

**На правах рукописи**

**БУФЕЕВ ФЕДОР КОНСТАНТИНОВИЧ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ, ПРИУРОЧЕННЫХ К  
СКЛОНАМ ИСТОРИЧЕСКИХ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ,  
СЛОЖЕННЫХ ТЕХНОГЕННЫМИ ГРУНТАМИ**

Специальность 25.00.08 - инженерная геология, мерзлотоведение и  
грунтоведение

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-  
минералогических наук**

Москва 2016

Работа выполнена на кафедре инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета имени С. Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ).

<b>Научный руководитель:</b>	<b>Пашкин Евгений Меркурьевич,</b> доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии МГРИ-РГГРУ
<b>Научный консультант:</b>	<b>Фоменко Игорь Константинович,</b> доктор геолого-минералогических наук, главный специалист по геотехнике ООО "Научно-производственный центр по инженерным изысканиям"
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Сергеев Сергей Валентинович,</b> доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией горного давления и сдвижения горных пород всероссийского научно-исследовательского института по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу (ОАО «ВИОГЕМ») <b>Зеркаль Олег Владимирович,</b> кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий МГУ имени М.В. Ломоносова.
<b>Ведущая организация:</b>	<b>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии» (ВСЕГИНГЕО)</b>

Защита диссертации состоится 22 сентября 2016 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.121.01 при Российском государственном геологоразведочном университете по адресу: г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, ауд. 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 117997, г. Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д.23, Российский государственный геологоразведочный университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.121.01.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2016 г.

**Ученый секретарь диссертационного совета,**  
доктор геолого-минералогических наук, доцент

**Ганова С.Д.**

### **Общая характеристика работы**

В настоящей работе автором рассматривается отдельный тип «оползней скольжения», приуроченных к историческим природно-техническим системам (ИПТС). Историческими называются природно-технические системы, в пределах которых осуществляется длительное 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» на 2010 год насчитывалось 5103 работы, изданных в России с середины XVIII века. Несмотря на огромное количество предложенных классификаций и методов прогноза развития оползневых процессов, на настоящий момент вопрос о достоверном количественном прогнозе их активизации остаётся 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.

Существуют определённые закономерности развития оползней скольжения, развивающихся в пределах исторических природно-технических систем. Они, в первую очередь, связаны с предзаданностью данного процесса на исторических территориях, перекрытых слоем техногенных накоплений большой мощности.

**Актуальность темы исследования** заключается в необходимости разработки специального подхода к изучению склонов, входящих в сферу взаимодействия исторических природно-технических систем. Эта потребность обусловлена участвующим 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. Каждый памятник архитектуры является уникальным, такой же неповторимостью отличаются природные условия каждого из них. Существуют определённые закономерности развития оползней скольжения, приуроченных именно к историческим территориям. Основным отличием 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.

**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.

**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 расчётов устойчивости.
- Разработана и апробирована методика оценки развития оползневого процесса в пределах ИПТС, сложенных техногенными грунтами

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

**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.

**Научная и методическая новизна работы заключается в следующем:**

1. Впервые произведено комплексное сравнение различных моделей распределения свойств грунтов в оползневом массиве.
2. Впервые произведена оценка зависимости результатов расчётов устойчивости склонов от выбора модели распределения свойств грунтов при моделировании оползневых процессов, развивающихся в пределах ИПТС.
3. Для модели полевого распределения свойств грунтов в оползневом массиве выполнен анализ влияния метода интерполяции на результаты расчётов устойчивости.

4. Предложена новая методика оценки устойчивости склонов в пределах исторических территорий, сложенных техногенными грунтами.

**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.

**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.

**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.

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.

**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: «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.

Диссертация выполнена в рамках научно-исследовательской работы (НИР) по гранту 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### **ГЛАВА 1 ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА И ЕГО ОПИСАНИЕ**

В данной главе рассмотрены основные этапы становления оползневедения в России, начиная с XVIII в. Определены главные термины, используемые при изучении оползней. Произведено сравнение различных определений и классификаций процесса. Определено место оползней скольжения в различных классификациях. Рассмотрены факторы, критерии и причины развития оползневого процесса, описан механизм развития оползней скольжения. Описаны особенности развития оползневого процесса в пределах ИПТС.

Впервые сведения об оползнях были опубликованы в конце XVIII - начале XIX вв. в монографиях, посвящённых Крыму, Одессе и Нижегородской губернии. В конце XIX-XX столетиях было предложено множество различных определений процесса, его классификаций. Разными авторами предлагались схемы описания механизма развития оползней. Исходя из этого, ими выделялись различные критерии, факторы причины и условия развития процесса.

Сделан основной вывод о том, что, несмотря на богатую историю изучения оползней, до сих пор не выработано единого взгляда на основные аспекты оползневедения. Это подтверждается большим количеством существующих определений, классификаций, представлений о причинах, факторах и критериях процесса, механизмах его развития, а также взглядами различных специалистов, занимающихся изучением оползней.

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. Поэтому в настоящее время инженеры-геологи часто сталкиваются с необходимостью изучения оползневых процессов, развивающихся в

пределах границ исторических природно-технических систем. И чаще всего оползневые процессы приурочены к техногенным грунтам, слагающим склоны.

## **ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ**

В данной главе выполнен анализ и сравнение методов оценки устойчивости склонов. Рассмотрены основные этапы развития расчётов устойчивости склонов. Особое внимание уделено методам предельного равновесия. Приведена их классификация. Рассмотрены основные группы методов предельного равновесия. Детально описана группа вертикальных отсеков. Дана характеристика каждой подгруппы, входящей в неё – методы, удовлетворяющие равновесию моментов, удовлетворяющие равновесию сил и удовлетворяющие равновесию моментов и сил.

Существует большое количество подходов к прогнозу оползневой опасности. В зависимости от характера и масштаба изысканий методы прогнозирования подразделяются на региональные и локальные. В настоящей работе основное внимание уделено методам математического моделирования оползневых процессов, относящимся к локальному прогнозированию развития процесса в масштабе исторических территорий.

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 адекватные реальным условиям формы. Этот процесс называется оптимизацией и играет важную роль в количественной оценке устойчивости склонов.

## **ГЛАВА 3 МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ РАСЧЁТЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ**

В данной главе рассмотрено качество отражения природных условий при построении геомеханических моделей. Описаны возможности применения различных моделей распределения свойств грунтов в массиве. Рассмотрены наиболее распространённые методы интерполяции при построении полей распределения свойств грунтов в массиве. Приведено детальное описание инженерно-геологических условий Боголюбского монастыря. Произведён анализ результатов расчётов устойчивости склона Боголюбского монастыря с применением различных моделей распределения свойств грунтов, различных методов расчётов устойчивости склонов,

различных методов интерполяции при построении полей распределения свойств грунтов в массиве.

Одним из главных этапов выполнения работ по количественной оценке устойчивости склонов является схематизация при построении геомеханической модели. Такого рода схематизация может быть обобщенной или специальной. Выполнение специальной схематизации можно разделить на два взаимосвязанных этапа: схематизацию структуры склона и схематизацию распределения свойств грунтов 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.

В результате схематизации происходит некоторое искажение и упрощение реального геологического строения, что при расчётах может привести к неверной оценке состояния склона.

Существует возможность использования различных подходов к распределению значений свойств грунтов в массиве. Рассмотрены пять принципиально отличающихся подходов к составлению модели:

1. Принятый в отечественной практике подход – в пределах выделенных расчётных грунтовых элементов (РГЭ) задаются расчётные характеристики свойств грунтов.
2. Принятый за рубежом подход – в пределах выделенных РГЭ задаются 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. Поле строится в пределах выделенных РГЭ;
4. Поле строится в пределах выделенных стратиграфо-генетических комплексов (СГК);
5. Поле строится в пределах всего массива без учёта литологических границ.

Детерминистические методы расчетов устойчивости склонов, применяемые в российской практике, учитывают изменчивость свойств грунтов через использование в математических моделях расчетных значений по выделенным инженерно-геологическим элементам. Коэффициенты устойчивости склонов, полученные на основании подобных расчётов, 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 – нахождение критической поверхности скольжения с минимальным коэффициентом устойчивости. Это связано с тем, что закладываемые в расчёт, формально уменьшенные, прочностные характеристики грунтов предопределяют не только заниженные итоговые значения коэффициентов устойчивости, но совсем другую – «расчётную» поверхность скольжения.

Ряда описанных 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. Суть анализа заключается в определении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости в зависимости от вероятностных функций распределения физико-механических свойств грунтов.

Минусом обоих подходов 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. При определённом уровне схематизации это вносит погрешность в отражение реальной картины. Особенно это существенно для техногенных грунтов, в силу их неоднородности.

Подходы с использованием пространственного распределения прочностных свойств 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.

Для расчётов устойчивости склонов по предлагаемым подходам значения характеристик задаются следующим образом. На геотехническую 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 задаётся поле распределения параметра. Здесь можно действовать в соответствии с одним из трёх предлагаемых подходов. Поле задаётся либо в пределах границ выделенных РГЭ, либо в пределах SGK, либо в пределах всего массива без учёта каких-либо границ.

Определяющим является вопрос выбора и обоснования применяемого метода интерполяции. При оптимальном подборе метода есть возможность сохранить структуру склонового массива. В программе Slide 6.0, в которой были выполнены расчёты, для интерполяции имеются в наличии методы Чага, Делоне, тонкого сплайна, обратных взвешенных расстояний.

Для оценки зависимости результатов расчётов устойчивости склонов от применяемой модели распределения свойств грунтов в массиве была выполнена серия расчётов с использованием метода Моргенштерна-Прайса. Расчёты производились с применением пяти описанных подходов к составлению модели возможного распределения свойств грунтов в оползневом массиве. В моделях с полевым распределением свойств грунтов использовался интерполяционный метод обратных взвешенных расстояний.

Расчёты с использованием всех моделей показали снижение значений коэффициентов устойчивости склона на 1-2% при расчёте по оптимизированной поверхности скольжения, что является закономерным. Значения эквивалентных объёмов (единичных объёмов потенциальных оползневых тел), рассчитанные по первому, второму и пятому подходам по круглоцилиндрической поверхности скольжения, отличаются менее чем на 1% а, по оптимизированной поверхности скольжения (по второму и пятому подходам) – на 2%, при равных коэффициентах устойчивости. Это позволяет сделать вывод о том, что в данном случае схематизация структуры склона с использованием интерполяционного метода обратных взвешенных расстояний по схеме, в которой не учитываются границы, позволяет сохранить структуру 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. Результаты расчётов сведены в табл. 1. Цифры в столбцах соответствуют обозначенным выше порядковым номерам пяти подходов к составлению модели возможного распределения свойств грунтов в оползневом массиве. В ячейках указаны значения коэффициентов устойчивости, в скобках приведены значения эквивалентных объёмов.

таблица 1

**Результаты расчётов устойчивости склона в Боголюбово по  
круглоцилиндрической и оптимизированной поверхностям скольжения**

Форма поверхности скольжения \ Расчётная схема	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)

Для оценки зависимости результатов количественной оценки устойчивости склонов от применяемого метода расчёта была выполнена серия расчётов с использованием упрощённых методов Бишопа и Янбу, а также метода Morgenstern-Price. Расчёты производились с применением описанных пяти подходов к составлению модели возможного распределения свойств грунтов в оползневом массиве по круглоцилиндрической поверхности для исключения влияния оптимизации на положение поверхностей скольжения. Для интерполяции прочностных свойств грунтов в дискретных моделях использовался метод обратных взвешенных расстояний.

Анализ полученных результатов показывает, что положение поверхностей скольжения и потенциальные объёмы оползневых тел, рассчитанные по методам Бишопа и Morgenstern-Price, наиболее близки. Вне зависимости от применяемой модели распределения свойств грунтов значение коэффициента устойчивости, определяемое по методу Янбу, является наименьшим, а по методу Morgenstern-Price наибольшим. При этом значения, рассчитанные по методам Бишопа и Morgenstern-Price отличаются не более чем на 2%. Результаты расчётов приведены в табл. 2. Цифры в столбцах соответствуют обозначенным выше порядковым номерам пяти подходов к составлению модели возможного распределения свойств грунтов в оползневом массиве. В ячейках указаны значения

коэффициентов устойчивости, в скобках приведены значения эквивалентных объёмов.

таблица 2

**Результаты расчётов устойчивости склона в Боголюбово с применением различных расчётных методов**

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

Для оценки зависимости результатов расчётов устойчивости склонов от применяемого метода интерполяции значений свойств грунтов была выполнена серия расчётов с использованием метода Моргенштерна-Прайса. Для сравнения различных методов интерполяции в расчётах использовались подходы с распределением свойств грунтов в пределах СГК и во всём массиве без выделения границ.

Анализируя результаты можно сделать следующие выводы. Результаты расчётов моделей с полевым распределением свойств грунтов с использованием интерполяционных методов обратных взвешенных расстояний и Делоне показывают результаты, близкие к полученным при расчётах общепринятыми методами. Это говорит о принципиальной возможности осуществления подобных расчётов. Наиболее точные результаты были получены при использовании интерполяционного метода обратных взвешенных расстояний по второму и четвёртому подходам.

Результаты расчётов сведены в табл. 3. В ячейках указаны значения коэффициентов устойчивости, в скобках приведены значения эквивалентных объёмов. В столбцах с результатами расчётов с использованием полевого распределения верхнее значение соответствует подходу с распределением свойств грунтов в пределах СГК, нижнее – подходу без выделения каких-либо границ.

**Результаты расчётов устойчивости склона в Боголюбово с применением  
различных методов интерполяции**

Форма поверхности скольжения	Расчётная схема	Расчётные значения свойств	Нормативные значения свойств	Полевое распределение свойств с интерполяцией по различным методам			
				Обратных взвешенных расстояний	Делоне	Чага	Тонкого сплайна
Круглоцилиндрическая		1,03 (335)	1,17 (327)	<u>1,15 (421)</u> <u>1,20 (330)</u>	<u>1,19 (306)</u> 1,06 (270)	<u>1,26 (234)</u> 0,80 (354)	<u>1,23 (229)</u> 0,92 (447)
Оптимизированная		1,01 (370)	1,16 (340)	<u>1,14 (421)</u> <u>1,16 (348)</u>	<u>1,16 (316)</u> 1,03 (314)	<u>1,21 (247)</u> 0,69 (370)	<u>1,20 (273)</u> 0,89 (456)

По результатам расчётов можно сделать следующие выводы. Применение подхода с построением поля распределения прочностных свойств грунтов в пределах РГЭ недопустимо при существующих нормах отбора проб. Это связано с невозможностью оконтуривания каждого РГЭ и, следовательно, с непредсказуемостью результатов экстраполяции свойств грунтов до границ РГЭ, пробы из которых отобраны далеко от их границ. Но при большом количестве проб, вследствие того, что пространственное распределение грунтов является подмножеством статистического, этот подход может служить уточняющим результаты расчётов с использованием классических подходов. Однако пока обоснование минимального количества проб для применения данного подхода не разработано, его применение на практике не может быть рекомендовано.

Применение подхода с построением поля распределения прочностных свойств грунтов в пределах СГК допустимо, но имеет ограничения. Они, как и в предыдущем случае, в первую очередь, связаны с экстраполяцией. Следовательно, для применения этого подхода необходимо отбирать большое количество проб у границ каждого СГК. Применение данного подхода, по мнению автора, является единственно возможным 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. Таким образом, вопрос интерполяции значений прочностных свойств в пределах склона снимается. Для других генетических типов появляются те же ограничения, что и для подхода с интерполяцией в пределах РГЭ.

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.

На приведённых выше результатах основывается первое защищаемое положение: 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).

Второе защищаемое также основывается на приведённых результатах: Показана необходимость обоснования применяемого метода интерполяции при использовании моделей с полевым распределением свойств грунтов.

То есть при применении предлагаемых подходов необходимо обосновывать применяемый метод интерполяции, в зависимости от геолого-структурных особенностей склона и объёма опробования.

#### **ГЛАВА 4 ИЗУЧЕНИЕ СКЛОНОВ В ПРЕДЕЛАХ ИПТС**

В данной главе дана подробная характеристика техногенных грунтов, рассмотрены их различные классификации. Определено место техногенных грунтов, залегающих в пределах склонов ИПТС. Рассмотрено влияние антропогенного литогенеза на изменение инженерно-геологических условий ИПТС. Приведено детальное описание инженерно-геологических условий Никольской горы Можайского кремля. Произведён анализ результатов расчётов устойчивости южного склона Никольской горы.

В инженерной геологии отдельным направлением является изучение исторических территорий. 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.

Исторические территории, как правило, отличаются повышенной мощностью техногенных накоплений. Их наличие требует специального подхода к изучению инженерно-геологических условий. 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. Поэтому в настоящее время

инженеры-геологи часто сталкиваются с необходимостью изучения оползневых процессов, развивающихся в пределах границ исторических природно-технических систем.

Эволюционные преобразования рельефа исторических территорий начались с постройкой первых сооружений. Выразалось 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 и происходит накопление техногенных грунтов, мощность которых, порой, превышает 10 метров.

Значения показателей физико-механических свойств техногенных грунтов, залегающих в пределах ИПТС, сильно отличаются от прочих, образованных в природе грунтов. Это, в первую очередь, связано с условиями их образования. Где-то был туалет, где-то могила, где-то яма для «забивки» извести, где-то слой пожара или куча перегноя. Распределение свойств в техногенных грунтах очень сложное из-за их неоднородности, обусловленной историей формирования, установить которую практически невозможно. Поэтому выделение различных по физико-механическим свойствам слоёв и задание в их пределах усреднённых значений характеристик крайне затруднительно.

На настоящий момент существует большое количество различных классификаций техногенных грунтов. Эти классификации подразделяются на региональные, частные и общие. В данной главе рассмотрены различные классификации техногенных грунтов. Определено место техногенных грунтов, залегающих в пределах склонов ИПТС. Согласно классификации Е.Н. Огородниковой они относятся к классу техногенно-переотложенных, группе сформировавшихся в результате строительной деятельности, подгруппе насыпных, типам грунтов земляных сооружений и грунтов, подготовленных для строительства территорий.

Е.М. Пашкиным был введён термин «предзаданность», то есть совокупность условий, служащих признаком, предвещающим приближение событий, явлений,

реализация которых обусловлена условиями предшествующих событий. Раскрытие этого понятия для оползневых процессов, приуроченных к историческим территориям, необходимо. Первая группа факторов, объединяющих условия оползнеобразования (по Е.П. Емельяновой), является набором условий предшествующих событий, которые определяют среднюю величину коэффициента устойчивости склона. 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 предопределённой поверхности. Преопределённая, предзаданная поверхность скольжения наиболее часто располагается на границе коренных и техногенных грунтов, то есть в пределах «слабого звена».

Всё вышеперечисленное требует разработки специального подхода к изучению подобных оползневых склонов.

Для сравнения различных моделей распределения прочностных свойств в техногенных грунтах была произведена серия расчётов на примере объекта культурного наследия федерального значения - южного склона Никольской горы Можайского кремля. В апреле 2013 года в нескольких метрах от юго-западного угла Ново-Никольского 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. По результатам изысканий были определены факторы, критерии и причины оползневого процесса, развивающегося в пределах склона. По результатам фактического обследования при инженерно-геологических изысканиях 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 залежали в подошве сошедшего оползня.

Расчёты устойчивости склона производились на примере профиля, в пределах которого наблюдалась максимальная изменчивость литологического состава. За левую границу потенциального оползневого тела была принята внешняя грань неподвижной подпорной стенки глубиной около 10 м. Расчёты производились по оптимизированной поверхности скольжения с использованием следующих 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 техногенных строилось поле распределения.

При реализации третьей модели были использованы две выборки прочностных свойств грунтов. Первая состояла из значений прочностных свойств техногенных грунтов, определённых на пробах, которые были отобраны из изучаемого профиля. Вторая выборка, включающая в себя первую, состояла из значений прочностных свойств техногенных грунтов, определённых на пробах, которые были отобраны в пределах всего склона. Значения сцепления и угла внутреннего трения, составляющие вторую выборку, согласно критерию Шапиро-Уилка распределены нормально. Значения сцепления, составляющие первую выборку, согласно тому же критерию распределены нормально, а угла внутреннего трения – нет.

Результаты расчётов сведены в таблицу 4. Номер столбца соответствует номеру расчётной модели. В ячейках указаны значения коэффициентов устойчивости, в скобках приведены значения эквивалентных объёмов потенциальных оползневых тел.

Сравнение результатов расчётов по методам Бишопа, Ямбу и Morgenштерна-Прайса показывает, что максимальное значение эквивалентного объёма получилось при использовании второй расчётной модели, что объясняется уходом поверхности с границы коренных и техногенных грунтов в нижележащие супеси, имеющие более низкие значения прочностных свойств.

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. При использовании моделей с полевым распределением прочностных свойств грунтов в пределах СГК техногенных накоплений результаты достаточно близки к результатам расчётов по первой модели с распределением прочностных свойств в пределах профиля.

таблица 4

### Результаты расчётов устойчивости склона в Можайске

Метод расчёта		Расчётная схема	1	2	3			
					Делоне	Чага	Тонкого сплайна	обратных взвешенных расстояний
Бишопа	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)					

Для оценки влияния количества проб на результаты оценки устойчивости склонов с использованием различных методов интерполяции была проведена серия расчётов по методу Моргенштерна-Прайса. Основная идея заключалась в уменьшении количества проб в скважинах и сравнении полученных результатов с исходными (определёнными при наличии всех проб). Для этого было выполнено по 12 расчётов с использованием каждого метода интерполяции. Всего в пределах

профиля было пробурено 4 скважины. В слое техногенных накоплений из верхней скважины было отобрано четыре пробы, из второй сверху – пять, из третьей и четвертой – по три (всего 15 проб).

таблица 5

**Результаты расчётов устойчивости склона в Боголюбово с применением различных расчётных методов**

Метод интерполяции	Делоне	Чага	Тонкого сплайна	Обратных взвешенных расстояний
Исходное значение	1,08 (105)	1,07 (103)	1,12 (110)	1,14 (102)
–3 пробы (по одной нижней пробе из 3-х верхних скважин)	0,98 (91)	0,96 (89)	1,07 (95)	1,16 (108)
–3 пробы (по одной нижней пробе из 3-х нижних скважин)	1,12 (106)	1,11 (99)	1,13 (102)	1,16 (104)
–3 пробы (по второй снизу пробе из 3-х верхних скважин)	1,11 (104)	1,17 (189)	1,14 (110)	1,15 (117)
–3 пробы (по второй снизу пробе из 3-х нижних скважин)	1,12 (118)	1,07 (97)	1,12 (113)	1,18 (117)
–6 проб (по две нижних пробы из 3-х верхних скважин)	0,98 (115)	0,98 (115)	1,01 (125)	1,19 (119)
–6 проб (по две нижних пробы из 3-х нижних скважин)	0,73 (128)	0,73 (128)	0,89 (128)	1,16 (117)
–11 проб (только верхняя скважина)	–	1,14 (94)	–	1,18 (103)
–4 пробы (без верхней скважины)	0,93 (90)	0,96 (95)	1,15 (142)	1,19 (118)
–5 проб (без второй сверху скважины)	1,15 (66)	1,12 (72)	1,12 (74)	1,11 (101)
–3 пробы (без третьей сверху скважины)	1,12 (110)	1,12 (112)	1,05 (127)	1,18 (114)
–3 пробы (без нижней скважины)	1,09 (103)	1,06 (104)	1,10 (107)	1,15 (101)
–8 проб (без двух средних скважин)	1,17 (188)	1,17 (189)	1,11 (187)	1,18 (98)

Расчёты с использованием методов Делоне и тонкого сплайна по при наличии только одной скважины невозможны в связи с ограничениями методов по расположению проб. Также стоит отметить сильное изменение значений эквивалентных объёмов (отражающих положение поверхностей скольжения) и коэффициентов устойчивости при использовании методов Делоне, Чага и тонкого сплайна. Это говорит о сильном влиянии количества проб и их местоположения на результаты расчётов с использованием данных методов. При расчётах с использованием метода обратных взвешенных расстояний значения эквивалентных объёмов изменяются меньше всего при изменении количества проб.

На приведённых результатах также основывается второе защищаемое положение: 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.

Исходя из результатов расчётов, автором предлагается использовать следующую методику для расчёта устойчивости оползней скольжения в пределах ИПТС, которая выносится на защиту.

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. Наличие подобных прослоев характерно 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 у кровли и подошвы. Из маломощных прослоев (менее 20 см) допустимо отбирать одну пробу.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Необходимость изучения оползневого процесса в пределах ИПТС не вызывает сомнения. Каждый памятник архитектуры является уникальным, также неповторимостью отличаются природные условия каждого из них. Существуют особые закономерности развития оползней скольжения, приуроченных именно к историческим природно-техническим системам. Они обусловлены предзаданностью данного процесса на территориях, покрытых слоем техногенных накоплений.

В настоящей работе впервые рассмотрены различные подходы к распределению свойств грунтов в массиве. На примере объекта всемирного наследия ЮНЕСКО – Боголюбского монастыря произведён сравнительный анализ результатов расчётов устойчивости склонов с применением сформулированных пяти подходов. Произведено сравнение результатов расчётов с использованием различных методов интерполяции свойств грунтов при использовании полевых подходов с построением поля распределения свойств грунтов.

Анализ результатов позволил сделать выводы о возможности использования подходов с построением полей распределения свойств грунтов в пределах стратиграфо-генетических комплексов, в пределах которых объём опробования позволяет осуществлять интерполяцию. Также, при достаточном количестве проб, допустимо рассчитывать однородные склоны без выделения границ в их пределах.

На примере южного склона Никольской горы Можайского кремля было произведено сравнение результатов расчётов устойчивости при использовании различных подходов к заданию свойств грунтов в пределах стратиграфо-генетического комплекса техногенных накоплений. Данный SGK обладает сильной неоднородностью, характер которой является индивидуальным для каждого склона. В силу этой особенности, его более дробное расчленение представляет большую сложность.

Также было произведено сравнение влияния количества и местоположения проб на результаты расчётов с использованием различных методов интерполяции для построения поля распределения прочностных свойств грунтов в массиве.

Предложенная автором методика позволит рассчитывать склоны исторических природно-технических систем, верхняя часть которых сложена техногенными накоплениями.

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.

### Публикации

#### *Публикации в журналах из перечня ВАК*

1. Буфеев Ф.К., Кувшинников В.М., Фоменко И.К. Зависимость результатов количественной оценки устойчивости склонов от выбора модели распределения свойств грунтов. *ГеоРиск*, № 4, 2015. С. 37-40.
2. Буфеев Ф.К., Фоменко И.К., Влияние методов расчёта и моделей распределения свойств грунтов на результаты количественной оценки устойчивости склонов. // — Москва: "Известия высших учебных заведений: Геология и разведка", №2, 2016. С. 33-38.
3. Буфеев Ф.К., Фоменко И.К., Сироткина О.Н. Влияние методов интерполяции прочностных свойств грунтов на результаты расчета устойчивости склонов. *Международный научно-исследовательский журнал* ▪ № 4 (46) ▪ Часть 6 ▪ Апрель 2016. С. 127-133.

#### *Доклады и тезисы на международных и российских конференциях*

4. Кувшинников В.М., Пономарев В.В., Демкин И.А., Бондарев М.В., Буфеев Ф.К. Опыт исследования и локализации оползневых процессов на исторических территориях Московской области // *Материалы X Общероссийской конференции изыскательских организаций: Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации*. Москва, 2014. С. 155.
5. 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.
6. Буфеев Ф.К., Демкин И.А., Кувшинников В.М., Пономарев В.В. Опыт усиления оползневых склонов на исторических территориях // *Сборник тезисов 6-го Международного научно-практического симпозиума: Природные условия строительства и сохранения храмов Православной Руси* Сергиев-Посад. 2015. С. 121-122.
7. Буфеев Ф.К., Кувшинников В.М., Фоменко И.К. Оценка зависимости результатов расчётов устойчивости склонов на исторических территориях от применяемой модели распределения свойств грунтов в массиве (на примере южного склона Свято-Боголюбского монастыря в Боголюбове) // *Материалы XI Общероссийской конференции изыскательских организаций: Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации*. Санкт-Петербург, 2015. С. 294.

8. Буфеев Ф.К., Фоменко И.К. Оценка зависимости результатов расчётов устойчивости склонов от применяемой модели распределения свойств грунтов и метода расчёта. В сборнике: «Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. Юбилейная конференция, посвященная 25-летию образования ИГЭ РАН.» Ответственный редактор В.И. Осипов . Москва, 2016. С. 584-588.

9. Буфеев Ф.К. О зависимости результатов расчётов устойчивости склонов от выбора модели и расчётной схемы // доклады VIII международной научной конференции аспирантов и молодых учёных «Молодые – наукам о земле». МГРИ-РГГРУ, Москва. 2016. С. 330-332