, A.G. Protosenya, D.N. Petrov // International Journal of Applied Engineering Research. 2016, vol. 11, pp. 8849-8956.

27. **Протосеня А.Г.** Развитие методов прогноза оседания земной поверхности при строительстве подземных сооружений в условиях плотной городской застройки. / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев // Метро и тоннели. 2016, №6, с. 85-89.