

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ МГРИ-РГГРУ**

на правах рукописи

Буфеев Федор Константинович

**Моделирование оползней скольжения, приуроченных к склонам исторических природно-
технических систем, сложенных техногенными грунтами**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Специальность 25.00.08 - Инженерная геология,
мерзотоведение и грунтоведение

Научный руководитель
Доктор геолого-минералогических наук
Профессор Пашкин Е.М.

Научный консультант
Доктор геолого-минералогических наук
Фоменко И.К.

Москва, 2016 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА И ЕГО ОПИСАНИЕ	9
1.1 История изучения оползневой процесса	9
1.2 Понятие оползневой процесса	14
1.3 Факторы, критерии и причины оползневой процесса	21
1.4 Механизм развития оползней скольжения	24
1.5 Особенности развития оползневой процесса в пределах ИПТС	27
Выводы	29
ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ	30
2.1 Анализ методов изучения оползней	30
2.2 Методы предельного равновесия	35
2.3 Форма поверхности скольжения	41
Выводы	42
ГЛАВА 3 МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ РАСЧЁТЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ	43
3.1 О качестве отражения природных условий при построении геомеханических моделей	43
3.2 Описание возможных расчётных схем	46
3.3 Методы интерполяции свойств грунтов в склоновом массиве	50
3.4 Расчёт устойчивости склонов с применением различных расчётных схем	55
Описание объекта	55
Расчёт устойчивости склона	66
Выводы	83
ГЛАВА 4 ИЗУЧЕНИЕ СКЛОНОВ В ПРЕДЕЛАХ ИПТС	86
4.1 Характеристика техногенных грунтов ИПТС	86
4.2 Влияние антропогенного литогенеза на изменение инженерно-геологических условий ИПТС	90
4.3 Расчёт устойчивости склонов, сложенных техногенными грунтами	93
Описание объекта	93
Расчёт устойчивости склона	100
Анализ влияния количества проб на результаты интерполяции	122
Выводы	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
ПРИЛОЖЕНИЯ	135

Приложение 1. План расположения выработок в Боголюбово	135
Приложение 2. Инженерно-геологический разрез по линии 2-2, Боголюбово	136
Приложение 3. План расположения выработок в Можайском кремле	137
Приложение 4. Инженерно-геологический разрез по линии 6-6, Можайский кремль	138
Приложение 5. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в производство	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	140

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе автором рассматривается отдельный тип «оползней скольжения», приуроченных к историческим природно-техническим системам (ИПТС) [1]. Историческими называются природно-технические системы, в пределах которых осуществляется тесное взаимодействие искусственных исторических сооружений с геологической средой.

Оценка устойчивости склонов является актуальной темой уже не одно столетие. Данному вопросу посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. В библиографическом указателе «Оползни и устойчивость склонов» [2] на 2010 год насчитывалось 5103 работы, изданных в России с середины XVIII века. Несмотря на огромное количество предложенных классификаций оползневых процессов и методов прогноза их развития, на настоящий момент вопрос о достоверном количественном прогнозе активизации оползневого процесса остается открытым. Это, в первую очередь, связано с неопределенностью данных, используемых при математическом моделировании устойчивости склонов, что является главным источником ошибок. Наибольшая неопределенность при построении геомеханической схемы, используемой для моделирования склоновых процессов, связана с субъективной интерпретацией геологического строения и распределения свойств грунтов в склоновом массиве.

Необходимость изучения оползневого процесса в пределах ИПТС не вызывает сомнения. Каждый памятник архитектуры является уникальным, также неповторимостью отличаются природные условия каждого из них. Существуют определённые закономерности развития оползней скольжения, приуроченных именно к историческим территориям. Первым важным отличием изучения оползневого процесса в пределах исторических природно-технических систем является его предзаданность. Если при новом строительстве есть возможность избежать участков с активным развитием оползневого процесса, то на ИПТС такая возможность отсутствует, и тем самым повышается значение прогноза оползневой опасности.

Вторым отличием изучения оползней в пределах исторических природно-технических систем является присущая им специфика инженерно-геологических условий. Главным образом это связано с большой мощностью техногенных накоплений, образованных за время функционирования каждого памятника с момента его постройки. Эти особенности требуют отдельного подхода к изучению взаимодействий в пределах склонов ИПТС.

Актуальность темы исследования заключается в необходимости разработки специального подхода к изучению склонов, входящих в сферу взаимодействия исторических природно-технических систем. Эта потребность обусловлена участившимся развитием оползней вблизи памятников архитектуры. Примерами могут служить оползни в Нижегородском, Смоленском, Можайском кремлях, на северном склоне Воскресенского Ново-

Иерусалимского монастыря, западном склоне Саввино-Сторожевского монастыря, южном склоне Боголюбского монастыря, на склонах Спасо-Евфимиева и Васильевского монастырей в Суздале, Печерского монастыря в Нижнем Новгороде. Практически все исторические объекты, разрушение которых оползневыми процессами представляет опасность в настоящее время, являются культовыми сооружениями. В ходе их эксплуатации в XX веке нередко нарушались системы водоотведения и дренажа, не осуществлялся уход за растительностью. Вследствие этого начинали развиваться различные экзогенные геологические процессы. Всё это потребовало разработки осмысленного подхода к количественной оценке устойчивости склонов.

Целью настоящей работы является рассмотрение и анализ зависимости результатов расчётов устойчивости склонов от выбора модели распределения свойств грунтов в массиве и разработка методики моделирования оползней скольжения в пределах ИПТС.

Работа выполнялась автором, начиная с 2013 года, на кафедре инженерной геологии МГРИ-РГГРУ им. Серго Орджоникидзе. Научным руководителем работы является доктор геолого-минералогических наук, профессор Е.М. Пашкин, научным консультантом – доктор геолого-минералогических наук И.К. Фоменко.

Задачи. В процессе исследования были решены следующие основные задачи:

- Выполнен анализ отечественного опыта изучения оползневого процесса.
- Рассмотрены и проанализированы методы оценки устойчивости склонов.
- Описаны возможные модели распределения свойств грунтов в оползневом массиве и выполнена оценка их влияния на результаты количественной оценки устойчивости.
- Разработана и апробирована методика оценки развития оползневого процесса в пределах исторических природно-технических систем, сложенных техногенными грунтами

Научная и методическая новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые произведено комплексное сравнение различных моделей распределения свойств грунтов в массиве.
2. Впервые произведена оценка зависимости результатов расчётов устойчивости склонов от выбора модели распределения свойств грунтов при моделировании оползневых процессов.
3. Для модели полевого распределения свойств грунтов в массиве выполнен анализ влияния метода интерполяции на результаты расчётов.
4. Предложена новая методика оценки устойчивости склонов в пределах исторических территорий, сложенных техногенными грунтами.

Теоретическая и практическая значимость работы

Внедрение в практику расчетов с применением различных моделей распределения свойств грунтов в массиве позволит существенно повысить достоверность результатов моделирования оползневого процесса. Описанные подходы могут быть использованы в учебных и научно-исследовательских целях. Разработанная методика расчёта устойчивости склонов, сложенных техногенными грунтами, может быть использована при оценке оползневой опасности ИПТС.

Методология и методы исследования включают обобщение отечественного и зарубежного опыта математического моделирования при расчетах устойчивости склонов и применение современных программных продуктов и методик для решения данного круга задач. Для расчётов была использована программа Slide, версия 6.0.

Защищаемые положения.

1. Показана возможность создания расчётных схем оценки устойчивости склонов с применением полевого распределения прочностных свойств грунтов в пределах стратиграфо-генетических комплексов и в пределах всего массива (без выделения границ).
2. Показана необходимость обоснования применяемого метода интерполяции при использовании моделей с полевым распределением свойств грунтов. Для техногенных грунтов рекомендуется использовать метод обратных взвешенных расстояний, поскольку подбор степени позволяет учитывать их неоднородность, которая характерна для данного стратиграфо-генетического комплекса.
3. Для расчёта устойчивости оползней скольжения в пределах ИПТС рекомендуется руководствоваться разработанной автором методикой, суть которой заключается в сочетании следующих основных положений. Для учёта включений и прослоев с аномально высокими и низкими значениями прочностных свойств в пределах слоя техногенных грунтов целесообразно строить поле распределения прочностных свойств. Для точного нахождения положения поверхности скольжения и выполнения прогноза оползневой опасности в коренных и четвертичных грунтах следует выделять инженерно-геологические элементы по стандартным методикам, назначая им нормативные значения прочностных характеристик.

Фактический материал. При подготовке настоящей работы были использованы данные, полученные автором в составе «ИГИТ», при оценке устойчивости склонов на объектах культурного наследия: южном склоне Можайском кремля и юго-восточном склоне Боголюбского монастыря.

Достоверность научных положений и выводов обосновывается качеством первичной инженерно-геологической информации, применением комплекса современных методов математического моделирования, сопоставимостью полученных результатов и соответствием их физическим представлениям.

Личный вклад автора. Автор в составе ООО «ИГИТ» принимал непосредственное участие в инженерно-геологических изысканиях на объектах, на основании которых выполнена настоящая работа. Под его руководством производились инженерно-геологические изыскания и камеральная обработка материалов при выполнении работ в Можайском кремле. Автор выполнял оползневую съёмку и расчёт устойчивости склонов (под руководством научного консультанта д. г-м. н. И.К. Фоменко) при работах в Боголюбском монастыре.

Научная апробация и публикации.

Основные результаты настоящей работы были представлены на международных и общероссийских конференциях и симпозиумах: «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2014; Санкт-Петербург, 2015); «Природные условия строительства и сохранения храмов Православной Руси» (Сергиев-Посад, 2015) Молодые науки о Земле (Москва, 2016).

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 статьи в реферируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Диссертационная работа выполнена в рамках гранта РФФИ 15-05-00577 «Методология оценки и прогноза оползневой опасности».

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложений и списка литературы. Она содержит 147 страниц текста, сопровождается 11 таблицами, 58 рисунками, 5 приложениями и списком литературы из 117 наименований.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю д. г-м. н., проф. Е.М. Пашкину за формирование научных взглядов, общее руководство над работой и полезные идеи. Научному консультанту д. г-м. н. И.К. Фоменко за возможность заниматься выбранной темой и помощь в выборе верного направления в работе, а также ценные консультации. Всему коллективу кафедры инженерной геологии РГГРУ-МГРИ, в особенности заведующему кафедрой д. г-м. н., проф. В.В. Пендину, д. г-м. н., проф. Л.А. Ярг, д. г-м. н., проф. В.В. Дмитриеву и д. г-м. н., проф. Д.С. Дроздову. Автор выражает глубокую признательность сотрудникам ООО «ИГИТ», в особенности генеральному директору, к. г-м. н., проф. В.М. Кувшинникову за возможность заниматься диссертационной работой, предоставление материалов и общую поддержку, к. г-м. н., доц. И.А. Демкину за конструктивное обсуждение результатов и ценные советы. Также автор выражает благодарность всей своей семье, в особенности отцу к. г-м. н. Буфееву К.В. за труд по

проверке и редакции текстовой части, брату Буфееву И.С. за помощь в освоении программного обеспечения и ценные советы.

ГЛАВА 1 ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА И ЕГО ОПИСАНИЕ

1.1 История изучения оползневого процесса

Изучение оползневого процесса занимает в отечественной инженерной геологии одно из ключевых мест. Это связано со многими факторами, и в первую очередь с потенциальной опасностью оползней для жизнедеятельности человека. Ещё в древней Руси, в XII веке киевские князья строили каменные подпорные стенки для защиты церквей, расположенных на склонах Днепра [3]. Противооползневые сооружения Нижегородского кремля, представляющие собой массивные каменные контрфорсы с дренажами, построенными в XVI в., обеспечили сохранность защищаемых сооружений до настоящего времени [2].

Впервые сведения об оползнях были опубликованы в конце XVIII - начале XIX вв. в монографиях, посвящённых Крыму, Одессе и Нижегородской губернии. Эти описания были составлены естествоиспытателями и путешественниками Людвигом, Палласом и другими ([4] и др.). В этих работах оползни рассмотрены как процессы, издавна мешающие спокойной жизни людей в городах.

Мощное промышленное развитие России во второй половине XIX века и связанное с ним строительство железных дорог поставило инженеров-путейцев и горных инженеров перед необходимостью изучения оползней. Обеспечение безопасности на железных дорогах требовало выявления оползнеопасных зон. Это повлекло за собой детальное изучение оползневого процесса. Первые публикации по этой теме выполнялись инженерами-путейцами, которые обобщали свой опыт строительства железных дорог. В то же время стали появляться первые заметки о катастрофических последствиях внезапного схождения оползней [5], [6], [7], и др. Одновременно с этими работами появились первые описания крупных склоновых процессов сейсмотектонического происхождения – Зеравшанского завала в Средней Азии, Амткельского и Геналдонского на Кавказе, Демерджийского в Крыму.

В начале XX века пишется много работ, посвящённых оползням, и в 1924 году Д.Н. Мушкетов и Н.Ф. Погребов обобщают итоги многолетнего изучения оползней на юге страны [8], [9], [10]. В это же время А.П. Павлов переводит монографию Э. Ога «Геология», обобщающую результаты зарубежных исследователей [11]. С выходом указанных работ начинается новый этап изучения оползней. Это связано с тем, что имеется определённый опыт изучения оползневого процесса, но отсутствует научная база, позволяющая оценивать устойчивость отдельных склонов по определённым, стандартным критериям. Основная часть последующих работ всё так же связана со строительством железных дорог [12] и др. Вместе с тем, учитывая большие объёмы строительства, внимание уделяется и оползням в новом строительстве [13], [14] и др., а также изучению оползней на черноморском побережье [15] и

др., на Кавказе [16] и др., и в Поволжье [17] и др. В 1929 году выходит «Морфологическая и генетическая классификация оползней и обвалов» И.А. Двойченко [18].

К началу 30-х годов стало понятно, что оползневой процесс цикличен, и приурочен к областям, тектонические и инженерно-геологические условия которых определяют постоянное развитие отдельных оползней. И при этом имеющиеся инженерно-технические решения не могут полностью решить проблему, а лишь частично уменьшают урон, наносимый оползнями. Д.И. Мушкетов, А.П. Павлов, Н.Ф. Погребов и другие учёные понимали, что причины возникновения оползней могут быть изучены только при систематическом наблюдении за процессом, и его детальном изучении. В связи с этим, в 1930 году было принято решение о создании первой научно-исследовательской Крымской оползневой станции. В 1932 году была организована Одесская оползневая станция, в 1934 году, в Сочи, – Черноморская научно-исследовательская оползневая станция, в 1935 году – Киевская. В 1939 году все эти оползневые станции перешли в ведомство Министерства геологии СССР, а до этого они находились в составе Гидрометеослужбы (за исключением Крымской).

В 1934 году было проведено Первое оползневое совещание, на котором обсуждалась проблематика оползней в Советском Союзе и возможные пути решения проблемы. Была принята следующая концепция – целью изучения оползней является разработка рациональных противооползневых мероприятий. На совещании Н.Ф. Погребов дал первое определение оползня – «Движение масс горных пород вниз по склону под действием силы тяжести, часто при участии поверхностных и подземных вод» [19]. Это совещание дало начало новому периоду изучения оползней, который характеризуется научным подходом к систематизации накопленных материалов, проведённых в результате первых исследований на оползневых станциях. В течение данного периода происходит расширение и углубление геологических знаний об оползнях, развиваются методы расчётов устойчивости склонов. В 1935 году Ф.П. Саваренский создаёт первую классификацию оползней, основанную на ориентировке поверхности скольжения [20]. В это же время выходят работы по методике изучения оползневых склонов различными методами, в том числе электроразведкой [21]. В этот же период формируются базовые принципы исследования оползней и проектирования мер инженерной защиты от них.

В военное время и сразу после войны основным направлением работ было изучение возможностей быстрого строительства тоннелей, автомобильных и железных дорог и их безаварийного функционирования [22] и др. В 1947 году выходит работа Н.Я. Денисова, посвящённая стадийности деформаций глинистых пород [23]. В ней был опубликован новый подход к изучению оползней как в историко-геологическом аспекте, так и в связи с решением геомеханических задач, связанных с выявлением механизма оползневых деформаций [2]. В

1949 году под руководством академика Ф.П. Саваренского проходит Второе всесоюзное оползневое совещание. В постановлении совещания было отмечено, что народное хозяйство страны ежегодно несёт колоссальные убытки в результате оползневой деятельности. Была признана необходимость создания государственной противооползневой службы. Также было решено расширить имеющуюся сеть научно-исследовательских оползневых станций для изучения наиболее важных оползнеопасных районов Советского Союза. Кроме этого, в составе АН СССР рекомендовалось создать специальную научную организацию, которая занималась бы комплексной разработкой теоретических вопросов, связанных с борьбой с оползнями, а также координацией деятельности соответствующих организаций. Одним из главных результатов этого совещания стало признание оползневого процесса процессом геологическим, и, в связи с этим, требующим использования при изучении специального набора методов, принятых в грунтоведении, геофизике, геоморфологии, исторической геологии. Помимо этого, была признана необходимость более детальной разработки методов механико-математического и физического анализа оползневых явлений. Также было отмечено, что в связи с большим разнообразием типов оползней и региональными особенностями их причин, необходимо разработать инструкции и методики изучения оползней, а также проектирования противооползневых мероприятий, применительно к конкретным региональным условиям, и даже индивидуально к различным объектам [24]. В это же время выходят работы Н.М. Герсевича [25] и Н.Н. Маслова [26] – два основных труда в области механики грунтов, в которых отдельные главы посвящены расчётам устойчивости откосов и склонов.

В начале 50-х годов публикуются новые разработки по стационарным геофизическим методам исследований оползней, фототеодолитной съёмке [2]. В 1953 году в работе Е.П. Емельяновой «О причинах и факторах оползневых процессов» [27] впервые формулируется понятие «оползневой процесс», так как до этого употреблялся термин «оползневые явления». Желание понять механизмы оползневого процесса потребовало изучения механики разрушения грунтов в процессе оползания. Начинается изучение факторов оползневого процесса, определяющих его развитие. В 1956 году А.И. Фокиным и Г.Г. Рамишвили, по результатам исследований оползней в Грузии, поставлен вопрос об антропогенном факторе, влияющем на активизацию оползневого процесса [28]. Этот вопрос является существенным при изучении деформаций памятников архитектуры, расположенных вблизи склонов. В том же году выходят две крупные монографии «Оползни. Типы, причины образования, меры борьбы» А.М. Дранникова [29] и «Методическое руководство по стационарному изучению оползней» Е.П. Емельяновой [30]. Эти работы, с одной стороны, говорят о завершении крупного этапа обобщения накопленных ранее материалов, а с другой – о начале нового этапа, направленного на углублённое изучение факторов и самого механизма оползневого процесса.

Характерно, что в данный период также началось прогнозирование устойчивости склонов. Хотя наибольшего развития прогнозирование достигло после схождения оползня в Италии, на Вайонтской плотине в 1963 году, в результате которого погибло около двух тысяч человек. В течение этого же периода вышло несколько монографий, посвящённых этой тематике. В том числе «Некоторые вопросы теории инженерно-геологических прогнозов устойчивости склонов» В.Н. Славянова [31]. В этих работах под «прогнозом» понимался локальный прогноз образования, развития или повторной подвижки единичного оползня, без оценки регионального фактора. В 1958 году на Западе выходит «Механика грунтов в инженерной практике» и «Механизм оползней» К. Терцаги [32], [33]. Одновременно с ними Е.П. Емельянова вводит понятие «механизм» оползневого процесса, имея ввиду модель деформирования-разрушения склона [34], [2]. В этот период происходит разработка новых методов изучения склонов, таких как радиоизотопные исследования свойств грунтов в массиве, геоботанические наблюдения, аэровизуальные наблюдения и дешифрирование аэрофотоснимков. Серьёзно исследуется цикличность оползневого процесса с точки зрения регионального ритма, определяемого по результатам наблюдений за частотой отдельных оползневых явлений. С 1960 по начало 1970-х годов было собрано несколько совещаний и конференций, на которых поднимались и обсуждались вопросы об особенностях развития оползней в различных регионах СССР, теории оползневого процесса, проблеме классификации оползней, методах их изучения, влиянии различных факторов на развитие оползневого процесса, а также вопросы, связанные с проектированием противооползневых сооружений и мероприятий. Наиболее представительным стало «Совещание по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними», проходившее в Киеве в 1964 году. Оно привлекло широкий круг учёных. В работе совещания приняли участие более 500 специалистов из СССР и зарубежья, которые представляли проектные и научно-исследовательские институты, высшие учебные заведения, строительные организации и руководящие органы [35].

В конце 60-х – начале 70-х годов начинают развиваться методы измерения напряжений в склонах, и, как результат, появились методы лабораторного моделирования устойчивости склонов и откосов. Для этого в ведущих научно-исследовательских институтах, в том числе во ВСЕГИНГЕО, ДИИТе, МГУ были созданы специальные лаборатории, занимающиеся различного рода моделированием: центробежным, стереоскопическим, оптическим, методом эквивалентных материалов и другими.

В 70-е годы разрабатываются методы математического моделирования оползневых склонов. Стоит отметить возрастание интереса к изучению оползней, которое выразилось в увеличении количества публикаций в год на эту тему почти в два раза. В течение этого периода было издано несколько важнейших трудов по оползневой проблематике. В 1972 году вышла

книга Е.П. Емельяновой «Основные закономерности оползневых процессов» [36], в которой произведена систематизация и обобщение многолетней работы советских геологов по изучению оползней. Эта монография на настоящий момент является самым полным отечественным трудом по общей теории оползней. В 1973 году под редакцией Г.С. Золотарёва вышла книга «Опыт оценки устойчивости склонов сложного геологического строения методом конечных элементов и экспериментами на моделях» [37]. В 1980 году вышла книга В.В. Кюнтцеля «Закономерности оползневого процесса на Европейской территории СССР и его региональный прогноз» [38].

В 70-е годы созывалось всего одно межведомственное совещание по оползням – в Тирасполе, в 1974 году. В то же время вопросы изучения оползневого процесса рассматривались и на международном симпозиуме по глинам, проходившем в Москве в 1972 году, и на 1-й Всесоюзной конференции по инженерной геологии, проходившей в 1974 году. Стоит отметить, что в этот период возросло внимание к оползневым процессам, приуроченным к территориям Сибири и Дальнего Востока. Увеличилось общее количество различных классификаций оползней.

В 80-е годы был запущен международный проект «Охрана литосферы как окружающей среды». Финансирование осуществлялось ООН. В рамках этого проекта в 1981 году в Алма-Ате был проведён Международный семинар по мониторингу экзогенных геологических процессов. На этом семинаре был обобщён мировой опыт прогноза оползней и селей, а также опыт защиты от этих процессов [2]. В 1984 году, по результатам работ второй части этого проекта была опубликована двухтомная монография «Оползни и сели» [39], в составлении которой приняли участие около 30 ведущих специалистов из СССР, КНР, США, Канады, Франции, Японии, Индии и Новой Зеландии. В этот период увеличилось количество переводных изданий, в том числе в 1981 году вышла книга «Оползни. Исследование и укрепление» под редакцией Р. Шустера и Р. Кризека [40]. В течение этого периода продолжалось развитие методов математического и лабораторного моделирования, совершенствовались методики стационарного изучения оползней, были разработаны новые методы натурных измерений параметров оползневого процесса.

В 90-е годы резко снизилось количество публикаций по оползневой проблематике, уменьшился объём научно-исследовательских работ. Постепенный подъём в данной отрасли наметился начале 2000-х годов. Стоит отметить, что хотя объём публикаций и увеличился, публикуются статьи и тезисы (за преимущество последних). Однако в свет вышли несколько крупных работ и учебников, посвящённых методам расчёта устойчивости склонов [41], [42], методологии оценки, предупреждения и прогноза оползневой опасности [43], [44].

1.2 Понятие оползневого процесса

Вначале необходимо определить понятия «склон» и «откос». По Е.П. Емельяновой, склоном называется наклонный участок поверхности литосферы, формирующийся под действием рельефообразующих процессов [36]. Характер склона определяется составом и залеганием слагающих его пород, абсолютными и относительными отметками местности и характером склоновых процессов, зависящих от следующих особенностей – климата, экспозиции склона, растительности и других компонентов природной среды.

Простой склон состоит из собственно склона (BC), бровки склона (B), подошвы склона (C) и его подножия (CD) [36], [42].

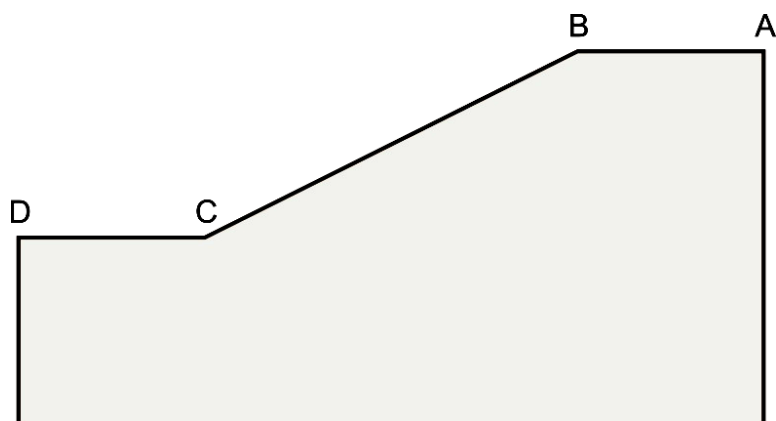


Рис. 1.1. Схема профиля простого склона по Е.П. Емельяновой [36].

Для оценки степени устойчивости все склоны подразделяются на три группы [45]: склоны сноса; склоны обрушения, в частности склоны подмыва, и склоны накопления.

Откос – искусственно созданная поверхность, которая ограничивает природный грунтовый массив, выемку или насыпь. Откосы образуются при возведении различных насыпей (дорожного полотна, земляных плотин и т.д.), выемок (котлованы, каналы, карьеры и т.п.) или при перепрофилировании территорий. При определенном сочетании различных факторов грунтовый массив, ограниченный откосом или склоном, может выйти из состояния равновесия, что послужит причиной развития оползневого процесса. Одной из основных геотехнических характеристик склона является его устойчивость.

Под устойчивостью склона/откоса понимается его способность сохранять свой профиль а, следовательно, вид и строение в целом на протяжении длительного времени.

Оползни являются вторичными экзогенными геологическими процессами. Экзогенный геологический процесс – движение приповерхностной геосистемы в физическом времени, обусловленное её взаимодействием с внешними средами или взаимодействием между элементами литосистемы [46]. Оползневой процесс имеет достаточно много определений. Они были собраны Н.Ф. Петровым в книге «Оползневые системы. Простые оползни» [47]. В таблице 1.1, дополненной автором, в хронологическом порядке приведены наиболее известные

определения оползней, которые были даны различными учёными, начиная с первой половины прошлого века.

Таблица 1.1

Различные определения оползневого процесса

№ п/п	Автор, источник	Определение оползня
1	Погребов Н.Ф., 1935	Движение масс горных пород вниз по склону под действием силы тяжести, часто при участии поверхностных и подземных вод
2	Попов И.В., 1959, с. 124	Скользящее смещение горных пород, слагающих склон, под действием их веса
3	Емельянова Е.П., 1972, с. 55, 57	Как процесс, «это смещение на более низкий уровень части горных пород, слагающих склон (а иногда также его основание, подножие и территорию за его бровкой) в виде скользющего движения, в основном без потери контакта между движущимися и неподвижными породами». Горные породы, оползающие в рассматриваемый момент или периодически, также называют оползнем
4	Геологический словарь, 1973, т. 2, с. 33	Отрыв земляных масс и перемещение их по склону под влиянием силы тяжести
5	Бранэден Д., 1973, с. 45	Термин «оползень» обычно означает движение вниз по склону рыхлых или скальных масс, которое происходит в основном в результате образования трещин отрыва на границах движущейся массы. Эти движения включают, как механизм оползания, так и механизм течения
6	Ломтадзе В.Д., 1977, с. 245	Оползнем следует называть массу горных пород, сползшую или сползающую вниз по склону или откосу (искусственный склон) под влиянием силы тяжести, гидродинамического давления, сейсмичности и некоторых других сил. Оползень есть результат геологического оползневого процесса, проявляющегося в вертикальном и горизонтальном смещениях масс горных пород вследствие нарушения их устойчивости – равновесия
7	Белый Л.Д., Попов В.В., 1978, с. 196	Под оползнем в общем смысле понимают смещение земляных масс по склону, причем различной морфологии, строения и динамики
8	Варнес Д., 1978, с. 32	По существу, оползень представляет собой совокупность склоновых движений масс пород, в процессе которых происходит разрушение и сдвиг вдоль одной или нескольких характерных поверхностей. Термин «оползень» широко применяется и будет, несомненно, использоваться в дальнейшем как общее понятие почти для всех видов склоновых процессов, включая и те движения, в которых мало скольжения или вообще его нет
9	Сергеев Е.М.,	В общем представлении оползень – это скользящее смещение

	1978, с. 223	горных пород на склонах под действием силы тяжести при участии поверхностных или подземных вод
10	Кюнтцель В.В. 1980, с. 15	Целесообразно под оползнем понимать часть геологической среды, ограниченной земной поверхностью и поверхностью смещения, по которой без потери контакта с неподвижным основанием происходит ее перемещение на новый, как правило, более низкий гипсометрический уровень. Тогда под оползневым процессом следует понимать последовательное изменение состава, состояния и свойств оползня с момента его зарождения и перемещения на другой уровень, вплоть до полного затухания, проявляющееся в деформациях, слагающих его горных пород
11	Инженерно-геологические изыскания. 1980, с. 191	Смещение горных пород, слагающих склон, представляющее собой скользящее движение вследствие механического разрушения или течения пород склона или его основания без потери контакта между смещающейся и неподвижной частью склона
12	Золотарев Г.С., 1983, с. 197-198	Оползнями называются такие смещения на склонах горных пород разного состава, сложения и объёмов, в которых преобладает механизм скольжения их по имеющейся или формируемой в процессе движения поверхности или зоне, когда сдвигающие усилия больше прочности пород
13	Петров Н.Ф., 1988 г, с. 28	Оползень – это процесс отделения и смещения части горных пород, слагающих склон (откос), с образованием стенки отрыва и сохранением материальной связи со средой
14	Кюнтцель В.В., 1992 г., с. 48	Оползень или оползневый процесс – смещение части горных пород (грунтов) под влиянием прежде всего силы тяжести на более низкий гипсометрический уровень при сохранении контакта с неподвижным основанием. Нередко под термином «оползень» также понимают оползневое тело, т.е. геологическое тело, которое сформировано в оползневом процессе и ограничено снизу поверхностью или зоной смещения, а сверху земной поверхностью
15	Опасные экзогенные процессы, 1999, с. 99.	Под гравитационными склоновыми процессами (ГСП) понимают денудационно-аккумулятивные экзогенные геологические процессы на естественных склонах и искусственных откосах, проявляющиеся в виде смещенного грунтового материала на более низкие гипсометрические уровни под действием силы тяжести без существенного влияния каких-либо транспортирующих агентов
16	Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б., 2001, с. 263	Оползневые явления (оползни) – движение больших масс горных пород вниз со склона или откоса по поверхности (или поверхностям) скольжения под влиянием различных гравитационных сил (веса пород, давления воды, сейсмического воздействия, техногенной нагрузки)
17	Инженерная геология России. Т.2. Инженерная геодинамика территории России	Оползневый называют движение масс горных пород вниз по склону под действием силы тяжести в виде скольжения по хорошо выраженной поверхности или зоне.

	2013, с. 534	
--	--------------	--

Анализируя таблицу, можно сделать вывод, что все авторы по-своему определяют понятие оползня. Несмотря на это, все имеют следующие общие позиции:

- 1) оползневой процесс – смещение масс горных пород вниз по склону;
- 2) основная движущая сила – вес смещающихся пород;
- 3) движение оползневых масс по склону происходит в виде скольжения или течения;
- 4) смещение оползневого тела происходит без потери контакта с неподвижным основанием.

Следует учитывать, что под оползнем понимают и оползневой процесс и оползневое тело. В настоящей работе термин «оползень» используется в обоих смыслах.

Поскольку смещение оползневого тела осуществляется без потери контакта с основанием склона, выделяется поверхность или зона, по которой и происходит смещение. Такая поверхность называется поверхностью или зоной скольжения. Она является обязательным элементом строения оползневого склона и диагностическим признаком развития процесса. В однородных породах форма поверхности чаще вогнутая, практически круглоцилиндрическая, а в неоднородных форма предопределяется положением ослабленных зон в пределах склона. Такими зонами могут являться границы между выветрелыми и невыветрелыми породами, коренными и техногенными грунтами, прослой слабые грунтов, зоны трещиноватости, и т.д. При неоднородном разрезе или наличии в пределах склона подобных ослабленных зон, форма поверхности скольжения будет чаще всего плоской, плоско-ступенчатой, волнистой или более неправильной. Верхняя линия пересечения поверхности скольжения с поверхностью склона называется вершиной оползня, нижняя – подошвой, левая и правая (относительно оси оползня) бортами [48].

Как и Е.П. Емельянова [36], под механизмом оползневого процесса автор понимает последовательность или совокупность промежуточных состояний и элементарных процессов взаимодействия отдельных частей оползня и неподвижного ложа, посредством которых оползень переходит из одного состояния в другое и тем самым осуществляется протекание оползневого процесса [47], [42].

Процесс развития каждого отдельного оползневого процесса формирует оползневой участок, границы и форма которого в плане определяются структурой массива, типом оползня и его размером. В развитии различных оползневых процессов важную роль играют и общие закономерности и специфические, зависящие от местоположения склона (геологическое строение, климат, и т.д.) [48].

В ходе изучения оползневого процесса создавались различные его классификации. Г.К. Бондарик в 1981 году насчитал около 100 классификаций оползневого процесса [46]. На

сегодняшний день их существует гораздо больше. Наиболее известны классификации Ф.П. Саваренского, Д. Варнеса, К.А. Гулакяна и В.В. Кюнтцеля, Г.С. Золотарёва, М.К. Рзаевой, Н.Ф. Петрова, И.О. Тихвинского. Классификация Ф.П. Саваренского основана на ориентировке поверхности скольжения, И.В. Попова – на возрасте оползней, остальные – на механизме оползания.

В 1903 году А.П. Павлов выделил два типа оползней – деляпсивные (соскальзывающие) и детрузивные (толкающие) [49].

В 1935 году Ф.П. Саваренский выделил три типа оползней – асеквентные, инсеквентные и консеквентные [20].

В 1958 году Д. Варнес выделил оползни скольжения и оползни течения [50], [51].

В 1959 году И.В. Попов выделил оползни современные (отвечающие современному положению базиса эрозии и уровня абразии) и древние (не отвечающие современному положению базиса эрозии и уровня абразии) [52].

В 1969 году М.К. Рзаева выделила оползни блоковые, срезающие, соскальзывания, сползания, выдавливания (одесского типа), суффозионные, выплывания, просадочные, потоки (течения, оползания), норвежского типа [53].

В 1970 году Г.С. Золотарев выделил оползни соскальзывания (консеквентные), выдавливания (детрузивные), выплывания, суффозионные, потоки и сплывы, разжижения [50].

В том же году В.В. Кюнтцель и К.А. Гулакян предложили классификацию, в которой выделили следующие типы оползней: оползни скольжения, выдавливания, выплывания, проседания, течения и разжижения [54].

В 1978 году Д. Варнес к собственной классификации (оползни скольжения и течения) добавил оползни выдавливания [50].

В 1980 году В.В. Кюнтцель предложил классификацию, которая несколько отличается от предложенной им и К.А. Гулакяном. В новой классификации выделяются оползни скольжения, сдвига (выдавливания), выплывания, проседания, оползни-потоки (течения) и оползни разжижения [38].

В 1987 году Н.Ф. Петров выделил следующие виды оползней: оползни скольжения, выдавливания, проседания («особенные»), выплывания (суффозионные), проседания, течения, оседания («особенные»), и разжижения [47].

В 1988 году И.О. Тихвинский предложил следующую классификацию: оползни сдвига (скольжения блоковые, «собственно оползни»), выдавливания (раздавливания), гидродинамического разрушения (выплывания), вязкопластические (вязкопластического течения, консистентные, грязевые), внезапного разжижения [55].

В части II СП 11-105-97 по механизму смещения пород выделяются оползни сдвига (скольжения), выдавливания, вязкопластические, гидродинамического разрушения и внезапного разжижения [56].

В настоящей работе рассматриваются выделяемые практически во всех классификациях оползни скольжения, они же оползни соскальзывания [57] или оползни по преопределённой поверхности [58]. Данный тип оползней является одним из наиболее распространённых в пределах центральной России. Оползни скольжения часто встречаются на исторических территориях. Например, в пределах Московского региона они приурочены к четвертичным отложениям, перекрывающим основные формы рельефа. Для данного типа оползней характерно наличие наклонной поверхности, зачастую совпадающей с поверхностями напластования, и блоковое строение.

На западе, в зависимости от соотношения и вида поверхностей ослабления, отчленяющих тело оползня, по механизму образования различают три группы оползней скольжения [59], [43]:

- первая – с явно выраженной одной поверхностью скольжения;
- вторая – с двумя поверхностями скольжения, падающими навстречу друг другу и вниз по склону, когда смещение оползневого блока происходит в направлении, совпадающим с их линией пересечения, типа «клин»;
- третья – с круглоцилиндрической поверхностью скольжения (рис 1.2).

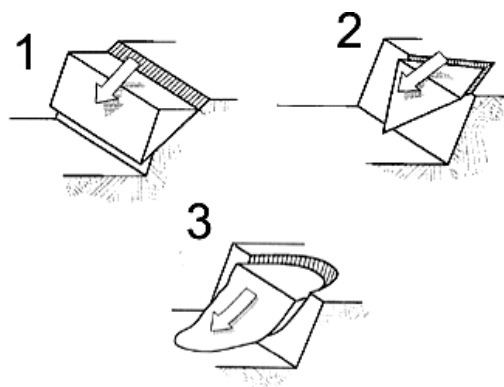


Рис.1.2. Типы нарушения устойчивости скальных склонов. Обрушение скального блока пород: 1- по одной поверхности скольжения; 2- по двум поверхностями скольжения, падающими навстречу друг другу; 3 – по круглоцилиндрической поверхности скольжения [59].

Как и В.В. Кюнтцель, под термином «оползни скольжения» автор понимает скольжение блоков пород или рыхлых масс вследствие мгновенной потери прочности (хрупкого разрушения) или развития ползучести, переходящей в срез [50]. Среди оползней скольжения выделяют два типа – консеквентные и инсеквентные (по Ф.П. Саваренскому). В консеквентных

смещение блоков происходит по плоскостям напластования, а в инсеквентных – по зонам ослабления, секущим грунтовый массив.

Размеры оползней, в соответствии с СП 11-105-97, часть II [56], следующие: небольшие (тысячи м^3), средние (десятки тысяч м^3), большие (сотни тысяч м^3), очень большие (миллионы м^3) и чрезвычайно большие (десятки миллионов м^3 и более).

1.3 Факторы, критерии и причины оползневого процесса

Оползни являются вторичными экзогенными геологическими процессами (ЭГП), то есть подготовка к их формированию осуществляется первичными ЭГП, развивающимися на контакте различных сред. Оползневой процесс может возникать в результате контакта литосферы с атмосферой (выветривания), с поверхностной гидросферой (эрозии, абразии), с глубинными областями земли (землетрясений), с техносферой (техногенеза) [42]. Эти процессы влекут за собой формирование зон экзогенного разрушения в слагающем склон грунтовым массиве, в которых происходит изменение естественных напряжений.

Для развития любого экзогенного геологического процесса необходимы причины и факторы развития. Причина ЭГП – другой процесс, развивающийся в среде, внешней по отношению геологической среде (внешняя причина) или в литосфере (внутренняя причина) [46]. Чаще всего существует несколько причин и факторов развития каждого отдельного процесса.

Причины оползневого процесса можно объединить в три различные группы [43]:

1. Изменение формы и высоты склона. К этой группе относится подрезка склона, осуществляемая как природной деятельностью, выраженной в эрозии склона постоянными и временными водными потоками, а также абразией морей и водохранилищ, так и антропогенной, выраженной в искусственной подрезке склона для инженерно-хозяйственных целей.
2. Изменение строения, состояния и свойств грунтов, слагающих склон. В эту группу объединены процессы, изменяющие физические, химические и механические свойства грунтов. Это физическое и химическое выветривание, изменение влажности грунтов в результате действия атмосферных и подземных вод, а также суффозионный и карстовый процессы.
3. Дополнительная нагрузка на склон. Это различные дополнительные нагрузки, к которым относятся сейсмические, гидростатические, гидродинамические, а также антропогенное статическое или динамическое воздействие.

Е.П. Емельянова под фактором оползневого процесса понимала любое обстоятельство, которое влияет на устойчивость склонов и, следовательно, может способствовать возникновению или повторному смещению оползня [36].

Достаточно большое количество работ было посвящено определению факторов развития оползневого процесса. По мнению автора, наиболее полной является классификация по виду влияния факторов на коэффициент устойчивости и на режим устойчивости склона. Она основана на подходах, предложенных Е.П. Емельяновой [60] и И.П. Ивановым [61]. По ней факторы оползнеобразования можно разделить на две различные группы:

1. Группа факторов, которая объединяет условия оползнеобразования (среднюю величину коэффициента устойчивости):

- рельеф местности;
- геологическое строение склонов и откосов;
- особенности физико-механических свойств горных пород;
- гидрогеологические условия;
- современные и новейшие тектонические движения и сейсмические явления;
- климатические особенности района;
- гидрологический режим водоёмов и рек для береговых оползневых участков;
- развитие сопутствующих экзогенных геологических процессов и явлений;
- инженерная деятельность человека.

2. Группа факторов, которая объединяет процессы, изменяющие величину коэффициента устойчивости. Её, в свою очередь можно разделить на следующие подгруппы [61]:

1) Подгруппа факторов изменяющих состав, состояние, строение и свойства горных пород, которые слагают склон или откос, а в итоге влияющих на их прочность и деформируемость. Она включает:

- процессы выветривания;
- увлажнение грунтов дождевыми, талыми, подземными и хозяйственными водами;
- процессы промерзания и оттаивания грунтов;
- процессы длительной ползучести грунтов;
- процессы выщелачивания и суффозии.

2) Подгруппа факторов, изменяющих напряжённое состояние массива горных пород склона или откоса, которая включает:

- процессы эрозии и абразии;
- изменение базиса эрозии;
- изменение уровня грунтовых вод и связанные с этим эффекты гидростатического взвешивания грунтов и гидродинамического давления фильтрационного потока;
- аккумуляцию аллювиальных и делювиальных отложений, пригрузку склонов обвальными массами;
- техногенное воздействие, связанное с подрезкой, пригрузкой и изменением профиля склона;
- сейсмическое воздействие.

Исходя из этого, оползневой процесс формируется в геологической среде, подготавливается группой факторов и происходит под действием силы тяжести.

В качестве идентификационных признаков проявления оползневого процесса наиболее часто используются следующие [42]:

1. Оползневые трещины, которые в начальной стадии развития оползня едва заметны, но по мере развития процесса постепенно расширяются, удлиняются и, соединяясь друг с другом, создают сплошную линию отчленения оползневого тела.
2. Оползневые цирки, представляющие собой выемки, образующиеся в склоне, в результате оползания части грунтового массива.
3. Плоскости срыва, формирующиеся при отрыве массы оползающих пород.
4. Валы, образующиеся у подножья склона в результате клиновидного выпора пород, расположенных у подножья склона оползающей массой.
5. Оползневые уступы – площадки, наклоненные обычно в сторону склона и образующиеся в результате скольжения оползневого тела по криволинейной поверхности.
6. Заболоченные участки с развитием болотной растительности в тыловой части уступа оползня, образующиеся за счет скопления атмосферных осадков в углублениях оползневых уступов.
7. “Пьяный лес”. Искривленные деревья, произрастающие на оползневом склоне и принимающие наклонное положение в результате оползневых подвижек.
8. Взбугренные поверхности, образующиеся в результате эрозионного сглаживания оползневых уступов и последующего формирования эрозионных форм рельефа.
9. Несовпадение положения пластов в разрезе склонов и изменение азимутов простирания.
10. Наличие большого числа водопроявлений на склонах.
11. Наличие деформаций в сооружениях, расположенных в зоне влияния оползневого процесса.

Степень выраженности проявления этих признаков зависит от активности оползня, стадии его развития и возраста [48].

1.4 Механизм развития оползней скольжения

В формировании любого оползневого склона можно выделить три этапа:

- 1). Подготовка оползня. На этом этапе чаще всего происходит постепенное уменьшение устойчивости грунтов;
- 2). Фактическое образование оползня. На этом этапе, как правило, происходит сравнительно быстрая и резкая потеря устойчивости грунтов и их смещение вниз по склону;
- 3). Стабилизация оползня. На этом этапе происходит восстановление устойчивости масс горных пород.

Подобная схема развития оползневого процесса рассматривалась многими учёными, среди которых Ф.П. Саваренский [62], И.В. Попов [63], Е.П. Емельянова [36], В.Д. Ломтадзе [64], Г.С. Золотарев [65] и другие.

И.П. Иванов и Ю.Б. Тржцинский [61] выделяют три стадии оползневого процесса (по сути – этапы):

- подготовительную;
- появления оползня;
- затухания оползневого процесса.

Продолжительность каждого этапа в разных случаях будет отличаться. К примеру, если этап подготовки оползня длился несколько десятилетий, и вдруг, в результате какого-либо воздействия на склон, например сейсмического, в режиме с обострением происходит смещение склона, второй будет во много раз короче.

Когда первый этап занимает значительный временной отрезок, процесс может развиваться неравномерно (ускоряться, затухать) в связи с периодическими изменениями климатических, гидрологических и других условий или с искусственными причинами, вызванными сработкой уровня воды в водохранилище, нагрузкой от транспорта, поливом сельскохозяйственных угодий и т.д. В течение этого времени возможно изменение крутизны склона под действием гидрогенных процессов, развитие микроподвижек, пластических деформаций и, в том числе, явлений глубинной ползучести [66], изменение физических и механических свойств грунтов. Это приводит к снижению устойчивости склона и к развитию оползневых деформаций. Явления, развивающиеся на этом этапе (образование бугристости, валов, трещин и др.), часто фиксируются визуально, но чаще всего, полнее характеризуются данными стационарных инструментальных наблюдений. Первый этап от второго условно отделяется появлением трещин, прежде всего трещин «закола», увеличением величины и скорости смещения масс горных пород [43].

Этап фактического образования оползня также может иметь различную продолжительность и неравномерность скорости смещения оползневого тела или отдельных его

частей. И.В. Попов различал оползни движущиеся, приостановившиеся и остановившиеся [63]. Каждая новая значительная подвижка оползня характеризует стадию процесса, а местные подвижки – его фазы. Стадии выделяются по перерывам между общими значительными подвижками оползня. В перерывах между стадиями образования оползня подвижки оползневых масс часто не прекращаются, а характеризуются малыми расстояниями и скоростями и, как правило, устанавливаются по инструментальным наблюдениям [43].

Этап стабилизации оползня наступает, когда оползень сошёл, факторы, вызвавшие его формирование, устранены и перемещение оползневых тел завершено. Устойчивость деформируемых грунтов восстанавливается при новом положении в рельефе. Повышение устойчивости может происходить постепенно, плавно или скачкообразно, иногда сопровождается локальными смещениями небольших объёмов грунтов до полного окончания оползневого процесса. Дальнейшее преобразование и изменение рельефа оползневого склона происходит под воздействием других агентов денудации [43].

Главные отличительные черты развития оползневого процесса во времени характеризуются следующими положениями [36]:

1. Оползневой процесс является нестационарным, в нем можно выделить определенные этапы, стадии и фазы развития.
2. Оползень возникает при коэффициенте устойчивости склона или откоса, равном единице.
3. Смещение оползня в каждом цикле является законченным.
4. Повторение процесса возможно после достижения неустойчивого равновесия при некотором воздействии старого или нового фактора.
5. Оползневой процесс является необратимым.

Механизм развития оползней скольжения выглядит следующим образом. Возникновению первичного оползня чаще всего предшествует достаточно долгий подготовительный период. В течение этого периода под влиянием неотектоники, гидрогенных и гидрогеогенных процессов, а также, что немаловажно, техногенеза происходит формирование склона, изменяется конфигурация и, следовательно, происходит перераспределение напряжений внутри грунтового массива. В результате, под воздействием массы склона в его отдельных частях формируются зоны, в которых постепенно развиваются процессы медленной глубинной и (или) поверхностной ползучести или хрупкого разрушения. Образуются участки с дефектами структуры грунтового массива. Преодоление грунтами пиковых сопротивлений сдвигу в разных точках склона влечёт за собой увеличение дополнительных напряжений в соседних точках, что в конечном итоге приводит к прогрессирующему разрушению в зоне смещения. Увеличение в массиве таких центров ускоряет процесс оползания и приводит к

«режиму с обострением» [1], который проявляется вследствие работы «положительной обратной связи» [67].

При достаточно большой глубине захвата массива оползневым процессом, за счёт тепла, выделяющегося из-за трения, на поверхности смещения формируется плёнка стекловатых пород. В результате происходит падение прочностных свойств грунтов. Такие оползни характеризуются очень высокими скоростями перемещения.

На завершающем этапе оползневое тело перемещается на более низкие гипсометрические отметки.

После перемещения, зачастую очень быстрого, наступает временное или полное затухание оползневого процесса.

1.5 Особенности развития оползневого процесса в пределах ИПТС

В инженерной геологии отдельным направлением является изучение исторических территорий. Это связано с уникальностью каждого памятника, камерностью объектов и необходимостью сохранения их для потомков. Нельзя рассматривать исторические здания и сооружения отдельно от их грунтового основания, так как сохранность памятника и его безаварийное функционирование зависит от их взаимодействия в рамках системы. Для описания этого Е.М. Пашкиным был введён термин Историческая природно-техническая система [1].

Исторические территории, как правило, отличаются повышенной мощностью техногенных накоплений. Их наличие требует специального подхода к изучению инженерно-геологических условий. Современное состояние памятников русской архитектуры зависит от неблагоприятных инженерно-геологических процессов, развивающихся в их пределах. Развитие этих процессов представляет потенциальную опасность риска для сохранения в будущем архитектурного наследия [1].

Храмы и монастыри на Руси древние зодчие строили, используя принцип «как мера и красота скажут». Это часто приводило к выбору строительной площадки на возвышенных местах, рядом со склонами. Многие склоны под влиянием изменения природных условий в процессе функционирования исторических территорий оказались оползнеопасными [1]. Поэтому в настоящее время инженеры-геологи часто сталкиваются с необходимостью изучения оползневых процессов, развивающихся в пределах границ исторических природно-технических систем [68], [69]. И чаще всего оползневые процессы приурочены к техногенным грунтам, слагающим склоны.

Е.М. Пашкиным был введён термин «предзаданность». Под предзаданностью он понимает «совокупность условий, служащих признаком, предвещающим приближение событий, явлений, реализация которых обусловлена условиями предшествующих событий» [70], стр. 599.

Раскрытие этого понятия для оползневых процессов, приуроченных к историческим территориям, необходимо. Первая группа факторов, объединяющих условия оползнеобразования (по Е.П. Емельяновой [36]), является набором условий предшествующих событий, которые определяют среднюю величину коэффициента устойчивости склона (факторы оползнеобразования описаны в первой главе настоящей работы). К этим факторам в первую очередь относятся рельеф, геологическое строение, гидрогеологические условия и физико-механические свойства грунтов. Рельеф и геологическое строение верхней части склонов ИПТС определяются новейшей историей развития территории, и связаны с жизнедеятельностью человека, действия которого и приводят к формированию различных

слоёв, перекрывающих изначальный, природный, рельеф. Изменение гидрогеологических условий и поверхностного стока также влечёт за собой переувлажнение зоны контакта между техногеном и коренным склоном. В результате, оползневые процессы, развивающиеся в пределах территорий с подобным геологическим строением, чаще всего развиваются по схеме оползней скольжения, или, согласно К. Зарубе и В. Менцлу, оползней по преопределённой поверхности [58]. Преопределённая, предзаданная поверхность скольжения наиболее часто располагается на границе коренных и техногенных грунтов, то есть в пределах «слабого звена».

Выводы

Несмотря на то, что оползневой процесс изучается давно, до сих пор не выработано единого взгляда на основные аспекты оползневедения. Это проявляется в большом количестве существующих определений, классификаций, представлений о причинах, факторах и критериях процесса, механизмах его развития. В работе исследуются оползни скольжения. Они имеют достаточно широкое распространение на территории России и часто приурочены к склонам ИПТС, в верхней части которых залегают техногенные накопления. Автор пользуется классификацией оползней В.В. Кюнтцеля, понятиями о причинах, факторах и критериях процесса по И.П. Иванову и Ю.Б. Тржицинскому.

Особого внимания и отдельного подхода требуют оползни скольжения, развивающиеся в пределах исторических природно-технических систем. Это обусловлено повышенной мощностью техногенных накоплений, предзаданностью процесса и обязательным наличием «слабого звена», которым является зона контакта коренных и техногенных грунтов.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

2.1 Анализ методов изучения оползней

Основной целью разработки классификаций оползней было прогнозирование развития этого процесса, то есть оползневой опасности. А.И. Шеко [71] дал следующее определение оползневой опасности: «научное, основанное на анализе закономерностей развития, предсказание места, времени, характера, (типа) и масштаба проявления тех или иных процессов, а также подверженности территории и объектов народного хозяйства их воздействию». Прогноз оползневой опасности – предсказание возможности появления (или степени распространения) активных оползней на рассматриваемых склонах при последующих вероятных изменениях природных условий и воздействий (в результате намечаемого хозяйственного освоения территории и влияния природных процессов) [72].

Существует большое количество подходов к прогнозу оползневой опасности. В зависимости от характера и масштаба изысканий методы прогнозирования подразделяются на региональные и локальные.

Региональное прогнозирование связано с работами, выполняемыми на больших территориях. Оно заключается в районировании изучаемой территории по различным типам оползневых склонов, их масштабу, вероятности развития оползневого процесса, интенсивности его проявления, ущербу, и т.д. В настоящей работе проблемы регионального прогноза не рассматриваются. Основное внимание уделено методам математического моделирования оползневых процессов, относящимся к локальному прогнозированию развития оползней в масштабе исторических территорий.

Локальное прогнозирование оползневых процессов выполняется в более мелких масштабах, и практически всегда связано с конкретным инженерным сооружением, в сферу взаимодействия которого попадает изучаемый склон. Оно имеет большую практическую значимость и требует увеличенного, по сравнению с региональным прогнозированием, набора методов получения инженерно-геологической информации и её объёма. Это выражается в детальном изучении оползневых и оползнеопасных склонов. Классификация методов локального изучения оползней приведена на рис. 2.1.

Локальный прогноз устойчивости каждого склона осуществляется в два этапа [72]:

- прогноз изменений инженерно-геологических условий (рельефа, нагрузок на склон, свойств пород и других условий) на рассматриваемом склоне;
- анализ изменения состояния склона и его отдельных морфологических элементов в зависимости от изменения рельефа, внешних нагрузок и воздействий, предусмотренных проектом хозяйственного освоения рассматриваемой территории, а

также к запрогнозированным на предшествующем этапе изменениям инженерно-геологической обстановки.

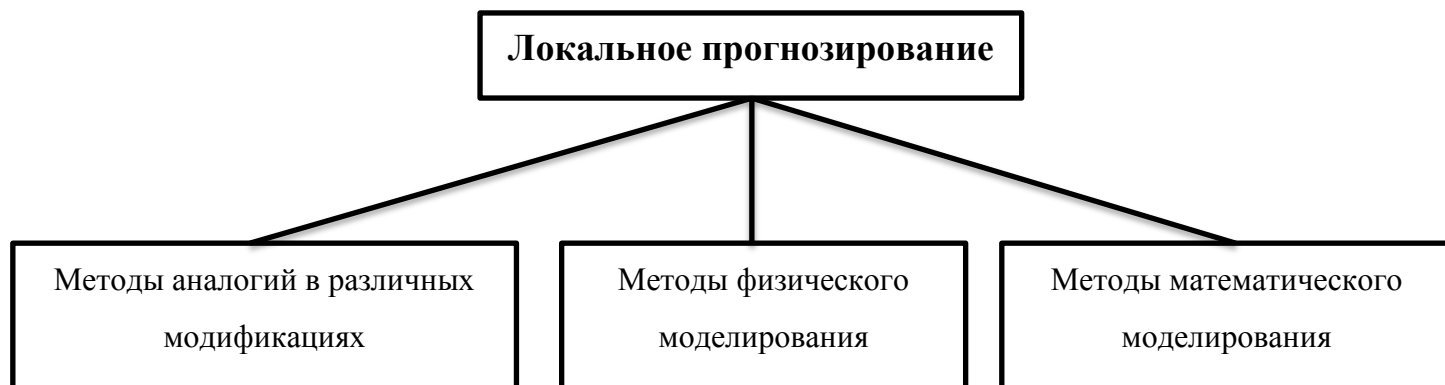


Рис. 2.1. Классификация методов локального прогнозирования оползневых процессов (по И.К. Фоменко [43]).

Прогноз изменений инженерно-геологических условий должен учитывать влияние планируемой инженерно-хозяйственной деятельности в период эксплуатации склона, а также результаты продолжающегося воздействия природных экзогенных процессов (эрозионных, абразионных, оползневых и др.) на рассматриваемый склон [72].

При локальном прогнозировании устойчивости склонов применяются три класса методов [41], [73]:

1. Методы аналогий;
2. Методы физического моделирования;
3. Методы математического моделирования.

Методы аналогий или натурных аналогов основаны на теории геологического подобия Л.Б. Розовского [74]. Они не получили развития в современной практике. Это связано с тем, что не существует базы природных аналогов (склонов) на которых проведены детальные инженерно-геологические исследования, дающие подробную информацию обо всех факторах и причинах оползневых процессов, формирующихся в их пределах.

Методы физического моделирования очень разнообразны. Они основаны на создании модели изучаемого склона в уменьшенном масштабе из аналоговых материалов, позволяющих смоделировать распределение напряжений в пределах массива. Моделируемые склоны отличаются от исследуемых малыми размерами, аналоговыми материалами и интенсивностью проявления процесса во времени, которую практически невозможно создать. Важным преимуществом физического моделирования является возможность прямого наблюдения за моделируемыми процессами, что отличает его от остальных методов [43]. Наиболее распространёнными методами являются моделирование на эквивалентных материалах,

центробежное и поляризационно-оптическое, тензометрической сетки и электрогидродинамических аналогий [42].

Математическое моделирование в современном мире имеет наибольшее распространение, по сравнению с остальными методами. Это связано с активным развитием вычислительной техники начиная со второй половины XX века. Математическое моделирование в настоящее время практически полностью вытеснило физическое, поскольку для решения задач не требуется большого количества лабораторий, вспомогательного персонала, различных материалов и приборов. Эти методы являются теоретическими и работают с компьютерными моделями геологической среды. Результаты моделирования сводятся к количественной оценке устойчивости изучаемого склона и его динамики.

История развития расчётов устойчивости склонов длится более 250 лет [75]. Основоположником является Шарль Кулон, который вывел уравнение прочности грунта во второй половине XVIII века.

И.К. Фоменко выделяет четыре крупных периода развития расчётов устойчивости склонов [43]:

Первый период длится с 1820 года до середины XIX века. В течение этого периода зародилось направление расчётов устойчивости склонов. Он начался с предложения Г. Франсе способа расчёта устойчивости по плоской поверхности скольжения, который был основан на уравнении прочности Кулона [76]. После этого, в 1857 году В. Ренкиным было рассмотрено предельное равновесие бесконечного массива, ограниченного наклонной поверхностью. Результатом стало появление теории давления земляных масс. Ренкиным было введено понятие о поверхности скольжения и выведены основные уравнения теории.

Второй период длится с середины XIX века до начала второй мировой войны. В течение этого периода происходило развитие методов расчёта устойчивости склонов, основанных на теории предельного равновесия. Было сформировано два направления развития методов. Первое направление связано со строгой теорией предельного равновесия, и продолжает идеи В. Ренкина. Оно получило развитие после выхода работ Ф. Кеттера [77]. Он составил систему уравнений предельного равновесия сыпучей среды, а после преобразовал её в криволинейных координатах, взяв за основу дифференциальные уравнения равновесия и предельные условия в каждой точке. В этот период было доказано, что скольжение происходит по некой кривой, решена общая задача статики сыпучей среды. Второе направление связано с «упрощённой» теорией предельного равновесия. Она основана на предположении об удовлетворении условия предельного равновесия по поверхности скольжения откоса. При этом предполагалось, что деформация откоса происходит в результате преодоления грунтами сопротивления сдвигу по всей предполагаемой поверхности скольжения. Именно на основании «упрощённой» теории

равновесия было разработано огромное количество методов расчётов, поскольку решение задачи по данной теории статически не определено, за исключением плоской формы поверхности скольжения или нулевого значения угла внутреннего трения. В рамках второго направления разрабатываются методы расчётов, базирующиеся на разделении оползневого тела на сегменты. Впервые это было применено Петтерсоном при расчёте устойчивости Стигбергской набережной в 1916 году. На основании этого был разработан простой шведский метод срезов [78], [43].

Третий период длился с 40-х по 70-е годы XX века. В это время разрабатываются основные методы расчётов устойчивости склонов, применяющиеся и по сей день. Развитие большого количества методов приурочено к прогрессу в сфере вычислительной техники. В 1954 году Н. Янбу и в 1955 году А. Бишоп разрабатывают свои методы расчёта устойчивости склонов, основанные на разделении оползневых тел на сегменты. В 60-е годы разрабатываются более сложные методы. В 1965 году Н. Моргенштерн и В. Прайс, а в 1967 году Е. Спенсер, разрабатывают свои методы, использующиеся при большинстве расчётов. В это же время в Советском Союзе разрабатывается большое количество методов расчётов, что связано с активным развитием изучения оползней в стране. Наиболее важными являются работы Г.М. Шахунянца [79], Н.Н. Маслова [80], Р.Р. Чугаева [81], М.Н. Гольдштейна [82], З.Г. Тер-Мартirosяна [83].

Четвёртый период начался в середине 70-х годов прошлого века, и длится в настоящее время. Он характеризуется крайне быстрым развитием компьютерных технологий, что изменило подходы к расчётам устойчивости склонов. Появляется большое количество программ, позволяющих производить сложные расчёты разными методами на персональных компьютерах. Возможности вычислительной техники позволяют глубже понимать процессы, происходящие в пределах склонов. В 1970 году Д. Френдлунд разработал метод предельного равновесия [84] и составил алгоритм программы для его реализации на вычислительных машинах. Разрабатываются и набирают популярность программы, использующие методы конечных элементов и конечных разностей.

В настоящее время существует множество методов расчётов устойчивости склонов. Создано большое количество их классификаций, опирающихся на различные принципы группировки.

В качестве примера в табл. 2.1. приведем варианты классификации методов расчета устойчивости склонов предложенную Д. Коганом в 1998 году [85].

Таблица 2.1.

**Классификация методов расчета устойчивости склонов
(по Д. Когану с упрощениями)**

Традиционные методы анализа	Методы предельного равновесия
	Методы кинематического анализа
	Методы статистического анализа обрушения
Численные методы анализа	Методы основанные на механике сплошной среды
	Методы основанные на механике дискретной среды
	Гибридные методы

В данной работе используются методы, основанные на анализе предельного равновесия. Они подробно рассмотрены в следующем разделе.

2.2 Методы предельного равновесия

В настоящее время существует достаточно много различных методов, основанных на предельном равновесии. Это связано со статической неопределенностью задачи. Различия между методами заключаются в том, какие приняты допущения, как производится учет сил действующих на границе сегментов и как задается взаимоотношение между сдвигающими и нормальными силами, действующими на их границе.

В 1977 году в Саскатчеванском университете Д. Френдлундом была разработана общая формулировка предельного равновесия (GLE) [84]. Она основывается на системе уравнений для расчёта коэффициента устойчивости, одно из которых удовлетворяет условию равновесия сил, а другое моментов сил [78].

Методы предельного равновесия основаны на предельной схеме удерживающих и сдвигающих усилий действующих на склон. Коэффициент устойчивости в этом случае может быть определен как отношение удерживающих моментов к сдвигающим или как отношение удерживающих сил к сдвигающим:

$$\frac{M_{уд}}{M_{сдв}} = K_y \quad \text{или} \quad \frac{F_{уд}}{F_{сдв}} = K_y \quad (2.1)$$

Стоит отметить, что методы предельного равновесия основаны на принципе статики, т.е. комбинации моментов, вертикальных и горизонтальных сил. В данных методах ничего не говорится о деформации и смещениях, поэтому они не удовлетворяют вопросам совместности смещений.

Удерживающие и сдвигающие силы в развитии оползневого процесса являют собой положительные и отрицательные обратные связи соответственно [67]. Роль отрицательной обратной связи выполняют удерживающие силы, а положительной – сдвигающие. И задачей прогноза развития оползневого процесса является установление их величины и соотношения.

Общая схема классификации методов предельного равновесия, основанная на классификации И.К. Фоменко с наиболее известными методами расчётов устойчивости склонов приведена на рис. 2.2. Методы, входящие в классификацию, объединяются в два подкласса – отсеков и монолитного тела [43].

Последний включает в себя группы методов монолитного тела.

Примерами методов монолитного тела служат методы Тейлора, Иванова и шведского цилиндра. При расчёте коэффициента устойчивости склона рассматривается условие равновесия сдвигающего и удерживающего моментов. Сдвигающий момент рассчитывается исходя из допущения о том, что все внешние силы действуют на отсек (монолитное оползневое

тело) как одна – равнодействующая. Удерживающий момент рассчитывается как произведение удельного веса грунтов и суммы касательных напряжений на элементарных участках сдвига.

Подкласс методов отсеков включает в себя методы, в основе которых лежит разбиение массива на отсеки – сегменты с прямолинейным отрезком в основании. Для каждого отсека рассчитываются силы, действующие на границах каждого отсека. Он подразделяется на группы вертикальных и невертикальных отсеков.

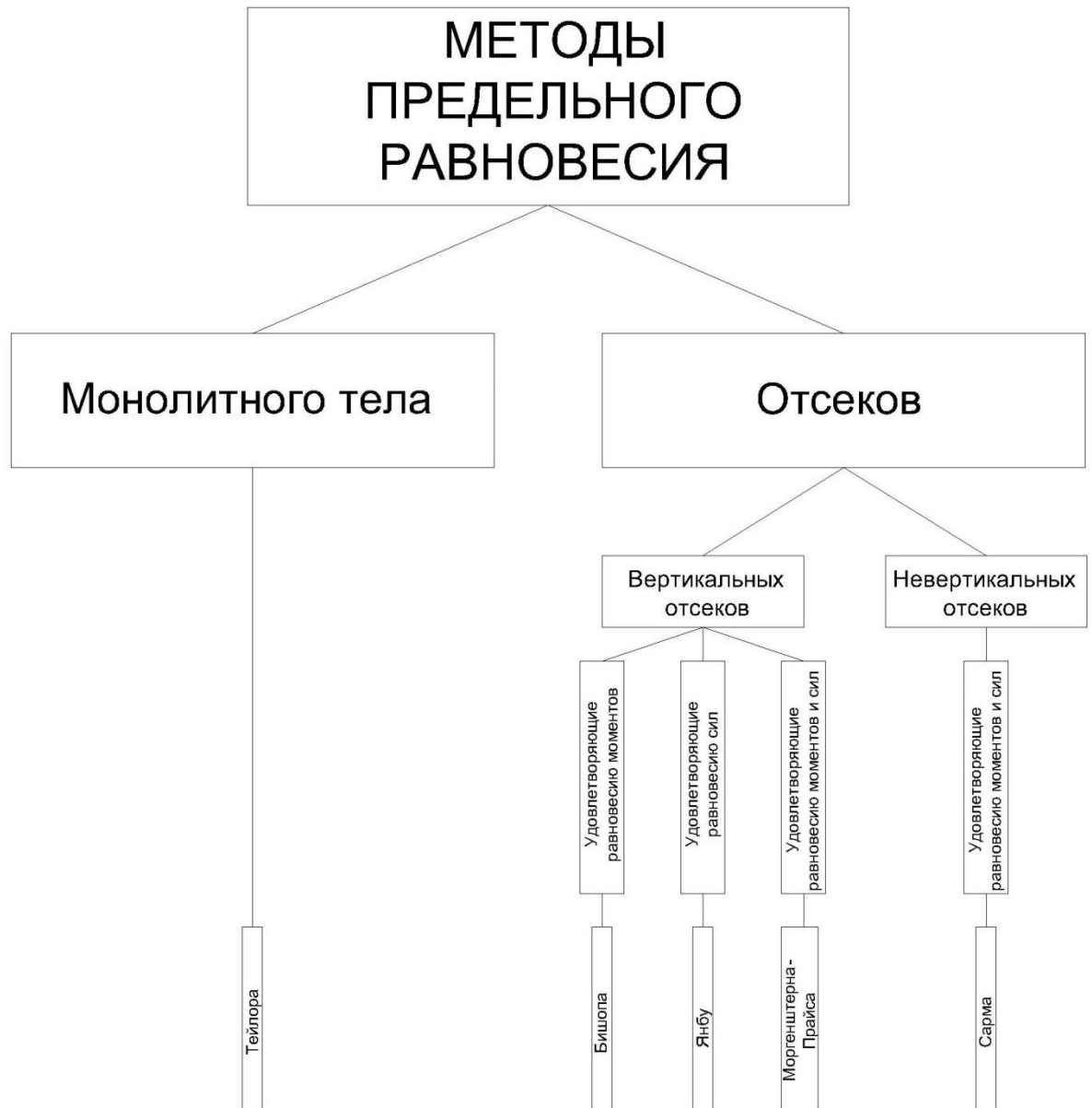


Рис. 2.2. Классификация методов предельного равновесия

Группа вертикальных отсеков разделяется на три подгруппы, в зависимости от того, выполнение каких условий удовлетворяется.

Первая подгруппа состоит из методов, удовлетворяющих равновесию моментов. К ним относятся методы Бишоп, Феллениуса. В настоящей работе для расчётов был использован

упрощённый метод Бишопа, поэтому для общей характеристики подгруппы приведём его описание.

Данный метод разработан в 1957 году английским профессором Лондонского Имперского колледжа Аланом Уилфредом Бишопом [86]. В данном методе осуществляется удовлетворение условию равновесия общих моментов и вертикальных сил, при этом не соблюдается равновесие сдвигающих сил. Диаграмма распределения сил в отсеке и многоугольник сил, построенные при расчёте по упрощённому методу Бишопа показаны на рис. 2.3.

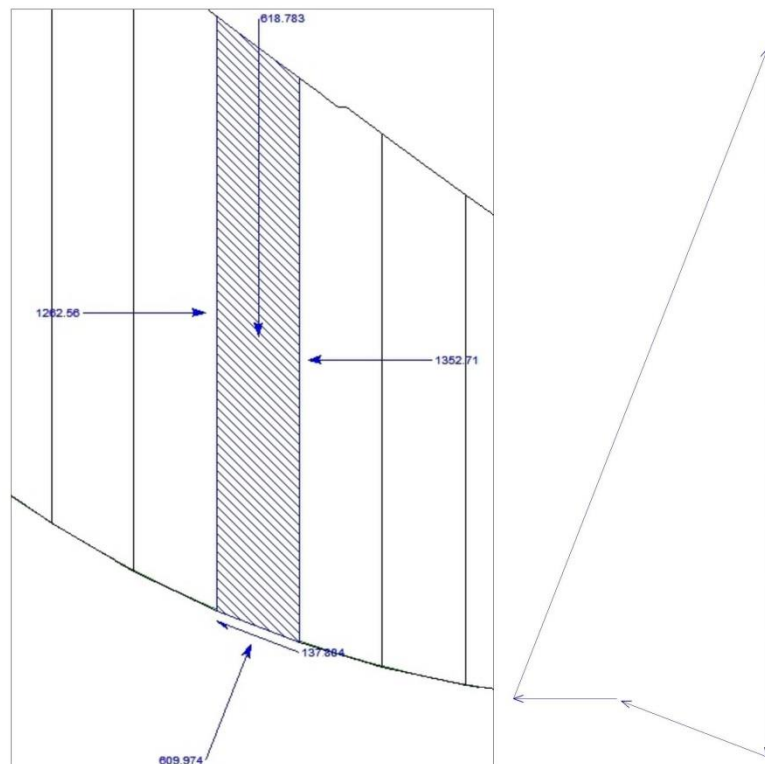


Рис. 2.3. Диаграмма распределения сил в отсеке и многоугольник сил, построенные по упрощённому методу Бишопа.

Уравнение для вычисления коэффициента устойчивости по упрощённому методу Бишопа выглядит так:

$$K_y = \frac{\sum \left[(c \cdot \beta + W \cdot \tan \varphi) \cdot \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \varphi}{K_y} \right) \right]}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (2.2),$$

где K_y – коэффициент устойчивости склона; c – величина сцепления грунта; φ – угол внутреннего трения; W – вес отсека; β – длина основания отсека; α – угол наклона основания отсека.

Для решения этого уравнения требуется задаваться предположением о начальном значении коэффициента устойчивости склона. Это связано с тем, что переменная K_y входит в обе части уравнения. После этого уравнение решается итерацией до тех пор, пока

значение коэффициента устойчивости не станет меньше заданной допустимой погрешности.

Метод Бишопа рекомендован российскими нормативными документами для расчёта устойчивости склонов.

Вторая подгруппа методов, входящая в группу вертикальных отсеков, состоит из методов, удовлетворяющих равновесию сдвигающих сил. К ним относятся метод Маслова-Берера, упрощённый и обобщённый методы Янбу и ассоциации инженеров. В настоящей работе для расчётов был использован упрощённый метод Янбу, поэтому для общей характеристики подгруппы приведём его описание.

Данный метод разработан в 1954 году норвежским профессором геотехники Нилмаром Оскаром Чарльзом Янбу [87]. Он очень схож с методом Бишопа. Отличием является то, что в данном методе осуществляется удовлетворение равновесию сдвигающих сил, при этом не соблюдается удовлетворение равновесию моментов. Диаграмма распределения сил в отсеке и многоугольник сил, построенные при расчёте по упрощённому методу Янбу показаны на рис. 2.4.

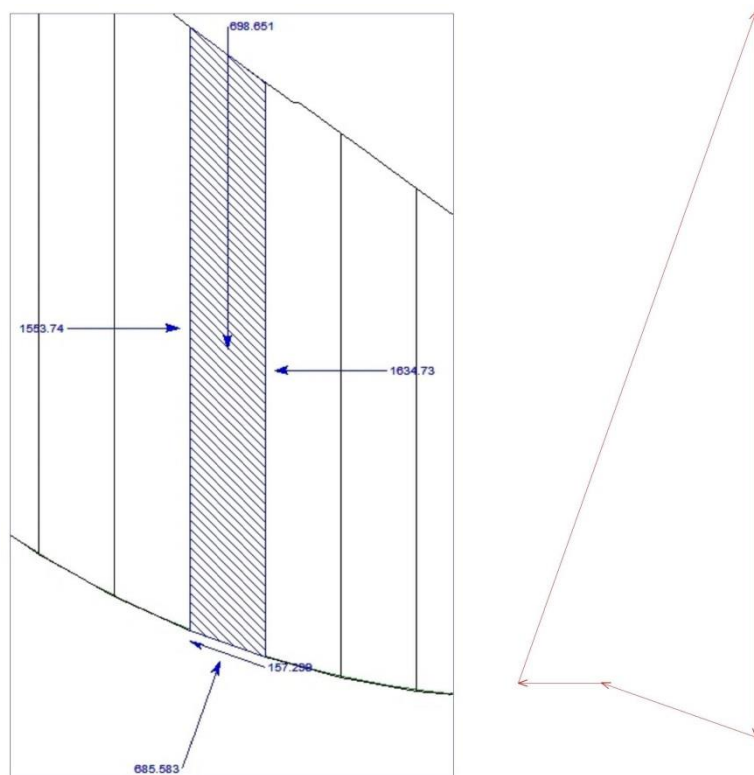


Рис. 2.4. Диаграмма распределения сил в отсеке и многоугольник сил, построенные по упрощённому методу Янбу.

Анализируя многоугольник сил в отсеке, можно сказать что многоугольник, получающийся по расчётам методом Янбу, замкнут лучше, чем в методе Бишопа. Стоит отметить, что при расчёте по круглоцилиндрической поверхности результаты по методу Янбу получаются заниженными.

Уравнение для вычисления коэффициента устойчивости по упрощённому методу Янбу выглядит так:

$$K_y = \frac{\sum[(c \cdot \beta + N \cdot \operatorname{tg} \varphi) \cdot \sec \alpha]}{\sum W \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sum \Delta E} \quad (2.3),$$

где K_y – коэффициент устойчивости склона; c – величина сцепления грунта; φ – угол внутреннего трения; W – вес отсека; N – сила реакции опоры отсека; β – длина основания отсека; α – угол наклона основания отсека; ΔE – разность горизонтальных удерживающих и сдвигающих горизонтальных сил, действующих на границах отсека.

Упрощённый метод Янбу является наиболее близким к методу Маслова-Берера, рекомендованному российскими нормативными документами для расчёта устойчивости склонов [88].

Третья подгруппа методов, входящая в группу вертикальных отсеков, состоит из методов, удовлетворяющих равновесию и моментов и сдвигающих сил. Наиболее известны методы Моргенштерна-Прайса, Спенсера и обобщённого предельного равновесия. В настоящей работе для расчётов был использован метод Моргенштерна-Прайса, поэтому для общей характеристики подгруппы приведём его описание.

Данный метод разработан в 1965 году Норбертом Моргенштерном и В. Прайсом [89]. В данном методе осуществляется удовлетворение условию и равновесия общих моментов и вертикальных сил, и равновесию сдвигающих сил. Диаграмма распределения сил в отсеке и многоугольник сил, построенные при расчёте по методу Моргенштерна-Прайса показаны на рис. 2.5.

Уравнение для вычисления коэффициента устойчивости по методу Моргенштерна-Прайса в отношении равновесия горизонтальных сил выглядит так:

$$K_y(f) = \frac{\sum\{c' \cdot \beta \cdot \cos \alpha + N \cdot \operatorname{tg} \varphi' \cdot \cos \alpha\}}{\sum N \cdot \sin \alpha - \sum D \cdot \cos \omega} \quad (2.4),$$

Уравнение для вычисления коэффициента устойчивости в отношении равновесия моментов выглядит так:

$$K_y(m) = \frac{\sum\{c' \cdot \beta \cdot R + N \cdot R \cdot \operatorname{tg} \varphi'\}}{\sum(N \cdot \sin \alpha - N \cdot f \mp D \cdot d)} \quad (2.5)$$

где c' – эффективное сцепление грунта; φ' – эффективный угол внутреннего трения; u – поровое давление; N – сила, нормальная основанию отсека; W – вес отсека; D – нагрузка; β , R , f , d , ω – геометрические параметры; α – уклон наклона основания отсека к горизонтали;

Для нахождения значения коэффициента устойчивости склона необходимо решить систему из двух уравнений. Для этого вводится упрощающее допущение, относящееся к зависимости между касательными E и нормальными N составляющими сил взаимодействия между отсеками:

$$E = X \lambda f(x) \quad (2.6)$$

где, X – касательная составляющая сил взаимодействия между отсеками; E – нормальные составляющие сил взаимодействия между отсеками; $f(x)$ – вид функциональной зависимости между E и X ; λ – доля используемой функции.

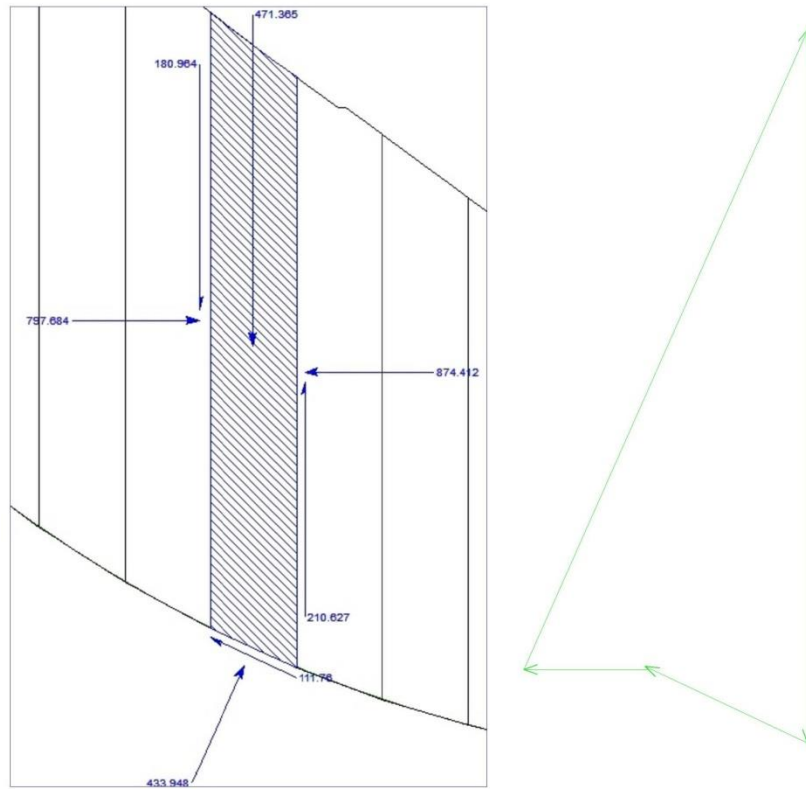


Рис. 2.5. Диаграмма распределения сил в отсеке и многоугольник сил, построенные по методу Morgenstern-Price.

При использовании описанных выше методов расчётов устойчивости склонов существует два критерия, влияющие на результаты расчётов устойчивости склонов:

1. Выбор модели распределения свойств грунтов.
2. Выбор формы поверхности скольжения, по которой будет производиться расчёт коэффициента устойчивости.

Их подробное описание дано в следующем разделе.

2.3 Форма поверхности скольжения

Основной задачей при расчетах устойчивости склонов является нахождение положения и формы критической поверхности скольжения (характеризующейся минимальным коэффициентом устойчивости).

Расчёты по описанным выше методам, в классической постановке задачи, ведутся по поверхностям скольжения круглоцилиндрической формы. Но в природе такая форма поверхности скольжения встречается не часто, что, в первую очередь, связано с геолого-структурными особенностями массива горных пород. В связи с этим, в различных программах существует механизмы оптимизации поверхности скольжения.

Оптимизация состоит в следующем. Вначале находится круглоцилиндрическая поверхность скольжения с минимальным значением коэффициента устойчивости. После этого итеративным путём производится поиск поверхности скольжения, имеющей отличающуюся от круглой форму. Найденные поверхности могут иметь либо линейно-ломаную форму, либо состоящую из ломаных и круглых отрезков. Обязательным является условие выпуклости подобных плоскостей, иначе такие поверхности противоречат здравому смыслу. Суть поиска заключается в том, что круглоцилиндрическая поверхность разделяется на отсеки с прямолинейным основанием. После чего происходит перемещение точек, являющихся концами отрезков. Начинается перемещение с верхней точки пересечения поверхности скольжения с уровнем земли. Далее перемещаются все точки. После чего самые длинные отрезки разбиваются на две части, и процедура повторяется. Повторение производится то тех пор, пока не будет найдена поверхность с более низким значением коэффициента устойчивости. Окончательная форма и положение оптимизированной поверхности скольжения будет зависеть от формы и положения изначально рассчитанной (или заданной) поверхности, так как оптимизированный поиск осуществляется в пределах круглоцилиндрической поверхности. Данный метод позволяет найти более точную форму и положение критической поверхности скольжения [78].

Выводы

Существует большое количество подходов к прогнозу оползневой опасности. В зависимости от характера и масштаба изысканий методы прогнозирования подразделяются на региональные и локальные. В данной работе рассматриваются методы математического моделирования, основанные на анализе предельного равновесия, которые относятся к методам локального прогнозирования.

На основании анализа методов расчётов устойчивости склонов, в качестве основных в настоящей работе были выбраны упрощённые методы Бишопа и Янбу, а также Моргенштерна-Прайса, поскольку принадлежат к разным классам методов предельного равновесия. Метод Бишопа удовлетворяет условию равновесия общих моментов и вертикальных сил, при этом не соблюдается равновесие сдвигающих сил. Метод Янбу удовлетворяет равновесию сдвигающих сил, при этом не соблюдается удовлетворение равновесию моментов. Метод Моргенштерна-Прайса удовлетворяет условиям равновесия общих моментов вертикальных и сдвигающих сил. Методы Бишопа и Моргенштерна-Прайса рекомендованы российскими нормативными документами. Метод Янбу является наиболее близким к методу Маслова-Берера, также рекомендованного к использованию в России.

Расчёты устойчивости склонов заключаются в поиске положения и формы потенциальной поверхности скольжения с минимальным значением коэффициента устойчивости, который может быть определён как отношение удерживающих и сдвигающих сил или моментов. Классическая форма поверхности скольжения является круглоцилиндрической, однако современные методики расчётов позволяют находить более оптимальные формы поверхностей скольжения. Этот процесс называется оптимизацией и играет важную роль в количественной оценке устойчивости склонов.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ РАСЧЁТЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

3.1 О качестве отражения природных условий при построении геомеханических моделей

Одним из главных этапов выполнения работ по количественной оценке устойчивости склонов является схематизация при построении математической модели. Такого рода схематизация может быть обобщённой или специальной. Под обобщённой схематизацией, в данном контексте, следует понимать процесс упрощения реального природного объекта, обладающего бесконечной степенью сложности, до концептуальной модели, с одной стороны ограниченной рамками научного познания, а с другой стороны – степенью информационной обеспеченности, достигнутой при выполнении инженерно-геологических работ [90], [73]. Специальная схематизация предполагает упрощение концептуальной модели до специализированной (геомеханической) схемы, способной в рамках поставленной задачи сохранить в должной мере адекватность полученной схемы и исходной концептуальной модели, а в конечном итоге – обеспечить с требуемой детальностью описание реального природного объекта.

Цель специальной схематизации – максимальное упрощение при минимальной потере адекватности. Этот тезис может служить также основой для математической постановки задачи. Обоснование схематизации является одной из важнейших задач при описании процесса построения математической модели [88].

Собственно выполнение специальной схематизации можно разделить на два взаимосвязанных этапа:

- схематизацию структуры склонового массива;
- схематизацию свойств грунтов и особенностей их распределения в исследуемом массиве.

Результаты количественной оценки устойчивости склонов зависят от исходной инженерно-геологической информации, выбора модели распределения свойств грунтов в массиве и используемых методов расчёта устойчивости.

Качество информации, получаемой в результате инженерно-геологических изысканий, зависит от применяемых методов изучения свойств геологической среды, которые, в свою очередь, определяются в процессе составления программы работ, с учётом технического задания, на основании требований нормативных документов. В процессе полевых работ производится описание обнажений, открытых горных выработок и карьеров, а также буровых скважин. При описании открытых горных выработок или обнажений выделение границ между

различными инженерно-геологическими телами, отличающимися хотя бы по литологическому составу, бывает вполне очевидно. Не так однозначно решается эта задача при бурении. Критерий выделения границ становится субъективным, так как в процессе проходки скважины буровым оборудованием невозможно в точности определить глубину, на которой происходит смена слоёв. Определяющую роль в оценке границ играет человеческий, личностный фактор. Более точно выделять слои помогают косвенные методы получения информации – геофизика, зондирование. Но указанные исследования не всегда применяются при проведении полевых работ.

При проходке фациально замещающихся слоёв, что особенно характерно для четвертичных грунтов флювиального генезиса, переходные зоны обычно не выделяются. Вместо этого, вполне произвольным образом проводится строгая граница между соседними литологическими разностями. К примеру, при описании аллювиальных отложений границу между песчаными и глинистыми слоями, на самом деле неявную, часто выделяют на какой-то строго определённой глубине. В действительности же такой границы может и не быть. Вместо неё часто наличествует зона постепенного изменения процентного соотношения песчаных и глинистых разностей. Аналогичная картина происходит при описании техногенных грунтов. В этом случае установлению границ между слоями, как правило, уделяется крайне мало внимания. Таким образом, при описании буровой скважины границы между различными инженерно-геологическими телами выделяются с определённой погрешностью. Это может существенно влиять на расчёт устойчивости склона, поскольку граница между песчаными и глинистыми грунтами зачастую определяет положение поверхности скольжения с минимальным коэффициентом устойчивости.

По окончании полевых работ производится камеральная обработка материалов, полученных в процессе изысканий. Определяются различные свойства грунтов, строятся инженерно-геологические колонки и разрезы, которые служат основой для построения геомеханических моделей. При этом объективным является выделение границ между различными стратиграфо-генетическими комплексами (СГК). Выделение же границ между более мелкими инженерно-геологическими телами является не вполне достоверным. В первую очередь это может быть связано с погрешностями при полевом описании скважин, а также с недостаточным количеством отобранных проб, что снижает точность статистической обработки лабораторных данных и приводит к искусственному упрощению реальной картины. Ещё одним фактором, вносящим искажение в представление о строении склонового массива, является проведение границ между скважинами. Очертания линз и прослоев, опять же, зависят от геолога, составляющего разрез. И если при изысканиях под строительство при проходке котлована разрезы могут быть скорректированы, то при изучении склонов за составлением

разрезов следует построение геомеханической модели, качество которой напрямую влияет на результаты расчётов устойчивости.

При построении геомеханической модели происходит ещё более сильное искажение реальных природных условий и всё сильнее возрастает влияние фактора субъективности. Причины этого – коррекция геометрии рельефа и инженерно-геологических разностей, схематизация свойств грунтов и особенностей их распределения в исследуемом массиве

.

3.2 Описание возможных расчётных схем

Сегодня в России схематизации свойств грунтов и особенностей их распределения в исследуемом массиве уделяется неоправданно мало внимания.

В расчётах устойчивости склонов исторически применяется теория прочности Мора-Кулона. Французский инженер Шарль Огюст де Кулон в 1773 году сформулировал критерий прочности, доработанный в XIX веке немецким физиком Кристианом Отто Мором, который выражается в таком виде:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (3.1)$$

где τ – величина касательных напряжений, σ – величина нормальных напряжений, φ – угол внутреннего трения грунтов, C – величина сцепления грунта.

Данный критерий показывает зависимость максимального сопротивления сдвигу от нормальной нагрузки, при заданных значениях прочностных свойств грунтов. При этом возможны различные варианты задания свойств.

В настоящей работе впервые в отечественной практике расчетов устойчивости склонов рассмотрены различные модели распределения свойств грунтов в массиве.

Рассмотрим пять принципиально отличающихся подходов к составлению модели возможного распределения свойств грунтов в оползневом массиве:

1. Принятый в отечественной практике подход: в пределах выделенных расчётных грунтовых элементов (РГЭ) задают расчётные характеристики свойств грунтов.
2. Принятый за рубежом подход: в пределах выделенных РГЭ задают нормативные характеристики свойств грунтов (Eurocode 7 - Design approach 1, Combination 1).

Оба подхода подразумевают использование статистического распределения свойств в пределах массива. Статистическое распределение является единственно возможным для определённой выборки значений прочностных свойств, но ему соответствует бесконечное множество пространственных распределений.

В связи с этим автором сформулированы следующие принципиальные подходы, основанные на построении поля пространственного распределения свойств грунтов в массиве

3. В пределах выделенных РГЭ задаётся поле распределения значений прочностных характеристик;
4. В пределах выделенных стратиграфо-генетических комплексов задаётся поле распределения значений прочностных характеристик;
5. В пределах всего массива без учёта литологических границ задаётся поле распределения значений прочностных характеристик.

Консервативные, детерминистические методы расчетов устойчивости склонов, применяемые в российской практике, учитывают изменчивость свойств грунтов лишь

опосредованно – через использование в математических моделях расчетных (в статистической терминологии) значений по выделенным инженерно-геологическим элементам (ИГЭ). Полученные на основании подобных расчётов коэффициенты устойчивости склонов в действительности не определяют фактический уровень опасности, поскольку невозможно установить взаимосвязь между ними и вероятностью развития оползневого процесса. Также стоит отметить, что данный подход не позволяет решить основную задачу при выполнении оценки устойчивости склонов – нахождение критической поверхности скольжения с минимальным коэффициентом устойчивости. Это связано с тем, что закладываемые в расчет, формально уменьшенные, прочностные характеристики грунтов предопределяют не только заниженные итоговые значения коэффициентов устойчивости, но совсем другую «расчетную» поверхность скольжения. Очевидно, что для однородных склонов уменьшение величины сцепления грунтов будет приводить к уменьшению глубины поверхности скольжения, что, в свою очередь, скорее всего, приведёт к ошибкам при проектировании [91].

Ряда описанных выше недостатков лишен второй подход, при котором в пределах выделенных РГЭ задаются нормативные характеристики свойств грунтов. Основным преимуществом данного подхода является возможность использования вероятностного анализа при оценке устойчивости склонов, который приобретает актуальность в мировой практике. Его применение оправдано пониманием дискретности (по существу, случайности) получаемых ходе инженерно-изыскательских работ рядов значений физико-механических характеристик грунтов. Сущность такого анализа заключается в определении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости в зависимости от вероятностных функций распределения физико-механических характеристик грунтов, слагающих склон, или иных факторов, влияющих на оползневой процесс. Однако и данный подход к составлению модели не лишен определённых недостатков [91]. Это связано с тем, что формирование поверхности скольжения, как правило, происходит по ослабленным зонам. В описываемом подходе используются средние значения характеристик, что не в полной мере отвечает механизму развития оползневого процесса.

Подходы с использованием полей распределения прочностных свойств грунтов позволяют избежать некоторых вышеперечисленных недостатков. В их основе лежит следующая идея: по известным, фактически замеренным величинам свойств грунтов строится поле распределения свойств в массиве.

Отличительной особенностью применения предлагаемых автором подходов является уход от статистической обработки лабораторных данных для каждого слоя. Даже самые мелкие геологические тела неоднородны. В отечественной практике неоднородность учитывается путём понижения среднего значения характеристики. В зарубежной практике используется среднее значение – математическое ожидание, при этом неоднородность учитывается с

помощью вероятностных функций распределения физико-механических характеристик грунтов.

Минусом обоих общепринятых методов является следующая особенность. Выделяемому в пределах одного геологического разреза слою назначаются статистически обработанные характеристики, выборка которых включает в себя значения, определённые для этого слоя в других местах. То есть, если выделенный ИГЭ вскрыт в другой скважине, на некотором расстоянии от профиля, который в данный момент обрабатывается, показатели физико-механических свойств будут зависеть от данных, полученных в другой скважине. А при определённом уровне схематизации это вносит погрешность в отражение реальной картины. Особенно это существенно для техногенных грунтов.

Для расчётов устойчивости склонов по предлагаемым методам значения характеристик грунтов задаются следующим образом. На геомеханическую модель наносятся координаты отобранных из каждой скважины проб. Они определяются в пространстве по абсолютным координатам устья скважины и глубине отбора пробы. На разрез наносятся значения прочностных свойств грунтов в определённой точке. Далее необходимо задать поле параметра. Здесь можно действовать в соответствии с одним из трёх предлагаемых подходов. Поле изменения параметра определяется либо в пределах границ выделенных РГЭ, либо в пределах СГК, либо в пределах всего массива без учёта каких-либо границ.

Для практической реализации предлагаемых нами подходов достаточно произвести интерполяцию свойств грунтов в пределах выделяемого тела. Определяющим является вопрос выбора и обоснования применяемого метода. Наиболее распространённые методы интерполяции приведены разделе 3.3 настоящей работы.

Количественная оценка устойчивости склона, выполненная с применением каждого подхода, обладает определёнными особенностями. Расчёт по схеме с распределением свойств грунтов в пределах РГЭ подразумевает отказ от статистической обработки значений характеристик, полученных вне рассчитываемого профиля. Выделение же границ следует выполнять в пределах каждого профиля по классическим методикам статистической обработки, связанным с изменчивостью физических свойств грунтов по глубине и регламентированным ГОСТ 20522 – 2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний» [92]. При необходимом количестве проб и правильно выбранном методе интерполяции значений параметров данный подход позволяет оценить устойчивость склона в пределах выбранного профиля.

Недостатком подхода, при котором распределение свойств грунтов выполняется по массиву в целом, является невозможность учёта геологической структуры склона. Но при этом, весь массив представляет собой поле распределения сцепления и угла внутреннего трения, что

в случае сильно неоднородного геологического строения при использовании косвенных методов получения инженерно-геологической информации (в первую очередь зондирования) будет иметь положительные результаты. Также разумным кажется применение данного подхода при оценке устойчивости однородных склонов, что позволит учесть изменение значений прочностных свойств грунтов в пространстве. Другим недостатком данного подхода является отсутствие возможности задания удельного веса грунтов в разных точках – этот параметр в программе Slide 6.0 назначается общим на весь массив. Правда значение удельного веса не оказывает большого влияния на величину коэффициента устойчивости склона.

Подход, в котором используется распределение свойств грунтов в пределах стратиграфо-генетических комплексов, по мнению автора, является наиболее обоснованным. В данном случае не возникает проблемы объединения различных по генезису грунтов в одно расчётное поле, и при этом есть возможность учёта переходных зон между фациально замещающимися разностями в пределах одного СГК. Описываемый подход наиболее применим к расчёту устойчивости склонов, в пределах которых большую мощность имеют техногенные отложения. Ввиду того, что техногенные грунты обладают сильной неоднородностью, большой проблемой является статистическая обработка значений механических свойств указанных грунтов. Данный подход позволяет рассчитывать устойчивость склонов, сложенных техногенными грунтами, без применения статистической обработки значений, моделируя поле изменения сцепления и угла внутреннего трения в пределах стратиграфо-генетического комплекса, и без выделения границ между различными слоями техногенных грунтов, проведение которых крайне затруднительно.

3.3 Методы интерполяции свойств грунтов в склоновом массиве

Современные компьютерные программы при расчётах устойчивости склонов методами предельного равновесия позволяют задавать поле распределения физико-механических свойств грунтов. Но при использовании данного подхода встаёт вопрос о характере распределения значений характеристик в грунтовом массиве. Для этого в программах применяются методы интерполяции, при помощи которых осуществляется построение поля изменения свойств грунтов в пределах заданной области. Рассмотрим основные методы, используемые для построения полей распределения физико-механических характеристик в программе Slide 6.0.

Метод Чага

Метод предложен Ашоком Чагом (Ashok K. Chugh) – сотрудником службы водных и энергетических ресурсов штата Колорадо, США. Он был впервые опубликован в статье «Pore Water Pressure in Natural Slopes» (поровое давление воды в природных склонах) [93]. Метод позволяет рассчитать значения параметра в грунтовом массиве между точками, в которых определено значение того или иного параметра (изначально порового давления). Алгоритм расчётов приведён ниже.

Пусть у нас есть геомеханическая модель склона, в n точках которой определены значения параметра U (рис. 3.1). Для определения значения параметра U_m в точке m необходимо построить ортогональную систему координат с началом координат в точке m . Тогда наша модель будет разделена на четыре квадранта (рис. 3.2). Необходимо определить к какому квадранту относится каждая из точек. Точки, лежащие на осях координат необходимо сместить в один из квадрантов. Далее следует выявить в каждом из квадрантов точку, ближайшую к началу координат (точке m). Определим координаты каждой из четырёх точек как x_1y_1 , x_2y_2 , x_3y_3 , x_4y_4 , значения параметра в этих точках как U_1 , U_2 , U_3 , и U_4 (рис. 3.3). После чего составим однородный полином первой степени:

$$U_n = a_1 + a_2x_n + a_3y_n \quad (3.2)$$

где a_1 , a_2 , и a_3 – произвольные коэффициенты.

Для каждого из четырёх треугольников составим систему из трёх уравнений для каждой вершины. Решив четыре системы, определим значение параметра U_m в точке m .

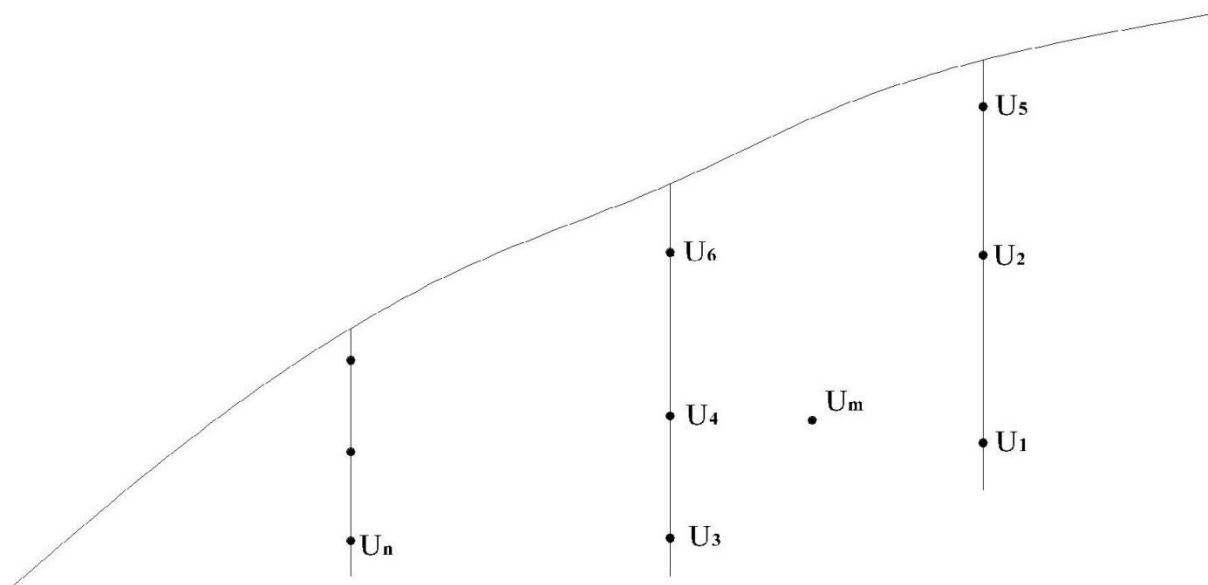


Рисунок 3.1

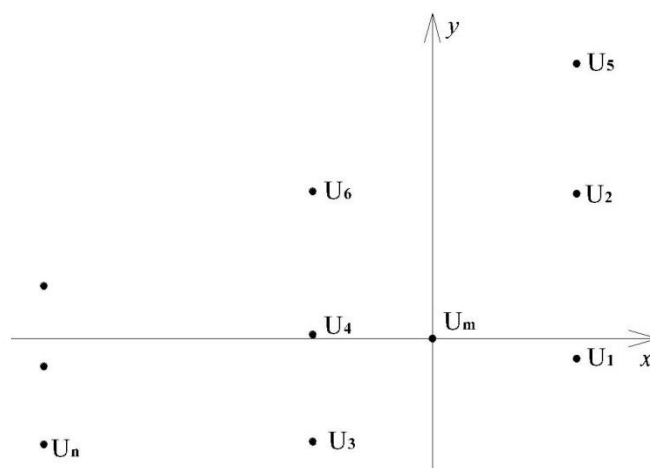


Рисунок 3.2

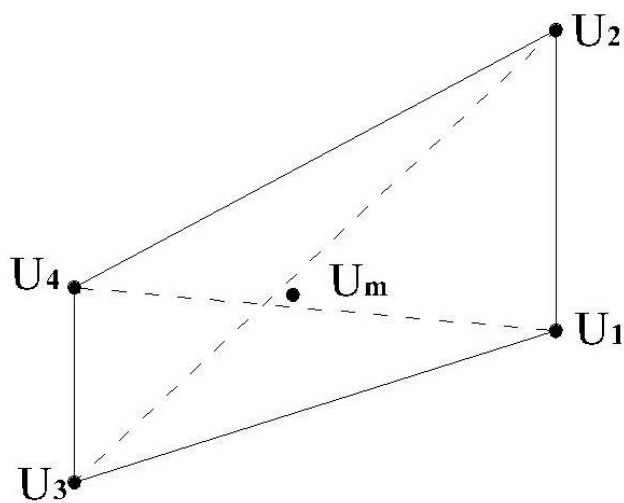


Рисунок 3.3

Триангуляция Делоне

Триангуляция Делоне (TIN triangulation, triangulation irregular network – триангуляция неравномерных сетей) создаёт поле значений, используя метод интерполяции Делоне. Метод Делоне предложен советским математиком Борисом Николаевичем Делоне в 1934 году [94].

Триангуляция называется «триангуляцией Делоне», если она является выпуклой и удовлетворяет «условию Делоне». Условие Делоне заключается в том, что внутри окружности, описанной вокруг любого из построенных треугольников, не попадает ни одна из заданных точек триангуляции (рис. 3.4). Пара соседних треугольников триангуляции удовлетворяет «условию Делоне», если ему (условию) удовлетворяет триангуляция только этих двух треугольников. Треугольник удовлетворяет «условию Делоне», если ему (условию) удовлетворяет триангуляция этого треугольника и трёх его соседей (если они существуют). Триангуляция Делоне появилась как граф, двойственный диаграмме Вороного – базовой структуре вычислительной геометрии [95].

Для заданной точки $P_i \in \{P_1, \dots, P_n\}$ на плоскости многоугольником (ячейкой) Вороного называется геометрическое место точек на плоскости, которые находятся к P_i ближе, чем к любой другой заданной точке P_j , $j \neq i$ [96]. Диаграммой Вороного заданного множества точек $\{P_1, \dots, P_n\}$ называется совокупность всех многоугольников Вороного этих точек (рис. 3.5) [95]. Одно из главных свойств диаграммы Вороного – двойственность триангуляции Делоне [94]. Это свойство заключается в том, что соединяя отрезками исходные точки, многоугольники которых соприкасаются хотя бы углами, мы получаем триангуляцию Делоне (рис. 3.5).

Существуют три теоремы о триангуляции Делоне, приведённые в книге А.В. Скворцова [95].

1. Триангуляцию Делоне можно получить из любой другой триангуляции по той же системе точек, последовательно перестраивая пары соседних треугольников, не удовлетворяющих условию Делоне в другие пары.
2. Триангуляция Делоне обладает максимальной суммой минимальных углов всех своих треугольников среди всех возможных триангуляций.
3. Триангуляция Делоне обладает минимальной суммой радиусов окружностей, описанных около треугольников, среди всех возможных триангуляций.

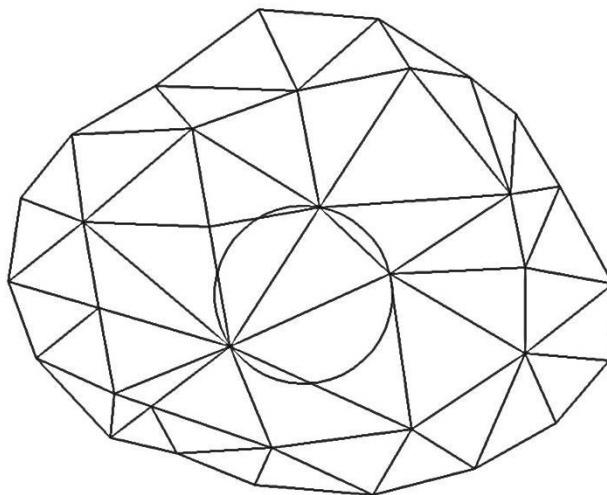


Рисунок 3.4. Пример триангуляции Делоне

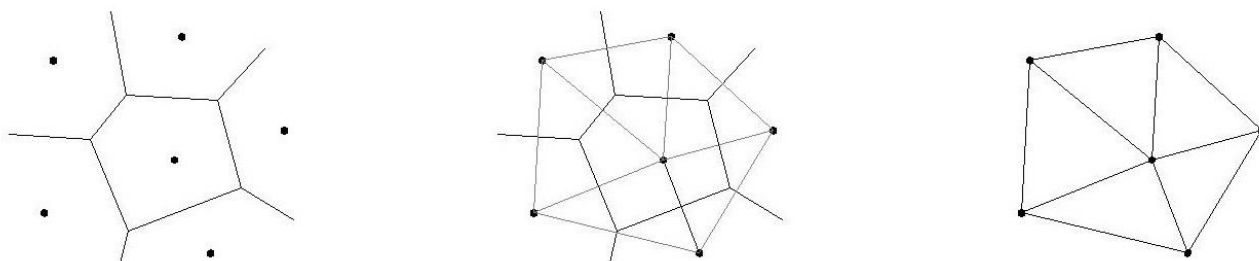


Рисунок 3.5. Пример Диаграммы Вороного и двойственной ей триангуляции Делоне

В случае если какая-нибудь точка лежит за пределами оболочки, используемой при построении поля параметра, тогда используется метод вторичной интерполяции для подобных выборочных областей. Выпуклая оболочка строится по полигону, в вершинах которого лежат уже известные значения.

Метод обратных взвешенных расстояний

Метод обратных взвешенных расстояний (Inverse distance) был предложен профессором Гарвардского университета Дональдом Шепардом (Shepard, Donald). Впервые он был опубликован в статье «A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data» (двумерная интерполяционная функция для неравномерно распределённых данных) в 1968 году [97]. Метод вычисляет значение параметра в искомой ячейке по среднему суммарному значению точек замеров, расположенных вблизи от неё. Чем ближе к рассчитываемой ячейке располагается точка замера, тем большее влияние она оказывает на её значение. Данный метод предполагает, что влияние точки, в которой измерен параметр на изучаемую ячейку, уменьшается по мере увеличения расстояния между ними. При построении интерполяционной функции используется метод наименьших квадратов, что уменьшает вероятность появления ложных структур (типа «бычьего глаза») вокруг точек с известным значением. Алгоритм метода представлен в уравнении (3.3).

$$F(P) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{F_i}{\|P-P_i\|^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\|P-P_i\|^2}} \quad (3.3),$$

где P – координаты искомой точки, $F(P)$ – интерполируемое значение в искомой точке, P_i – координаты известной точки (с заданным значением параметра), F_i – значение параметра в известной точке, $\|P-P_i\|$ – расстояние между интерполируемой точкой и точкой с заданным значением.

Локальные экстремумы обычно расположены в точках с заданным значением параметра и это приводит к плохим свойствам фигуры.

Метод тонкого сплайна

Метод тонкого сплайна разработан Ричардом Франком (Franke, Richard) и впервые описан в статье «Thin plate splines with tension» (тонкие сплайны под напряжением), вышедшей в 1985 году [98]. Название «сплайн тонкой пластины» или «тонкий сплайн» (thin-plate spline) отсылает к физической аналогии изгибания тонкого листа металла. Поверхность сплайна аналогична изогнутому тонкому металлическому листу, жёстко закреплённому в заданных точках. Также как и металл, имеющий жёсткость, тонкие сплайны сопротивляются сгибанию, что подразумевает гладкость аппроксимирующей поверхности. Результатом построения является трёхмерная поверхность, проходящая через все точки с заданными значениями параметра. Полученная функция является частным случаем базисной функции, выражающейся уравнением (3.4) [99].

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n c_i B(h_{0i}), \quad (3.4),$$

где h_{0i} – расстояние от точки x_0 до точки x_i ;

$$B(h) = (h^2 + \delta^2) \lg(h^2 + \delta^2), \quad (3.5),$$

$B(h)$ – базисная функция, зависящая от расстояния (h) и сглаживающего параметра δ ,

c_i – весовой коэффициент, определяемый из условия точности оценки в известных точках. Он означает, что во всех заданных точках (x_i, y_i) модель интерполяции даёт оценку, равную заданным значениям $V(x_i, y_i)$. Чтобы найти коэффициенты c_i , необходимо решить систему из N линейных уравнений с N неизвестными:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N c_i B[q(x_i, y_i; x_1, y_1)] = V(x_1, y_1), \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N c_i B[q(x_i, y_i; x_N, y_N)] = V(x_N, y_N). \end{cases} \quad (3.6)$$

3.4 Расчёт устойчивости склонов с применением различных расчётных схем

В данном разделе проанализирована зависимость результатов расчётов устойчивости склонов от выбора модели распределения свойств грунтов при исследовании оползней скольжения.

Для модели полевого распределения свойств грунтов в массиве выполнен анализ влияния метода интерполяции на результаты расчётов. В качестве объекта был выбран памятник архитектуры федерального значения Боголюбский монастырь, располагающийся по адресу Владимирская область, Суздальский район, посёлок Боголюбово, улица Ленина. Богородице-Рождественский собор, Лестничная башня и переход палат князя Андрея Боголюбского являются объектами культурного наследия ЮНЕСКО. Фотография объекта исследования приведена на рисунке 3.6.

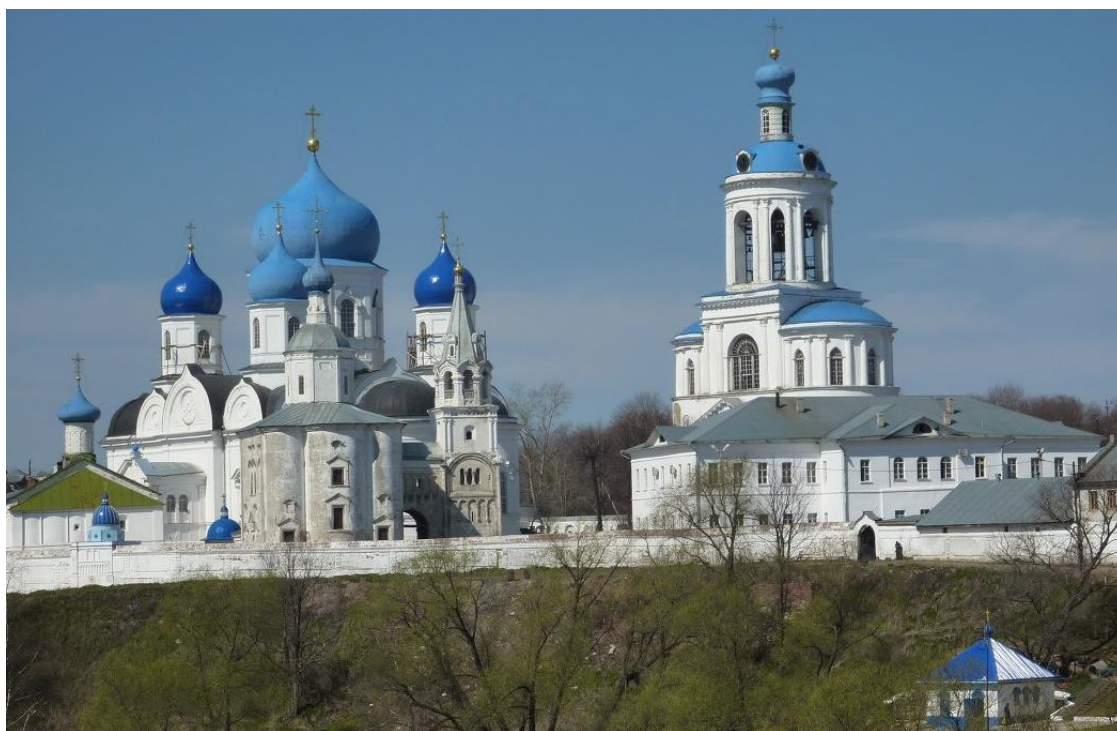


Рис.3.6. Общий вид склона – объекта моделирования

Описание объекта

Согласно письменным источникам Боголюбово городище основано в середине XII в. владимирским князем Андреем Юрьевичем, прозванным впоследствии Боголюбским. В Новгородской летописи под 1158 годом содержатся сведения «князь Андрей ... град заложи в Боголюбове», «создал же башет себе город камен, именем Боголюбивый». Основание города связывается с легендой о явлении Богоматери князю Андрею. В июне 1155 г. Андрей со свитой проезжал здесь, двигаясь из Киева в Суздаль, свою вотчину. Князь вез с собой икону Пресвятой Богородицы, будущую «Владимирскую». Неожиданно кони остановились, отказываясь

двинуться с места. Так продолжалось дотемна, и князь приказал раскинуть шатер, в котором всю ночь молился. Его молитва была настолько сильна, что Божья Матерь сама явилась ему. На этом месте князь основал свой замок и повелел написать явленный ему образ Богоматери. В период 1158 – 1165 гг. был возведен архитектурный ансамбль княжеской резиденции, состоящий из белокаменного княжеского замка, собора Рождества Богородицы и крепостной стены. Перед храмом находилась белокаменная водосвятная чаша под шатром или сводом (киворий). Боголюбский замок был вторым после Владимира центром политической жизни времен Андрея Боголюбского. Во время нашествия монголо-татар в феврале 1238 г. были разрушены его крепостные сооружения. Вероятно, были сильно повреждены и дворцовые здания. Их камень растаскивался впоследствии на нужды монастырского строительства, которое активно велось в XVII - XIX вв. В 1683 г. была построена Благовещенская церковь (перестроена в 1804 г.). По преданию, на ее месте стояла церковь Святого Леонтия, построенная Андреем Боголюбским. В 1751 г. на месте древнего Рождественского собора, обрушившегося в 1722 г., строится новый Богородице-Рождественский собор; к этому же времени относится строительство келарского корпуса, дома архимандрита. В XIX в. были построены Святые ворота с надвратной Успенской церковью и колокольной (1841 г.), монастырский собор Боголюбовской иконы Божией Матери (1866 г.), корпус монастырских келий и разные хозяйственные строения. [100].

В течение последних нескольких лет на территории памятника увеличилась интенсивность проявления суффозионного процесса. Основным индикатором стал объём выноса пылевато-глинистого материала в воде из каптированного источника в основании склона. На самом склоне образовались два провала диаметром до 1,5 м, глубиной до 3-х м. Также начались подвижки склона. Индикатором этого стало смещение пня, стоявшего у тропы на 6 м вниз по склону, а так же образование трещин растяжения в верхней части склона.

Целью изысканий, проведённых ООО «ИГИТ» в 2015 году, было получение необходимых инженерно-геологических материалов в объёме, достаточном для осуществления противоаварийных мероприятий по сохранению объекта культурного наследия Боголюбского монастыря. Автор принимал непосредственное участие в полевых работах и расчётах устойчивости склона [100], [101].

По результатам изысканий можно описать факторы и причины развивающегося оползневого процесса.

I группа факторов объединяет условия оползнеобразования (среднюю величину коэффициента устойчивости). Подробно эта группа факторов описана в разделе 1.3 настоящей работы. Применительно к изучаемому объекту, к этой группе относятся рельеф местности, геологическое строение склона, особенности физико-механических свойств грунтов,

гидрогеологические условия, развитие сопутствующих экзогенных геологических процессов и инженерная деятельность человека.

Схема расположения расчётного профиля и геологический разрез, на основании которого выполнялись расчёты приведены в приложениях №1 и №2

Рельеф местности

Рельеф участка характеризуется отметками 93-94 м (пойма реки), 108-109 м (поверхность первой надпойменной террасы).

В южной части территория ограничена крутым 15-ти метровым склоном по направлению к старице р. Клязьмы.

Монастырь расположен на левом берегу реки Клязьмы, на первой надпойменной террасе. Склон террасы крутой, частично покрыт молодой порослью кустарника и лиственными деревьями. В юго-восточной части участка исследования у подножия склона находится источник с оборудованной купелью. Пойма в рельефе выделяется плохо. Ширина её изменяется в пределах 10-18 м, отметка уреза воды в старице 93,2 м. Превышение поймы над урезом воды в старице составляет 1,5-2,0 м. Абсолютные отметки поверхности пойменной террасы составляют 94-95 м. Поверхность поймы местами заболочена.

Склон относится к крутым: высота его достигает 15 м, крутизна – 33-41°. У подножия наблюдаются выходы родников.

Геологическое строение склона

В структурном отношении территория проведения изысканий относится к центральной части Московской синеклизы, где с размывом четвертичные отложения залегают на пермских отложениях. По данным, полученным при проходке эксплуатационной скважины на территории монастыря в 2011 году, поверхность каменноугольных отложений вскрыта на глубине 63,0 м от дневной поверхности (абсолютная отметка 46,83 м). Объект исследования располагается в пределах Московской синеклизы Восточно-Европейской платформы.

В геологическом строении площадки сверху вниз принимают участие современные техногенные накопления (tQ_{IV}), современные озёрно-болотные отложения (lhQ_{IV}), современные аллювиальные (пойменные) отложения (aQ_{IV}), нерасчленённые средне-верхнечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные отложения первой надпойменной террасы р. Клязьмы (a, fQ_{II-III}), и отложения северодвинского горизонта татарского яруса пермской системы (P_{2sd}).

Четвертичная система (Q)

Техногенные накопления (tQ_{IV}) развиты повсеместно. Представлены суглинками тёмно-серыми мягкопластичными, тугопластичными, полутвёрдыми и текучими с включениями

дресвы кирпича и известняка, известково-песчаной крошки, древесного угля и прочего строительного-бытового мусора. Их мощность изменяется от 0,4 до 2,3 м.

Современные озёрно-болотные отложения (lhQ_{IV}) вскрыты на дне пруда (старицы р. Клязьмы). Представлены чёрными глинистыми илами текучепластичной консистенции с примесью органических веществ и суглинками от тёмно-серого до чёрного цвета, мягкопластичными, опесчаненными, с прослоями песка мелкого, с включениями разложившейся древесины, с примесью органических веществ. Мощность отложений достигает 3,3 м около берега.

Современные аллювиальные (пойменные) отложения (aQ_{IV}) вскрыты у подножия склона вдоль береговой линии пруда и под самим прудом. Представлены суглинками серовато-коричневыми и серовато-зелёными, текучепластичными, опесчаненными, с включениями остатков древесного угля, с примесью органических веществ, с прослоями песка. Мощность отложений достигает 5,5 м.

Нерасчленённые средне-верхнечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные отложения первой надпойменной террасы р. Клязьмы (a,fQ_{II-III}) слагают весь склон. В верхней части разреза отложения представлены коричневыми суглинками тугопластичной, мягкопластичной и текучепластичной консистенции, опесчаненными, с прослоями песка мелкого. В нижней части склон сложен желтовато-коричневыми песками мелкими от рыхлых до плотных, средней степени водонасыщения и насыщенными водой. Мощность песчаных отложений изменяется от 1,1 до 2,5 м. Общая мощность средне-верхнечетвертичных аллювиально-флювиогляциальных отложений, слагающих исследуемый склон, изменяется от 1,2 до 9,7 м.

Пермская система (P)

Четвертичные отложения подстилаются отложениями северодвинского горизонта татарского яруса вверху склона на абсолютных отметках 98,8 м, у подножия склона (вдоль береговой линии пруда) – 87,18 м. Такая разница кровли пермских отложений вверху и внизу склона обусловлена их древним размывом.

Северодвинский горизонт, татарский ярус (P_{2sd}). Отложения северодвинского горизонта распространены на всей изучаемой территории и представлены глинами красновато-коричневыми в верхней части, коричневыми в нижней части, тугопластичными и твёрдыми, опесчаненными, с прослоями мергеля и алевролита серовато-зеленых и красновато-коричневых, песка пылеватого.

Общая вскрытая мощность пермских отложений составляет 1,1-15,5 м.

Физико-механические свойства грунтов

Расчёты, приведенные в настоящей работе, производились на примере профиля 2-2 (приложение 2). По результатам анализа архивных материалов, лабораторным данным и по полевому визуальному описанию в геологическом строении изучаемого профиля склона выделено 16 инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Значения прочностных свойств грунтов, использованных в расчётах приведены в таблице 3.1.

Техногенные накопления (*tQIV*)

- ИГЭ-1.1. Суглинок мягкопластичный, темно-серый до черного, опесчаненный, с включениями дресвы кирпича и известняка, известково-песчаной крошки, древесного угля, $\gamma=18,8 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-1.2. Суглинок тугопластичный, темно-серый до черного, опесчаненный, с включениями дресвы кирпича и известняка, известково-песчаной крошки, древесного угля, $\gamma=20,2 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-1.3. Суглинок полутвердый, темно-серый до черного, опесчаненный, с включениями дресвы кирпича и известняка, известково-песчаной крошки, древесного угля, $\gamma=20,5 \text{ кН/м}^3$;

Современные озёрно-болотные отложения (*lhQIV*)

- ИГЭ-2. Ил текучепластичный, черный, глинистый, с примесью органических веществ, $\gamma=15,5 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-3. Суглинок мягкопластичный, темно-серый до черного, опесчаненный, с прослоями песка мелкого, с вкл. остатков древесины, с примесью органических веществ, $\gamma=19,3 \text{ кН/м}^3$;

Современные аллювиальные (пойменные) отложения (*aQIV*)

- ИГЭ-4. Суглинок текучепластичный, серовато-коричневый до серовато-зеленого, опесчаненный, с вкл. остатков древесного угля, с примесью органических веществ, $\gamma=17,6 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-9. Суглинок мягкопластичный, серовато-зеленый, опесчаненный, с прослоями песка мелкого, $\gamma=19,8 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-10. Суглинок тугопластичный, серый, опесчаненный, с прослоями песка мелкого, $\gamma=20,1 \text{ кН/м}^3$;

Нерасчленённые средне-верхнечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные
отложения первой надпойменной террасы р.Клязьмы (a,fQII-III)

- ИГЭ-11. Суглинок тугопластичный, коричневый, с прослоями песка мелкого, слюдистый, $\gamma=20,3 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-12. Суглинок мягкопластичный, коричневый, с прослоями песка мелкого, слюдистый, $\gamma=20,2 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-13. Суглинок текучепластичный, коричневый, с прослоями песка мелкого, слюдистый, $\gamma=18,5 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-14. Песок мелкий, желтовато-коричневый, средней плотности, средней степени водонасыщения и насыщенный водой, $\gamma=18,1 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-14а. Песок мелкий, желтовато-коричневый, рыхлый, средней степени водонасыщения и насыщенный водой $\gamma=17,1 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-14б. Песок мелкий, желтовато-коричневый, плотный, средней степени водонасыщения и насыщенный водой $\gamma=20,3 \text{ кН/м}^3$;

Верхнепермские отложения татарского яруса северодвинского горизонта (P_{2sd})

- ИГЭ-17. Глина тугопластичная, красновато-коричневая, опесчаненная, с прослоями мергеля, алевролита и песка пылеватого серовато-зеленого и красновато-коричневого, $\gamma=19,1 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-18. Глина твердая, красновато-коричневая (в верхней части) и коричневая (в нижней части), опесчаненная, с прослоями мергеля, алевролита и песка пылеватого серовато-зеленого и красновато-коричневого, $\gamma=19,6 \text{ кН/м}^3$.

Таблица 3.1

Характеристики прочностных свойств грунтов

Характеристики свойств №ИГЭ	Нормативные значения		Расчётные значения		Дискретные значения			
	с,кПа	φ,град	с,кПа	φ,град	Координаты точки		с,кПа	φ,град
					х	у		
1.1	21	15	19	13	80,0	29,1	19,12	14,04
					59,0	38,4	20,50	15,11
					9,8	42,9	22,30	17,01

1.2	26	16	24	14	51,3	42,9	23,0	13,2
					51,3	42,4	30,3	19,0
					51,3	43,2	20,8	15,1
1.3	35	20	33	17	59,0	37,7	37,3	24,9
					51,3	41,9	20,7	19,3
					51,3	41,4	14,3	13,0
2	10	0	10	0	86,4	28,1	10	0
					86,4	28,1	10	0
					86,4	28,2	10	0
3	10	0	10	0	86,4	25,4	10	0
					86,4	26,5	10	0
					86,4	27,1	10	0
4	10	12	8	10	80,0	28,6	10,3	11,9
					80,0	28,0	13,7	13,2
					80,0	28,4	28	16,2
9	16	14	14	12	80,0	27,1	11,7	10,2
					80,0	26,7	12,9	11,0
					80,0	25,2	16,8	15,1
					80,0	24,2	16,5	14,0
					86,4	24,4	14,1	12,2
					86,4	23,1	18,5	16,2
10	18	19	16	16	80,0	26,3	18,0	17,74
					80,0	26,0	22,0	23,0
					80,0	25,6	20,3	20,8
11	31	18	27	15	59,0	32,3	28,7	15,9
					51,3	32,0	33,3	19,3
					9,8	39,9	25,3	11,9
					66,1	32,0	37,0	23,8
					9,8	32,4	31,0	18,0
12	31	15	29	14	51,3	37,4	33,4	18,2
					9,8	38,1	28,8	14,0
					66,0	32,4	28,2	13,0
13	11	10	9	8	9,8	40,5	6,8	6,2
					9,8	41,2	22,7	10,2
					9,8	41,8	7,0	5,9

14	0	31	0	30	66,1	31,0	0	30
					66,1	30,0	0	31
					66,1	27,4	0	32
					80,0	22,9	0	32
14a	0	27	0	26	66,06	31,6	0	25
					66,06	30,6	0	26
					59,0	35,7	0	27
14б	5	38	5	37	9,8	34,5	4	36
					9,8	34,3	5	37
					9,8	33,9	6	38
17	29	9	27	7	80,0	21,8	33,3	12,9
					66,1	25,5	26,3	6,0
					80,0	21,3	27,7	7,9
18	42	7	39	5	59,0	29,3	41,8	7,3
					9,8	32,8	44,1	8,9
					51,3	31,2	15,3	8,0
					66,1	24,1	46,3	11,3
					80,0	20,6	22,1	15,9

Гидрогеологические условия

Подземные воды в пределах изученного разреза представлены двумя водоносными горизонтами, развитыми повсеместно:

Четвертичный водоносный горизонт, приуроченный к комплексу аллювиальных (пойменных) и нерасчлененных средне-верхнечетвертичных аллювиальных отложений. Водовмещающими грунтами служат пески от мелких до гравелистых и прослойки песков в суглинистых отложениях. Горизонт вскрыт всеми скважинами на глубинах 0,28-10,20 м. Горизонт напорно-безнапорный. Высота напора составляет 0,0-1,0 м. Нижним водоупором служат пермские глины северодвинского горизонта татарского яруса.

Питание водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, разгрузка осуществляется в пруд.

На склоне наблюдаются выходы первого водоносного горизонта в виде родников, один из которых каптирован.

Пермский водоносный горизонт спорадического распространения вскрыт на глубинах 9-18 м. Горизонт напорный. Пьезометрический уровень установился на глубинах 6,5 – 14 м соответственно. Высота напора составляет 2,5-4 м.

Водоносный горизонт заключен в прослоях алевролитов и пылеватых песков в северодвинских глинах. Питание водоносного горизонта осуществляется за счет перетока со смежных территорий.

Развитие сопутствующих экзогенных геологических процессов и явлений

Заболачивание

Заболачивание развивается в местах выхода и разгрузки подземных вод в виде родников у подножья склона.

Оползневой процесс

В процессе проведения автором оползневой съёмки склона были отмечены различные проявления оползневого процесса. В восточной части участка выделяется характерный оползневой рельеф – поверхность бугристая, видны трещины закола, заболоченные террасы, пьяный лес. В центральной части участка, вблизи суффозионных провалов располагаются трещины закола, видны стенки срыва. В западной части участка на склоне выделяются оползневые террасы, заболоченные в месте примыкания к склону. Деревья сильно наклонены в сторону падения склона. Оползневой рельеф склона в пределах описываемого профиля показан на рис. 3.7. Трещина закола, расположенная в центральной части склона, вблизи описываемого профиля, приведена на рис. 3.8.



Рисунок 3.7. Оползневой рельеф склона.



Рисунок 3.8. Трещина закола в центральной части склона.

Инженерная деятельность человека

Плоская поверхность первой надпойменной террасы активно начала застраиваться в XVI-XVII веке. Многовековые строительные и реставрационные работы изменили поверхность террасы: повсеместно она перекрыта насыпными грунтами, достигающими мощности в среднем 2-3м, максимум до 8 м. Также стоит отметить изменение режима естественного стока поверхностных вод с территории монастыря, ограниченной кирпичной стеной. Вода инфильтруется через склон, что вызывает активизацию суффозионного и оползневого процессов. Известно, что 20 мая 1851 года во время крестного хода, скорее всего в результате схождения оползня, обрушился мост. Тогда погибло около 160 человек.

II группа факторов объединяет процессы, изменяющие величину коэффициента устойчивости. Подробно эта группа факторов описана в разделе 1.3 настоящей работы. Применительно к изучаемому объекту, к ним можно отнести увлажнение грунтов дождевыми, талыми, подземными и хозяйственными водами, а так же суффозионный и эрозионный процессы.

Увлажнение грунтов дождевыми, талыми, подземными и хозяйственными водами

Некачественный отвод поверхностных вод в пределах территории монастыря вызывает переувлажнение грунтов и подъём уровня грунтовых вод. Поверхностные воды, попадающие в дренажную систему, сбрасываются на склон. Отсутствие регулируемого стока в районе ворот,

ведущих к склону, приводит к тому, что во время дождей и в период снеготаяния поверхностные воды через ворота попадают на склон, переувлажняя массив. Регулярный полив клумбы и кустарников, высаженных на бровке склона, также приводит к переувлажнению склона. Дождевые воды с хлева и стен сбрасываются на бровку склона. Также стоит отметить, что на склоне оборудован туалет над выгребной ямой. И все фекальные массы инфильтруются в грунты.

Суффозионный процесс

На изучаемой территории суффозионный процесс активно развивается в районе каптированного родника. По словам насельниц монастыря, первый провал, вызванный суффозией, произошел 6 лет назад. С тех пор данный процесс проявляется в виде увеличивающегося провала как в глубину так и в ширину, замутнения воды в купели – на дне оседает пылевато-глинистый материал, в месте впадения родника в пруд образовался конус выноса, состоящий из того же пылевато-глинистого материала.

Данный суффозионный процесс по классификации можно отнести к механическому. Основными причинами суффозионного явления следует считать возникновение в подземных водах достаточных сил гидродинамического давления и превышение величины некоторой критической скорости воды. Это вызывает отрыв и вынос частиц во взвешенном состоянии. Суффозионный процесс происходит на контакте суглинков мягкопластичных, опесчаненных, с прослоями песка (ИГЭ-12) и песков залегающих непосредственно над ними.

На склоне, в центральной части участка располагаются два суффозионных провала диаметром 3 м и 1 м, глубиной 0,5 и 1,5 м соответственно.

Эрозионный процесс

Эрозионный процесс (образование промоин) является следствием неправильного регулирования поверхностного стока. На склоне явно выделяется несколько промоин.

Основной причиной оползневого процесса можно назвать изменение физико-механических свойств грунтов, слагающих склон, вследствие некачественного отвода поверхностных вод с территории монастыря, который вызывает суффозию и переувлажнение грунтов.

Расчёт устойчивости склона

Сравнение различных моделей распределения свойств грунтов

Для оценки зависимости результатов расчётов устойчивости склонов от применяемой модели распределения свойств грунтов в массиве была выполнена серия расчётов с использованием метода Моргенштерна-Прайса. Данный метод был выбран поскольку он удовлетворяет условиям равновесия моментов и сил [88]. Расчёты производились с применением подробно описанных в предыдущей главе пяти подходов к составлению модели возможного распределения свойств грунтов в оползневом массиве:

1. В пределах выделенных расчётных грунтовых элементов задавались расчётные характеристики свойств грунтов.
2. В пределах выделенных РГЭ задавались нормативные характеристики свойств грунтов.
3. В пределах выделенных РГЭ задавалось поле распределения значений прочностных характеристик;
4. В пределах выделенных стратиграфо-генетических комплексов задавалось поле распределения значений прочностных характеристик;
5. В пределах всего массива без учёта литологических границ задавалось поле распределения значений прочностных характеристик.

В моделях с полевым распределением свойств грунтов использовался интерполяционный метод обратных взвешенных расстояний.

Было выделено 5 стратиграфо-генетических комплексов: техногенных накоплений, озёрно-болотных, аллювиальных, аллювиально-флювиогляциальных и пермских отложений. При расчётах по четвёртому подходу поле распределения прочностных свойств грунтов строилось в пределах границ обозначенных SGK.

Каждому стратиграфо-генетическому комплексу были назначены статистически обработанные по входящим в них ИГЭ значения удельного веса, которые составили:

- для техногенных накоплений $\gamma=19,8 \text{ кН/м}^3$;
- для озёрно-болотных отложений $\gamma=17,4 \text{ кН/м}^3$;
- для аллювиальных отложений $\gamma=19,2 \text{ кН/м}^3$;
- для аллювиально-флювиогляциальных отложений $\gamma=18,8 \text{ кН/м}^3$;
- для пермских отложений $\gamma=19,4 \text{ кН/м}^3$;

Анализ полученных данных показал, что при использовании первой расчётной схемы (в пределах выделенных РГЭ задавались расчётные характеристики свойств) по круглоцилиндрической поверхности скольжения коэффициент устойчивости склона составил 1,03, эквивалентный объём (единичный объём смещаемой оползневой массы) составил 335 м³.

При расчёте по оптимизированной поверхности скольжения коэффициент устойчивости склона составил 1,01 (минимальное значение из всех выполненных расчётов), эквивалентный объём – 370 м³, то есть в результате оптимизации не только увеличился потенциальный объём оползневого тела, но и уменьшился коэффициент устойчивости склона.

При использовании второй расчётной схемы (в пределах выделенных РГЭ задавались нормативные характеристики свойств) по круглоцилиндрической поверхности скольжения коэффициент устойчивости склона составил 1,17, эквивалентный объём составил 327 м³ (минимальное значение из всех выполненных расчётов). При расчёте по оптимизированной поверхности скольжения коэффициент устойчивости склона составил 1,16, эквивалентный объём – 340 м³ (минимальное значение из всех выполненных расчётов по оптимизированной поверхности скольжения). Как и в предыдущем случае, в результате оптимизации не только увеличился потенциальный объём оползневого тела, но и уменьшился коэффициент устойчивости склона. В сравнении с первой расчётной схемой, потенциальный объём оползневого тела уменьшился, а коэффициент устойчивости увеличился.

При использовании третьей расчётной схемы (задавалось поле распределения свойств грунтов в пределах РГЭ) по круглоцилиндрической поверхности скольжения коэффициент устойчивости склона составил 1,11, эквивалентный объём – 360 м³. При расчёте по оптимизированной поверхности скольжения коэффициент устойчивости склона составил 1,08, эквивалентный объём – 354 м³.

При использовании четвертой расчётной схемы (задавалось поле распределения свойств грунтов в пределах SGK) по круглоцилиндрической поверхности скольжения коэффициент устойчивости склона составил 1,15, эквивалентный объём – 421 м³ (максимальное значение из всех выполненных расчётов по всем расчётным схемам). При расчёте по оптимизированной поверхности скольжения коэффициент устойчивости склона составил 1,14, эквивалентный объём, как и при расчёте по круглоцилиндрической поверхности, – 421 м³.

При использовании пятой расчётной схемы (задавалось поле распределения свойств грунтов в пределах всего массива, без учёта границ) по круглоцилиндрической поверхности скольжения коэффициент устойчивости склона составил 1,20 (максимальное значение из всех выполненных расчётов по всем расчётным схемам), эквивалентный объём – 330 м³. При расчёте по оптимизированной поверхности скольжения коэффициент устойчивости склона, как и при расчёте по нормативным значениям характеристик, составил 1,16 (максимальное значение из всех выполненных расчётов по оптимизированной поверхности скольжения), эквивалентный объём – 348 м³.

Результаты расчётов сведены в таблицу 3.2. Цифры в столбцах соответствуют обозначенным выше порядковым номерам описания схем. В ячейках указаны значения

коэффициентов устойчивости, в скобках приведены значения единичных объёмов потенциальных оползневых тел. Итоговые геомеханические схемы с результатами расчётов приведены на рисунках 3.9 и 3.10

Таблица 3.2

Расчётная схема Форма Поверхности скольжения	1	2	3	4	5
Круглоцилиндрическая	1,03 (335)	1,17 (327)	1,11 (360)	1,15 (421)	1,20 (330)
Оптимизированная	1,01 (370)	1,16 (340)	1,08 (354)	1,14 (421)	1,16 (348)

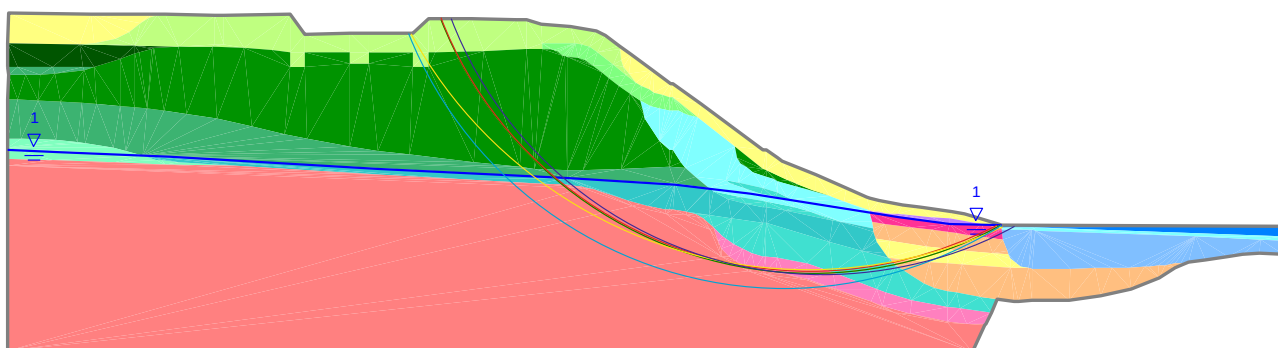


Рис. 3.9. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по круглоцилиндрической поверхности скольжения. Поверхность скольжения при расчёте по первой схеме показана зелёным цветом, по второй – красным, по третьей – жёлтым, по четвёртой – голубым, по пятой – синим.

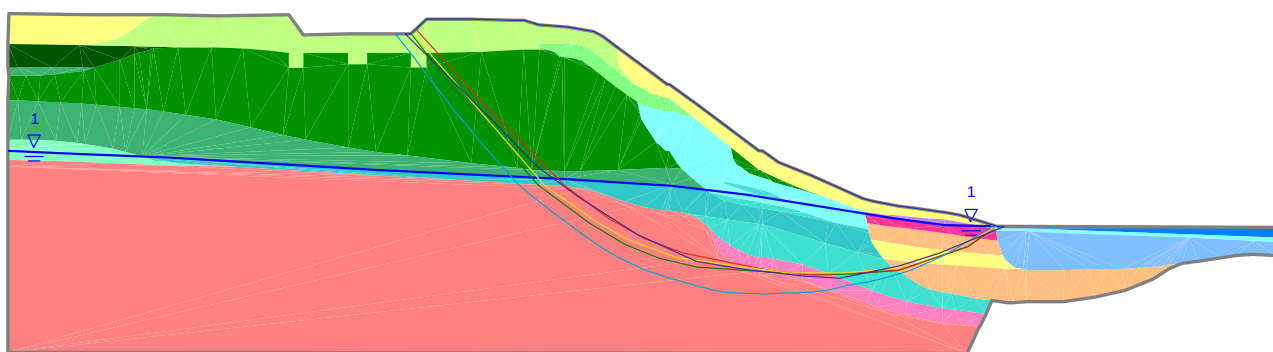


Рис. 3.10. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по оптимизированной поверхности скольжения. Цветовая схема аналогична рис. 3.9.

Расчёты с использованием всех моделей показывают снижение значений коэффициентов устойчивости склона на 1-2% при расчёте по оптимизированной поверхности скольжения, что является закономерным. Это обусловлено нахождением более оптимальной поверхности скольжения, не имеющей искусственной, круглоцилиндрической формы. Значения эквивалентных объёмов, рассчитанные по нормативным значениям и без учёта границ по круглоцилиндрической поверхности скольжения, отличаются менее чем на 1%, а значения

коэффициентов устойчивости при расчёте по нормативным значениям меньше на 2,5%. Значения эквивалентных объёмов, рассчитанные по нормативным значениям и без учёта границ, по оптимизированной поверхности скольжения, отличаются на 2%, а значения коэффициентов устойчивости одинаковые. Это позволяет сделать вывод о том, что в данном случае схематизация структуры склонового массива с использованием интерполяционного метода обратных взвешенных расстояний по схеме, в которой не учитываются границы, позволяет сохранить структуру склонового массива и даёт реальное положение поверхности скольжения. Таким образом, геотехнический аспект при моделировании устойчивости данного склона, выраженный через прочностные характеристики грунтов, является более значимым, чем его геологическое строение. В целом, влияние моделей распределения свойств грунтов по своему эффекту на оценку устойчивости склона сопоставимо с влиянием оптимизации поверхности скольжения.

Сравнение различных методов расчётов устойчивости склонов

Для оценки зависимости результатов расчётов устойчивости склонов от применяемого метода расчёта была выполнена серия расчётов с использованием упрощённых методов Бишопа и Янбу, а также метода Моргенштерна-Прайса. Это наиболее распространённые методы, как мы отмечали выше. Методы Бишопа и Моргенштерна-Прайса рекомендованы СП 11-105-97, ч. II [38] для расчётов устойчивости склонов, а метод Янбу является наиболее близким к методу горизонтальных сил Маслова-Берера, также рекомендованного указанным СП [91]. Расчёты производились с применением описанных в предыдущем разделе пяти подходов к составлению модели возможного распределения свойств грунтов в оползневом массиве. Для расчётов использовались модели, описанные в предыдущем разделе. Расчёты производились по круглоцилиндрической поверхности для исключения влияния оптимизации на положение поверхностей скольжения. Для интерполяции прочностных свойств грунтов в моделях с полевым распределением использовался метод обратных взвешенных расстояний.

Результаты расчётов показали, что при использовании первой расчётной схемы (в пределах выделенных РГЭ задавались расчётные характеристики свойств) по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,00, эквивалентный объём – 414 м³. По методу Янбу коэффициент устойчивости склона составил 0,91, эквивалентный объём – 476 м³. По методу Моргенштерна-Прайса коэффициент устойчивости склона составил 1,03, эквивалентный объём – 335 м³. Значения коэффициентов устойчивости, рассчитанные по методам Бишопа и Моргенштерна-Прайса, являются минимальными из всех результатов расчётов по каждому из методов. Значение коэффициента устойчивости, рассчитанное по методу Янбу, является минимальным из всех результатов расчётов по всем методам, а эквивалентный объём, рассчитанный по методу Бишопа, максимальным из всех расчётов по данному методу. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 3.11.

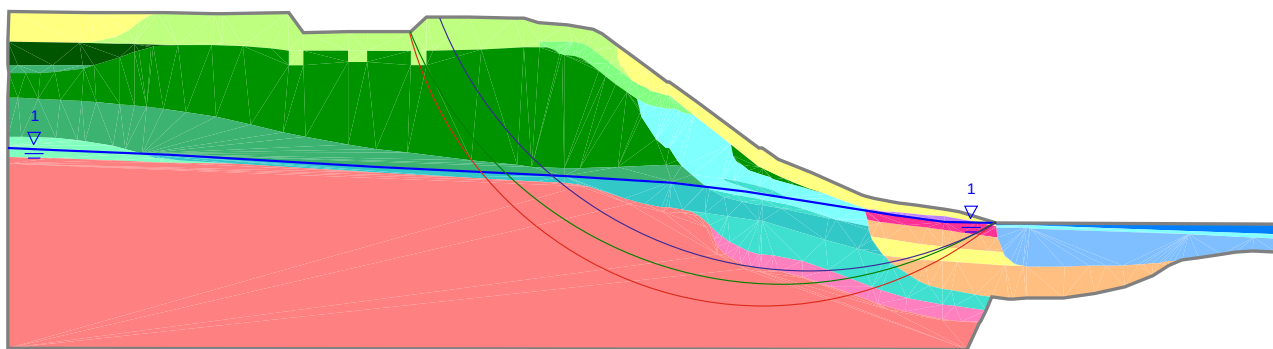


Рис. 3.11. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по первой расчётной схеме. Поверхность скольжения при расчёте по методу Бишопа показана зелёным цветом, по Методу Янбу – красным, по методу Моргенштерна-Прайса – синим.

При использовании второй расчётной схемы (в пределах выделенных РГЭ задавались нормативные характеристики свойств) по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,15, эквивалентный объём – 315 м³. По методу Янбу коэффициент устойчивости – составил 1,07, эквивалентный объём – 321 м³. По методу Morgenstern-Price коэффициент устойчивости склона составил 1,17 м³, эквивалентный объём – 327 м³. Величины эквивалентных объёмов, рассчитанные по всем методам, являются минимальными из всех расчётов по каждому из методов, кроме того, значение эквивалентного объёма, рассчитанное по методу Бишопа, минимально из всех значений по всем методам. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 3.12.

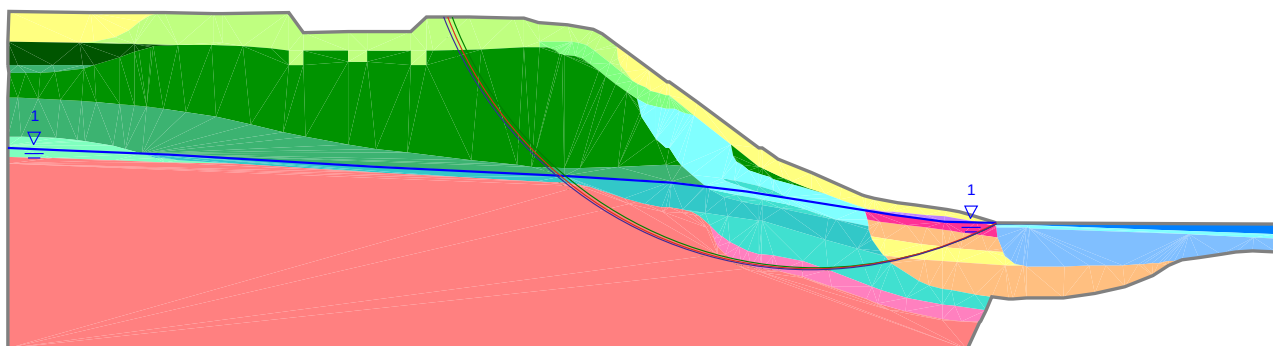


Рис. 3.12. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по второй расчётной схеме. Поверхность скольжения при расчёте по методу Бишопа показана зелёным цветом, по Методу Янбу – красным, по методу Моргенштерна-Прайса – синим.

При использовании третьей расчётной схемы (задавалось поле распределение свойств грунтов в пределах выделенных РГЭ) по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,09, эквивалентный объём – 354 м³. По методу Янбу коэффициент устойчивости склона составил 1,01, эквивалентный объём – 478 м³. По методу Моргенштерна-Прайса коэффициент устойчивости склона составил 1,11, эквивалентный объём – 360 м³. Величина эквивалентного объёма, рассчитанная по методу Янбу, является максимальной из всех расчётов по всем методам. Величина эквивалентного объёма, рассчитанная по методу Моргенштерна-Прайса, является максимальной из всех расчётов по данному методу. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 3.13.

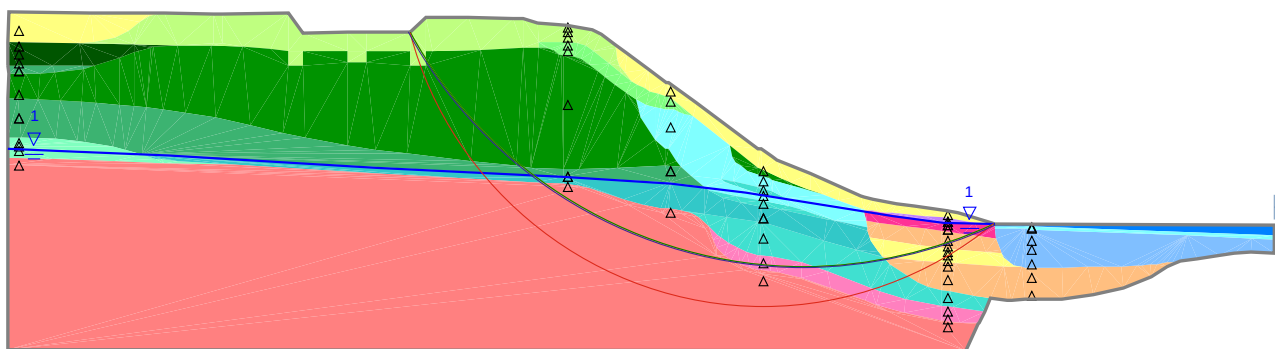


Рис. 3.13. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по третьей расчётной схеме. Поверхность скольжения при расчёте по методу Бишопа показана зелёным цветом, по Методу Янбу – красным, по методу Morgenstern-Прайса – синим. Треугольниками обозначены места отбора проб грунтов.

При использовании четвёртой расчётной схемы (задавалось поле распределения свойств грунтов в пределах СГК) по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,13, эквивалентный объём – 468 м³. По методу Янбу коэффициент устойчивости склона составил 1,01, эквивалентный объём – 470 м³. По методу Morgenstern-Прайса коэффициент устойчивости склона составил 1,15, эквивалентный объём – 421 м³. Величины эквивалентных объёмов, рассчитанные по методам Бишопа и Morgenstern-Прайса, являются максимальными из всех расчётов по данным методам. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 3.14.

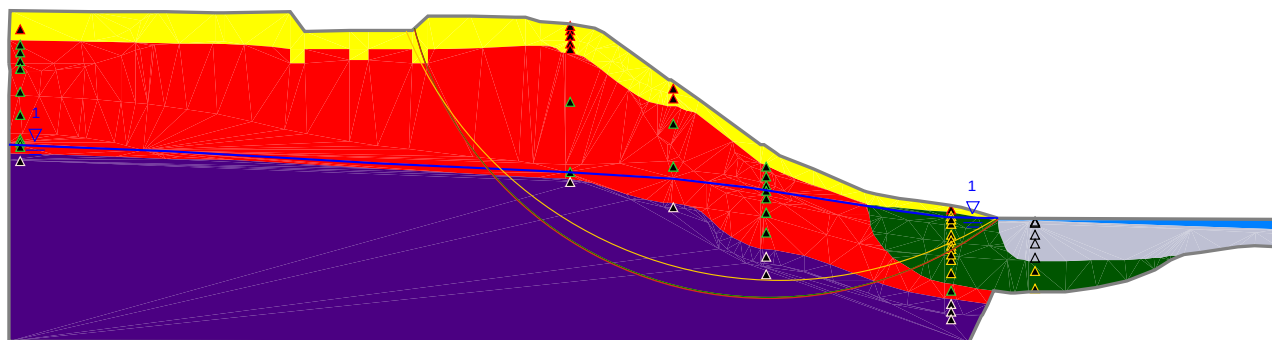


Рис. 3.14. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по четвёртой расчётной схеме. Поверхность скольжения при расчёте по методу Бишопа показана зелёным цветом, по Методу Янбу – красным, по методу Morgenstern-Прайса – оранжевым. Цветами выделены стратиграфо-генетические комплексы. Треугольниками обозначены места отбора проб грунтов.

При использовании пятой расчётной схемы (задавалось поле распределения свойств грунтов в пределах всего массива, без учёта границ) по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,19, эквивалентный объём – 330 м³. По методу Янбу коэффициент устойчивости склона составил 1,08, эквивалентный объём – 338 м³. По методу Morgenstern-Прайса коэффициент устойчивости склона составил 1,20, эквивалентный объём

– 330 м³. Положения поверхностей, рассчитанных по методам Бишопа и Morgenштерна-Прайса, совпадают. Значения коэффициентов устойчивости, рассчитанные по всем методам являются максимальными из всех расчётов по всем схемам. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 3.3.10.

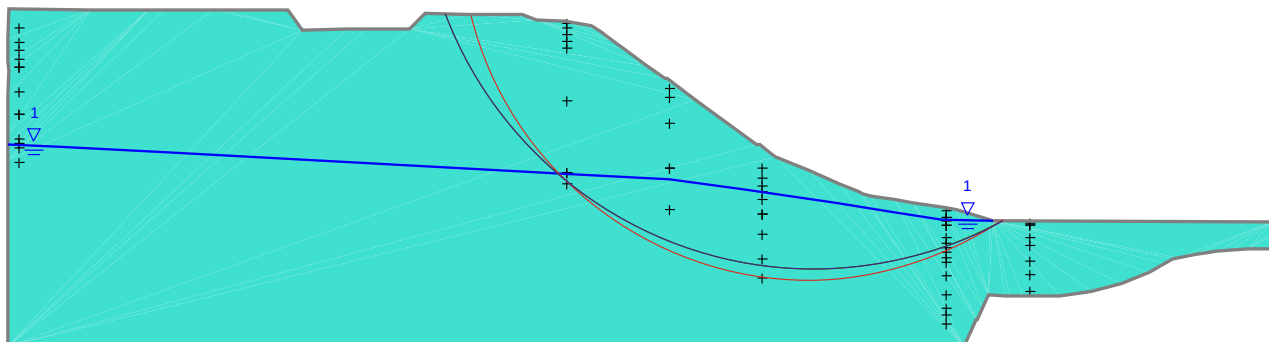


Рис. 3.14. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по пятой расчётной схеме. Поверхность скольжения при расчёте по методу Бишопа показана зелёным цветом, по Методу Ямбу – красным, по методу Morgenштерна-Прайса – синим. Крестиками обозначены места отбора проб грунтов.

Результаты расчётов сведены в таблицу 3.3. Цифры в столбцах соответствуют обозначенным в предыдущем разделе порядковым номерам описания схем. В ячейках указаны значения коэффициентов устойчивости, в скобках приведены значения единичных объёмов потенциальных оползневых тел.

Таблица 3. 3

Расчётная схема Метод расчёта	1	2	3	4	5
Бишопа	1,00 (414)	1,15 (315)	1,09 (354)	1,13 (468)	1,19 (330)
Ямбу	0,91 (476)	1,07 (321)	1,01 (478)	1,01 (470)	1,08 (338)
Morgenштерна- Прайса	1,03 (335)	1,17 (327)	1,11 (360)	1,15 (421)	1,20 (330)

Анализ полученных результатов показывает, что положение поверхностей скольжения и потенциальные объёмы оползневых тел, рассчитанные по методам Бишопа и Morgenштерна-Прайса, наиболее близки. При расчёте по пятой схеме, когда задавалось поле распределения свойств грунтов в пределах всего массива они получились одинаковыми. Исключение составляет первая расчётная схема, когда в пределах выделенных РГЭ задавались расчётные

характеристики свойств. При её использовании результаты расчётов потенциальных объёмов отличаются более чем в 1,5 раза. Вне зависимости от применяемой модели распределения свойств грунтов значение коэффициента устойчивости, определяемое по методу Янбу, является наименьшим, а по методу Моргенштерна-Прайса наибольшим. При этом значения, рассчитанные по методам Бишопа и Моргенштерна-Прайса отличаются не более чем на 2%.

Сравнение различных методов интерполяции при расчётах устойчивости склонов

Для оценки зависимости результатов расчётов устойчивости склонов от применяемого метода интерполяции значений свойств грунтов была выполнена серия расчётов с использованием метода Моргенштерна-Прайса. Данный метод был выбран, так как он удовлетворяет условиям равновесия моментов и сил [88], [102]. Для сравнения различных методов интерполяции в расчётах использовались подходы с распределением свойств грунтов в пределах стратиграфо-генетических комплексов и во всём массиве без выделения границ. Расчётная схема с полевым распределением свойств грунтов в пределах расчётных грунтовых элементов не использовалась, так как невозможно выполнить качественную интерполяцию в пределах отдельных прослоев и линз, из которых отобрано по одной-двум пробам. Поэтому расчёты с использованием этого подхода не будут отражать качество метода интерполяции.

Расчёты были произведены с применением четырёх подходов:

- при первом подходе расчёты производились по круглоцилиндрической поверхности скольжения, распределение свойств грунтов задавалось в пределах СГК;
- при втором подходе расчёты производились по круглоцилиндрической поверхности скольжения, распределение свойств грунтов задавалось в массиве, без выделения границ;
- при третьем подходе расчёты производились по оптимизированной поверхности скольжения, распределение свойств грунтов задавалось в пределах СГК;
- при четвёртом подходе расчёты производились по оптимизированной поверхности скольжения, распределение свойств грунтов задавалось в массиве, без выделения границ;

По результатам расчётов можно сделать следующие выводы. При первом подходе производились расчёты по круглоцилиндрической поверхности скольжения с использованием расчётной схемы, когда в пределах выделенных СГК задавалось поле распределения свойств грунтов. При интерполяции свойств грунтов по методу обратных взвешенных расстояний значение коэффициента устойчивости составило 1,15, эквивалентного объёма – 421 м³. Это максимальное значение эквивалентного объёма и минимальное значение коэффициента устойчивости при расчётах по данному подходу. При использовании интерполяции по методу Делоне значение коэффициента устойчивости составило 1,19, эквивалентного объёма – 306 м³. При использовании интерполяции по методу Чага значение коэффициента устойчивости составило 1,26, эквивалентного объёма – 234 м³. Это максимальное значение коэффициента устойчивости при расчётах по данному подходу. При использовании интерполяции по методу тонкого сплайна значение коэффициента устойчивости составило 1,23, эквивалентного объёма

– 229 м³. Это минимальное значение эквивалентного объёма при расчётах по данному подходу. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 3.15.

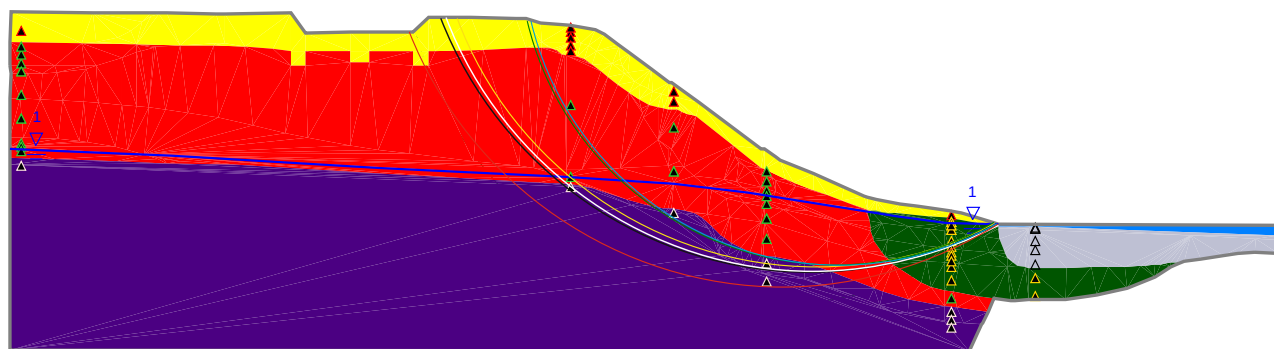


Рис. 3.15. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по первому подходу. Поверхность скольжения при расчёте по расчётным характеристикам показана чёрным цветом, по нормативным – белым. С использованием интерполяционного метода обратных взвешенных расстояний – красным, Делоне – жёлтым, Чага – зелёным, тонкого сплайна – голубым. Треугольниками обозначены места отбора проб грунтов.

При втором подходе производились расчёты по круглоцилиндрической поверхности скольжения с использованием расчётной схемы, когда распределение свойств грунтов задавалось в массиве, без выделения границ. При интерполяции свойств грунтов по методу обратных взвешенных расстояний значение коэффициента устойчивости составило 1,20, эквивалентного объёма – 330 м³. Это максимальное значение коэффициента устойчивости при расчётах по данному подходу. При использовании интерполяции по методу Делоне значение коэффициента устойчивости составило 1,06, эквивалентного объёма – 270 м³. Это минимальное значение эквивалентного объёма при расчётах по данному подходу. При использовании интерполяции по методу Чага значение коэффициента устойчивости составило 0,80, эквивалентного объёма – 354 м³. Это минимальное значение коэффициента устойчивости при расчётах по данному подходу. При использовании интерполяции по методу тонкого сплайна (Ричарда) значение коэффициента устойчивости составило 0,92, эквивалентного объёма – 447 м³. Это максимальное значение эквивалентного объёма при расчётах по данному подходу. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рис. 3.16.

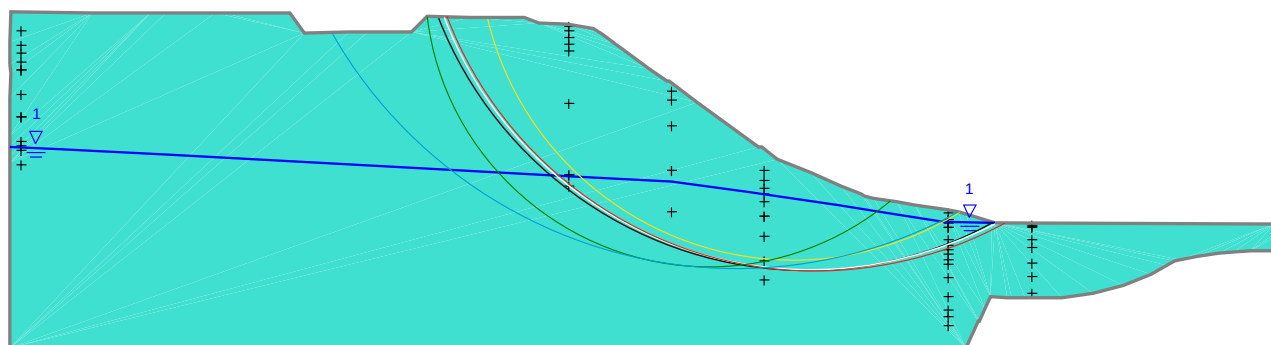


Рис. 3.16. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по второму подходу. Цветовая схема аналогична рис. 3.15. Крестиками обозначены места отбора проб грунтов.

При третьем подходе производились расчёты по оптимизированной поверхности скольжения с использованием расчётной схемы, когда в пределах выделенных СГК задавалось поле распределения свойств грунтов. При интерполяции свойств грунтов по методу обратных взвешенных расстояний значение коэффициента устойчивости составило 1,14, эквивалентного объёма – 421 м³. Это максимальное значение эквивалентного объёма и минимальное значение коэффициента устойчивости при расчётах по данному подходу. При использовании интерполяции по методу Делоне значение коэффициента устойчивости составило 1,16, эквивалентного объёма – 316 м³. При использовании интерполяции по методу Чага значение коэффициента устойчивости составило 1,21, эквивалентного объёма – 247 м³. Это минимальное значение эквивалентного объёма при расчётах по данному подходу. При использовании интерполяции по методу тонкого сплайна (Ричарда) значение коэффициента устойчивости составило 1,20, эквивалентного объёма – 273 м³. Это максимальное значение коэффициента устойчивости при расчётах по данному подходу. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 3.17.

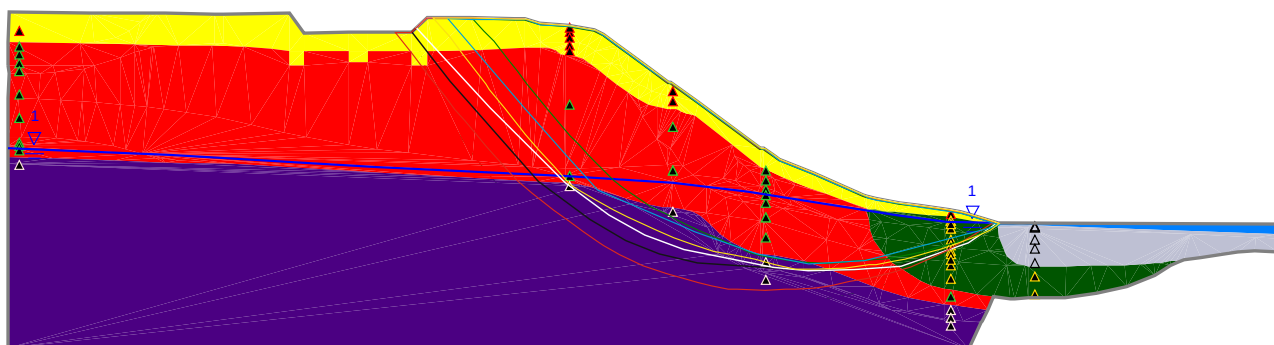


Рис. 3.17. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по третьему подходу. Цветовая схема аналогична рис. 3.15.

При четвёртом подходе производились расчёты по оптимизированной поверхности скольжения с использованием расчётной схемы, когда распределение свойств грунтов задавалось в массиве, без выделения границ. При интерполяции свойств грунтов по методу обратных взвешенных расстояний значение коэффициента устойчивости составило 1,16, эквивалентного объёма – 348 м³. Это максимальное значение коэффициента устойчивости при расчётах по данному подходу. При использовании интерполяции по методу Делоне значение коэффициента устойчивости составило 1,03, эквивалентного объёма – 314 м³. Это минимальное значение эквивалентного объёма при расчётах по данному подходу. При использовании интерполяции по методу Чага значение коэффициента устойчивости составило 0,69, эквивалентного объёма – 370 м³. Это минимальное значение коэффициента устойчивости при

расчётах по данному подходу. При использовании интерполяции по методу тонкого сплайна (Ричарда) значение коэффициента устойчивости составило 0,89, эквивалентного объёма – 456 м³. Это максимальное значение эквивалентного объёма при расчётах по данному подходу. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 3.18.

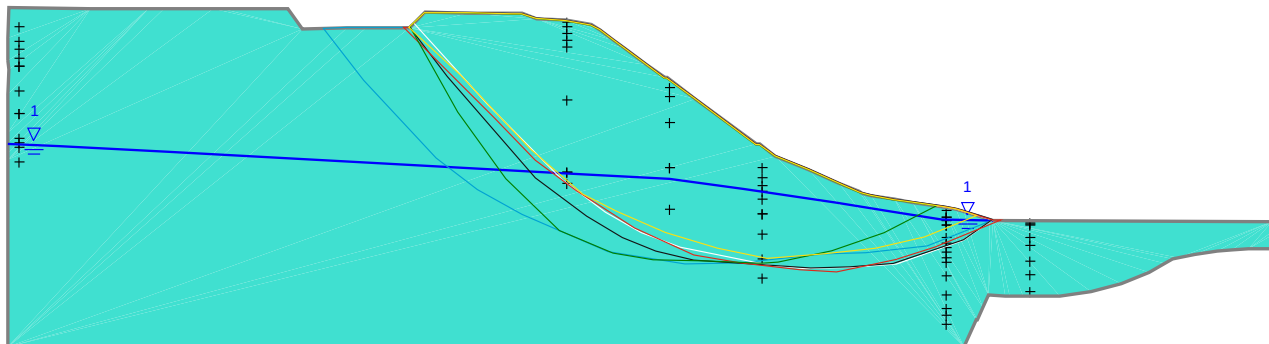


Рис. 3.18. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по четвёртому подходу. Цветовая схема аналогична рис. 3.15.

Результаты расчётов сведены в таблицу 3.4. Номера столбцов соответствуют следующим расчётным схемам:

1. В пределах выделенных РГЭ задавались расчётные характеристики свойств грунтов.
2. В пределах выделенных РГЭ задавались нормативные характеристики свойств грунтов.
3. Задавалось поле распределения значений прочностных свойств грунтов с использованием интерполяции по методу обратных взвешенных расстояний.
4. Задавалось поле распределения значений прочностных свойств грунтов с использованием интерполяции по методу Делоне.
5. Задавалось поле распределения значений прочностных свойств грунтов с использованием интерполяции по методу Чага.
6. Задавалось поле распределения значений прочностных свойств грунтов с использованием интерполяции по методу тонкого сплайна.

В столбцах 2-6 верхнее значение соответствует расчётной схеме с выделением стратиграфо-генетических комплексов, нижнее – схеме без выделения каких-либо границ. В ячейках указаны значения коэффициентов устойчивости, в скобках приведены значения единичных объёмов потенциальных оползневых тел.

Таблица 3.4

Расчётная схема Форма поверхности скольжения	1	2	3	4	5	6

Круглоцилиндрическая	1,03 (335)	1,17 (327)	<u>1,15 (421)</u>	<u>1,19 (306)</u>	<u>1,26 (234)</u>	<u>1,23 (229)</u>
			1,20 (330)	1,06 (270)	0,80 (354)	0,92 (447)
Оптимизированная	1,01 (370)	1,16 (340)	<u>1,14 (421)</u>	<u>1,16 (316)</u>	<u>1,21 (247)</u>	<u>1,20 (273)</u>
			1,16 (348)	1,03 (314)	0,69 (370)	0,89 (456)

Анализируя результаты можно сделать следующие выводы. Наиболее точные результаты были получены при использовании интерполяционного метода обратных взвешенных расстояний по второму и четвёртому подходам. Это следует из того, что значения эквивалентных объёмов, отличаются от значений, полученных при расчётах по нормативным свойствам грунтов менее чем на 2,5%. То есть определение положения потенциальной критической поверхности скольжения осуществлено правильно. Значения коэффициентов устойчивости, рассчитанное по первому и второму подходам отличаются от рассчитанных по нормативным значениям менее чем на 2%. Значение коэффициента устойчивости, рассчитанное по четвёртому подходу не отличается от рассчитанного по нормативным значениям. Это говорит о принципиальной возможности использования подобных расчётов при оптимальном расстоянии между скважинами и необходимом количестве проб в каждой из них, а также обосновании применения интерполяционного метода обратных взвешенных расстояний. Поля распределения прочностных свойств грунтов в массиве с использованием метода обратных взвешенных расстояний приведены на рисунках 3.19 и 3.20.

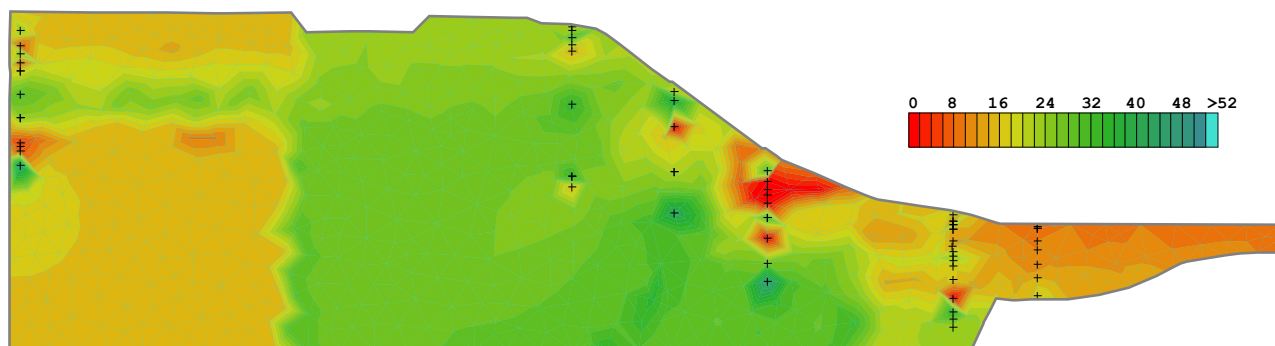


Рис. 3.19. Поле распределения сцепления в массиве без учёта геологических границ по интерполяционному методу обратных взвешенных расстояний.

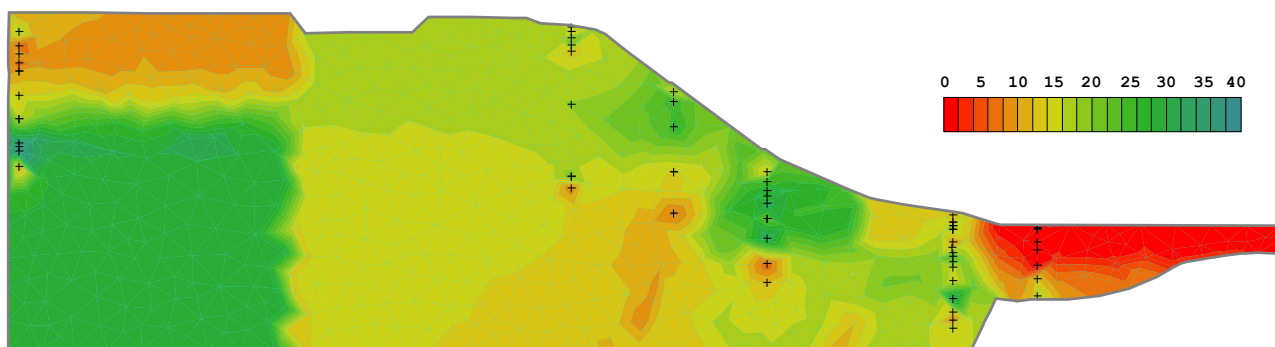


Рис. 3.20. Поле распределения угла внутреннего трения в массиве без учёта геологических границ по интерполяционному методу обратных взвешенных расстояний.

Расчёты с использованием интерполяционного метода Делоне показали большее расхождение с результатами стандартных расчётов, по сравнению с методом обратных взвешенных расстояний. Это говорит об ограничении возможности его применения на неоднородных склонах. Это связано со сложностью интерполяции значений прочностных свойств грунтов между скважинами, находящимися на большом расстоянии друг от друга. При этом, структура распределения свойств грунтов в массиве сохраняется, как это видно на рисунках 3.21 и 3.22.

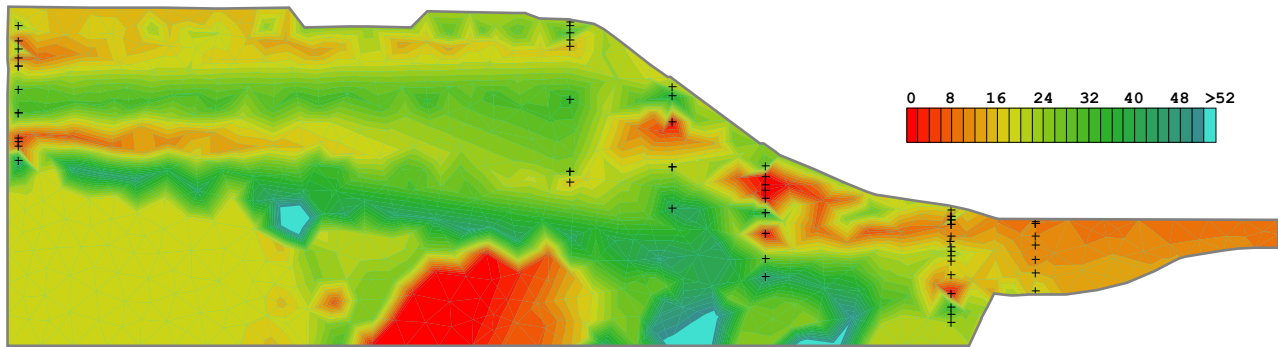


Рис. 3.21. Поле распределения сцепления в массиве без учёта геологических границ по интерполяционному методу Делоне.

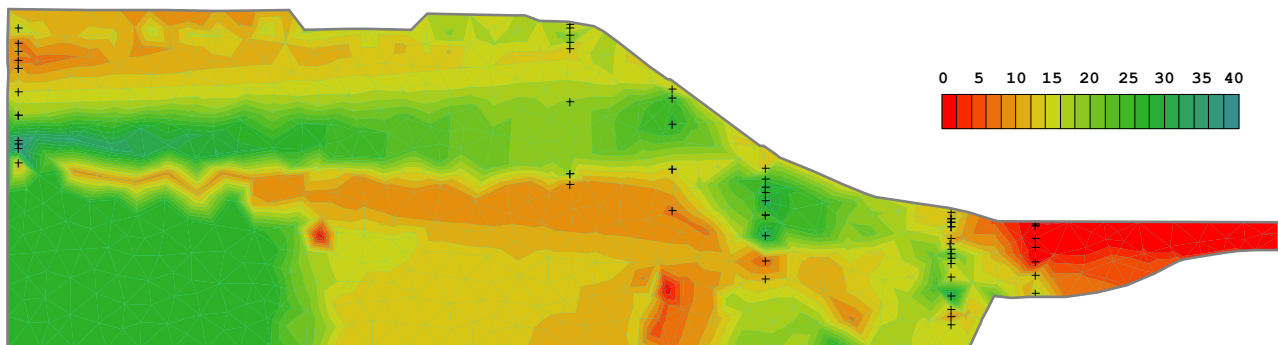


Рис. 3.22. Поле распределения угла внутреннего трения в массиве без учёта геологических границ по интерполяционному методу Делоне.

Расчёты с использованием методов интерполяции Чага и Тонкого сплайна по второму и четвёртому подходам показали нереалистичные результаты, так как коэффициенты устойчивости склона оказались меньше 1. Это говорит о невозможности их применения для расчётов неоднородных склонов, на которых расстояние между скважинами достаточно велико, так как интерполяция значений прочностных свойств грунтов на больших расстояниях между точками опробования приводит к созданию зон с сильно заниженными или завышенными значениями показателей. Поля распределения прочностных свойств грунтов в массиве с использованием метода интерполяции Чага приведены на рисунках 3.23 и 3.24, метода Тонкого сплайна на рисунках 3.25 и 3.26.

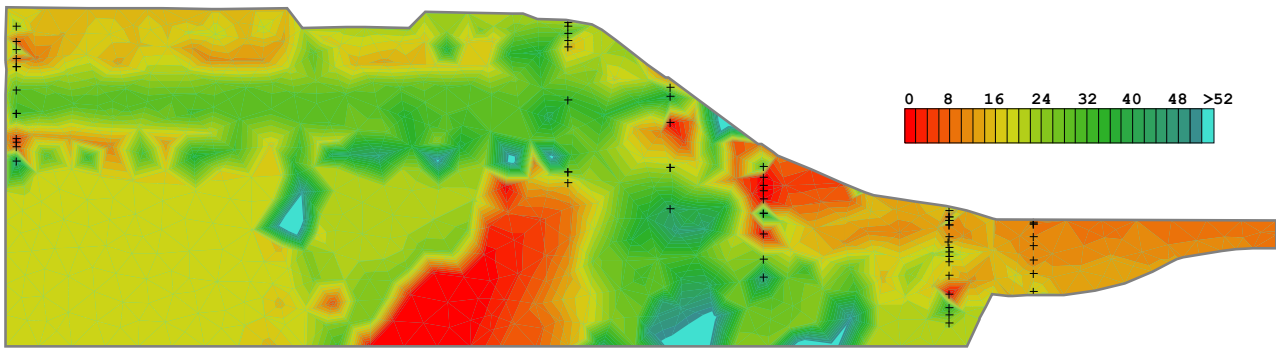


Рис. 3.23. Поле распределения сцепления в массиве без учёта геологических границ по интерполяционному методу Чага.

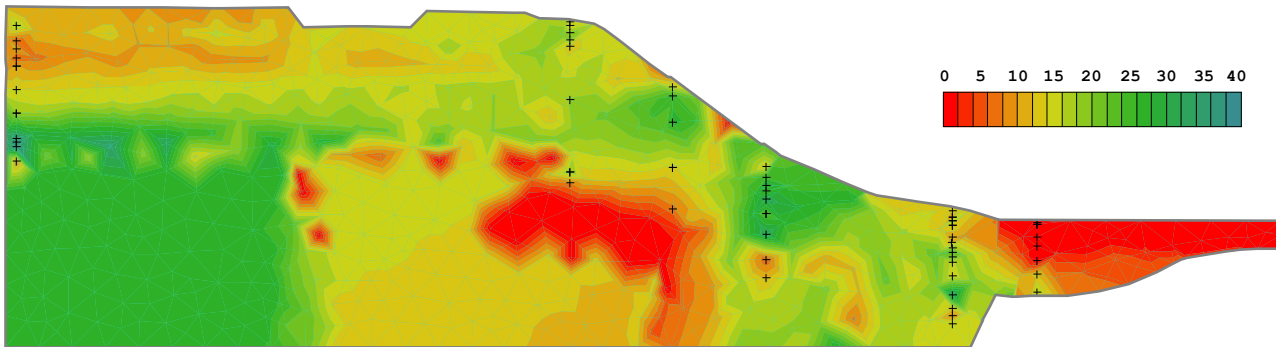


Рис. 3.24. Поле распределения угла внутреннего трения в массиве без учёта геологических границ по интерполяционному методу Чага.

Экстраполяция свойств грунтов с использованием метода Тонкого сплайна приводит к полиномиальному росту значений вне области интерполяции.

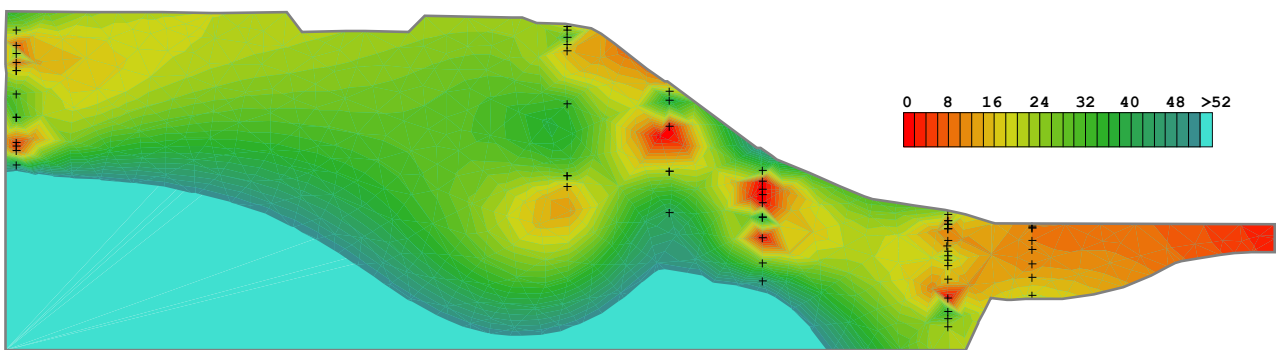


Рис. 3.25. Поле распределения сцепления в массиве без учёта геологических границ по интерполяционному методу Тонкого сплайна.

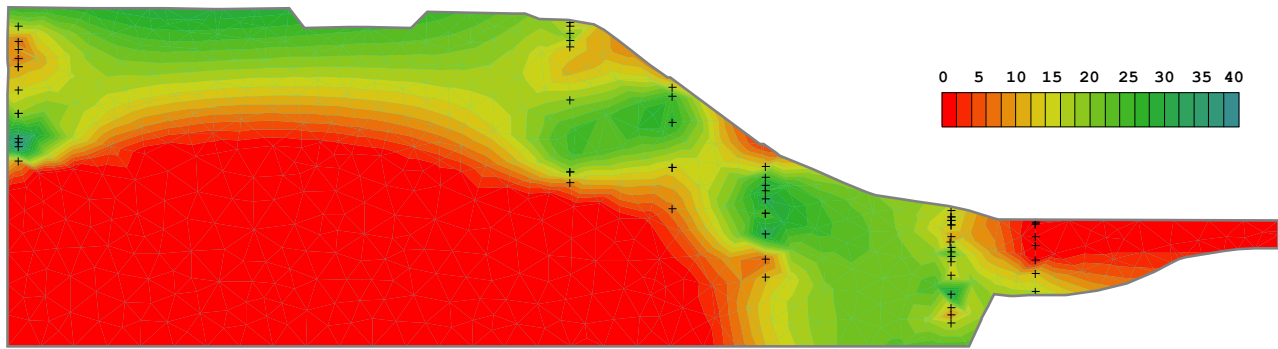


Рис. 3.26. Поле распределения угла внутреннего трения в массиве без учёта геологических границ по интерполяционному методу Тонкого сплайна.

Расчётные схемы с построением полей распределения значений прочностных свойств грунтов в пределах расчётных грунтовых элементов и в пределах всего массива без выделения границ имеют ограничения в применении. В первом случае это связано с невозможностью осуществления достоверной интерполяции в пределах отдельных прослоев и линз, из которых отобрано малое количество проб. В них осуществляется экстраполяция значений, которая приводит к пикам значений от 0 и практически до бесконечности (особенно методом тонкого сплайна). Аналогичная ситуация характерна и для подхода с распределением прочностных свойств в пределах всего массива без выделения границ, за исключением случаев, когда поверхность скольжения располагается выше опробованных слоёв и попадает в зону интерполяции, а не экстраполяции. Поэтому применение этих подходов недопустимо при расчётах неоднородных склонов.

Выводы

Основной задачей инженерно-геологических изысканий в пределах оползнеопасных склонов является схематизация природных условий для количественной оценки их устойчивости. В результате схематизации происходит упрощение реального геологического строения. Этот процесс начинается с полевых работ, в процессе которых геолог описывает скважины и обнажения, продолжается в лаборатории, в ходе камеральной обработки материалов, и заканчивается при составлении геомеханических моделей склона. В результате, некоторая часть информации искажается, что при расчётах устойчивости может привести к неверной оценке состояния склона.

Большинство методов расчётов устойчивости склонов основано на критерии прочности Мора-Кулона, показывающем зависимость максимального сопротивления сдвигу от нормальной нагрузки при заданных значениях прочностных свойств грунтов. Существует возможность использования различных методов распределения значений свойств грунтов в массиве. Один из подходов позволяет задавать поле распределения свойств грунтов в массиве. Для этого необходимо производить интерполяцию свойств грунтов. Одними из наиболее распространённых методов являются методы Чага, Делоне, обратных взвешенных расстояний и тонкого сплайна. Их сравнение в аспекте изучения оползней скольжения, впервые приведено в данной работе.

При использовании модели с полевым распределением свойств грунтов необходимо обоснование применяемого метода интерполяции. Для описанного склона при расчёте в программе Slide 6.0 наиболее оптимальным является метод обратных взвешенных расстояний.

Геомеханическая модель составляется на основе инженерно-геологических разрезов, в пределах которых природные массивы разделены на элементарные слои – инженерно-геологические элементы. Характеристики элементам назначаются в результате обработки полевых и лабораторных данных о свойствах грунтов. Существует два основных подхода к заданию свойств элементам – отечественный, когда всему выделенному слою назначаются расчётные (в статистической терминологии) свойства, и зарубежный, когда назначаются нормативные значения характеристик. Оба эти подхода имеют некоторые недостатки. Основным недостатком отечественного подхода является искусственное уменьшение средних значений свойств грунтов за счёт введения коэффициентов надёжности. В результате, закладываемые в расчет, формально уменьшенные, прочностные характеристики грунтов предопределяют не только заниженные значения коэффициентов устойчивости в итоге, но и совсем другую «расчетную» поверхность скольжения. Зарубежный подход также имеет свои недостатки.

Автором сформулированы принципиальные подходы, основанные на построении поля пространственного распределения свойств грунтов в массиве. Они опираются на распределение свойств грунтов между точками, в которых известны значения прочностных свойств грунтов. Эти точки соответствуют местам отбора проб в горных выработках, привязанных к системе координат.

Первый подход заключается в разделении склона на расчётные геологические элементы согласно статистической обработке физических свойств грунтов. Далее, в пределах каждого слоя осуществляется интерполяция свойств одним из имеющихся в распоряжении методов интерполяции. Основные методы интерполяции описаны в предыдущей главе. Недостатком этого подхода являются «краевые эффекты», возникающие на границах расчётных грунтовых элементов в процессе экстраполяции свойств за пределы интерполируемого массива. Второй подход заключается в разделении разреза на стратиграфо-генетические комплексы. Он позволяет учитывать переходные слои между фациально замещающимися разностями в пределах массива пород одного происхождения и возраста, что позволяет избежать ошибок, возникающих при расчётах за счёт расположения поверхностей скольжения на строгой границе песчаных и глинистых грунтов с разными прочностными характеристиками. Третий подход заключается в задании поля распределения свойств грунтов в пределах всего массива без выделения каких-либо границ.

Сравнение различных методов расчётов устойчивости склонов и моделей распределения свойств грунтов впервые выполнено в настоящей работе на примере юго-восточного склона Боголюбского монастыря, расположенного во Владимирской области. Объекты монастыря, находящиеся в непосредственной близости к склону, являются объектами культурного наследия ЮНЕСКО и памятниками архитектуры Федерального значения.

По результатам расчётов можно сделать следующие выводы. Применение подхода с построением поля распределения прочностных свойств грунтов в пределах РГЭ недопустимо. Это связано с непредсказуемостью результатов экстраполяции свойств грунтов до границ РГЭ, пробы из которых отобраны далеко от их границ.

Применение подхода с построением поля распределения прочностных свойств грунтов в пределах СГК допустимо, но имеет ограничения. Они, в первую очередь, связаны с экстраполяцией прочностных свойств к границам комплекса. Следовательно, при применении этого подхода необходимо отбирать большое количество проб у границ каждого СГК. Данный подход позволяет учитывать изменчивость свойств грунтов в пределах полипородных геологических тел, сформировавшихся в одно геологическое время в результате действия определённого геологического процесса, между различными литологическими разностями, между которыми не всегда можно строго провести границу в силу фациальной изменчивости,

что особенно характерно для четвертичных грунтов флювиального генезиса. Применение данного подхода необходимо при изучении склонов с большой мощностью техногенных накоплений. Это связано с тем, что выделение в пределах данного СГК более мелких геологических тел крайне затруднительно в силу их неоднородности и невыдержанной мощности, а его простираие позволяет осуществлять отбор проб за границами склона. В результате, вопрос интерполяции значений прочностных свойств в пределах склона снимается при применении этого подхода для расчёта устойчивости склонов, сложенных техногенными накоплениями. Применение данного подхода для склонов с большой мощностью техногенных грунтов рассмотрено в следующей главе.

Применение подхода с построением поля распределения прочностных свойств грунтов в пределах всего массива допустимо, но имеет ограничения. Данный подход можно применять только для однородных склонов, в пределах которых отобрано большое количество проб. Это позволит выполнить качественную интерполяцию свойств грунтов в пределах подобных склонов и учесть ослабленные зоны, что очень важно при расчёте устойчивости склонов.

Таким образом, в данной главе обоснованы первое и второе защищаемые положения. Показана возможность создания расчётных схем оценки устойчивости склонов с применением полевого распределения прочностных свойств грунтов в пределах стратиграфо-генетических комплексов и в пределах всего массива (без выделения границ).

Показана необходимость обоснования применяемого метода интерполяции при использовании моделей с полевым распределением свойств грунтов.

ГЛАВА 4 ИЗУЧЕНИЕ СКЛОНОВ В ПРЕДЕЛАХ ИПТС

4.1 Характеристика техногенных грунтов ИПТС

В.И. Вернадский считал, что человек является огромной геологической силой [103]. Ф.В. Котлов писал «...человек является одним из активных геологических факторов современного осадкообразования...» ([104], стр. 151). По данным Е.Н. Огородниковой человечество за год производит объём осадков, более чем в три раза превышающий ежегодный объём твердого стока всех рек Земли [105].

Ф.В. Котловым было введено понятие «антропогенный литогенез», под которым он понимал геологический процесс образования молодых в геологической истории Земли отложений, связанный с хозяйственной деятельностью человека [106]. Он считал результатом действия этого процесса появление антропогенных отложений, которые связаны с появлением человека на Земле и характеризуются планетарным распространением. Их возраст изменяется от нескольких лет до нескольких миллионов лет. При этом тип антропогенного литогенеза определяется видом человеческой деятельности и может носить направленный или стихийный характер [105].

Образующиеся в процессе антропогенного литогенеза грунты Е.М. Сергеев называл искусственными [107], Ф.В. Котлов антропогенными отложениями [104]. В ГОСТ 25100-2011, который является основным нормативным документом, выделяется тип «техногенные грунты» [108]. По определению ГОСТ, техногенными называются грунты, изменённые, перемещённые или образованные в результате инженерно-хозяйственной деятельности человека. Они подразделяются на «техногенно изменённые в условиях естественного залегания природные грунты», «техногенно перемещённые природные грунты» и «антропогенные грунты».

Техногенно изменёнными в условиях естественного залегания называются природные грунты, подвергнутые различному по природе техногенному воздействию (химическому, физическому, биологическому и т.п.) на месте его залегания [108].

Техногенно перемещёнными или переотложенными называются природные грунты, перемещённые тем или иным искусственным способом с места их природного залегания, и подвергнутые при этом частичному преобразованию [108].

Антропогенными или антропогенно-образованными называются образовавшиеся естественно-историческим образом (культурные слои) или созданные человеком разными способами грунты, представленные отходами или продуктами его производственной и/или хозяйственной деятельности, являющимися компонентами геологической среды [108].

В пределах исторических природно-технических систем преимущественно накапливаются антропогенные и техногенно перемещённые грунты. Поэтому они представляют

наибольший интерес в рамках настоящей работы. По своему вещественному составу они классифицируются согласно ГОСТ 25100-2011 как скальные и дисперсные грунты (как связные и несвязные). Учитывая специфику работы, автором рассматриваются исключительно дисперсные грунты.

В настоящее время существует большое количество различных классификаций техногенных грунтов. Эти классификации подразделяются на региональные, частные и общие [105].

Наиболее известные частные классификации составлены Ю.М. Абелевым [109], Ю.М. Лычко [110], Б.Х. Насыровым [111]. Наиболее известные региональные классификации составлены А.М. Худайбергеновым [112] и Д.В. Спиридоновым [113]. Наиболее известные общие классификации составлены Ф.В. Котловым [106] и М.И. Хазановым [114].

По общей классификации Ф.В. Котлова изучаемые грунты относятся к группе наземных, классу насыпных, надклассам строительных и/или хозяйственно-бытовых. Если грунты можно отнести к надклассу строительных, то их можно отнести к любому из четырёх классов, в зависимости от ситуации. Это классы стройплощадок, земляных сооружений, подсыпок, грунтовых строительных отвалов. Если грунты можно отнести к надклассу хозяйственно-бытовых, то они относятся к классу площадных культурных слоёв. Инженерам-геологам, работающим в пределах сферы взаимодействия исторических природно-технических систем, чаще всего приходится сталкиваться именно с обозначенными выше классами техногенных (антропогенных) грунтов.

Указанные выше классификации достаточно неудобны в использовании из-за их излишней детальности, в которой нет необходимости, а так же отсутствия количественных признаков выделения отдельных таксонов. Специальная классификация Е.Н. Огородниковой [105] более конкретна и удобна в использовании, так как позволяет чётко определить место техногенных грунтов, приуроченных к историческим территориям. В ней выделяются следующие таксоны: класс (по происхождению) – группа (по виду деятельности как источнику формирования) – подгруппа (по способу образования) – тип (по петрографическому составу и структурно-текстурным характеристикам) – подтип (по дисперсности) – вид (по степени самоуплотнения, уплотнения и упрочнения, характеру литогенетических преобразований) – разновидность (по показателям вещественного состава и физико-механических свойств).

По этой классификации описываемые грунты относятся к классу техногенно-образованных, группе сформировавшихся в результате строительной деятельности или группе коммунального хозяйства. К техногенно-образованным в результате строительной деятельности автор классификации относит перемещённые грунты, претерпевшие изменения под влиянием различных строительных работ и воздействий на застраиваемых территориях,

свалки строительных отходов, а также мелиорированные грунты. К грунтам, образованным в результате коммунально-хозяйственной деятельности, Е.Н. Огородникова относит твёрдые отходы бытовой деятельности человека. Далее, при более детальном расчленении обозначенных групп, изучаемые грунты относятся к подгруппе насыпных, типу грунтов культурного слоя. Подтип определяется исходя из вещественного состава, вид по степени уплотнения, разновидность по показателям физико-механических свойств.

Отдельным исключением являются грунты, залегающие в пределах склонов, и помещённые туда в результате планомерной отсыпки, вызванной необходимостью нивелирования профиля склона. Такие грунты относятся к классу техногенно-переотложенных, группе сформировавшихся в результате строительной деятельности, подгруппе насыпных, типам грунтов земляных сооружений и грунтов, подготовленных для строительства территорий. Разделение на подтипы и разновидности производится так же как и для грунтов культурного слоя, а по виду они разделяются на рыхлые и средней плотности.

Анализ и сравнение различных геологических разрезов через исторические территории центральной части европейской России показывает, что техногенные грунты, накопленные за последнее тысячелетие, обладают рядом специфических особенностей. Многометровые толщи этих накоплений определяют неблагоприятные особенности инженерно-геологических условий [1].

Значения показателей физических, химических и механических свойств техногенных грунтов, залегающих в пределах ИПТС, сильно отличаются от прочих, образованных в природе грунтов. Это связано с условиями их формирования, составом материнских пород и присутствующих включений. Условия формирования техногена влияют на структурно-текстурные особенности, предопределяя дальнейшее поведение грунтов. Состав материнских пород влияет на структуру техногенных грунтов, определяет в большей степени их минеральный состав, и предопределяет физико-механические свойства [115]. Наличие включений окончательно формирует свойства техногена. Чаще всего в техногенных грунтах, распространённых в пределах ИПТС, включения представлены строительным мусором и органическими остатками. Наличие органики обуславливает и химические и физико-механические свойства грунтов.

Распределение свойств в техногенных грунтах очень сложное в силу их неоднородности и условий формирования, установить которые не всегда возможно. В связи с этим, выделение различных по физико-механическим свойствам слоёв и задание в их пределах усреднённых значений характеристик представляет определённую сложность. А склоны, входящие в сферу взаимодействия ИПТС, зачастую сложены многометровыми толщами техногенных грунтов,

вследствие чего количественная оценка устойчивости подобных склонов достаточно затруднительна.

4.2 Влияние антропогенного литогенеза на изменение инженерно-геологических условий ИПТС

Эволюционные преобразования рельефа исторических территорий начались с постройкой первых сооружений. Выражалось это в нивелировании территории и её приспособлении к требованиям хозяйственных нужд. За многовековую историю функционирования ИПТС рельеф их поверхности, как правило, изменился очень значительно. А изменение рельефа влечёт за собой изменение количественных и качественных показателей инженерно-геологических процессов. Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, изменение энергии рельефа приводит к изменениям градиентов поверхностного стока и к переформированию полей напряжений в грунтовых массивах. Во-вторых, изменяются гидрогеологические условия территории. И в-третьих, изменяются физико-механические свойства грунтов, залегающих в верхней части разреза. Рассмотрим каждый фактор по отдельности.

Эвакуация поверхностного стока является одной из важнейших проблем при эксплуатации исторических территорий. Изначально существующая природная эрозионная сеть с уклонами, порой достаточно крутыми, является фактором, ограничивающим возможность постройки новых сооружений на желаемом месте. Для реализации строительных планов зачастую прибегали к засыпке мелких эрозионных элементов. Это приводило к тому, что атмосферные осадки начинали инфильтроваться в грунты, увеличивая их влажность, повышая уровень грунтовых вод и приводя к замачиванию подземных элементов строительных конструкций. Стремление к внешней «красоте» порой влекло за собой серьёзные последствия. К таким же последствиям приводило отсутствие контроля за действием дренажных систем. Даже если дрены и не засыпали, то их заполнение грунтовым материалом и мусором приводило к ликвидации естественного дренажа. И если большинство исторических территорий, размещавшихся на возвышенных местах, исторически выполняли фортификационную роль, и за водным балансом внутри крепостей тщательно следили, то начиная с XVIII века, при перестройках стен за этим перестали следить с той же тщательностью. Но, несмотря на это, должный режим сохранялся. XX век привёл к разрушению дренажных систем и нарушению режима эвакуации поверхностных вод.

В качестве яркого примера можно привести Нижегородский кремль. Крепостная стена практически на всём протяжении опирается на полускальные пермские грунты. Участок в районе Зачатьевской башни расположен в пределах засыпанного техногенными грунтами оврага. Этот овраг являлся крупнейшей природной дренажной в пределах этого участка склона. И грунты техногенной засыпки постоянно переувлажнялись, в результате чего развивался процесс оползания данного участка стены со скоростью около 1 см/год. В результате, за почти 500 лет

участок стены «съехал» вниз на расстояние около 5 м. И только в 2000-е годы стена была восстановлена на историческом месте.

В том же кремле, в районе Губернаторского сада существовала историческая дренажная система, выполненная из деревянных конструкций, которая перехватывала поверхностный сток и часть подземного. В советские годы система пришла в негодность, и пока не была реконструирована, на прилегающих участках склона интенсивно развивались оползневые процессы. После реконструкции системы подвижки склона прекратились. В 1990-е годы перестал осуществляться должный режим эксплуатации дренажной системы, и вновь начались подвижки склона. В настоящее время система эксплуатируется должным образом, и участок склона стабилен.

Изменение гидрогеологических условий территорий ИПТС связано с увеличением мощности техногенных накоплений, созданием различных отмосток и нарушением поверхностного стока. Увеличение мощности техногенных накоплений приводит к увеличению мощности зоны аэрации и, следовательно, к уменьшению испарения с зеркала грунтовых вод. Таким образом, происходит повышение абсолютных отметок уровня подземных вод. Это влечёт за собой увеличение влажности и снижение значений показателей механических свойств грунтов. Создание паровлагонепроницаемых отмосток, например выполненных из асфальта, приводит к нарушению инфильтрационного питания на отдельных участках, которые перекрыты отмосткой. Одновременно с этим на других участках происходит увеличение инфильтрационного питания за счёт складирования снега и сброса дождевой воды, а так же активного полива культивируемых площадей. Нарушение поверхностного стока, как было показано выше, однозначно приводит к подтоплению территорий.

В качестве примера можно указать Боголюбский монастырь, описание которого приведено в главе 3 настоящей работы. Там, после перестройки стен в XIX веке, не была организована дренажная система. В настоящее время сток поверхностных вод с территории монастыря осуществляется малоэффективной дренажной системой. Это подтверждается наличием суффозионных провалов, как в пределах монастырских стен, так и на склоне. При проведении автором оползневой съёмки, в монастырских стенах были обнаружены частично засыпанные и заросшие травой отверстия для пропуска поверхностных вод, функционирование которых не представляется возможным. Дренажные трубы выходят посередине склона, сбрасывая на него воду. Помимо этого, у бровки склона организована клумба, регулярно поливаемая насельниками монастыря. Всё это привело к активизации оползневых подвижек в последние годы.

Другим, не менее ярким примером, служит Ново-Иерусалимский монастырь в подмосковной Истре. Там северо-восточная часть холма Сион, на котором расположен

монастырь, подвергалась постоянным оползневым подвижкам. Вызвано это было нарушением работы исторической дренажной системы, которая эксплуатировалась без осуществления технической поддержки дренажных каналов. Её частичное разрушение привело к переувлажнению грунтов, слагающих склон, и активному развитию оползневого процесса. Регулярный прорыв тепловых сетей в районе Надвратной церкви приводил также к активизации оползневого процесса на прилегающем участке склона.

Таким образом, инициирование инженерно-геологических процессов, в первую очередь оползневого, связано с изменением рельефа исторических территорий. Для их изучения и локализации необходимо максимальное внимание уделять режиму подземных вод и изменению физико-механических свойств техногенных накоплений.

4.3 Расчёт устойчивости склонов, сложенных техногенными грунтами

В данном разделе описывается предлагаемая методика оценки устойчивости склонов в пределах исторических территорий, сложенных техногенными грунтами. Объектом, на котором она апробируется, является участок южного склона Никольской горы Можайского кремля. Объект располагается по адресу Московская область, г. Можайск, ул. Бородинская, д. 8, Комплекс Можайского кремля. Фотография объекта исследования приведена на рисунке 4.1.



Рис.4.1. Общий вид склона – объекта моделирования

Описание объекта

История Можайского кремля насчитывает несколько веков. В настоящее время на бывшей кремлёвской территории располагаются Ново-Никольский и Петропавловский соборы. Ново-Никольский собор построен в стиле псевдоготики, или русской готики, архитектором А.Н. Бакаревым. Ново-Никольский Собор обстроен вокруг древних ворот и стоящей на них надвратной Никольской церкви, построенной в 1685 г., от которой он и получил свое название. Собор строился с перерывами. Основание сохранившихся белокаменных ворот, представляющее собой единую плиту, сложенную из блоков известняка грубой тёски на

глинистом растворе, устроено непосредственно на поверхности вала XIV века. Строительство крепостных стен Можайска велось в 1624—1626 годах. Собор построен из кирпича с богатым белокаменным декором. Для симметрии с севера к новому Собору был пристроен такой же придел. Изначально основной объем храма венчала купольная ротонда, разрушенная в годы Великой Отечественной войны и не восстановленная до сих пор. С запада к Собору пристроена четырехъярусная колокольня с высоким шпилем. В процессе реставрации в 1961г. ротонду не стали восстанавливать, и Собор в таком виде пребывает до сих пор [116]. Собор является объектом культурного наследия федерального значения.

В апреле 2013 года в нескольких метрах от юго-западного угла собора сошёл оползень. В июле того же года согласно техническому заданию Министерства культуры РФ для инженерно-геологических изысканий ООО «ИГИТ» была направлена полевая группа, под руководством автора.

Целью изысканий было получение необходимых инженерно-геологических материалов в объеме, достаточном для осуществления противоаварийных мероприятий по сохранению объекта культурного наследия. Работы проводились в соответствии с нормативными документами, регламентирующими проведение инженерно-геологических изысканий.

По результатам изысканий можно описать факторы и причины развивающегося оползневого процесса.

I группа факторов объединяет условия оползнеобразования (среднюю величину коэффициента устойчивости). Подробно эта группа факторов описана в разделе 1.3 настоящей работы. Применительно к изучаемому объекту, к этой группе относятся рельеф местности, геологическое строение склона, особенности физико-механических свойств грунтов, гидрогеологические условия, развитие сопутствующих экзогенных геологических процессов и инженерная деятельность человека.

Рельеф местности

В геоморфологическом отношении участок работ находится на Кремлёвском холме (Никольской горе), в пределах Смоленско-Московской моренно-эрозионной возвышенности, расчленённой глубокими речными долинами, оврагами и балками.

Рельеф участка холмистый, характеризуется отметками 183 – 190 м (подножие холма) – 202-203 м (бровка и верхняя часть холма). Склон холма имеет значительную крутизну. Его высота составляет 13-19 м, крутизна достигает 41°. Поверхность склона ровная, без бугров, кочек и западин, заросшая травой.

Геологическое строение склона

В структурном отношении территория располагается в пределах Московской синеклизы, подробное описание которой приведено в главе 3. Отличием является отсутствие пермских отложений, полностью размытых в мезозойское время. По архивным данным до глубины 48 м залегают четвертичные отложения.

В геологическом строении площадки сверху вниз до глубины 32,30 м принимают участие современные техногенные накопления (tQ_{IV}), среднечетвертичные озёрно-ледниковые отложения (lgQ_{IIms}^{1-2}).

Четвертичная система (Q)

Техногенные накопления (tQ_{IV}) развиты повсеместно. Вскрыты всеми горными выработками. Они залегают или с поверхности, или сразу под почвенно-растительным покровом. Представлены преимущественно суглинками и супесями коричневыми и серыми с зеленоватым оттенком иногда до чёрных, с включениями органики, корнями растений, древесным углем, местами ожелезнёнными и песчанистыми, с включениями дресвы и гравия магматических и метаморфических горных пород, щебнем кирпича и известняка. Грунты крайне неоднородны по составу и свойствам. Мощность отложений достигает 11,90 м, в пределах расчётного профиля 8,90 м (скв. 6-2).

Среднечетвертичные озёрно-ледниковые отложения (lgQ_{IIms}^{1-2}) вскрыты во всех глубоких скважинах. Они подстилают флювиогляциальные отложения, а в склоновой части залегают непосредственно под техногенными накоплениями (tQ_{IV}). Отложения представлены в верхней части разреза преимущественно супесями и суглинками коричневыми, светло-коричневыми, серо-коричневыми, с прослоями песков и глин; в нижней части разреза преимущественно песками серыми, серо-коричневыми, зеленовато-коричневыми, пылеватыми, глинистыми, плотными, влажными и водонасыщенными, с прослоями супесей, суглинков и глин. Вскрытая мощность отложений более 23 м. По архивным данным в разрезе они залегают на глубину более 48 м.

Физико-механические свойства грунтов

По результатам анализа архивных материалов, лабораторных данных и по полевому визуальному описанию в пределах расчётного профиля выделено 7 инженерно-геологических элементов. Значения физико-механических свойств грунтов, использованные в расчётах приведены в таблице 4.1.

Техногенные накопления (tQIV)

- ИГЭ-1. Суглинки и супеси от коричневого до тёмно-серого цвета от мягкопластичной до полутвёрдой консистенции опесчаненные с включениями дресвы кирпича и известняка, древесного угля, органики и строительного мусора. $\gamma=19,5 \text{ кН/м}^3$;

Среднечетвертичные озерно-ледниковые отложения ($lgQIIms^{1-2}$)

- ИГЭ-7. Супесь светло-коричневая пластичная слоистая макропористая с прослоями супеси твёрдой, песка крупного водонасыщенного, суглинка полутвёрдого. $\gamma=20 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-9. Супесь светло-коричневая пластичная макропористая с включениями гравия и гальки магматических горных пород, с прослоями суглинка полутвёрдого, песка средней крупности влажного, глины твёрдой. $\gamma=19,8 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-10. Суглинок коричневый полутвёрдый с прослоями супеси пластичной, песка средней крупности водонасыщенного и глины твёрдой. $\gamma=19,1 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-11. Суглинок светло-коричневый мягкопластичный слоистый макропористый с включением гравия и дресвы карбонатных пород содержанием до 10%, с прослоями супеси пластичной, песка крупного водонасыщенного и глины твёрдой. $\gamma=19,3 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-13. Супесь тёмно-серая пластичная с прослоями суглинка тугопластичного, глиной твёрдой, песка средней крупности водонасыщенного. $\gamma=19,6 \text{ кН/м}^3$;
- ИГЭ-14. Песок пылеватый зеленовато-серый средней плотности маловлажный с прослоями супеси пластичной. $\gamma=18,7 \text{ кН/м}^3$;

Гидрогеологические условия

Подземные воды в пределах изученного разреза представлены двумя водоносными горизонтами, развитыми повсеместно:

В ходе изысканий на исследуемой территории были вскрыты водоносный горизонт, приуроченный к пылеватым пескам и супесям озерно-ледниковых отложений ($lgQIIms^{1-2}$) и верховодка.

Верхним водоупором основного водоносного горизонта являются озерно-ледниковые суглинки ($lgQIIms^{1-2}$), нижний водоупор вскрыт не был. Установившийся уровень вод этого горизонта зафиксирован на абсолютных отметках 174,34-174,60. Горизонт является напорно-безнапорным. Питание водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, разгрузка осуществляется в р. Можайку.

Верховодка в пределах склона формируется на контакте техногенных накоплений и коренных отложений. Грунты, залегающие в зоне контакта водонасыщенные. Мощность зоны не превышает 5-7 см.

Таблица 4.1.

Таблица физико-механических свойств грунтов

Характеристики свойств №ИГЭ	Нормативные значения		Расчётные значения		Значения в точках опробования						
	с,кПа	φ,град	с,кПа	φ,град	Координаты точки		с,кПа	φ,град	ρ, г/см³	I _p ,%	I _L
					x	y					
1	21	20	19	17	3,2	25,5	23,50	20,30	2,00	7,52	0,24
					3,2	22,8	25,67	18,00	1,87	9,32	0,46
					3,2	20,5	11,67	10,20	1,96	8,89	0,68
					3,2	19,3	20,17	14,04	1,98	10,01	0,74
					9,3	21,3	29,83	36,13	2,05	8,77	0,23
					9,3	19,5	23,33	12,95	1,85	8,76	0,45
					9,3	16,4	21,33	15,64	1,93	7,92	0,64
					9,3	14,7	20,50	16,17	1,88	6,41	0,67
					9,3	13,2	19,17	12,95	1,85	8,76	0,45
					17,9	15,1	15,68	7,97	1,93	6,92	0,64
					17,9	12,6	23,00	13,50	1,84	8,22	0,21
					17,9	11,1	22,53	17,95	1,97	10,22	0,70
					23,0	13,4	13,33	18,00	1,93	5,10	0,45
					23,0	12,2	13,67	23,75	1,99	7,30	0,77
					23,0	11,1	15,00	21,06	1,98	3,90	0,77
	Нормативные значения										
	с, кПа				φ, град			ρ, г/см³	I _p ,%	I _L	
7	14				20			2,00	4,87	0,41	
9	15				10			1,98	5,61	0,37	
10	42				32			1,91	9,99	0,15	
11	25				18			1,93	9,07	0,56	
13	29				28			1,96	4,35	0,42	
14	2				32			1,87	—	—	

Развитие сопутствующих экзогенных геологических процессов и явлений

Суффозионный процесс

На изучаемой территории суффозионный процесс не развит. Выполненные расчёты суффозионной устойчивости показали, что все инженерно-геологические элементы, представленные песчаными грунтами, являются несуффозионными.

Заболачивание

Заболачивание развивается в местах выхода и разгрузки подземных вод в виде родников у подножья склона, вблизи от опытного профиля.

Оползневой процесс

В апреле 2013 года на исследуемом участке сошёл оползень. По механизму смещения пород указанный оползень, согласно СП 11-105-97, ч. II [56], относится к типу оползней сдвига (скольжения), подтипу консеквентных (соскальзывающих). Масштаб оползня – небольшой. Размеры цирка 17х18 м. Максимальная глубина захвата пород 3 метра. Объём смещённых масс около 700 м³. В ходе рекогносцировочного обследования склона были выявлены трещины растяжения раскрытием до 3 см, что указывает на активное развитие оползневого процесса в пределах изучаемой территории. Подвижки склона связаны с перемещением техногенного массива по коренным грунтам, вследствие переувлажнения зоны контакта.

Инженерная деятельность человека

Рельеф Никольской горы за последние несколько веков претерпел сильные изменения. Изначально на поверхности холма располагался кремль. Вначале он был огорожен оборонительными валами, после была возведена белокаменная крепостная стена. К воротам вела одна дорога по деревянному мосту через овраг. Под крепостной стеной была построена отвесная белокаменная подпорная стенка, высотой около 9 метров. Благодаря этому Можайский кремль был практически неприступным. После утраты Можайском статуса стратегического приграничного города, вокруг белокаменных ворот, воздвигнутых на месте крепостных валов XIV века, строились различные сооружения. Построенный в XIX веке Ново-Никольский собор частично опирается на исторические въездные ворота [117]. Предположительно в XIX веке начались деформации подпорной стенки, вследствие чего к ней были пристроены кирпичные контрфорсы. В процессе изысканий был пройден шурф, которым впервые была вскрыта кладка подпорной стены и контрфорсы, не выполнявшие предназначенной функции, так как нижняя их часть была смещена более чем на 10 см от тела стены. В XIX веке подпорная стена и контрфорсы были засыпаны грунтом, придавшим более пологую форму склону.

II группа факторов объединяет процессы, изменяющие величину коэффициента устойчивости. Подробно эта группа факторов описана в разделе 1.3 настоящей работы. Применительно к изучаемому объекту, к ним можно отнести увлажнение грунтов дождевыми и талыми водами.

Увлажнение грунтов дождевыми, талыми, подземными и хозяйственными водами

Проблема переувлажнения склона характерна для описываемого объекта, так как до начала противоаварийных работ осенью 2013 года атмосферные осадки с крыши собора сбрасывались на склон. Снег, всю зиму убиравшийся с территории складировался у бровки склона. Из-за резкого аномального потепления весной 2013 года огромные сугробы растаяли, насытив грунты водой. И на участке склона, над которым была сложена куча снега, сошёл оползень.

Расчёт устойчивости склона

В процессе изысканий было установлено, что сошедший оползень сформировался на границе коренных и техногенных грунтов. При полевом описании скважин чётко выделялась граница между техногенными и коренными грунтами. Зона контакта была представлена грунтами с повышенной влажностью, в пределах оползневого цирка выходили коренные породы, а техногенные накопления залегали в подошве сошедшего оползня.

Расчёты производились на примере профиля 6-6 (приложения №3 и №4). За левую границу потенциального оползневого тела была принята внешняя грань неподвижной подпорной стенки глубиной около 10 м.

Недостатки детерминистических подходов к заданию свойств грунтов в пределах выделяемых ИГЭ с помощью усреднения значений (с введением понижающих коэффициентов и без них) были рассмотрены в разделе 3.2. В настоящее время в мировой практике широкое распространение приобретает вероятностный подход к заданию свойств грунтов в пределах выделяемых литологических разностей. Его сущность заключается в определении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости в зависимости от вероятностных функций распределения физико-механических характеристик грунтов, составляющих склон.

При использовании данного подхода выделенным литологическим разностям задаются математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, разница между математическим ожиданием и максимальным и минимальным значениями прочностных свойств грунтов, отобранных в пределах данной разности, составляющих выборку. Далее делается предположение о функции распределения плотности вероятности задаваемого параметра. Чаще всего используются распределения нормальное, логнормальное, равномерное, гамма, экспоненциальное, а также некоторые другие, в зависимости от возможностей программы. После этого производится расчёт вероятности распределения коэффициента устойчивости склона в зависимости от изменения заданных параметров, обычно с использованием метода Монте-Карло. Данный подход позволяет оценить вероятность развития оползневого процесса и выполнить анализ чувствительности.

Для применения этого подхода необходимо выполнение условия непрерывности распределения параметров выборки. При статистической обработке выборок значений механических свойств грунтов в пределах выделяемого геологического тела производится отбраковка экстремальных (максимальных и минимальных) значений, поскольку делается предположение об их ошибочности. И если для коренных грунтов такое предположение может быть обосновано их однородностью в пределах выделенной разности, то для техногенных грунтов нельзя делать предположение о какой-либо однородности. Это связано с

невозможностью точного установления истории геологического развития данного стратиграфо-генетического комплекса. Примером могут служить склоны Нижегородского кремля и Боголюбского монастыря, на которых были устроены глубокие выгребные ямы под общественные туалеты. После ликвидации подобных сооружений в массиве техногенных грунтов остаются полости, заполненные накоплениями с непредсказуемыми механическими свойствами. И при расчёте устойчивости таких склонов нельзя не учитывать низкие, по сравнению со средним значением, показатели прочностных свойств, так как они выполняют роль «слабого звена», по которому возможно развитие потенциальной поверхности скольжения. Примеров формирования подобных прослоев, линз и прочих геологических тел в процессе жизнедеятельности человека можно привести очень много, причём необязательно с низкими значениями, но и с сильно завышенными (например старые ямы для забивки извести). И всё это необходимо учитывать при количественной оценке устойчивости. А такая неоднородность и непредсказуемость состава, как правило, не позволяет делать предположение о распределении свойств грунтов в пределах стратиграфо-генетического комплекса техногенных накоплений, подчиняющемся какому-либо известному закону.

На исследуемом объекте расчёты производились по оптимизированной поверхности скольжения с использованием следующих подходов к составлению моделей распределения свойств грунтов:

1. коренным грунтам задавались нормативные значения прочностных свойств, а техногенным – расчётные;
2. коренным и техногенным грунтам задавались нормативные значения прочностных свойств;
3. коренным грунтам задавались нормативные значения прочностных свойств, а в пределах СГК техногенных накоплений строилось поле распределения прочностных свойств. Интерполяция свойств техногенных грунтов была проведена методами Делоне, Чага, тонкого сплайна и обратных взвешенных расстояний, подробно описанными в разделе 3.3 настоящей работы.

Как уже говорилось, при использовании общепринятых подходов к заданию свойств грунтов в массиве обрабатывается выборка значений прочностных характеристик, полученная по результатам испытаний образцов, отобранных из определённого ИГЭ во всех выработках, пройденных в пределах изучаемого объекта. Это значит, что на значение свойств грунтов в каком-либо профиле оказывают влияние пробы, отобранные из этого же слоя на расстоянии от него, причём, зачастую, достаточно большом. Это вносит определённую погрешность в результаты расчётов.

В пределах изучаемого профиля было пройдено 4 скважины. Из слоя техногенных грунтов было отобрано 15 проб. В ходе инженерно-геологических изысканий из слоя техногенных накоплений было отобрано 36 проб. Выборка значений сцепления и угла внутреннего трения, отобранных в пределах всего склона приведена в таблице 4.2. Выборка значений сцепления и угла внутреннего трения, отобранных в пределах изучаемого профиля, а также их координаты приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.2.

Значения прочностных свойств техногенных грунтов, определённые в пределах всего объекта

	с,кПа	φ,град
Частные значения	21,17	15,11
	23,50	16,17
	19,17	12,95
	21,83	19,29
	19,87	16,91
	21,33	15,64
	22,53	17,95
	22,50	19,29
	20,17	14,04
	20,50	16,17
	19,17	12,95
	23,33	12,95
	29,33	22,05
	20,00	9,93
	15,67	7,97
	25,67	18,00
	23,00	13,50
	25,17	24,23
	29,00	30,96
	27,50	27,92
	25,50	27,92
	23,50	20,30
	29,83	36,13
	17,00	23,03

	14,67	21,06
	13,67	23,75
	13,33	18,00
	15,00	21,06
	25,00	12,00
	16,00	22,00
	10,67	11,03
	13,33	12,13
	10,00	10,2
	8,67	8,81
	10,67	11,03
	11,67	12,68
Нормативное значение	19,69	17,64
Расчётное значение	18,04	15,80

Таблица 4.3.

Значения прочностных свойств техногенных грунтов, определённые в пределах профиля

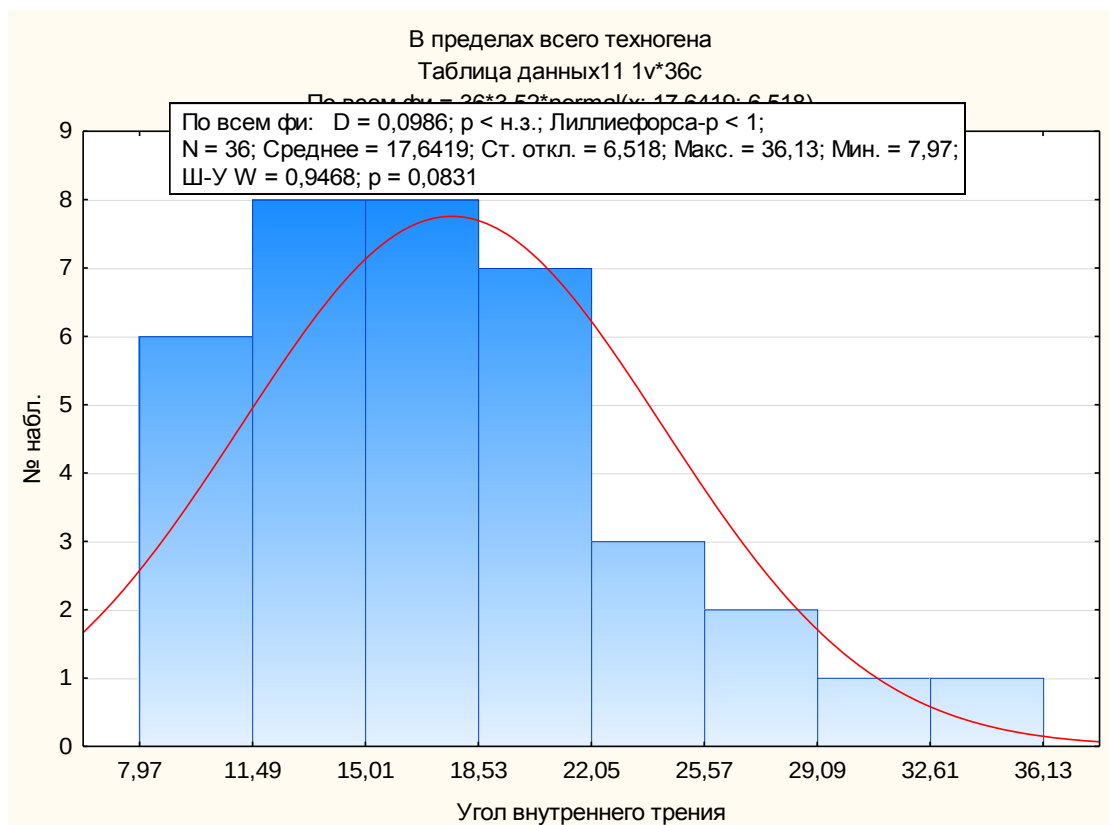
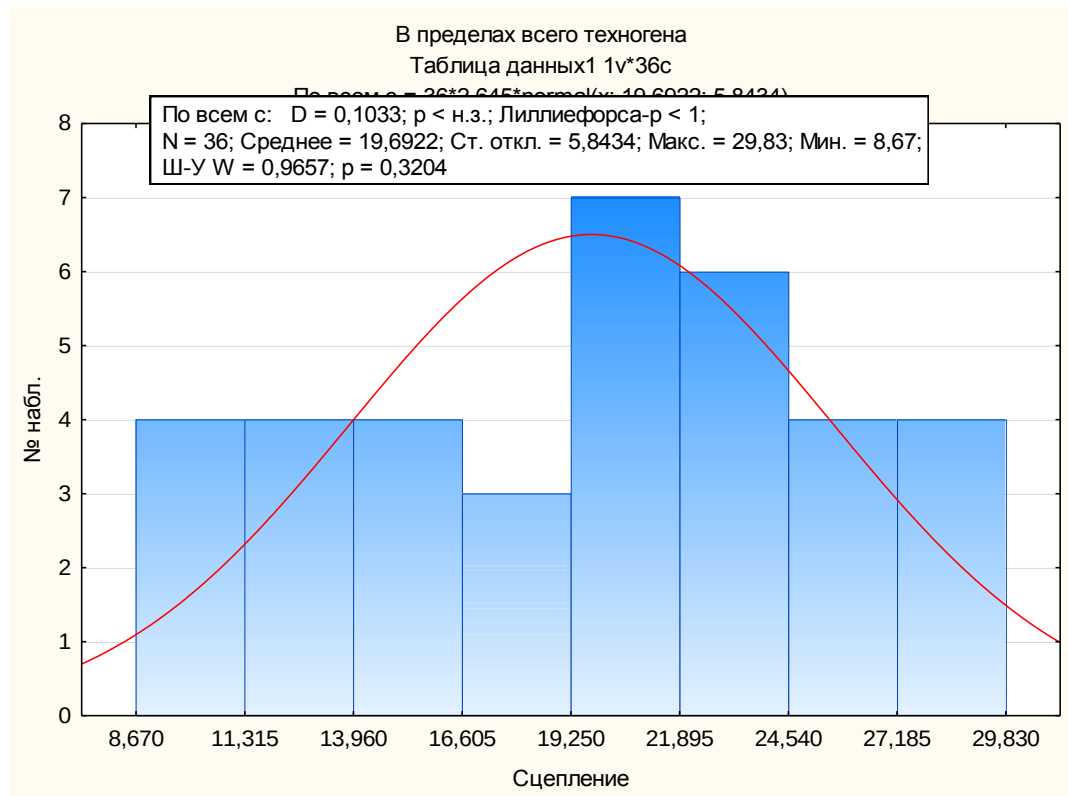
Координаты пробы		с,кПа	φ,град
х	у		
3,2	25,5	23,50	20,30
3,2	22,8	25,67	18,00
3,2	20,5	11,67	10,20
3,2	19,3	20,17	14,04
9,3	21,3	29,83	36,13
9,3	19,5	23,33	12,95
9,3	16,4	21,33	15,64
9,3	14,7	20,50	16,17
9,3	13,2	19,17	12,95
17,9	15,1	15,68	7,97
17,9	12,6	23,00	13,50
17,9	11,1	22,53	17,95
23,0	13,4	13,33	18,00
23,0	12,2	13,67	23,75

23,0	11,1	15,00	21,06
Нормативное значение		19,89	17,24
Расчётное значение		17,56	14,20

Сравнивая выборки можно сделать следующие выводы: при использовании всех имеющихся значений прочностных свойств техногенных грунтов средние значения сцепления и угла внутреннего трения практически не отличаются от значений, рассчитанных по результатам определения прочностных свойств в пределах профиля. При этом расчётные значения для выборки значений в пределах профиля меньше за счёт более высокого коэффициента надёжности по грунту, зависящего от количества проб.

Статистические параметры выборки значений сцепления, определённых в пределах всего стратиграфо-генетического комплекса техногенных накоплений следующие: математическое ожидание 19,69, среднеквадратическое отклонение 5,84. Статистические параметры выборки значений угла внутреннего трения, определённых в пределах профиля следующие: математическое ожидание 17,64, среднеквадратическое отклонение 6,52.

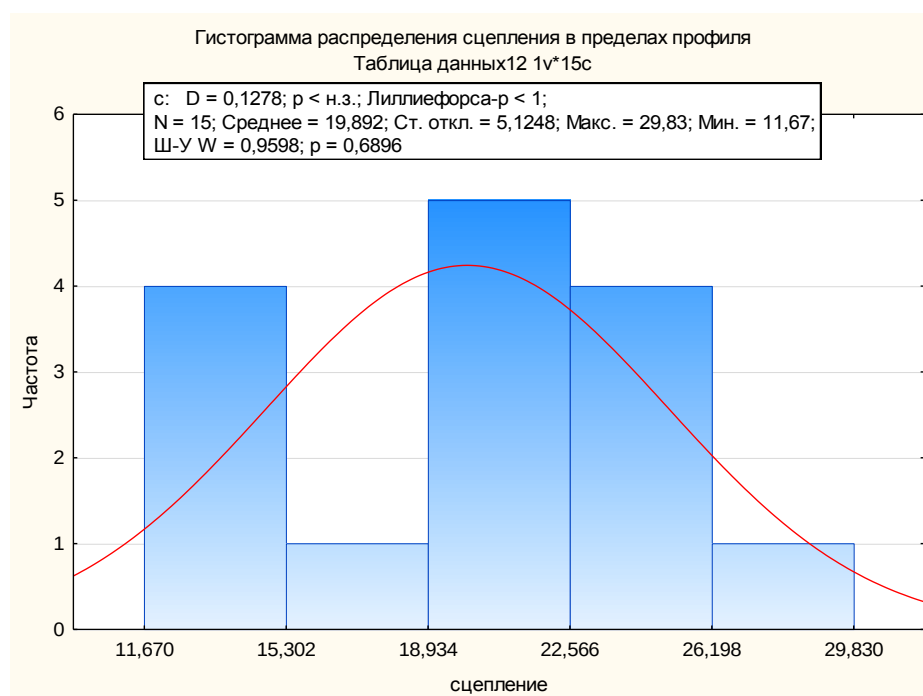
Сравнение реального распределения значений сцепления, определённых в пределах всего стратиграфо-генетического комплекса техногенных накоплений, с нормальным по критерию Шапиро-Уилка показало значение критерия 0,966, реального распределения значений угла внутреннего трения – 0,947. Графики распределения приведены на рисунках ниже. Для выборки в 36 значений теоретическое значение критерия Шапиро-Уилка составляет 0,935. Из этого можно сделать вывод о том, что величина распределена нормально.



Статистические параметры выборки значений сцепления, определённых в пределах профиля следующие: математическое ожидание 19,89, среднеквадратическое отклонение 5,12. Статистические параметры выборки значений угла внутреннего трения, определённых в

пределах профиля следующие: математическое ожидание 17,24, среднее квадратическое отклонение 6,68.

Сравнение реального распределения значений сцепления, определённых в пределах всего стратиграфо-генетического комплекса техногенных накоплений, с нормальным по критерию Шапиро-Уилка показало значение критерия 0,959, реального распределения значений угла внутреннего трения – 0,879. Графики распределения приведены на рисунках ниже. Для выборки в 15 значений теоретическое значение критерия Шапиро-Уилка составляет 0,881. Из этого можно сделать вывод о том, что величина сцепления распределена нормально, а величина угла внутреннего трения нет.



Все расчёты производились с использованием описанных в разделе 2.2 упрощённых методов Бишопа и Янбу и метода Моргенштерна-Прайса.

В расчётах по первому и второму подходам, описанным выше, использовались значения, полученные при обработке выборок, включающих в себя значения сцепления и угла внутреннего трения, определённые в пределах профиля (первая выборка) и в пределах всего стратиграфо-генетического комплекса техногенных накоплений (вторая выборка).

При реализации первого подхода коренным грунтам задавались нормативные значения прочностных характеристик, а техногенным – расчётные. При использовании методов Бишопа и Моргенштерна-Прайса значения коэффициентов устойчивости и эквивалентных объёмов, рассчитанные по второй выборке получились больше, чем по первой. При использовании метода Янбу значение коэффициента устойчивости, рассчитанное по второй выборке получилось меньше, чем по первой, а эквивалентного объёма – больше.

При использовании метода Бишопа значения коэффициента устойчивости и эквивалентного объёма, рассчитанные по первой выборке, составили 1,05 и 113 м³ соответственно, по второй – 1,11 и 116 м³. Значения коэффициентов устойчивости отличаются на 6%, эквивалентных объёмов – на 3%. При использовании метода Янбу значения коэффициента устойчивости и эквивалентного объёма по первой выборке составили 1,01 и 120 м³ соответственно, по второй – 0,99 и 141 м³. Значения коэффициентов устойчивости отличаются на 2%, эквивалентных объёмов – на 15%. При использовании метода Моргенштерна-Прайса значения коэффициента устойчивости и эквивалентного объёма по первой выборке составили 1,10 и 102 м³ соответственно, по второй – 1,16 и 108 м³. Значения коэффициентов устойчивости отличаются на 5%, эквивалентных объёмов – на 6%.

Анализируя результаты вычислений с использованием расчётных характеристик прочностных свойств грунтов можно сделать следующие выводы. Минимальное значение коэффициента устойчивости рассчитано по методу Янбу по второй выборке, максимальное – по методу Моргенштерна-Прайса также по второй выборке. Минимальное значение эквивалентного объёма рассчитано по методу Моргенштерна-Прайса по первой выборке, максимальное – по методу Янбу по второй выборке. Минимальная разница значений коэффициентов устойчивости получена при расчёте по методу Янбу, максимальная – по методу Бишопа, а эквивалентных объёмов – наоборот. Результаты расчётов приведены в таблице 4.3. Итоговая геомеханическая схема приведена на рис. 4.5.

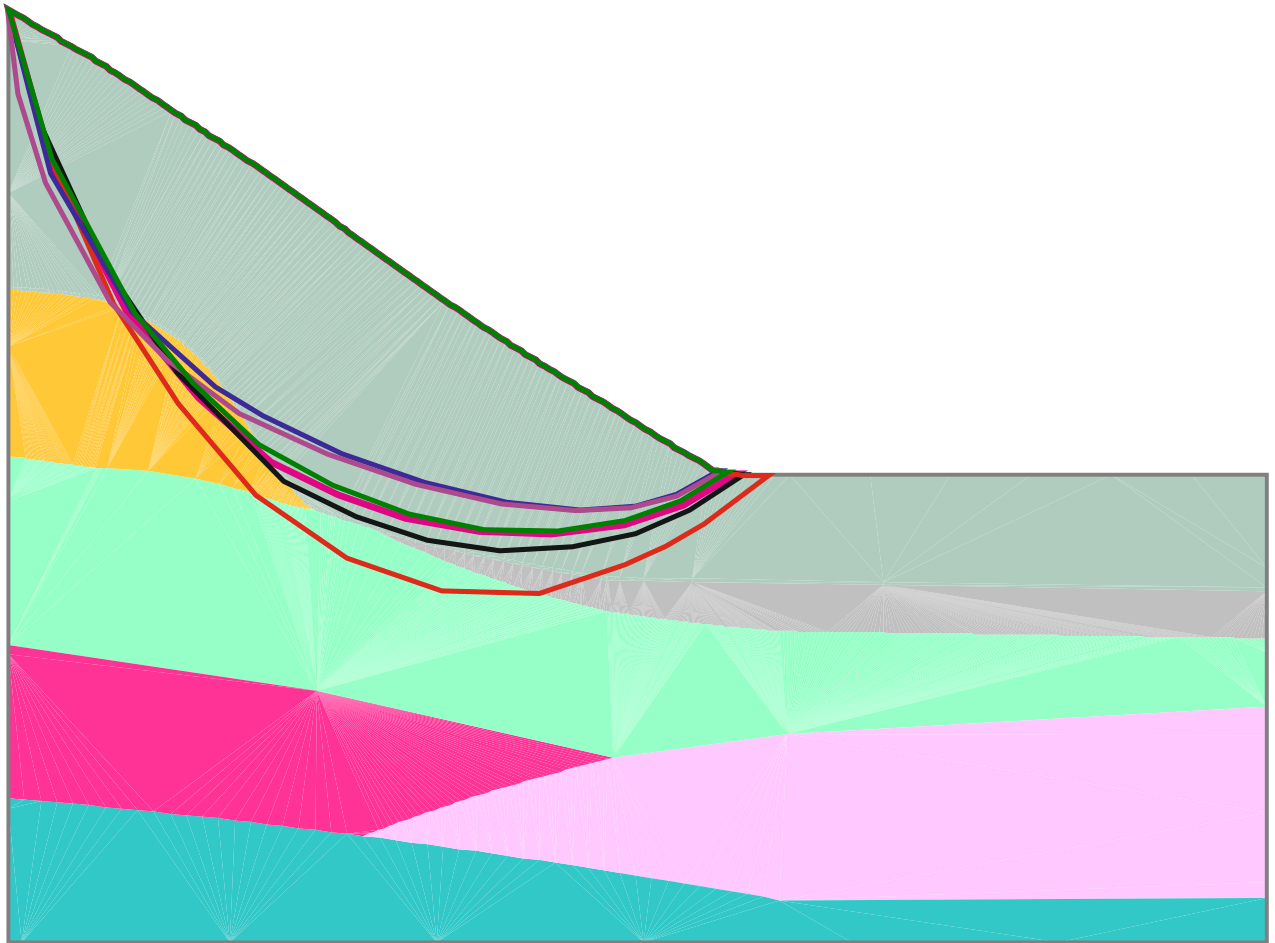


Рис. 4.5. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по первому подходу. Поверхность скольжения при расчёте по методу Бишопа с использованием первой выборки показана зелёным цветом, второй – розовым; по методу Янбу с использованием первой выборки – чёрным, второй – красным; по методу Morgenstern-Прайса с использованием первой выборки – синим, второй – фиолетовым.

При реализации второго подхода коренным и техногенным грунтам задавались нормативные значения прочностных характеристик. Были получены детерминистические и вероятностные значения коэффициентов устойчивости. Во всех расчётах вероятностные значения оказались выше детерминистических. Значения детерминистических коэффициентов устойчивости при расчёте по второй выборке оказались выше, чем по первой, по результатам расчётов с использованием всех методов. Значения вероятностных коэффициентов устойчивости при использовании методов Янбу и Morgenstern-Прайса оказались равными для первой и второй выборок по каждому методу. Вероятностные значения коэффициентов устойчивости при использовании метода Бишопа получились больше по второй выборке. Значения эквивалентных объёмов получились больше по второй выборке при использовании методов Янбу и Morgenstern-Прайса, а при использовании метода Бишопа – по первой.

При использовании метода Бишоп значения детерминистического и вероятностного коэффициентов устойчивости и эквивалентного объёма, рассчитанные по первой выборке, составили 1,07, 1,08 и 149 м³ соответственно, по второй – 1,08, 1,10 и 139 м³. Значения детерминистических коэффициентов устойчивости отличаются на 1%, вероятностных на 2%, эквивалентных объёмов – на 7%. Значения детерминистического и вероятностного коэффициентов устойчивости при расчёте по первой выборке отличаются на 1%, по второй – на 2%. Гистограммы распределения значений коэффициента устойчивости и интегральные функции приведены на рис. 4.5 и 4.6.

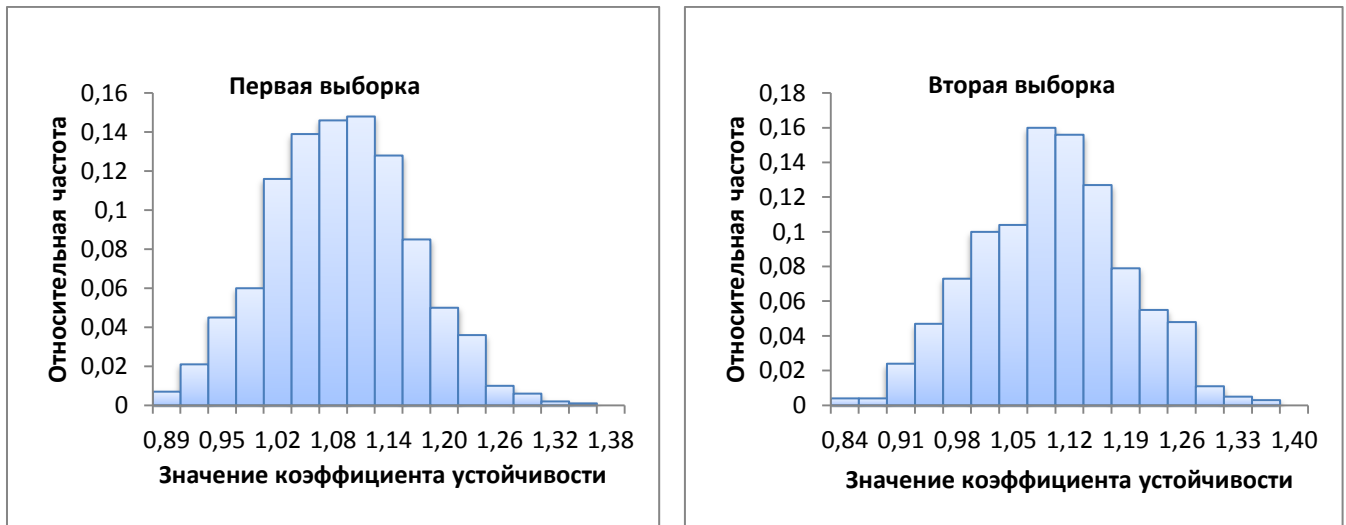


Рис. 4.5. Гистограммы распределения значений коэффициента устойчивости при расчёте по методу Бишопа

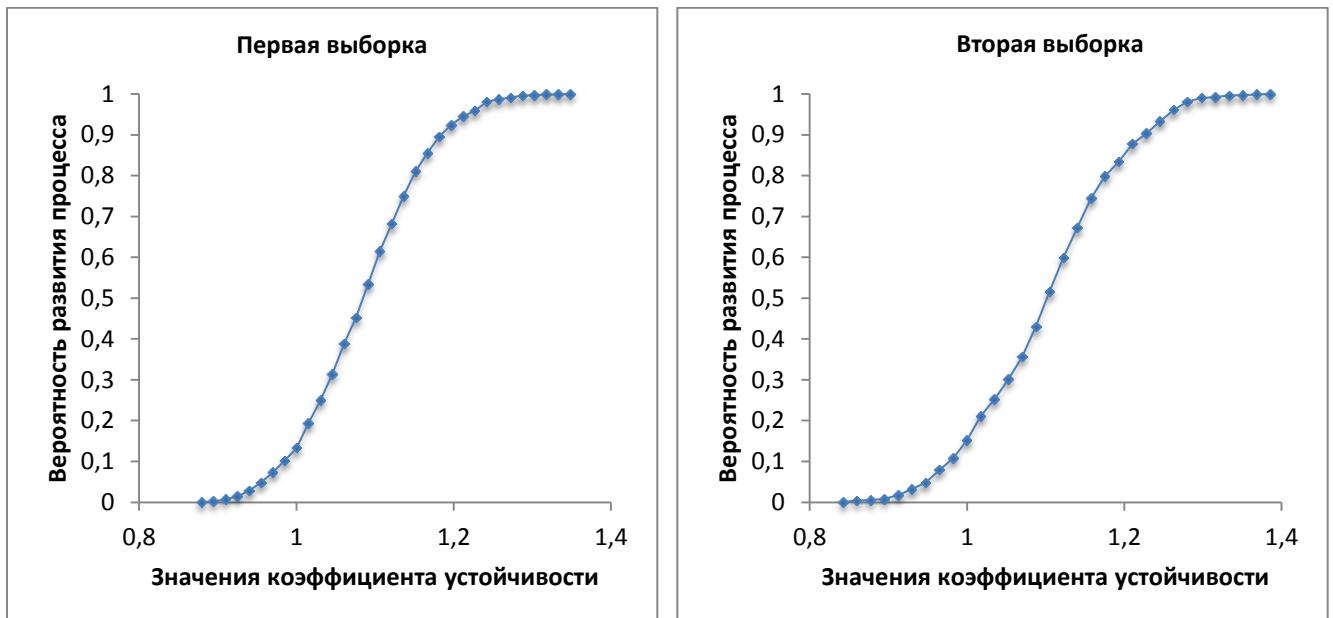


Рис. 4.6. Интегральные функции распределения значений коэффициента устойчивости при расчёте по методу Бишопа

Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что вероятность развития оползневого процесса при значении коэффициента устойчивости меньше 1 по первой выборке

составляет 13,3% при стандартном отклонении значений коэффициента устойчивости 0,07, по второй выборке 15,2% при стандартном отклонении 0,09.

При использовании метода Янбу значения детерминистического и вероятностного коэффициентов устойчивости и эквивалентного объема, рассчитанные по первой выборке, составили 1,02, 1,04 и 164 м³ соответственно, по второй – 1,03, 1,04 и 170 м³. Значения детерминистических коэффициентов устойчивости отличаются на 1%, вероятностных совпадают, эквивалентных объемов – на 4%. Значения детерминистического и вероятностного коэффициентов устойчивости при расчёте по первой выборке отличаются на 2%, по второй – на 1%. Гистограмма распределения значений коэффициента устойчивости и интегральная функция приведены на рис. 4.7 и 4.8.

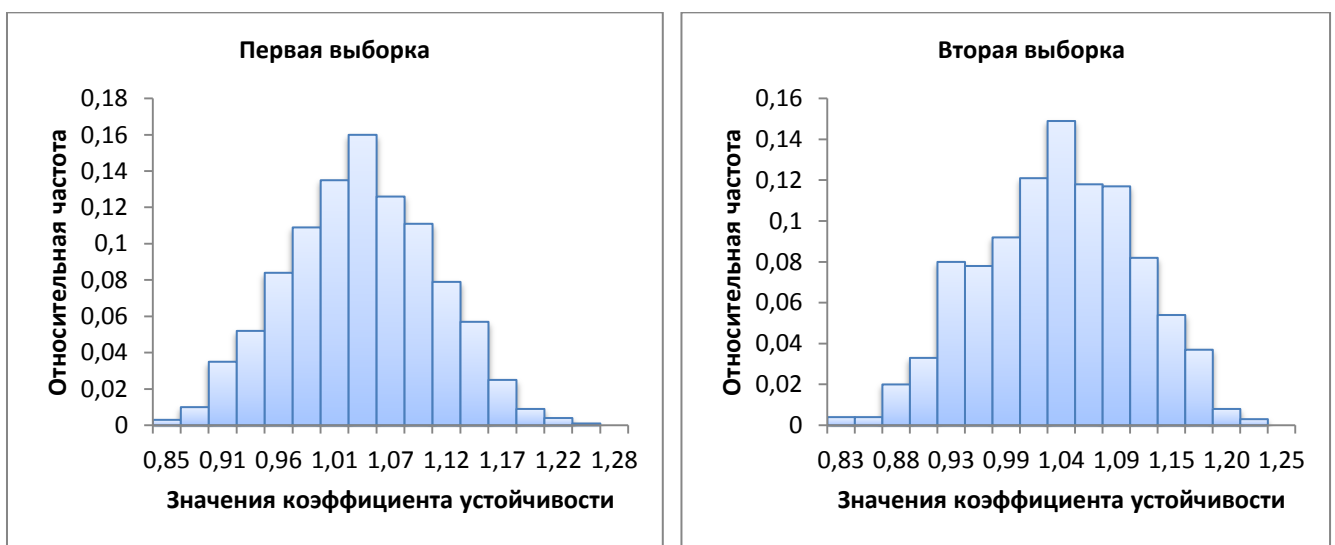


Рис. 4.7. Гистограммы распределения значений коэффициента устойчивости при расчёте по методу Янбу

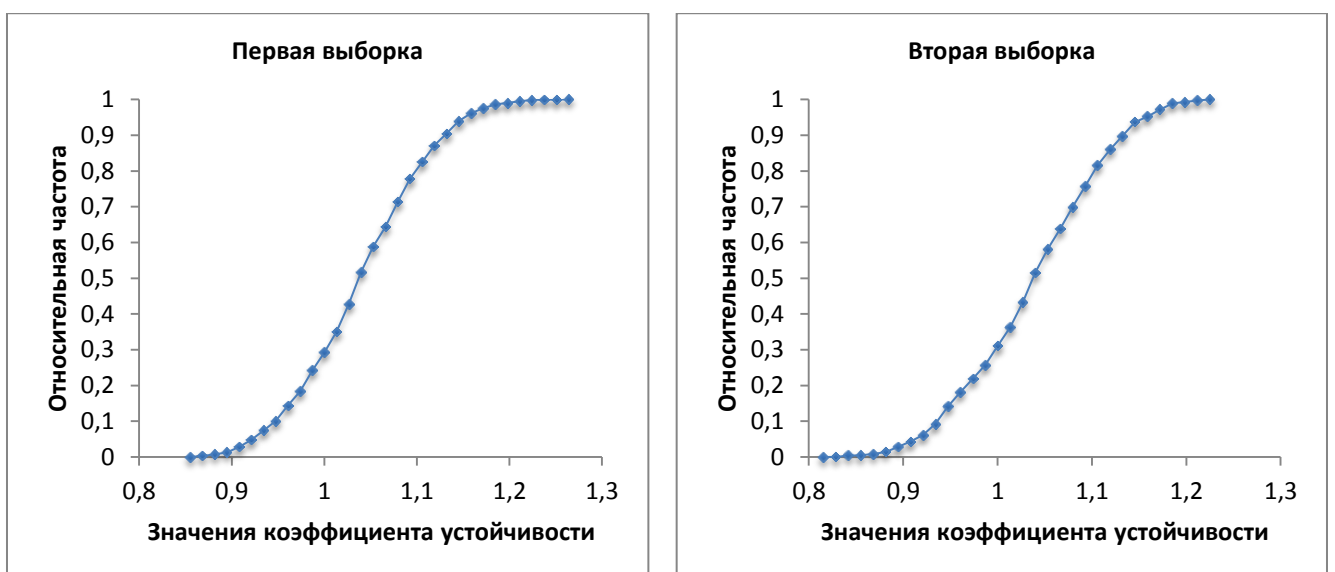


Рис. 4.8. Интегральные функции распределения значений коэффициента устойчивости при расчёте по методу Янбу

Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что вероятность развития оползнего процесса при значении коэффициента устойчивости меньше 1 по первой выборке составляет 29,3% при стандартном отклонении значений коэффициента устойчивости 0,07, по второй выборке 31,1% при стандартном отклонении 0,07.

При использовании метода Моргенштерна-Прайса значения детерминистического и вероятностного коэффициентов устойчивости и эквивалентного объёма, рассчитанные по первой выборке, составили 1,25, 1,33 и 114 м³ соответственно, по второй – 1,27, 1,33 и 117 м³. Значения детерминистических коэффициентов устойчивости отличаются на 2%, вероятностных совпадают, эквивалентных объёмов – на 3%. Значения детерминистического и вероятностного коэффициентов устойчивости при расчёте по первой выборке отличаются на 6%, по второй – на 5%. Гистограмма распределения значений коэффициента устойчивости и интегральная функция приведены на рис. 4.9 и 4.10.

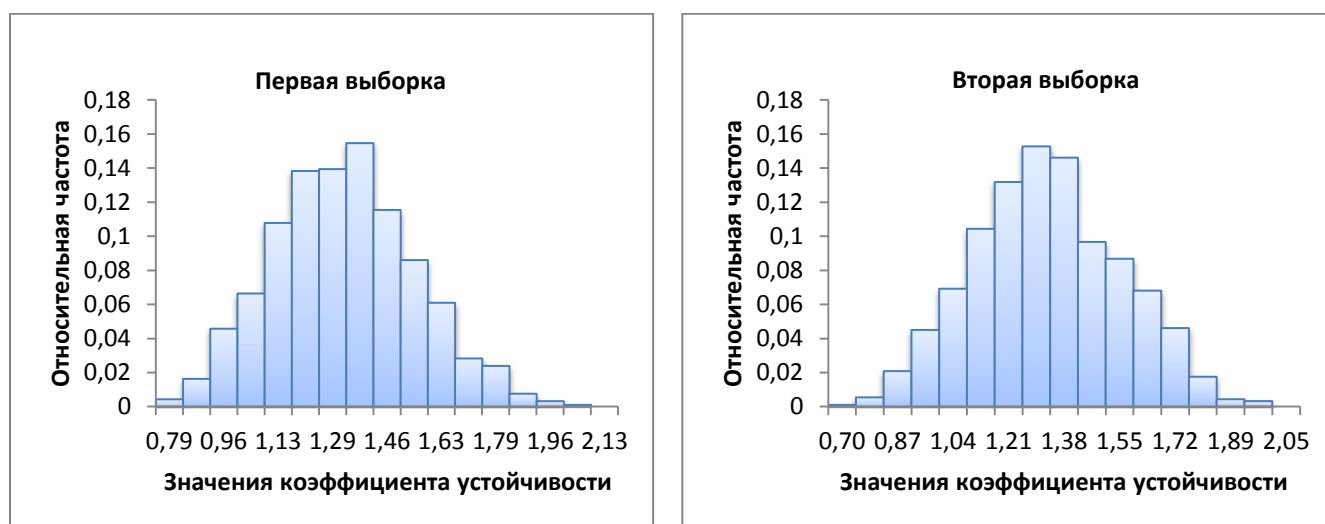


Рис. 4.9. Гистограммы распределения значений коэффициента устойчивости при расчёте по методу Моргенштерна-Прайса

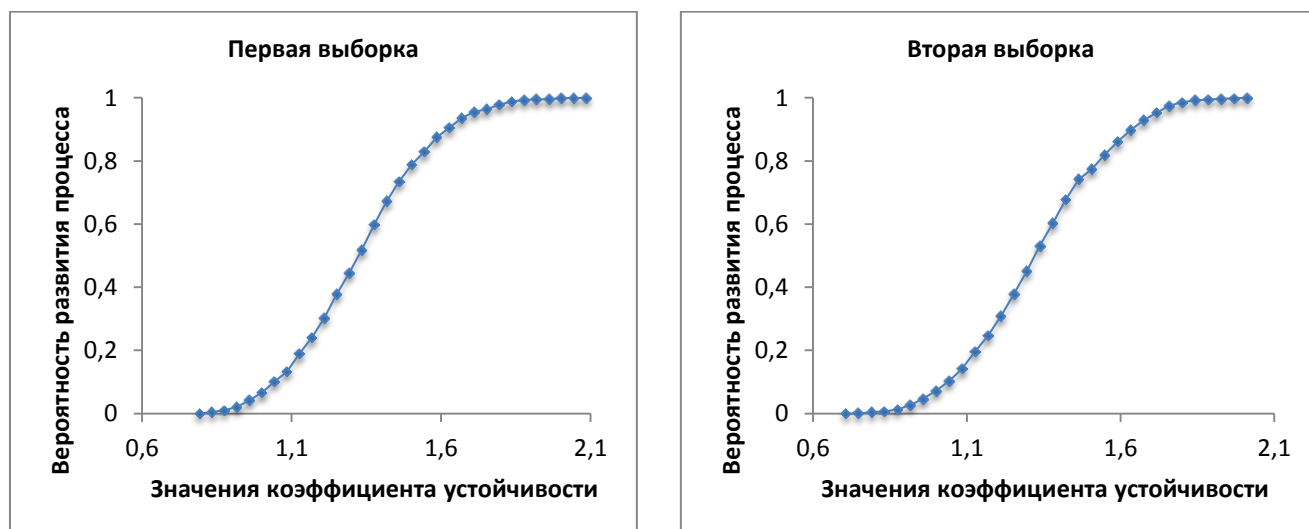


Рис. 4.10. Интегральные функции распределения значений коэффициента устойчивости при расчёте по методу Моргенштерна-Прайса

Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что вероятность развития оползневой процесса при значении коэффициента устойчивости меньше 1 по первой выборке составляет 6,6% при стандартном отклонении значений коэффициента устойчивости 0,02, по второй выборке 7,3% при стандартном отклонении 0,02.

Таким образом, расчёты с использованием вероятностного анализа показывают снижение вероятности развития оползневой процесса, уменьшение значения коэффициента устойчивости и эквивалентного объёма (за исключением расчётов по методу Бишопа) при статистической обработке выборки нормативных значений прочностных свойств грунтов, отобранных в пределах профиля. В сравнении с результатами расчётов с использованием расчётных характеристик прочностных свойств грунтов, значения коэффициентов устойчивости и эквивалентных объёмов выше, поскольку эти параметры напрямую связаны с абсолютным значением сцепления и угла внутреннего трения. И, как правило, при увеличении сцепления, увеличивается глубина поверхности скольжения, и, следовательно, эквивалентный объём. Результаты расчётов приведены в таблице 4.3. Итоговая геомеханическая схема приведена на рис. 4.11.

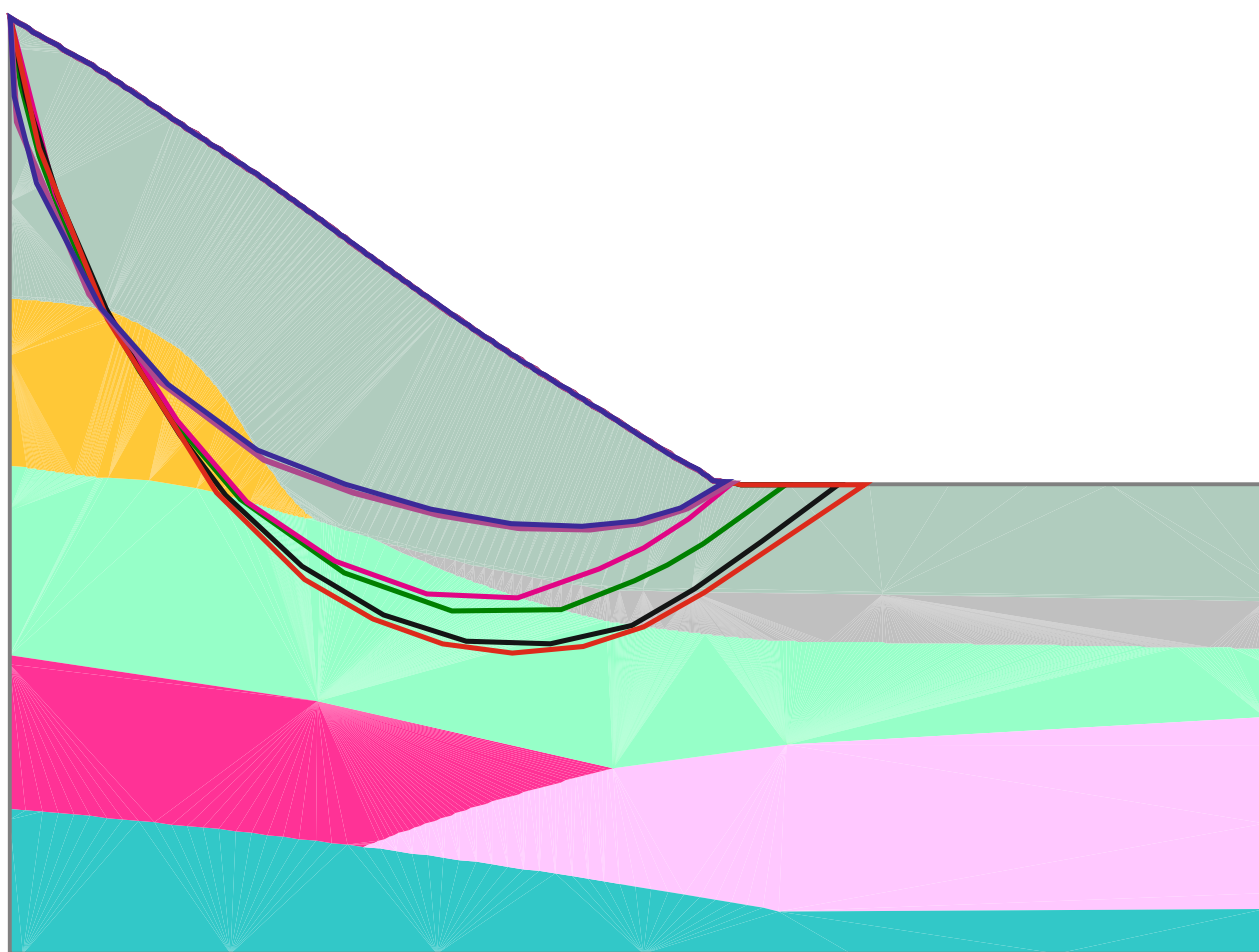


Рис. 4.11. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по второму подходу. Поверхность скольжения при расчёте по методу Бишопа с использованием первой выборки показана зелёным цветом, второй – розовым; по методу Ямбу с использованием первой

выборки – чёрным, второй – красным; по методу Моргенштерна-Прайса с использованием первой выборки – синим, второй – фиолетовым.

При реализации третьего подхода коренным грунтам задавались нормативные значения прочностных характеристик, а в пределах стратиграфо-генетического комплекса техногенных накоплений строилось поле распределения сцепления и угла внутреннего трения. Интерполяция свойств техногенных грунтов производилась методами Делоне, Чага, тонкого сплайна и обратных взвешенных расстояний, подробно описанными в разделе 3.3 настоящей работы. Величины эквивалентных объёмов, определённые с использованием всех интерполяционных методов при расчётах по методам Бишопа и Янбу, сильно меньше рассчитанных с использованием второго подхода. По методу Моргенштерна значения эквивалентных объёмов достаточно близки, но при этом коэффициенты устойчивости сильно меньше рассчитанных по второму подходу.

При использовании интерполяции Делоне по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,05, эквивалентный объём – 107 м³. По методу Янбу коэффициент устойчивости склона составил 1,02, эквивалентный объём – 109 м³. По методу Моргенштерна-Прайса коэффициент устойчивости склона составил 1,08, эквивалентный объём – 105 м³. Значения коэффициентов устойчивости отличаются от рассчитанных по первому и второму подходам с использованием выборки значений прочностных свойств грунтов, определённых в пределах профиля, не более чем на 2%. Исключение составляет результат по методу Моргенштерна-Прайса – величина коэффициента меньше рассчитанного по второму подходу с использованием первой выборки на 14%. Положение поверхностей скольжения достаточно хорошо совпадает с рассчитанными по первому подходу с использованием первой выборки. Величины эквивалентных объёмов, рассчитанные по методам Бишопа и Янбу, меньше рассчитанных по первому подходу на 5-9%, по методу Моргенштерна-Прайса больше на 3%. Результаты расчётов приведены в таблице 4.3. Итоговая геомеханическая схема приведена на рис. 4.12.

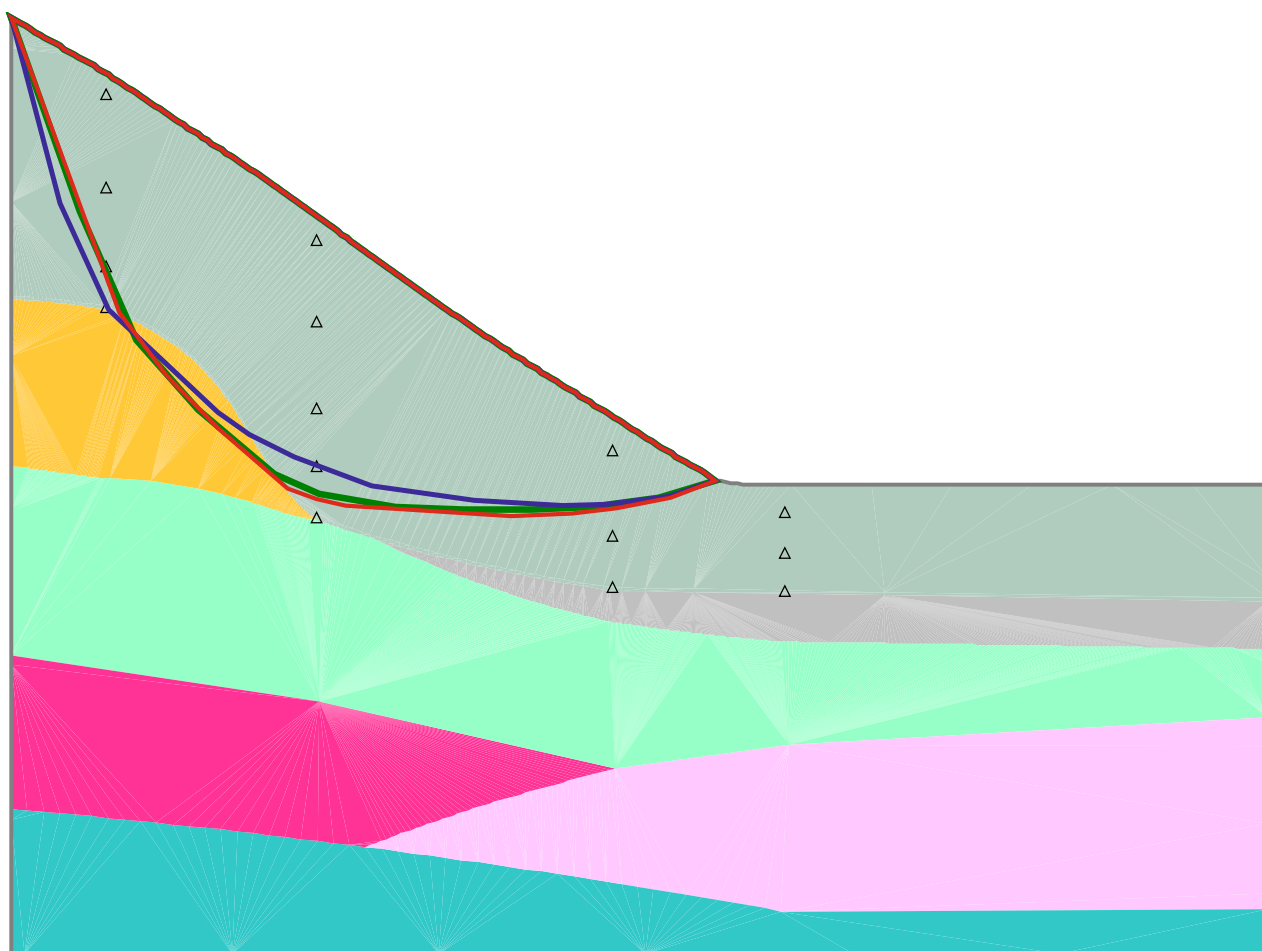


Рис. 4.12. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по третьему подходу с использованием метода интерполяции Делоне. Поверхность скольжения при расчёте по методу Бишопа показана зелёным цветом, по Янбу – красным, по Morgenstern-Прайса – синим.

При использовании интерполяции Чага по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,05, эквивалентный объём – 102 м³. По методу Янбу коэффициент устойчивости склона составил 1,00, эквивалентный объём – 105 м³. По методу Morgenstern-Прайса коэффициент устойчивости склона составил 1,07, эквивалентный объём – 103 м³. Значения коэффициентов устойчивости отличаются от рассчитанных по первому и второму подходам с использованием выборки значений прочностных свойств грунтов, определённых в пределах профиля, не более чем на 2%, за исключением метода Morgenstern-Прайса. Положение поверхности скольжения, определённое по методу Morgenstern-Прайса, достаточно хорошо совпадает с рассчитанным по первому подходу с использованием первой выборки, величины эквивалентных объёмов отличаются менее чем на 1%. Величины эквивалентных объёмов, рассчитанные по методам Бишопа и Янбу, отличаются более значительно – на 10-12%. Результаты расчётов приведены в таблице 4.3. Итоговая геомеханическая схема приведена на рис. 4.13.

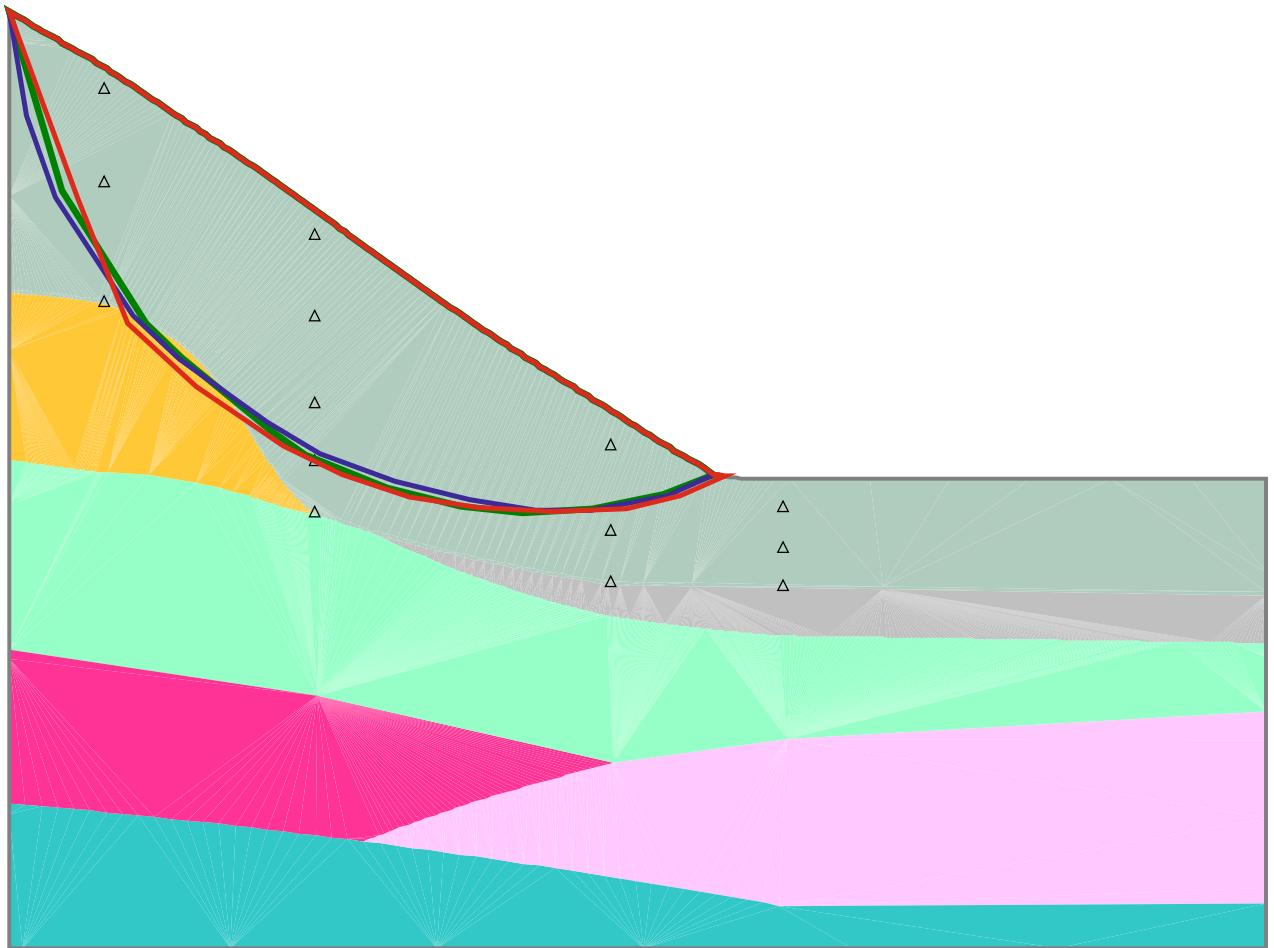


Рис. 4.13. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по третьему подходу с использованием метода интерполяции Чага. Цветовая схема аналогична рис. 4.12.

При использовании интерполяционного метода тонкого сплайна по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,05, эквивалентный объём – 113 м^3 . По методу Ямбу коэффициент устойчивости склона составил 0,98, эквивалентный объём – 118 м^3 . По методу Morgenstern-Price коэффициент устойчивости склона составил 1,12, эквивалентный объём – 110 м^3 . Значения коэффициентов устойчивости отличаются от рассчитанных по первому и второму подходам с использованием выборки значений прочностных свойств грунтов, определённых в пределах профиля, не более чем на 3%, за исключением метода Morgenstern-Price. Положения поверхностей скольжения, определённые по методам Бишопа и Ямбу, достаточно хорошо совпадают с рассчитанными по первому подходу с использованием первой выборки, величины эквивалентных объёмов отличаются менее чем на 1%. Величина эквивалентного объёма, рассчитанная по методу Morgenstern-Price, отличается более значительно – на 7%. Результаты расчётов приведены в таблице 4.3. Итоговая геомеханическая схема приведена на рис. 4.14.

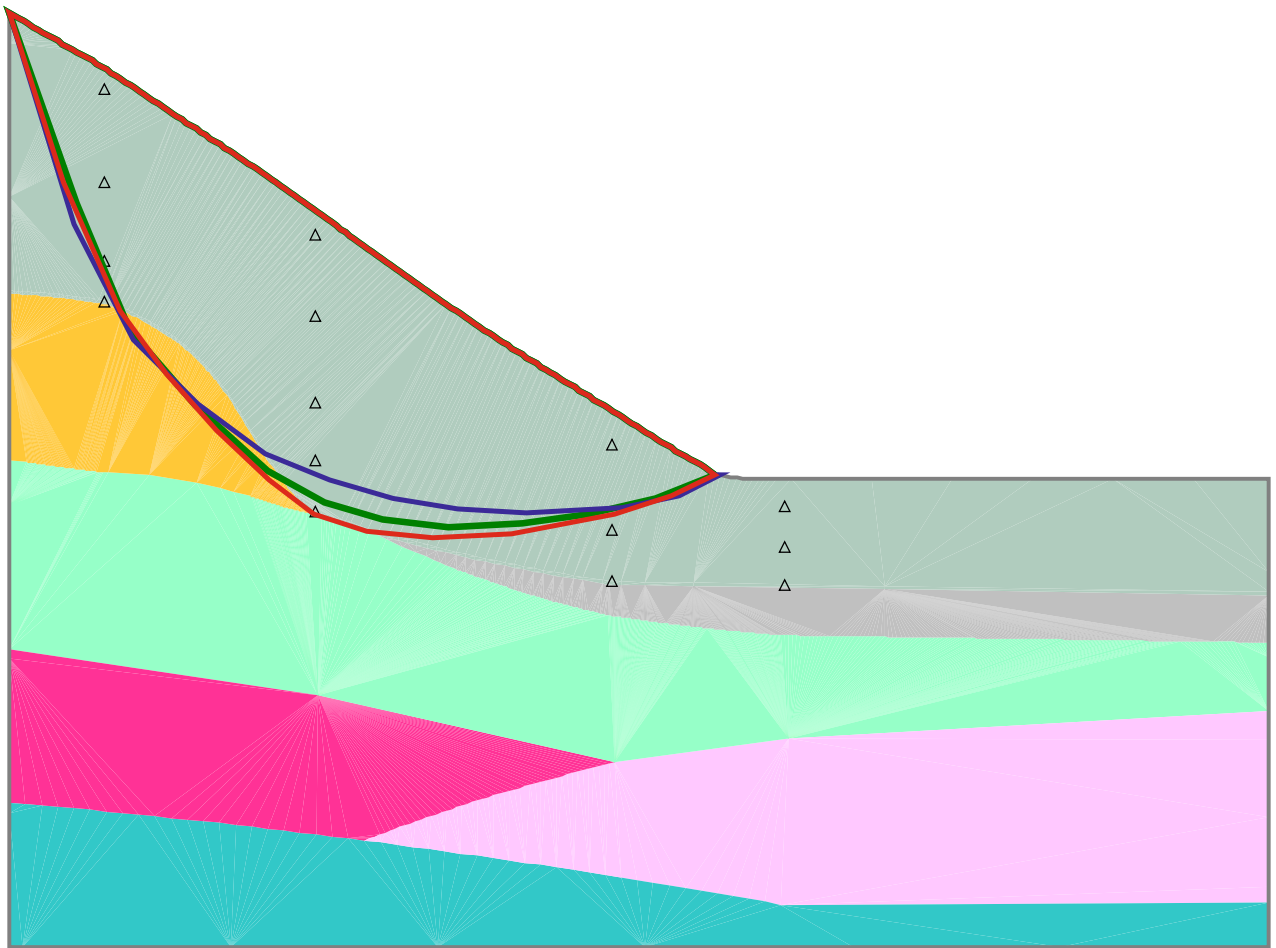


Рис. 4.14. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по третьему подходу с использованием метода интерполяции тонкого сплайна. Цветовая схема аналогична рис. 4.12.

При использовании интерполяционного метода обратных взвешенных расстояний по методу Бишопа коэффициент устойчивости склона составил 1,10, эквивалентный объём – 109 м³. По методу Ямбу коэффициент устойчивости склона составил 1,00, эквивалентный объём – 120 м³. По методу Моргенштерна-Прайса коэффициент устойчивости склона составил 1,14, эквивалентный объём – 102 м³. Значения коэффициентов устойчивости отличаются от рассчитанных по первому и второму подходам с использованием выборки значений прочностных свойств грунтов, определённых в пределах профиля, не более чем на 5%, за исключением метода Моргенштерна-Прайса.. Положения поверхностей скольжения, определённые по методам Ямбу и Моргенштерна-Прайса, совпадают с рассчитанными по первому подходу с использованием первой выборки, величины эквивалентных объёмов не отличаются. Величина эквивалентного объёма, рассчитанная по методу Бишопа, отличается на 4%. Результаты расчётов приведены в таблице 4.3. Итоговая геомеханическая схема приведена на рис. 4.15.

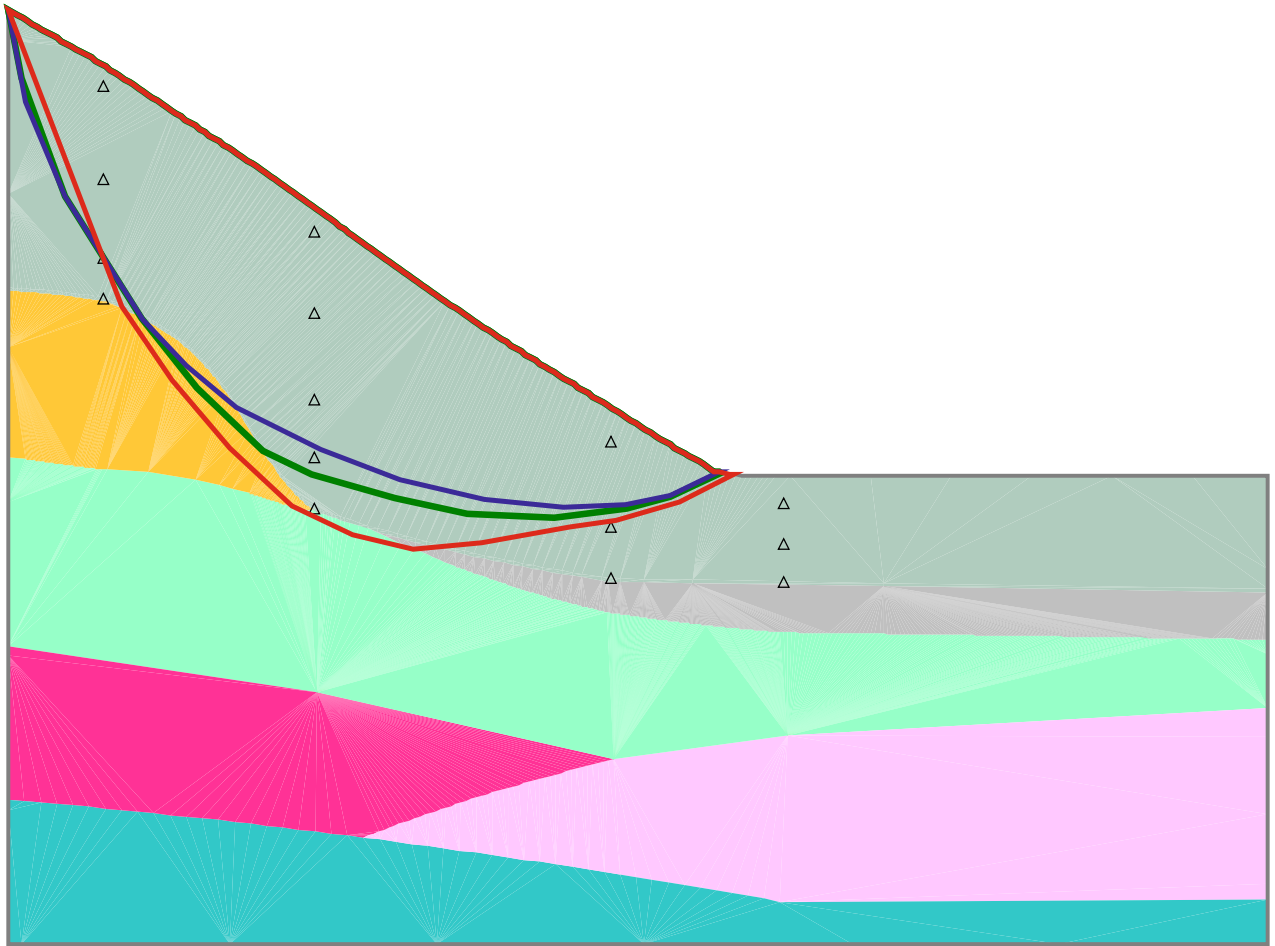


Рис. 4.15. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по третьему подходу с использованием метода интерполяции обратных взвешенных расстояний. Цветовая схема аналогична рис. 4.12.

Значения коэффициентов устойчивости с использованием всех подходов, рассчитанные по методу Бишопа отличаются незначительно – не более чем на 5%. При этом значения, определённые при расчёте по третьему подходу с использованием интерполяционных методов Делоне, Чага и тонкого сплайна, не отличаются от рассчитанного по первому подходу с использованием первой выборки. Величины эквивалентных объёмов, рассчитанные по первому и третьему подходам, отличаются не более чем на 10%. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Бишопа приведена на рис. 4.16.

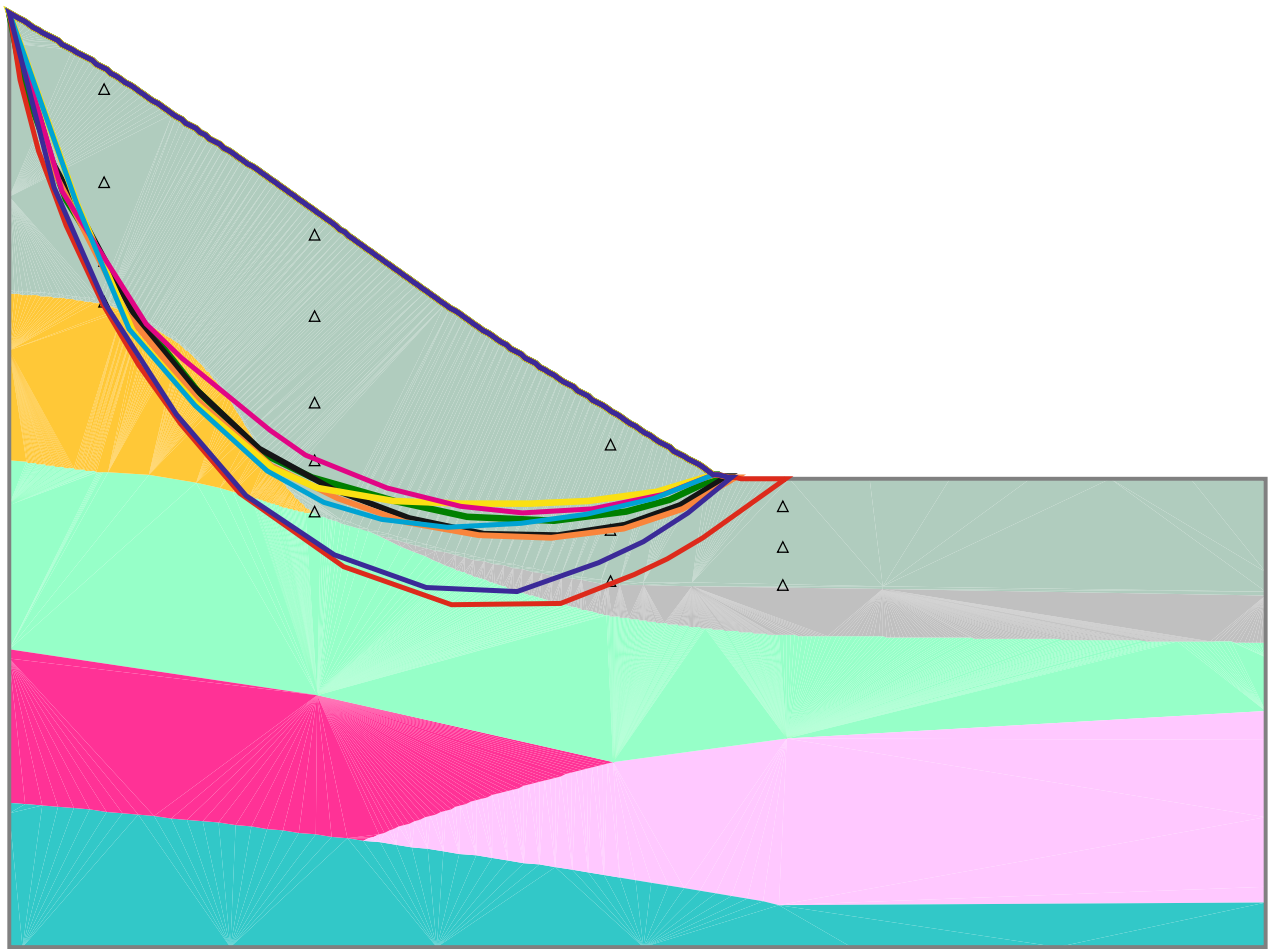


Рис. 4.16. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Бишоп. Поверхность скольжения при расчёте по первой схеме с использованием первой выборки показана чёрным цветом, второй – оранжевым; по второй схеме с использованием первой выборки – красным, второй – синим; по третьей схеме с использованием метода интерполяции Делоне – жёлтым, Чага – розовым, тонкого сплайна – голубым, обратных взвешенных расстояний – зелёным.

Значения коэффициентов устойчивости с использованием всех подходов, рассчитанные по методу Янбу отличаются незначительно – не более чем на 4%. Абсолютные значения коэффициентов устойчивости являются минимальными среди всех результатов расчётов по всем методам. Величины эквивалентных объёмов, рассчитанные по первому и третьему подходам, отличаются на 0-14%. Значения коэффициентов устойчивости меньше единицы являются **неверными**, и связаны с ошибками метода. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Янбу приведена на рис. 4.17.

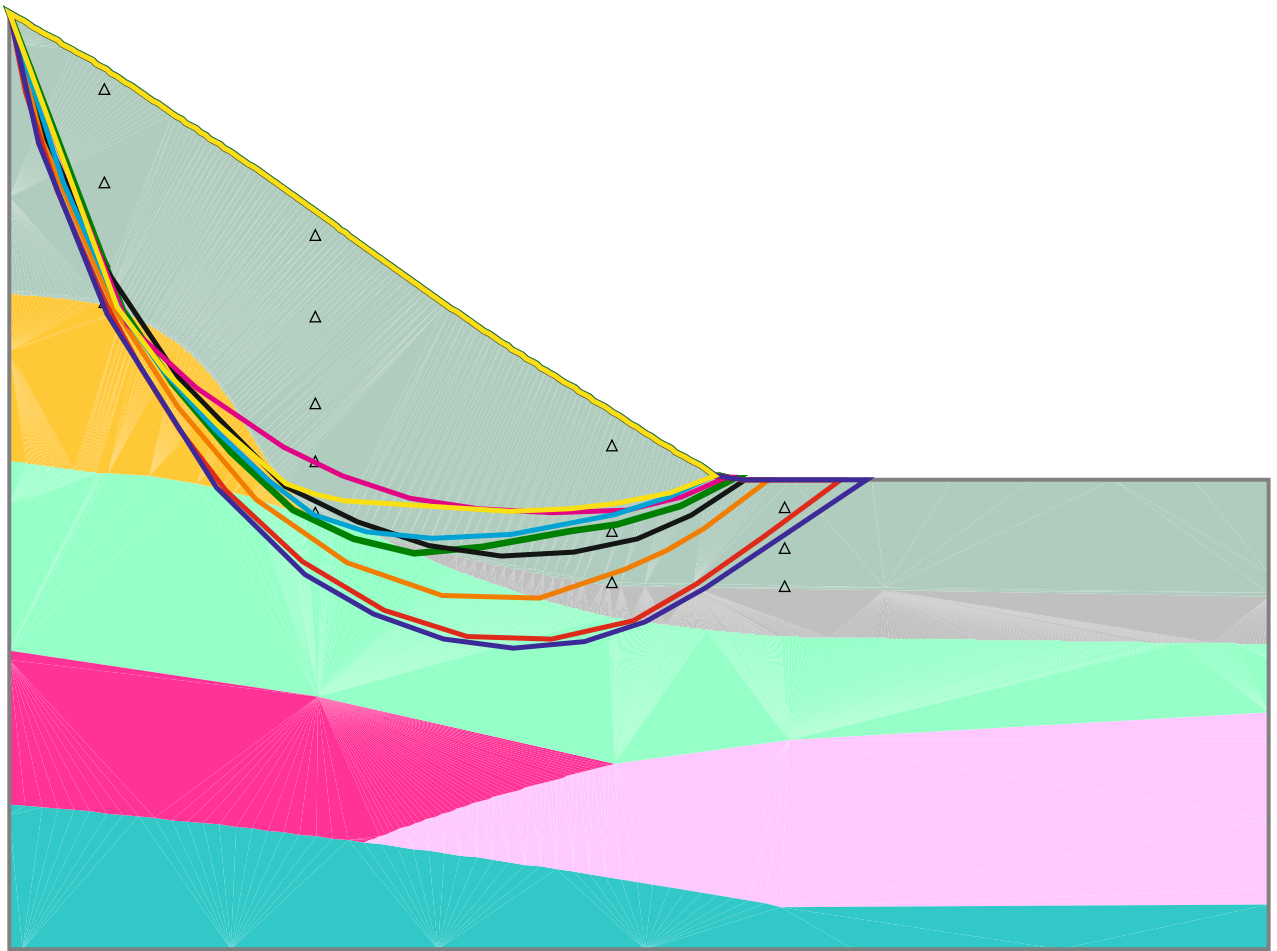


Рис. 4.17. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Янбу. Цветовая схема аналогична рис. 4.16.

Значения коэффициентов устойчивости с использованием всех подходов, рассчитанные по методу Morgenstern-Price отличаются на 2-5%, за исключением результатов расчётов по второму подходу (разница 12-17%). Абсолютные значения коэффициентов устойчивости являются максимальными среди всех результатов расчётов по всем методам. Величины эквивалентных объёмов, рассчитанные по всем трём подходам, отличаются на 0-13%. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Morgenstern-Price приведена на рис. 4.18.

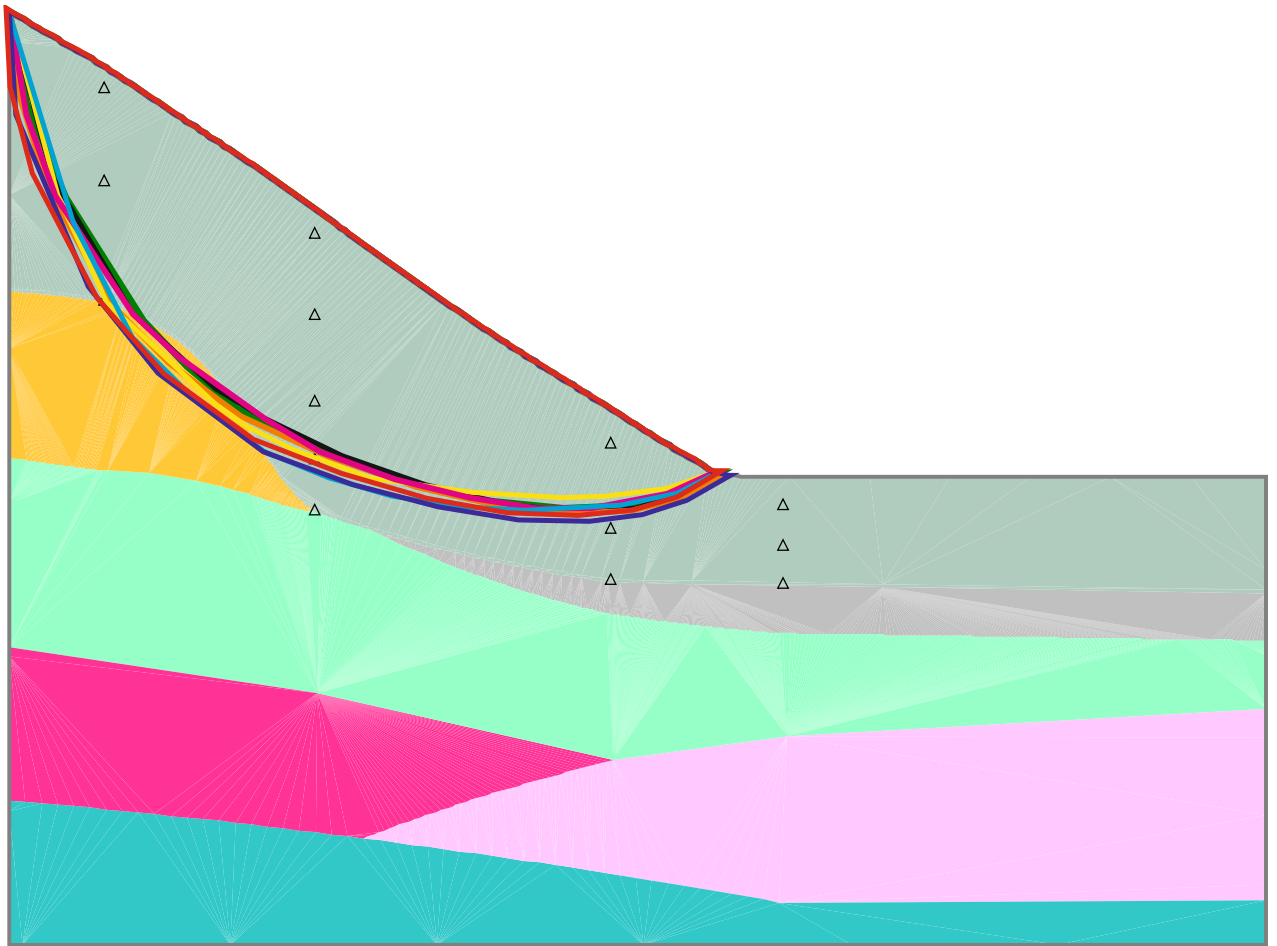


Рис. 4.18. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Morgenstern-Price. Цветовая схема аналогична рис. 4.16.

Из анализа результатов следует, что при расчётах с использованием распределения свойств грунтов в пределах профиля, за счёт более низких значений сцепления и угла внутреннего трения поверхность скольжения располагается выше, чем при использовании распределения свойств в пределах всего СГК техногенных накоплений. При применении расчётных свойств грунтов коэффициент устойчивости склона также ниже при распределении свойств в пределах профиля. При использовании нормативных свойств грунтов положение поверхности скольжения выше, чем при использовании расчётных свойств. При использовании нормативных свойств грунтов с распределением значений в пределах всего СГК техногенных накоплений, за счёт увеличения значения сцепления поверхность скольжения ушла глубже, в коренные грунты.

Результаты расчётов устойчивости склона Можайского кремля

Метод расчёта \ Расчётная схема		1	2	3			
				Делоне	Чага	Тонкого сплайна	Обратных взвешенных расстояний
Бишоп	Распределение в пределах профиля	1,05 (113)	1,07/1,08 (149)	1,05 (107)	1,05 (102)	1,05 (113)	1,10 (109)
	Распределение в пределах всего склона	1,11 (116)	1,08/1,10 (139)				
Янбу	Распределение в пределах профиля	1,01 (120)	1,02/1,04 (164)	1,02 (109)	1,00 (105)	0,98 (118)	1,00 (120)
	Распределение в пределах всего склона	0,99 (141)	1,03/1,04 (170)				
Моргенштерна-Прайса	Распределение в пределах профиля	1,10 (102)	1,25/1,33 (114)	1,08 (105)	1,07 (103)	1,12 (110)	1,14 (102)
	Распределение в пределах всего склона	1,16 (108)	1,27/1,33 (117)				

Анализ влияния количества проб на результаты интерполяции

Для оценки влияния количества проб на результаты оценки устойчивости склонов с использованием различных методов интерполяции была проведена серия расчётов по методу Моргенштерна-Прайса. Данный метод был выбран, так он как удовлетворяет условиям равновесия моментов и сил [88]. Основная идея заключалась в уменьшении количества проб в скважинах и сравнении полученных результатов с исходными. Для этого было выполнено по 12 расчётов с использованием каждого метода интерполяции. Применялись следующие сочетания проб в расчётном профиле:

1. из первых трёх скважин (6-1 – 6-3) убрано по одной пробе снизу (–3 пробы);
2. из правых трёх скважин (6-2 – 6-4) убрано по одной пробе снизу (–3 пробы);
3. из первых трёх скважин (6-1 – 6-3) убрано по второй пробе снизу (–3 пробы);
4. из первых трёх скважин (6-1 – 6-3) убрано по третьей пробе снизу (–3 пробы);
5. из первых трёх скважин (6-1 – 6-3) убрано по две нижних пробы (–6 проб);
6. из правых трёх скважин (6-2 – 6-4) убрано по две нижних пробы (–6 проб);
7. из правых трёх скважин (6-2 – 6-4) убраны все пробы (–11 проб);
8. из первой скважины (6-1) убраны все пробы (–4 пробы);
9. из второй скважины (6-2) убраны все пробы (–5 проб);
10. из третьей скважины (6-3) убраны все пробы (–3 пробы);
11. из четвёртой скважины (6-4) убраны все пробы (–3 пробы);
12. из второй и третьей скважин (6-2 и 6-3) убраны все пробы (–8 проб);

Результаты расчётов по каждому из методов интерполяции показали следующие результаты. При расчёте по методу Делоне значения эквивалентного объёма изменяются от 66 до 188, при базовом значении (рассчитанном с использованием 15 исходных проб) 109, а коэффициента устойчивости от 0,73 до 1,17, при базовом значении 1,08. Расчёт по седьмому варианту невозможен в связи с ограничениями метода по расположению проб. Это говорит о сильном влиянии количества проб и их местоположения на результаты расчётов с использованием данного метода. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 4.11.

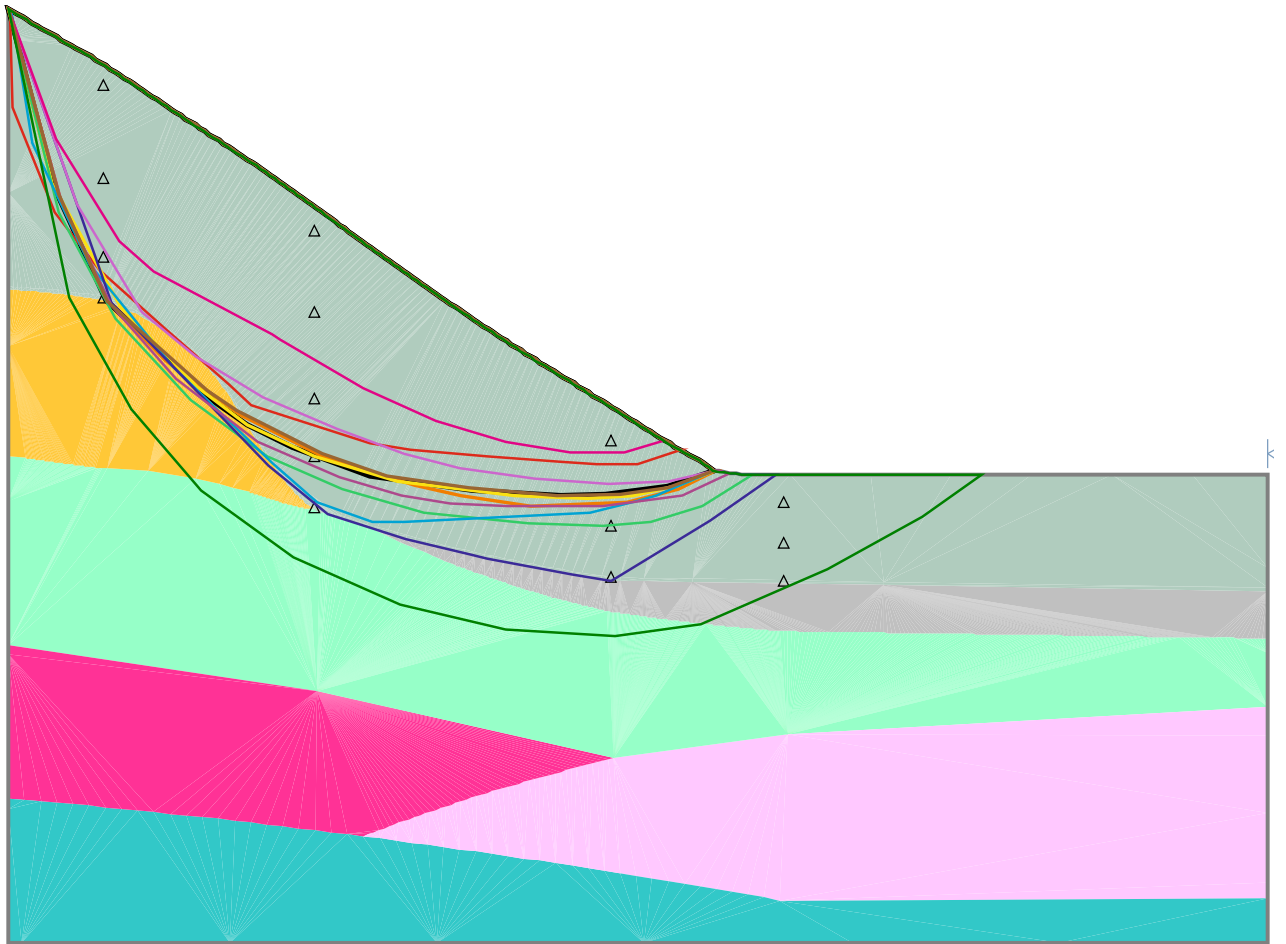


Рис. 4.11. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Делоне. Базовая поверхность скольжения показана чёрным цветом, рассчитанная по первому варианту – красным, по второму – оранжевым, по третьему – жёлтым, по 4-му – светло-зелёным, по 5-му – голубым, по 6-му – синим, по 8-му – фиолетовым, по 9-му – розовым, по 10-му – сиреневым, по 11-му – коричневым, по 12-му – тёмно-зелёным.

При расчёте по методу Чага значения эквивалентного объёма изменяются от 72 до 189, при базовом значении 103, а коэффициента устойчивости от 0,73 до 1,17, при базовом значении 1,07. Это говорит о сильном влиянии количества проб и их местоположения на результаты расчётов с использованием данного метода. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 4.12.

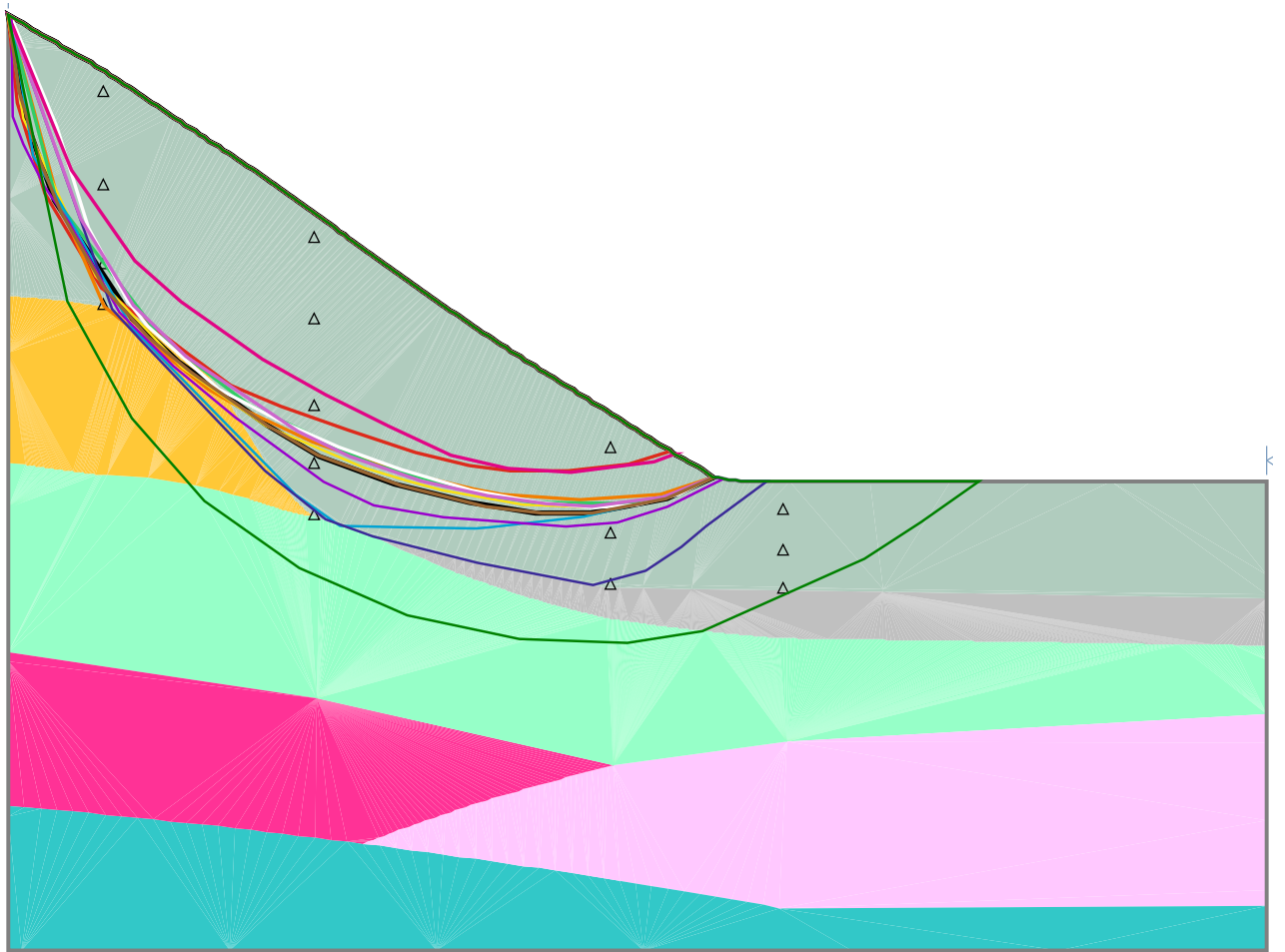


Рис. 4.12. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Чага. Базовая поверхность скольжения показана чёрным цветом, рассчитанная по первому варианту – красным, по второму – оранжевым, по третьему – жёлтым, по 4-му – светло-зелёным, по 5-му – голубым, по 6-му – синим, по 7-му – белым, по 8-му – фиолетовым, по 9-му – розовым, по 10-му – сиреневым, по 11-му – коричневым, по 12-му – тёмно-зелёным.

При расчёте по методу тонкого сплайна значения эквивалентного объёма изменяются от 74 до 187, при базовом значении 110, а коэффициента устойчивости от 0,89 до 1,15, при базовом значении 1,12. Расчёт по седьмому варианту невозможен в связи с ограничениями метода по расположению проб. Это говорит о сильном влиянии количества проб и их местоположения на результаты расчётов с использованием данного метода. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 4.13.

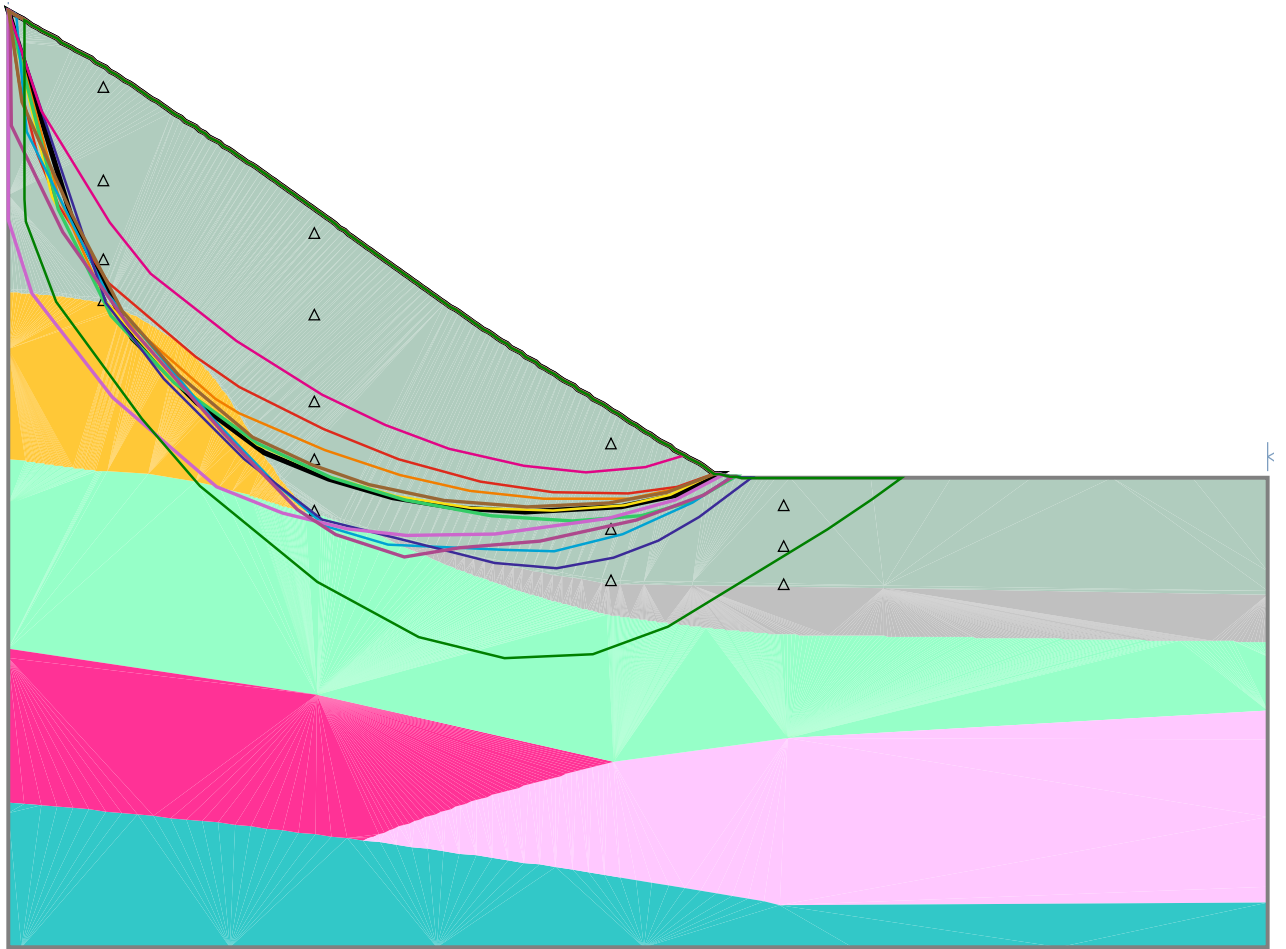


Рис. 4.13. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по методу Тонкого сплайна. Базовая поверхность скольжения показана чёрным цветом, рассчитанная по первому варианту – красным, по второму – оранжевым, по третьему – жёлтым, по 4-му – светло-зелёным, по 5-му – голубым, по 6-му – синим, по 8-му – фиолетовым, по 9-му – розовым, по 10-му – сиреневым, по 11-му – коричневым, по 12-му – тёмно-зелёным.

При расчёте по методу обратных взвешенных расстояний значения эквивалентного объёма изменяются от 98 до 119, при базовом значении 102, а коэффициента устойчивости от 1,11 до 1,19, при базовом значении 1,14. Это говорит о минимальном влиянии количества проб и их местоположения на результаты расчётов с использованием данного метода интерполяции и, следовательно, его максимальной точности. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов приведена на рисунке 4.14.

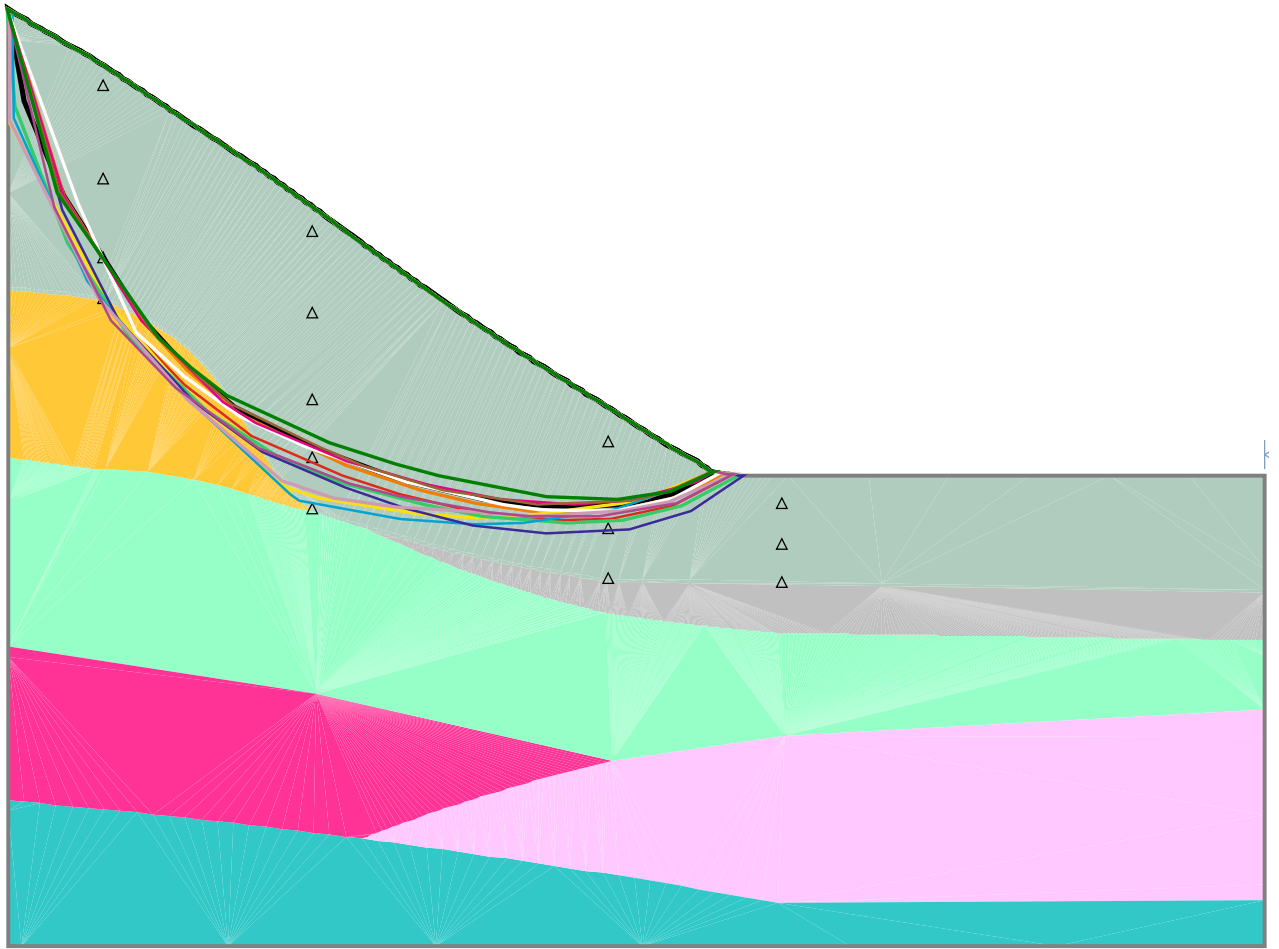


Рис. 4.14. Итоговая геомеханическая схема с результатами расчётов по методу обратных взвешенных расстояний. Базовая поверхность скольжения показана чёрным цветом, рассчитанная по первому варианту – красным, по второму – оранжевым, по третьему – жёлтым, по 4-му – светло-зелёным, по 5-му – голубым, по 6-му – синим, по 7-му – белым, по 8-му – фиолетовым, по 9-му – розовым, по 10-му – сиреневым, по 11-му – коричневым, по 12-му – тёмно-зелёным.

Результаты расчётов сведены в таблицу 4.4. В ячейках указаны значения коэффициентов устойчивости, в скобках приведены значения эквивалентных объёмов потенциальных оползневых тел.

Таблица 4.4

Результаты расчётов устойчивости склона с применением различного сочетания количества проб

Метод интерпо- ляции Вариант	Делоне	Чага	Тонкого сплайна	Обратных взвешенных расстояний
Базовое значение	1,08 (105)	1,07 (103)	1,12 (110)	1,14 (102)
1	0,98 (91)	0,96 (89)	1,07 (95)	1,16 (108)
2	1,12 (106)	1,11 (99)	1,13 (102)	1,16 (104)
3	1,11 (104)	1,17 (189)	1,14 (110)	1,15 (117)
4	1,12 (118)	1,07 (97)	1,12 (113)	1,18 (117)
5	0,98 (115)	0,98 (115)	1,01 (125)	1,19 (119)
6	0,73 (128)	0,73 (128)	0,89 (128)	1,16 (117)
7	–	1,14 (94)	–	1,18 (103)
8	0,93 (90)	0,96 (95)	1,15 (142)	1,19 (118)
9	1,15 (66)	1,12 (72)	1,12 (74)	1,11 (101)
10	1,12 (110)	1,12 (112)	1,05 (127)	1,18 (114)
11	1,09 (103)	1,06 (104)	1,10 (107)	1,15 (101)
12	1,17 (188)	1,17 (189)	1,11 (187)	1,18 (98)

Исходя из результатов расчётов, автором предлагается использовать следующую методику для количественной оценки оползней скольжения в пределах ИПТС.

1. Значения прочностных свойств грунтов следует задавать в пределах стратиграфо-генетического комплекса техногенных накоплений без выделения каких-либо границ внутри него. Это необходимо для учёта влияния на результаты расчётов устойчивости прослоев с экстремально низкими и высокими значениями прочностных свойств. Подобные прослои характерны для СГК техногенных накоплений.
2. Разделение остального разреза на слои должно выполняться в соответствии с требованиями нормативных документов, с регламентированной статистической обработкой рядов значений всех свойств грунтов.
3. Изменчивость техногенных грунтов должна учитываться посредством интерполяции значений прочностных свойств между точками, в которых оно известно. Метод интерполяции необходимо обосновывать в зависимости от особенностей геологического строения склона. Оптимальным методом интерполяции в программе Slide 6.0 является метод обратных взвешенных расстояний.

4. Следует задавать нормативные значения прочностных свойств грунтов в пределах РГЭ, относящихся к коренным грунтам, для точного нахождения положения поверхности скольжения и выполнять вероятностный анализ для обеспечения возможности прогноза оползневой опасности.
5. Для качественной интерполяции свойств грунтов при расчётах устойчивости в процессе инженерно-геологических изысканий необходимо проходить минимум одну скважину у бровки склона, одну скважину у подошвы склона и одну скважину на склоне.
6. При проведении полевых работ из каждой скважины необходимо отбирать монолиты для определения прочностных свойств грунтов у кровли СГК техногенных накоплений (ниже границы с почвенно-растительным слоем), у подошвы (над границей с коренными грунтами), а также в его пределах из каждой литологической разности уровня МГТ-3 [46] у кровли и подошвы. Из маломощных прослоев (менее 20 см) допустимо отбирать одну пробу.

Выводы

Исторические территории, как правило, отличаются повышенной мощностью техногенных накоплений. Их наличие требует специального подхода к изучению инженерно-геологических условий. Современное состояние памятников русской архитектуры зависит от неблагоприятных инженерно-геологических процессов, развивающихся в их пределах. Основную опасность для исторических природно-технических систем, расположенных вблизи склонов, представляет оползневой процесс. Зачастую на подобных склонах развиваются оползни скольжения, когда техногенные накопления смещаются по коренным грунтам. Это связано с изменением рельефа в процессе жизнедеятельности человека, которое влечёт за собой изменение градиентов поверхностного стока и к переформированию полей напряжений в грунтовых массивах. В результате изменяются гидрогеологические условия территории и физико-механические свойства грунтов, залегающих в верхней части разреза.

Автором предложена методика расчёта устойчивости склонов, сложенных в верхней части техногенными грунтами, имеющими большую мощность. Распределение свойств в техногенных грунтах бывает непредсказуемым в силу их неоднородности, а также ввиду того, что не всегда возможно точно установить условия их формирования. И в связи с этим, выделение различных по физико-механическим свойствам слоёв и задание в их пределах усреднённых значений характеристик представляет определённую сложность. Поэтому предлагается рассчитывать подобные склоны, пользуясь следующим подходом: значения прочностных свойств грунтов следует задавать в пределах стратиграфо-генетического комплекса техногенных накоплений без выделения каких-либо границ внутри него. Разделение остального разреза на слои должно выполняться в соответствии с требованиями нормативных документов, с регламентированной статистической обработкой рядов значений всех свойств грунтов. Следует задавать нормативные значения прочностных свойств грунтов в пределах РГЭ для точного нахождения положения поверхности скольжения и выполнять вероятностный анализ для обеспечения возможности прогноза оползневой опасности. Изменчивость техногенных грунтов должна учитываться посредством интерполяции значений прочностных свойств между точками, в которых оно известно. При использовании данной методики необходимо обоснование применяемого метода интерполяции Для качественной интерполяции свойств грунтов при расчётах устойчивости в процессе инженерно-геологических изысканий необходимо проходить минимум одну скважину у бровки склона, одну скважину у подошвы склона и одну скважину на склоне. При проведении полевых работ из каждой скважины необходимо отбирать монолиты для определения прочностных свойств грунтов у кровли СГК техногенных накоплений (ниже границы с почвенно-растительным слоем), у подошвы (над границей с коренными грунтами), а также в его пределах из каждой литологической разности

уровня МГТ-3 у кровли и подошвы. Из маломощных прослоев (менее 20 см) допустимо отбирать одну пробу.

Расчёты устойчивости южного склона Никольской горы Можайского кремля показали следующие результаты. Методика расчёта оползней скольжения с применением полевого распределения свойств грунтов в пределах стратиграфо-генетического комплекса техногенных накоплений показала хорошую сходимость результатов со стандартными методами. Сравнение различных методов интерполяции показало, что наиболее близкие значения эквивалентных объёмов оползневых тел получаются при расчётах с использованием триангуляции по методу обратных взвешенных расстояний. Поэтому для техногенных грунтов рекомендуется использовать метод обратных взвешенных расстояний, поскольку подбор степени позволяет учитывать степень их неоднородности (включения и прослои с аномально высокими и низкими значениями прочностных свойств), которая характерна для данного стратиграфо-генетического комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оползневой процесс изучается уже не одно столетие. Несмотря на это до сих пор не выработано единого взгляда на основные аспекты оползневедения. Данный факт проявляется в большом количестве существующих определений, классификаций, представлений о причинах, факторах и критериях процесса, механизмах его развития.

В настоящей работе исследуются оползни скольжения, приуроченные к склонам исторических природно-технических систем, в верхней части которых залегают техногенные накопления. Они имеют достаточно широкое распространение на территории России в масштабе исторических территорий.

Существует большое количество подходов к прогнозу оползневой опасности. В зависимости от характера и масштаба изысканий методы прогнозирования подразделяются на региональные и локальные. В данной работе рассматриваются методы математического моделирования, основанные на анализе предельного равновесия, которые относятся к методам локального прогнозирования.

Расчёты произведены по трём методам: упрощённым Бишопа и Янбу и Моргенштерна-Прайса. Метод Бишопа удовлетворяет условию равновесия общих моментов и вертикальных сил, при этом не соблюдается равновесие сдвигающих сил. Метод Янбу удовлетворяет равновесию сдвигающих сил, при этом не соблюдается удовлетворение равновесию моментов. Метод Моргенштерна-Прайса удовлетворяет условиям равновесия общих моментов вертикальных и сдвигающих сил. Данные методы использовались, поскольку принадлежат к разным классам методов предельного равновесия. Методы Бишопа и Моргенштерна-Прайса рекомендованы российскими нормативными документами. Метод Янбу является наиболее близким к методу Маслова-Берера, также рекомендованного к использованию в России.

Классическая форма расчётной поверхности скольжения является круглоцилиндрической, однако современные методики расчётов позволяют находить более оптимальные формы поверхностей скольжения. Этот процесс называется оптимизацией и играет важную роль в количественной оценке устойчивости склонов. В работе произведено сравнение результатов расчётов по круглоцилиндрической и оптимизированной поверхностям скольжения.

Геомеханическая модель составляется на основе инженерно-геологических разрезов, в пределах которых природные массивы разделены на элементарные слои – инженерно-геологические элементы. Характеристики элементам назначаются в результате обработки полевых и лабораторных данных о свойствах грунтов. Существует два основных подхода к заданию свойств элементам – отечественный, когда всему выделенному слою назначаются

расчётные (в статистической терминологии) свойства, и зарубежный, когда назначаются нормативные значения характеристик. Оба эти подхода имеют некоторые недостатки. Основным недостатком отечественного подхода является искусственное уменьшение средних значений свойств грунтов за счёт введения коэффициентов надёжности. В результате, закладываемые в расчет, формально уменьшенные, прочностные характеристики грунтов предопределяют не только заниженные значения коэффициентов устойчивости в итоге, но и совсем другую «расчетную» поверхность скольжения. Зарубежный подход также имеет свои недостатки.

Автором предложены три подхода к заданию свойств грунтов в массиве. Они опираются на распределение свойств грунтов между точками, в которых известны значения прочностных свойств грунтов. Эти точки соответствуют местам отбора проб в горных выработках, привязанных к системе координат.

Первый подход заключается в разделении склона на расчётные геологические элементы согласно статистической обработке физических свойств грунтов. Далее, в пределах каждого слоя осуществляется интерполяция свойств одним из имеющихся в распоряжении методов интерполяции. Недостатком этого подхода являются «краевые эффекты», возникающие на границах расчётных грунтовых элементов в процессе экстраполяции свойств за пределы интерполируемого массива. Второй подход заключается в разделении разреза на стратиграфо-генетические комплексы. Он позволяет учитывать переходные слои между фациально замещающимися разностями в пределах массива пород одного происхождения и возраста, что позволяет избежать ошибок, возникающих при расчётах за счёт расположения поверхностей скольжения на строгой границе песчаных и глинистых грунтов с разными прочностными характеристиками. Третий подход заключается в задании поля распределения свойств грунтов в пределах всего массива без выделения каких-либо границ.

Большинство методов расчётов устойчивости склонов основано на критерии прочности Мора-Кулона, показывающего зависимость максимального сопротивления сдвигу от нормальной нагрузки при заданных значениях прочностных свойств грунтов. Существует возможность использования различных методов распределения значений свойств грунтов в массиве. Один из подходов позволяет задавать поле распределения свойств грунтов в массиве. Для этого необходимо производить интерполяцию свойств грунтов. Одними из наиболее распространённых методов являются методы Чага, Делоне, обратных взвешенных расстояний и тонкого сплайна. Их сравнение в аспекте изучения оползней скольжения, впервые приведено в данной работе.

Сравнение различных методов расчётов устойчивости склонов и моделей распределения свойств грунтов впервые выполнено в настоящей работе на примере юго-восточного склона

Боголюбского монастыря и южного склона Никольской горы Можайского кремля. Объекты Боголюбского монастыря, находящиеся в непосредственной близости к склону, являются объектами культурного наследия ЮНЕСКО и памятниками архитектуры Федерального значения. По результатам расчётов сделаны следующие выводы, которые выносятся на защиту:

1. Показана возможность создания расчётных схем оценки устойчивости склонов с применением полевого распределения прочностных свойств грунтов в пределах стратиграфо-генетических комплексов и в пределах всего массива (без выделения границ).
2. Показана необходимость обоснования применяемого метода интерполяции при использовании моделей с полевым распределением свойств грунтов.

Исторические территории, как правило, отличаются повышенной мощностью техногенных накоплений. Их наличие требует специального подхода к изучению инженерно-геологических условий. Современное состояние памятников русской архитектуры зависит от неблагоприятных инженерно-геологических процессов, развивающихся в их пределах. Основную опасность для исторических природно-технических систем, расположенных вблизи склонов, представляет оползневой процесс. Чаще всего на подобных склонах развиваются оползни скольжения, когда техногенные накопления смещаются по коренным грунтам. Это связано с изменением рельефа в процессе жизнедеятельности человека, которое влечёт за собой изменение градиентов поверхностного стока и к переформированию полей напряжений в грунтовых массивах. В результате изменяются гидрогеологические условия территории и физико-механические свойства грунтов, залегающих в верхней части разреза.

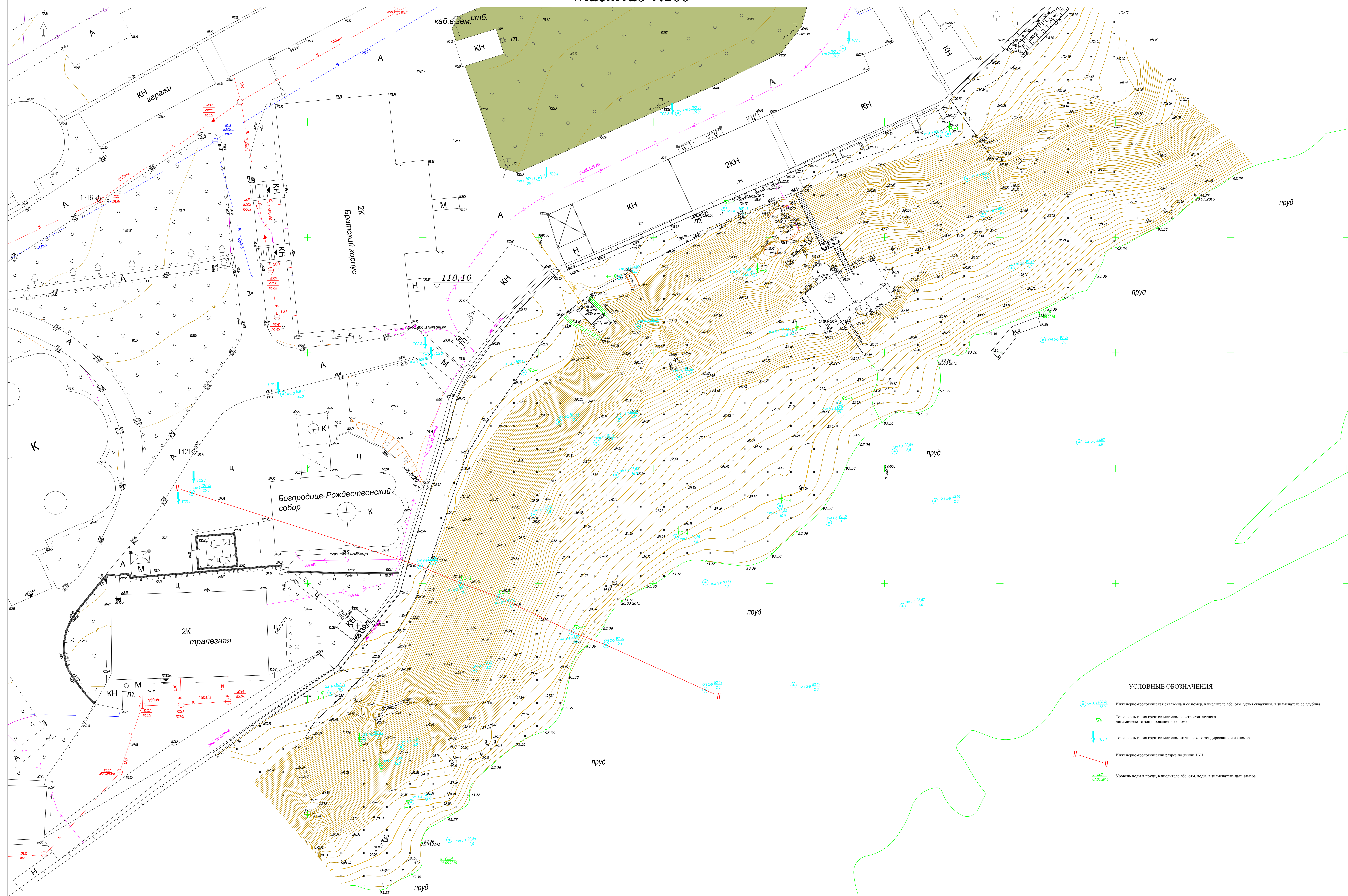
Распределение свойств в техногенных грунтах очень сложное в силу их неоднородности и условий формирования, установить которые не всегда возможно. В связи с этим, выделение различных по физико-механическим свойствам слоёв и задание в их пределах усреднённых значений характеристик представляет определённую сложность. А склоны, входящие в сферу взаимодействия ИПТС, зачастую сложены многометровыми толщами техногенных грунтов, вследствие чего количественная оценка устойчивости подобных склонов достаточно затруднительна. Поэтому при использовании моделей с построением полей распределения прочностных свойств в техногенных грунтах рекомендуется использовать метод обратных взвешенных расстояний, поскольку подбор степени позволяет учитывать их неоднородность, которая характерна для данного стратиграфо-генетического комплекса (второе защищаемое положение).

Автором предложена методика расчёта устойчивости склонов, в верхней части сложенных техногенными грунтами, имеющими большую мощность. Распределение свойств в техногенных грунтах очень сложное в силу их неоднородности и условий формирования,

установить которые не всегда возможно. И в связи с этим, выделение различных по физико-механическим свойствам слоёв и задание в их пределах усреднённых значений характеристик представляет определённую сложность. Поэтому предлагается рассчитывать подобные склоны, пользуясь следующим подходом: для учёта включений и прослоев с аномально высокими и низкими значениями прочностных свойств в пределах слоя техногенных грунтов целесообразно строить поле распределения прочностных свойств. Для точного нахождения положения поверхности скольжения и выполнения прогноза оползневой опасности в коренных и четвертичных грунтах следует выделять инженерно-геологические элементы по стандартным методикам, назначая им нормативные значения прочностных характеристик.

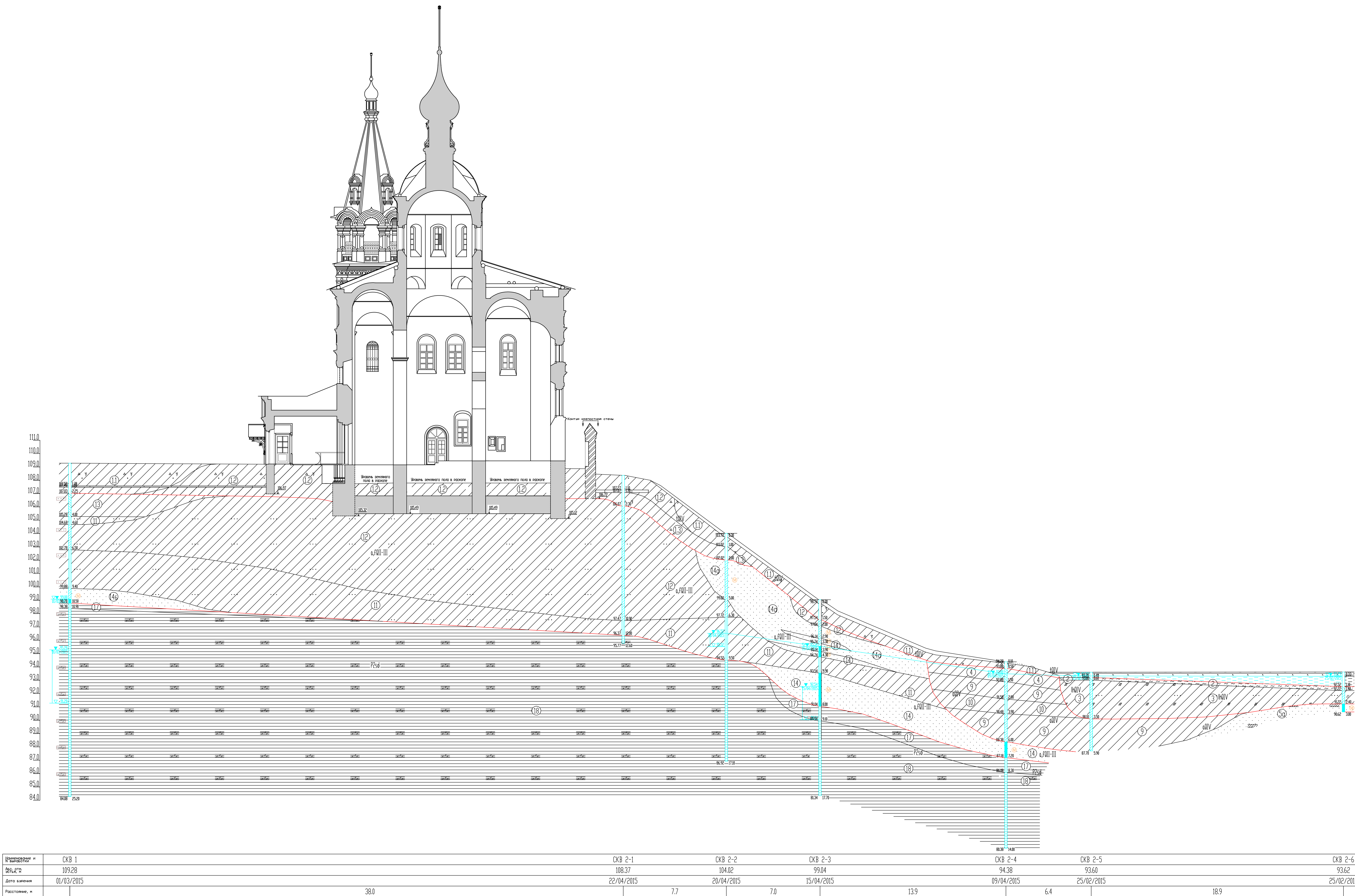
Расчёты устойчивости южного склона Никольской горы Можайского кремля показали следующие результаты. Методика расчёта оползней скольжения с применением полевого распределения свойств грунтов в пределах стратиграфо-генетического комплекса техногенных накоплений показала хорошую сходимость результатов со стандартными методами. Сравнение различных методов интерполяции показало, что наиболее близкие значения эквивалентных объёмов оползневых тел получаются при расчётах с использованием триангуляции по методу обратных взвешенных расстояний. Прочие методы дают худшие результаты, что говорит о необходимости проходки минимум одной скважины у бровки склона, одной скважины у подошвы склона и одной скважины на склоне. При проведении полевых работ из каждой скважины необходимо отбирать монолиты для определения прочностных свойств грунтов у кровли слоя (ниже границы с почвенно-растительным слоем), и у его подошвы (над границей с коренными грунтами), а также в пределах слоя по мере изменения литологического состава и показателей состояния грунтов.

В дальнейшем необходимо увеличение информационной базы по распределению прочностных свойств в техногенных грунтах, по развитию оползней на исторических территориях и по применению различных методов интерполяции для расчётов устойчивости склонов.



136
Приложение №2
Инженерно-геологический разрез по линии 2-2, Боголюбово
Масштаб 1:100

Проекция Богородице-Рождественского собора



Условные обозначения

① Номер инженерно-геологического элемента (ИГЭ)

Техногенные накопления - суглинок
мелкопл., темно-серый до черного,
опесчаненный, с вкл. дресвы кирпичи и
известняка, известково-песчаной крошки,
древесного згла t0IV

Техногенные накопления - суглинок
тугопл., темно-серый до черного,
опесчаненный, с вкл. дресвы кирпичи и
известняка, известково-песчаной крошки,
древесного згла t0IV

Техногенные накопления - суглинок полутвр.,
темно-серый до черного, опесчаненный, с вкл.
дресвы кирпичи и известняка,
известково-песчаной крошки, древесного згла t0IV

Ил черная, текучепл., суглинистая, с
примесью орг.в, t0IV

Суглинок темно-серый до черного,
опесчаненный, мягкопл., с примесью
орг.в, с вкл. остатков древесины, с
прослоями песка мелкого, t0IV

Суглинок серовато-коричневый до
серовато-зеленого, опесчаненный, с вкл.
дресвы орг.в, с вкл.
остатков древесного згла, t0IV

Песок мелкий серовато-коричневый, насыщенный
водой, с примесью орг.в, с тонкими
прослоями суглинка мягкопл., в прослоях
суглинка остатки нарастающих древесины, рыхлый, t0IV

Суглинок серовато-зеленый, опесчаненный,
мягкопл., с прослоями песка мелкого, t0IV

Суглинок серый, опесчаненный, тугопл., с
прослоями песка мелкого, t0IV

Суглинок коричневый, опесчаненный,
текучепл., с прослоями песка мелкого,
t0IV-III

Суглинок коричневый, опесчаненный,
мягкопл., с прослоями песка мелкого,
t0IV-III

Суглинок коричневый, опесчаненный,
текучепл., с прослоями песка мелкого,
t0IV-III

Песок мелкий желтовато-коричневый, средняя
степени водонасыщенности, сс. плотн.,
t0IV-III

Песок мелкий желтовато-коричневый, средняя
степени водонасыщенности, рыхлый, t0IV-III

Песок мелкий желтовато-коричневый, средняя
степени водонасыщенности, плотный, t0IV-III

Глина красновато-коричневая, опесчаненная,
тугопл., с прослоями мергеля и алевролита
серовато-зеленого и красновато-коричневого,
песка пылеватого, t2sd

Вода t0IV

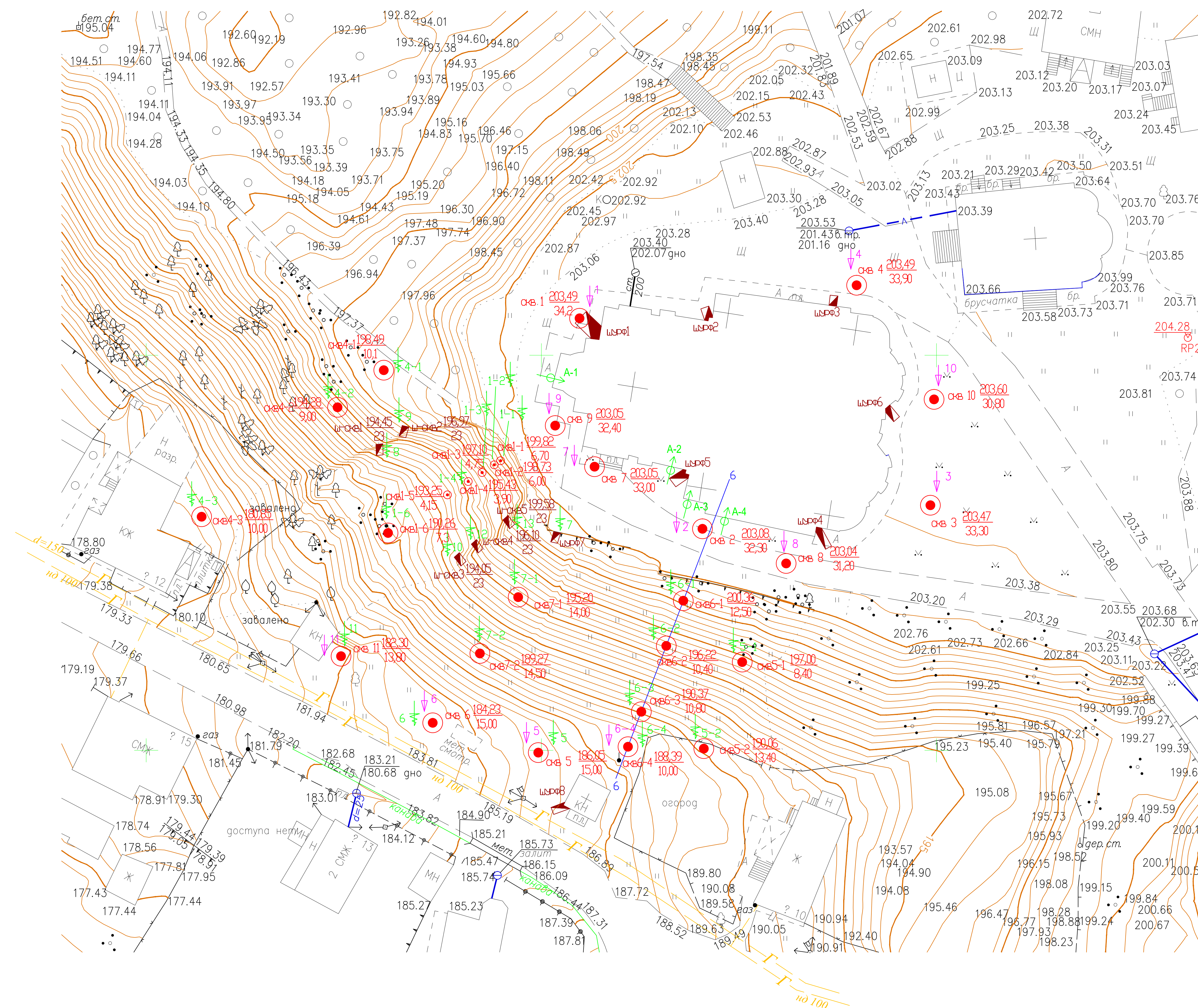
Глина красновато-коричневая, опесчаненная,
твердая, с прослоями мергеля и алевролита
серовато-зеленого и красновато-коричневого,
песка пылеватого, t2sd

ГРАНИЦЫ

СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ

ЛИТОЛОГИЧЕСКАЯ

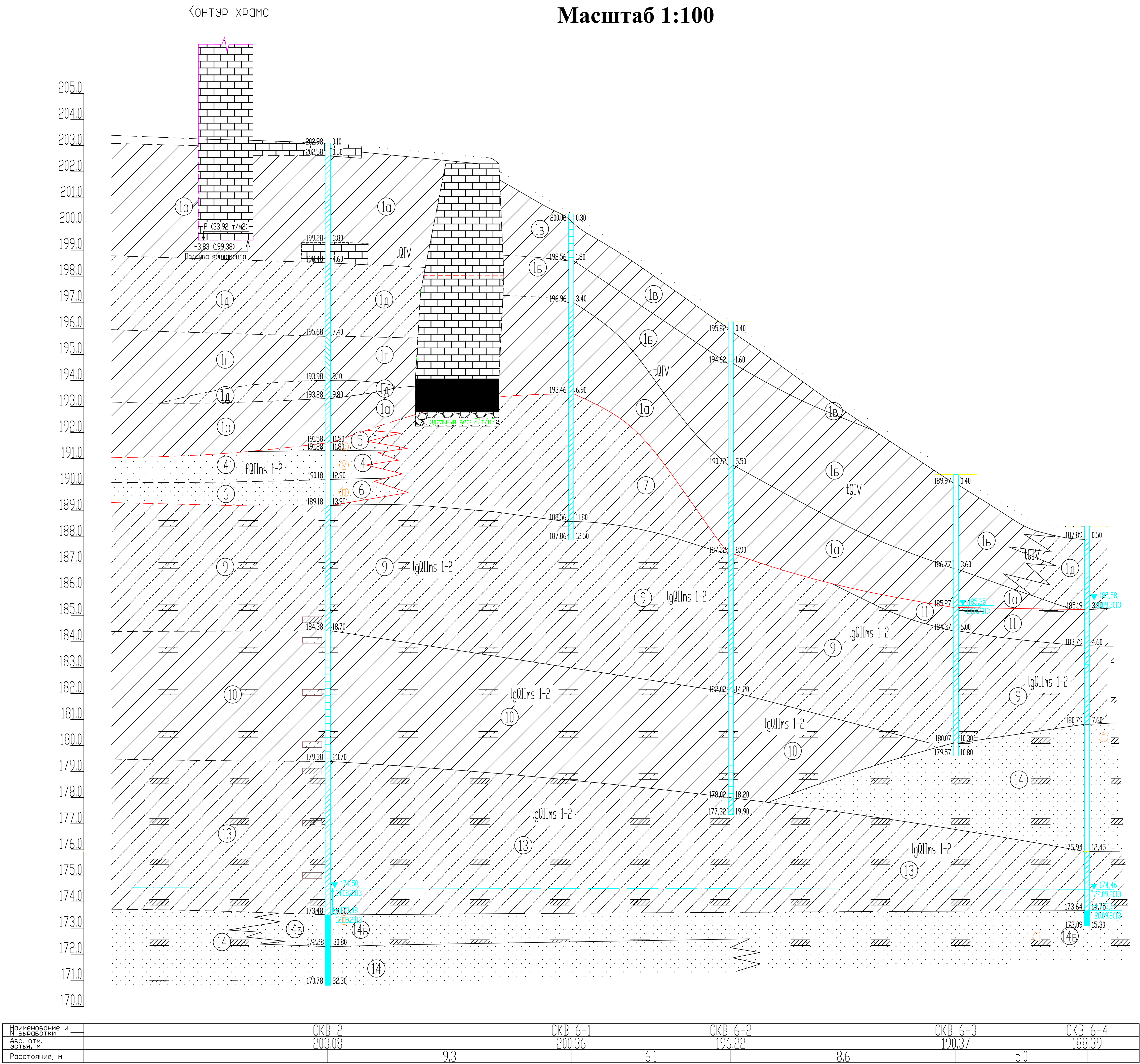
Обозначение состояния грунта	Консистенция глинистых грунтов глина и суглинок	Степень влажности песчаных грунтов	Степень влажности песчаных грунтов
тв	твердая	тв	малой степени водонасыщенности
п	полутвердая	—	—
тп	тугопластичная	—	—
тж	текучепластичная	п	средней степени водонасыщенности
т	текучая	т	насыщенные водой



	шурф 8	Инженерно–геологический шурф,его номер
	6	Точка испытания грунтов методом статического зондирования,ее номер
	сква-4 $\frac{188,39}{20}$	Инженерно–геологическая скважина,ее номер, в числителе абсолютная отметка устья, в знаменателе ее глубина
	ш-сква1 $\frac{194,45}{5,00}$	Шурф–скважина,ее номер, в числителе абсолютная отметка устья, в знаменателе ее глубина
	A-2	Скважина алмазного сверления
	6–2	Точка испытания грунтов методом электроконтактного динамического зондирования,ее номер
	6 — 6	Линия инженерно–геологического разреза

Приложение №4
Инженерно-геологический разрез по линии 6-6, Можайский кремль

Масштаб 1:100



Условные обозначения

Г Р А Н И Ц Ы стратиграфическая литологическая контур храма	Блоки известняка 1a Суглинок мягкоплст., tQIV 1б Суглинок туглоплст., tQIV 1r Суглинок полутв., tQIV 1г Суглинок текуч., tQIV	1a Сугесь пластинч., tQIV 4 Песок мелкий ср. плотн., fQIIms 1-2 5 Песок средней крупности ср. плотн., fQIIms 1-2 6 Песок пылеватый ср. плотн., fQIIms 1-2 7 Сугесь пластинч., lgQIIms 1-2 14a Песок пылеватый с прослоями супеси, плотный, lgQIIms 1-2	9 Сугесь пластинч., с прослоями суглинка, песка, глины твердой, lgQIIms 1-2 10 Суглинок полутвр., с прослоями супеси, песка, глины твердой, lgQIIms 1-2 11 Суглинок мягкоплст., с прослоями супеси, песка, глины твердой, lgQIIms 1-2 13 Сугесь пластинч., с прослоями суглинка, глины твердой, песка, lgQIIms 1-2 14 Песок пылеватый с прослоями супеси, lgQIIms 1-2
--	---	--	--

Обозначение состояния грунта	Консистенция глинистых грунтов		Степень влажности песчаных грунтов
	глина и суглинок	сугесь	
	твердая	твердая	малой степени водонасыщения
	полутвердая	—	—
	тугопластичная	—	—
	мягкопластичная	пластичная	средней степени водонасыщения
	текучепластичная	—	—
	текучая	текучая	насыщенные водой



143180, Московская область,
г. Звенигород,
ул. Почтовая, д. 8.

ИНН/КПП 7728640136/501501001
ОГРН 1077762934765
ОКПО 84042328

Тел/факс: 8 (499) 553-80-32;
E-mail: igit-1@mail.ru

«03» июня 2016г. № 128/16

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы

Буфеева Федора Константиновича

Комиссия в составе:

Председатель комиссии

Технический директор

Члены комиссии:

Заместитель генерального директора

по производству

Главный инженер

Начальник отдела инженерных

изысканий, к. г.-м. н.

Пономарёв В.В.

Андрианов Д.В.

Романенко А.М.

Бондарев М.В.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Моделирование оползней скольжения, приуроченных к склонам исторических природно-технических систем, сложенных техногенными грунтами», представленной на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук, реализованы при расчёте устойчивости оползнеопасных склонов в ходе производства работ по выполнению противооползневых мероприятий на объектах культурного наследия федерального значения южном склоне Никольской горы Можайского кремля и юго-восточном склоне Боголюбского монастыря.

Предложенная соискателем Ф.К. Буфеевым методика оценки оползневой опасности отличается от известных на сегодняшний день методик высокой надёжностью получаемых результатов.

Председатель комиссии

Члены комиссии



Пономарёв В.В.

Андрианов Д.В.

Романенко А.М.

Бондарев М.В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашкин Е.М. *Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры*; Изд. 2-е — Санкт-Петербург: ПИ "Геореконструкция", 2013.
2. Оползни и устойчивость склонов *Библиографический указатель* — Москва: ЗАО "Геоинформмарк", 2010. — 528 с.
3. Личков, Б. Л. *К вопросу о режиме оползневых явлений в районе расположения г. Киева и его окрестностей* // Геол. журн. АН УССР. — №5., Выпуск 4. — 1938.
4. Паллас П.С. *Путешествие по разным провинциям Государства Российского в 1763-1773*, Том II — СПб: s.n., 1773-1788.
5. Данилов М., Петлин А. *Крушение поезда на Московско-Курской дороге в ночь на 30 июня 1882 г.* // Железнодорожное дело. — 1882. — с. 110-113.
6. Жаринцов Д.Ф. *О причинах обвалов обрывистого берега в окрестностях г. Одессы и мерах, которые необходимо принять для предупреждения обрушения берега у Одесского электрического маяка* // Зап. Рус. геогр. о-ва. — №XV., Выпуск 5. — 1886. — с. 1-37.
7. Розанов Н. *Об Одесских оползнях* // Изв. Геогр. о-ва. — №XXIV. — 1889. — с. 484-487.
8. Мушкетов Д.И., Погребов Н.Ф. *Оползни Сочинского района Черноморского побережья* // Изв. Геол. ком. — 1924. — с. 184-192.
9. Мушкетов Д.И., Погребов Н.Ф. *Одесские оползни* // Изв. Геол. ком. — 1924. — с. 177-184.
10. Мушкетов Д.И., Погребов Н.Ф. *Оползни Южного берега Крыма* // Изв. Геол. ком. — 1924. — с. 169-177.
11. Ог Э. *Геология: пер. с франц. / Под ред. и с доп. А.П. Павлова*, Том I; 3-е — Москва: s.n., 1924.
12. Платонов Н.Х. *О причинах оползания железнодорожного полотна между станциями Георгиевск и Минеральные воды Сев.-Кавк. жел. дор.* // Вестн. Сев.-Кавк. жел. дор. им. С.Д. Маркова. — №8. — 1928.
13. Бернацкий Л.Н. *Оползни в СССР* // План. хоз-во. — 1926. — с. 1777-186.
14. Шитиков М. *Заметка о геологическом строении участка, предназначенного для сооружения тракторного завода в окр. Сталинграда* // Изв. Геол. ком.. — № XLVI., Выпуск 8. — 1927. — с. 919-927.
15. Мушкетов Д.И. *Оползни побережий Черного моря* // — 1925. - №1. — 61 с // Горн. журн. — 1925.
16. Михеев Б.И. *О причинах разрушения зданий на территории грозненских промыслов* // Строит. Промышленность. — 1930.

17. Еврейсков В.Е. *Борьба с оползнями в приволжских городах* // Изв. Том. техн. ин-та. — №50., Выпуск III. — 1929. — с. 1-6.
18. Двойченко И.А. *Морфологическая и генетическая классификация оползней и обвалов* // Вестн. Науч.-исслед. ин-та. водного хоз-ва Украины. — №II., Выпуск Ч. 2. — 1929. — с. 99-107.
19. Погребов Н.Ф. Сравнительная характеристика оползневых районов СССР // Тр. I Всес. оползн. совещ. — Л, 1935. — с. 199-213.
20. Саваренский Ф.П. Опыт построения классификации оползней // Тр. I Всес. оползн. совещ. — Л, 1935. — с. 19-21.
21. Гольдтман В.Г. Опыты с моделями оползней. К 45-летию науч. деятельности проф. Н.Ф. Погребова // ОНТИ, 1937.
22. Шахунянц Г.М. *О методике проектирования мероприятий по стабилизации земляного полотна* // Техника железных дорог. — 1944.
23. Денисов Н.Я. *О стадийности деформаций глинистых пород* // ДАН СССР. — №56., Выпуск 1. — 1947.
24. Постановления Второго Всесоюзного оползневого совещания *Сб.: Вопр. гидрогеол. и инж. Геол. //* — Выпуск 12. — 1949.
25. Герсеванов Н.М. *Теоретические основы механики грунтов и их практическое применение* — с.л.: Стройиздат, 1948.
26. Маслов Н.Н. *Прикладная механика грунтов* — с.л.: Машстройиздат, 1948.
27. Емельянова Е.П. *О причинах и факторах оползневых процессов* // Вопр. гидрогеол. и инж. Геол. — 1953.
28. Фокин А.И., Рамишвили Г.Г. *Фазы развития оползней в Шида-Картли и роль антропогенного фактора* // Сообщ. АН ГССР. — №17, — Выпуск 3. — 1956.
29. Дранников А.М. *Оползни. Типы, причины образования, меры борьбы* — Киев: Изд-во Укргипросельстроя, 1956.
30. Емельянова Е.П. *Методическое руководство по стационарному изучению оползней* // Госгеолтехиздат. — Выпуск 14. — 1956.
31. Славянов В.Н. *Некоторые вопросы теории инженерно-геологических прогнозов устойчивости склонов* // БМОИП. — 1957.
32. Терцаги К., Пек Р. *Механика грунтов в инженерной практике* / — Москва: Госстройиздат, 1958. — 607 с.
33. Терцаги К. Механизм оползней // Пробл. инж. геол., 1958.
34. Емельянова Е.П. К вопросу о механизме и причинах оползней у Одессы // Тез. докл. совещ. по изуч. оползней на Одесском побережье. — Одесса, 1958.

35. "Материалы совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними," Киев, 1964.
36. Емельянова Е.П. *Основные закономерности оползневых процессов* / — Москва: Недра, 1972. — 308 с.
37. *Опыт оценки устойчивости склонов сложного геологического строения методом конечных элементов и экспериментами на моделях* / Под ред. Г.С. Золотарёва — Москва: МГУ, 1973.
38. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II *Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов* — Москва: Госстрой России. - М.: ПНИИИС Госстроя России, 2000.
39. Оползни и сели *Оползни и сели* / Ред. Е.А. Козловский, А.И. Шеко: в 2 тт., Том 1,2 — Москва: Центр междунар. проектов ГКНТ, 1984.
40. Оползни. Исследование и укрепление: пер. с англ. *Под ред. Р. Шустера, Р. Кризека* — Москва: Под ред. Р. Шустера, Р. Кризекаир, 1981.
41. Калинин Э.В. *Инженерно-геологические расчеты и моделирование* / — Москва: Издательство Московского университета, 2006. — 256 с.
42. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. *Инженерная геодинамика* / — Москва: КДУ, 2007. — 327 с.
43. Пендин В.В., Фоменко И.К. *Методология оценки и прогноза оползневой опасности* — Москва: ЛЕНАНД, 2015.
44. Королев В.А. *Инженерная и экологическая геодинамика*; Электронный учебник на CD / — Москва: МГУ, 2004.
45. Маслов Н.Н. *Основы инженерной геологии и механики грунтов* / — Москва: Высшая школа, 1982. — 511 с.
46. Бондарик Г.К. *Общая теория инженерной (физической) геологии* / — Москва: Недра, 1981. — 256 с.
47. Петров Н.Ф. *Оползневые системы. Простые оползни (аспекты классификации).* / — Кишнев: Штиинца, 1988. — 226 с.
48. *Инженерная геология России. Том 2. Инженерная геодинамика территории России* под ред. Трофимов В.Т. — Москва: КДУ, 2013. — 815 с.
49. Павлов А.П. *Оползни Симбирского и Саратовского Поволжья* / — Москва: Университетская тип., 1903. — 69 с.
50. Григоренко А.Г., Кюнтцель В.В., Новак В.Е., Тамутис З.П. *Инженерная геодинамика: Учеб. Пособие* — Киев: Лыбидь, 1992.

51. Варнес Д. *Движение склонов, типы и процессы. Оползни, исследование и укрепление* — Москва: Мир, 1981. — 32-85 с.
52. Попов И.В. *Инженерная геология* / — Москва: МГУ, 1959. — 512 с.
53. Рзаева М.К. *Об инженерно-геологических типах оползней* // Инж. изыскан. в стр-ве. — №II, — Выпуск 1. — 1969.
54. Гулакян К.А., Кюнтцель В.В. *Классификация оползней по механизму их развития* // Вопр. изуч. оползней и факторов, их вызывающих // Тр. ВСЕГИНГЕО. — Выпуск 29. — 1970.
55. Тихвинский И.О. *Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов* / — Москва: Наука, 1988. — 144 с.
56. СП 11-105-97. *Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов* — Москва: Госстрой России. - М.: ПНИИИС Госстроя России, 2000.
57. Золотарев Г.С. *Генетические типы оползней, их развитие и изучение* // Материалы совещания по изучению оползней и мер борьбы с ними. — Киев, 1964. — с. 165-170.
58. Заруба К., Менцл В., *Инженерная геология* / — Москва: Мир, 1976. — 468 с.
59. Hoek E. and Brown, J.W. *Rock Slope Engineering* / — London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. — 402 с.
60. Емельянова Е.П. *Сравнительный метод оценки устойчивости склонов и прогноза оползней* / — Москва: Недра, 1971. — 103 с.
61. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б., *Инженерная геодинамика* / — СПб: Наука, 2001. — 416 с.
62. Саваренский Ф.П. *Инженерная геология* / — Москва: ОНТИ, 1937.
63. Попов И.В. *Инженерная геология* / — Москва: Геолиздат, 1951. — 444 с.
64. Ломтадзе В.Д. *Инженерная геология. Инженерная геодинамика* / — Л: Недра, 1977. — 480 с.
65. Золотарев Г.С. *Инженерная геодинамика* / — Москва: МГУ, 1983. — 328 с.
66. Тер-Степанян Г.С. *О длительной устойчивости склонов* / — Ереван: Изд-во АН АССР, 1961. — 128 с.
67. Курдюмов С.П. Князева Е.Н. *Синергетика как новое мировидение: диалог с И. Пригожиным* // Вопросы философии. — Выпуск № 12. — 1992. — с. 3-20.
68. Бондарев М.В., Буфеев Ф.К., Кувшинников В.М., Фоменко И.К. *Комплексирование методов инженерно-геологических исследований при изучении склоновых процессов* // Сборник тезисов 6-го международного научно-практического

симпозиума "Природные условия строительства и сохранения храмов православной Руси". — Сергиев-Посад, 2015. — с. 36-38.

69. Буфеев Ф.К., Демкин И.А., Кувшинников В.М., Пономарев В.В. Опыт усиления оползневых склонов на исторических территориях // Сборник тезисов 6-го научно-практического Симпозиума "Природные условия строительства и сохранения храмов православной Руси". — Сергиев-Посад, 2015. — с. 121-122.

70. Пашкин Е.М., Каган А.А., Кривоногова Н.Ф. *Терминологический словарь-справочник по инженерной геологии* / — Москва: КДУ, 2011. — 816 с.

71. Шеко А.И. *Закономерности формирования и прогноз селей* / — Москва: Недра, 1980. — 296 с.

72. ПНИИИС. *Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов* / — Москва: Стройиздат, 1984. — 80 с.

73. Фоменко И.К. Математическое моделирование напряженного состояния инженерно - геологического массива, сложенного анизотропными горными породами // дис... канд.геол.минер. наук: 04.00.07. — Москва, 2001. — с. 138.

74. Розовский Л.Б. *Введение в теорию геологического подобия и натурного моделирования* / — Москва: Недра, 1969. — 128 с.

75. Фоменко И.К. *Этапы развития математических методов оценки устойчивости склонов* // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании'2012». Одесса: КУПРИЕНКО. — №48, — Выпуск 4. — 2012. — с. 85-90.

76. Попов И.И., Шпаков П.С., Поклад Г.Г. *Устойчивость породных отвалов* / — Алма-Ата: Наука КазССР, 1987. — 224 с.

77. Соколовский В.В. *Статика сыпучей среды* / — Москва: Гостехиздат, 1954. — 275 с.

78. Krahn J. *Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology: First Edition, Revision 1* / — Calgary, Alberta: GEO-SLOPE International Ltd., 2004. — 396 с.

79. Шахунянц Г.М. *Земляное полотно железных дорог. Вопросы проектирования и расчета* / — Москва: Трансжелдориздат, 1953. — 828 с.

80. Маслов Н.Н. *Условия устойчивости откосов и склонов в гидротехническом строительстве* / — Москва: Госэнергоиздат, 1955. — 53 с.

81. Чугаев Р.Р. *Земляные гидротехнические сооружения (теоретические основы расчета)* / — Л: Энергия, 1967. — 460 с.

82. Гольдштейн М.Н. *Вариационный метод решения задач об устойчивости грунтов* // Вопросы геотехники: Тр. /ДИИТ. - Киев. — №16, — 1969.
83. Тер-Мартirosян З.Г., Ахпателян Д.М. *О напряженном состоянии бесконечного склона с криволинейной границей в поле гравитации и фильтрации* // Проблемы геомеханики. — 1971.
84. Fredlund D.G., and Krahn J. *Comparison of slope stability methods of analysis* // Canadian Geotechnical Journal. — №14 (3). — 1977. — с. 429-439.
85. Coggan, J.S., Stead, D., Eyre, J. *Evaluation of techniques for quarry slope stability assessment* // Trans. Instit. Min. Metall. — 1998. — с. 139-147.
86. Bishop A.W. *The use of the slip circle in the stability analysis of slopes* // Géotechnique. — №5. — 1955. — с. 7-17.
87. Janbu N. *Application of composite slip surface for stability analysis* // In Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes. — Stockholm, Sweden. Balkema, Rotterdam, 1954. — с. 43-49.
88. Буфеев Ф.К., Кувшинников В.М., Фоменко И.К. *Зависимость результатов количественной оценки устойчивости склонов от выбора модели распределения свойств грунтов* // ГеоРиск. — 2015.
89. Morgenstern N. R. and Price V.E., *The analysis of the stability. of general - slip surface* // Geotechnique. — №15. — 1965. — с. 70-93.
90. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. *Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов* // Инженерные изыскания. — 2013.
91. Буфеев Ф.К., Фоменко И.К. *Влияние методов расчёта и моделей распределения свойств грунтов на результаты количественной оценки устойчивости склонов* // Геология и Разведка. — 2016. — с. 33-38.
92. ГОСТ 20522-2012, "Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний," Москва, 2013.
93. Chugh, A.K. *Pore Water Pressure in Natural Slopes* //. — 1981. — с. 449 – 454.
94. Делоне Б.Н. *О пустоте сферы* // Изв. АН СССР. — Выпуск № 4. — 1934. — с. С.793–800.
95. Скворцов А.В. *Триангуляция Делоне и её применение* — Томск: Изд-во Том. ун-та. 128 с, 2002.
96. Voronoi G. *Nouvelles applications des parameters continues à la therie des formes quadratiques.* // Deuxième Mémoire: Recherches sur les parralléloèddres primitifs. — Выпуск N. 134. — 1908. — с. 198–287.

97. Shepard, D. *A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data* // Proc. 23rd Nat. Conf. — 1968. — с. 517-524.

98. Franke, Richard *Thin plate splines with tension* // Computer Aided Geometric Design. — Выпуск 2. — 1985. — с. 87 – 95.

99. Демьянов В.В., Савельева Е.А. *Геостатистика: теория и практика* под ред. под ред. Р.В. Арутюняна — Москва: Наука, 2010.

100. ООО "ИГИТ", "Инженерно-геологические изыскания в пределах юго-восточного участка башен XVIII в. Свято-Боголюбовского монастыря, объектов культурного наследия ЮНЕСКО: Богородице-Рождественского собора и Лестничной башни и перехода палат Андрея Боголюбского," ООО "ИГИТ", Москва, Проектная документация 2015.

101. ООО "ИГИТ", "Выполнение расчетов устойчивости склона, примыкающего к юго-восточному участку стен и башен XVIII в. Свято-Боголюбского монастыря," Москва, 2015.

102. Буфеев Ф.К., Фоменко И.К., Сироткина О.Н. *Влияние методов интерполяции прочностных свойств грунтов на результаты расчета устойчивости склонов* // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — с. 127-133.

103. Вернадский В.И. *Несколько слов о ноосфере* // Философские мысли натуралиста. — 1988. — с. 503-512.

104. Котлов Ф.В. *Изменения природных условий территории Москвы* — Москва: Издательство Академии Наук СССР, 1962.

105. Огородникова Е.Н., Николаева С.К. *Техногенные грунты* — Москва: МГУ, 2004.

106. Котлов Ф.В. *Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека* — Москва: Недра, 1978.

107. Сергеев Е.М. *Общее грунтоведение* — Москва: МГУ, 1952.

108. ГОСТ 25100-2011 *Грунты. Классификация* — Москва: ФГУП "СТАНДАРТИНФОРМ", 2013.

109. Абелев Ю.М., Крутов В.И. *Строительство зданий и сооружений на насыпных грунтах* — Москва: Госстройиздат, 1962.

110. Лычко Ю.М. *Использование промышленных отходов для устройства оснований зданий и сооружений* // Серия 8. Строительные конструкции (обзорная информация). — 1982.

111. Насыров Б.Х. *Техногенные источники минерального строительного сырья* — Москва: Недра, 1993.

112. Худайбергенов А.М. *Инженерная геология городов правобережья р. Чирчика (Ташкент, Чирчик, Янгиюль)* — Ташкент: ФАН, 1980.

113. Спиридонов Д.В. Инженерно-геологические особенности техногенных отложений Западного КАТЭКа и методы их изучения // Автореф. дисс. на соискан. степени канд. геол.-минер. наук. — Москва, 1986.

114. Хазанов М.И. *Искусственные грунты, их образование и свойства* — Москва: Наука, 1975.

115. Дроздов Д.С. Выделение техногенных геологических тел при инженерно-геологическом картографировании и геоэкологических исследованиях // Геоэкологические исследования при инженерно-геологических съёмках. Сб. науч. тр. ВСЕГИНГЕО. — Москва, 1992. — с. 28-35.

116. ООО "ИГИТ", "Инженерно-геологические изыскания на территории Ново-Никольского собора и оползневом участке южного склона Никольской горы Можайского кремля," Москва, Технический отчёт 2013.

117. Кондратьев И.И. *История Можайского Кремля* — Москва: ТАУС, 2010. — 232 с.