



М И С И

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ

МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ

В.В. Симонян

**МЕТОДОЛОГИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
СКЛОНОВЫХ СИСТЕМ**

ISBN 978-5-7264-3524-4

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2024

Москва
Издательство МИСИ – МГСУ
2024

СЕРИЯ ОСНОВАНА В 2008 ГОДУ

Рецензенты:

доктор технических наук *А.П. Сизов*,
профессор кафедры землеустройства и кадастров
Московского государственного университета геодезии и картографии;
доктор технических наук, доцент *И.Ю. Евграфова*,
профессор кафедры инженерных изысканий и геоэкологии НИУ МГСУ

Монография рекомендована к публикации научно-техническим советом НИУ МГСУ

Симонян, Владимир Викторович.

С37

Методология геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов склоновых систем : монография / В.В. Симонян ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, кафедра инженерных изысканий и геоэкологии. — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2024 (Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ). — 184 с.

ISBN 978-5-7264-3524-4

В монографии на основе оригинальных исследований автора и обширного опубликованного отечественного и зарубежного материалов рассматриваются теоретические и практические аспекты оползневедения с акцентом на ключевую проблему — методологию геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов склоновых систем для нового решения актуальной научной проблемы — оценки степени оползневой опасности и уровня безопасности склоновых систем.

Рассмотрены и проиллюстрированы на конкретных примерах современные направления методов постановки геодезического мониторинга оползневых процессов, геодезическая основа математической модели обобщенного среднеквадратического эллипсоида смещений оползней, теоретические основы постановки инженерно-геодезических изысканий и геодезического мониторинга на оползневых склонах, методология математического моделирования и оценки рисков в склоновых системах в условиях воздействия геодинамических факторов, результаты экспериментальных работ по исследованию смещений оползней.

Для научных работников и специалистов-практиков в области инженерной геодезии и гео-техники, а также для аспирантов и обучающихся геодезических и строительных вузов.

УДК 528.48
ББК 26.117

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ СКЛОНОВЫХ СИСТЕМ И ИХ БЕЗОПАСНОСТИ.....	9
1.1. Проблемные вопросы комплексной оценки оползневых рисков и обеспечения оползневой безопасности склоновых систем	9
1.1.1. Общие вопросы проблемы оценки рисков оползневого характера.....	9
1.1.2. Структурные особенности оценки риска в сложных склоновых системах	11
1.1.3. Факторы оползнеобразования и спектр смещений на оползневых склонах.....	16
1.2. Состояние разработки проблемы геодезического обеспечения мониторинга и безопасности инженерных сооружений на оползнеопасных территориях	24
1.2.1. Анализ существующих геодезических методов оценки и обеспечения безопасности инженерных сооружений на оползнеопасных территориях.....	24
1.2.2. Современная концепция совершенствования геодезических методов контроля за состоянием объектов инженерной геодинамики на оползневых территориях	26
Глава 2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВЫХ РИСКОВ В СКЛОНОВЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ФАКТОРОВ.....	29
2.1. Методы прогнозирования оползневых опасностей и оценки вызываемых ими рисков	29
2.2. Анализ существующих методов оценки оползневых опасностей	30
2.2.1. Качественный региональный прогноз оползневой опасности.....	30
2.2.2. Количественный региональный прогноз оползневой опасности.....	31
2.2.3. Количественный локальный прогноз оползневой опасности	34
2.3. Сравнительный анализ численных критериев эффективности различных методов оценки опасных оползневых процессов	35
2.4. Методика анализа оползневой устойчивости среды склоновых систем	41
Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОСТАНОВКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ	45
3.1. Особенности постановки геодезического мониторинга оползневых процессов.....	45
3.2. Современные геодезические средства и методы мониторинга оползней.....	46
3.3. Обоснование точности геодезических наблюдений деформаций оползней	49
3.4. Обоснование периодичности геодезических наблюдений деформаций оползней	51
3.5. Разработка методов создания опорной геодезической сети на склоновых территориях.....	53
3.5.1. Метод полигонометрии.....	53
3.5.2. Линейно-угловые сети.....	59
3.6. Обоснование точности наблюдений деформаций зданий и сооружений, возведенных на склоновых территориях	69
3.7. Корректировка расчетных характеристик грунтов по данным геодезического мониторинга.....	73
Глава 4. ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБОБЩЕННОГО СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЭЛЛИпсоИДА СМЕЩЕНИЙ ОПОЛЗНЕЙ.....	76
4.1. Механико-математическая модель устойчивого равновесия оползня	76
4.2. Механико-математическая модель устойчивого равновесия оползня с цилиндрической поверхностью скольжения	78
4.3. Комплексный подход к определению устойчивого равновесного состояния оползня	81
4.4. Теоретическое обоснование построения математической модели в виде обобщенных среднеквадратических эллипсоидов смещений оползней	85

Глава 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТАНОВКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ И ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНАХ	90
5.1. Методика расчета силы и ускорения оползня. Критерий оценки устойчивости оползня	90
5.2. Вероятностный анализ потенциальных возможностей оползневых смещений	97
5.3. Учет влияния сейсмического воздействия на скорость смещения оползней	101
5.4. Учет влияния атмосферных осадков на скорость смещения оползней	103
Глава 6. МЕТОДОЛОГИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ РИСКОВ В СКЛОНОВЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ФАКТОРОВ	105
6.1. Алгоритм комплексной оценки рисков в склоновых системах, подвергающихся воздействию оползневых факторов	105
6.2. Процедура оценки степени оползневого риска и уровня безопасности склоновых систем	107
6.2.1. Определение интегрального критерия уровня оползневой опасности	108
6.2.2. Определение интегрального критерия уровня оползневой уязвимости	115
6.2.3. Категории степени оползневого риска	122
6.3. Оценка степени оползневого риска районов и регионов (ранжирование оползневой безопасности)	122
6.4. Прогноз скорости смещения оползней как основа для прогнозирования оползневых рисков	123
6.5. Определение допустимого уровня оползневого риска	125
6.6. Социально-экономические аспекты управления оползневым риском	126
Глава 7. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СМЕЩЕНИЙ ОПОЛЗНЕЙ	128
7.1. Общая характеристика экспериментального оползневого склона	128
7.2. Построение обобщенных среднеквадратических эллипсоидов смещений оползней на примере Карамышевского оползня	128
7.3. Построение автокорреляционных функций и их анализ	135
7.4. Расчеты напряженно-деформированного состояния склонов с учетом ползучести грунтов основания на примере Карамышевского оползня	145
7.5. Геомеханическая модель Карамышевского склона с учетом результатов геодезического мониторинга	148
7.6. Применение геомеханической модели склона для выбора типа проектируемого фундамента сооружения	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	155
Библиографический список	156
ПРИЛОЖЕНИЯ	169

ВВЕДЕНИЕ

Происходящее в нашей стране реформирование проектно-испытательских работ, связанное с изменением законодательства и введением в действие Федерального закона № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а также принятое направление о гармонизации российских нормативных документов с международными стандартами заставляют по-новому взглянуть на состояние инженерно-геодезических исследований. Это в полной мере относится и к задачам оценки рисков застроенных склоновых территорий и уровня их безопасности. Заслуги отечественной инженерно-геодезической школы, ее вклад в решение задач по определению оползневых подвижек трудно переоценить. Однако следует отметить, что данное направление в России практически не развивалось. Доказательством этому служат нормативные документы, например СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов», разработанные в 50–70-х годах прошлого столетия и в которых ничего не сказано об оценках рисков.

Значительный ущерб, приносимый оползнями, разнообразие, сложность и многофакторность оползневого процесса делают задачу его познания на основе построения математических моделей по геодезическим данным очень важной.

Всемирная комиссия ООН по окружающей среде и развитию ввела в 1987 году в обиход термин *устойчивое развитие*, понимая под этим способность системы «природа – человеческое общество» возобновлять и совершенствовать свои жизненные и ресурсные потенциалы в условиях неблагоприятного антропогенного и природного воздействия на геосферы Земли. В Российской Федерации в 1996 году была принята концепция *устойчивого развития территорий* [159]. При этом весьма значимыми и актуальными встают вопросы, которые исходят от геологической составляющей окружающей среды (оползневые опасности или риски) [175; 191]. Следовательно, гарантия безопасности сооружений на склоновых территориях и населения, их защищенность от оползневых процессов есть одно из неперенных условий для устойчивого развития территорий.

Геодезические наблюдения на оползневых склонах — это один из важнейших методов инженерной геодинамики, основными задачами которых являются определение изменения взаимного положения точек на поверхности склона, а также элементов зданий и сооружений. Проведение наблюдений на оползневых склонах обеспечивает решение двух основных задач инженерной геодинамики: изучение механизма и динамики оползневого процесса и обеспечение безопасности зданий и сооружений (объекты инженерной геодинамики).

Важнейшей характеристикой геодинамических объектов является их напряженно-деформированное состояние (НДС), так как при достижении некоторого критического значения напряжений может произойти резкое изменение структуры объекта, свойств и т.п., вызывающее нежелательные и даже катастрофические для людей последствия [67]. Поэтому информация о движениях и НДС оползней, обусловленных экзогенными факторами, является важнейшей в аспекте прогноза смещений оползней. Вопросы о своевременном выявлении НДС грунта и оползневых деформаций на различных склоновых территориях и их влияния на здания и сооружения требуют настоящего изучения.

Оползни наносят значительный материальный ущерб. Чаще всего оползни случаются в Азии. В Японии, к примеру, ущерб от оползней колеблется от 4 млрд до 6 млрд долларов в год. В США, где установлено около 20 млн оползней, ежегодный ущерб от оползней составляет от 2 млрд до 2,5 млрд долларов. Ликвидация последствий одного единственного оползня в среднем обходится Европе в 23 млн долларов [78]. ЮНЕСКО в 2007 году объявила об активизации борьбы с оползнями.

Согласно [45] в мире за период с 2002 по 2013 год от оползней погибли 89 177 человек, т.е. в среднем жертвами оползней во всем мире становятся почти 9000 человек в год.

В Российской Федерации событий, связанных с оползнями, ежегодно случается от 6 до 15 раз. Так, практика последних десятилетий в области строительства показывает, что под строительные площадки нередко отводятся склоновые территории без предварительного исследования их на возможное развитие оползневой опасности. Очевидно, однако, что строительные работы и возведенные сооружения приводят к изменению НДС грунтов склона, к возможному развитию опасного оползневой опасности и, как следствие, к возникновению чрезвычайной ситуации: к разрушению сооружений и реальной угрозе для жизни людей.

Размер ущерба от протекания опасных оползневых процессов, причиняемого населению, промышленным предприятиям, жилым массивам, весьма значителен. На масштаб катастроф влияет степень застроенности территории. Так, по данным академика В.И. Осипова, суммарный ежегодный ущерб от оползней, селей и обвалов в стране составляет не менее 1 млрд долларов в год [79]. Следовательно, вопросы своевременного выявления НДС грунта и оползневых деформаций на различных склоновых территориях, количественной оценки их динамики и возможного влияния на здания и сооружения требуют настоящего изучения. Поэтому проблема геодезического обеспечения мониторинга оползневых процессов стала особенно актуальной в настоящее время из-за увеличения аварий и катастроф.

Имеющиеся традиционные методики качественного описания не могут дать решения обозначенных выше проблем и задач. Только количественные оценки оползневых опасностей и вызываемого ими риска могут дать решение таких задач и проблем. Но для этого необходимо проведение геодезического мониторинга. Основное требование, предъявляемое к нему, — максимальная точность, а это требует в каждом конкретном случае индивидуального подхода как к выбору методики таких наблюдений, так и к технологии их выполнения. Современные геодезические средства наблюдений обеспечивают возможность выполнения геодезического мониторинга на склоновых территориях с достаточной точностью и в комплексе с компьютерной обработкой результатов наблюдений создают предпосылки к разработке новых методов геодезического обеспечения мониторинга оползневых процессов. Однако применяемые в настоящее время методы геодезического мониторинга не удовлетворяют современным требованиям и дают возможность только прогнозировать либо смещение оползня, либо осадки зданий и сооружений, либо горизонтальные перемещения зданий и т.д., т.е. используются раздельно в зависимости от объекта наблюдений. Поэтому никогда и не ставилась задача по оценке риска и уровня безопасности склоновых территорий на основе применения геодезических методов. То есть не рассматривалась проблема создания единой унифицированной методологии геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых территорий.

В связи со значительным ущербом, наносимым строительной среде как в нашей стране, так и за рубежом, в результате возникновения различных оползневых опасностей настоящая работа направлена на создание методологии геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов для решения задач по обеспечению безопасности сооружений различной типологии на оползневых склонах, подвергающихся воздействию оползневых факторов.

Решение проблем геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов и решения задач по безопасности застроенных склоновых территорий от опасных оползневых процессов и комплексной оценки риска с позиций системного подхода определим на уровне склоновых систем.

Склоновые территории относятся к сложным распределенным природно-техническим системам, назовем их «склоновыми системами». Под *склоновой системой* (СС) будем понимать комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих между собой в пределах строго определенной склоновой территории природных и техногенных объектов, природных и антропогенных ресурсов и коммуникационных элементов, обеспечивающий посредством выработанных человеком правил и существующих в природе законов протекание на склоновой территории

процессов, направленных на поддержание устойчивого существования и безопасного развития человеческого сообщества.

Задачи обеспечения безопасности и комплексной оценки оползневых рисков в СС — это задачи стратегического характера. Решение таких задач невозможно без снятия ряда неопределенностей, которые сами представляют довольно сложную проблему. Это:

- неполнота информации о пространственно-временном распределении внешних воздействий на склоновую систему;
- неполнота информации о состоянии сложных склоновых систем;
- неопределенность в поведении склоновых систем.

Устранение отмеченных неопределенностей в контексте оползневых опасностей должно основываться на решении следующих задач:

- обеспечение геодезического мониторинга деформационных процессов СС (главная задача, без которой невозможно решить другие задачи);
- выявление факторов оползневого риска;
- количественная оценка оползневого риска;
- ранжирование склоновых территорий по степени оползневого риска;
- прогнозирование оползневых рисков и исследование их динамики;
- разработка стратегии обеспечения оползневой безопасности и устойчивого развития СС.

Исследования по изучению оползневых процессов соответствуют приоритетным направлениям развития науки и техники РФ, в частности направлению «Экология и рациональное природопользование», имеют научное и практическое значение. Научное значение таких исследований заключается в получении новых знаний о динамике оползневых процессов, об их строении, эволюции и т.д. Важнейшим практическим значением изучения оползневых процессов является решение задач прогноза, снижения риска и уменьшения последствий оползневых катастроф природного или техногенного характера, мониторинга окружающей среды. Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера включены в перечень приоритетных задач, утвержденный Указом Президента РФ от 7 июля 2011 года № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации».

Вместе с тем повышается необходимость совершенствования теоретических положений и методов, методик, алгоритмов и технологий изучения оползневых процессов на основе моделирования, меняющихся во времени геодезических параметров (смещения, закономерности движений, поля деформаций). При этом возникает потребность в строгом подходе к комплексной математической обработке разнородных геодезических наблюдений. Важной является разработка новых технологических решений по информативной и наглядной визуализации результатов математической обработки [67].

Из сказанного выше следует, что с позиций системного подхода назрела необходимость в создании новой методологии геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных СС, которая должна комплексно рассматривать и решать вышеназванные проблемы и соответствующие им задачи, и на основе эффективного применения геодезических методов разрабатывать новые стратегии обеспечения безопасного и устойчивого развития склоновых систем.

Монография состоит из введения, семи глав, заключения и приложения. Во введении дается анализ оползневых процессов на застроенных склоновых территориях как объектов геодинамических наблюдений и делается вывод о необходимости создания методологии геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов для решения задач по обеспечению безопасности сооружений различной типологии на оползневых склонах, подвергающихся воздействию оползневых факторов. В первой главе рассматриваются задачи по геодезическому обеспечению мониторинга природно-техногенных склоновых систем

и их безопасности. Во второй главе описываются существующие методы оценки оползневых рисков в склоновых системах в условиях воздействия оползневых факторов и предлагается методика сравнительного анализа численных критериев эффективности различных методов оценки опасных оползневых процессов. В третьей главе разрабатываются методы постановки геодезического мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем. В четвертой главе рассматриваются вопросы создания обобщенных среднеквадратических эллипсоидов смещений оползней. В пятой главе даются теоретические основы постановки инженерно-геодезических изысканий на оползневых склонах. В шестой главе приводится описание методологии математического моделирования и оценки рисков в склоновых системах. В седьмой главе показаны результаты реализации экспериментальных работ по исследованию оползневых смещений на конкретном оползневом склоне.

Работа выполнена по материалам диссертационной работы «Методология геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем» на кафедре инженерных изысканий и геоэкологии НИУ МГСУ.

Автор выражает глубокую признательность доктору технических наук, профессору В.В. Волкову и доктору технических наук, профессору А.Г. Тамразяну.

Глава 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ СКЛОНОВЫХ СИСТЕМ И ИХ БЕЗОПАСНОСТИ

1.1. ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВЫХ РИСКОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПОЛЗНЕВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СКЛОНОВЫХ СИСТЕМ

1.1.1. Общие вопросы проблемы оценки рисков оползневой опасности

Известно, что под *оползневой опасностью* понимают оползневый процесс в отношении вероятностной возможности его проявления [3; 90].

В качестве меры опасности используют такое понятие, как *риск*, — предполагаемый негативный результат взаимодействия природной, техногенной или антропогенной среды с природными или природно-техногенными объектами.

Такое представление о риске отражает вероятностный характер разворачивания оползневого процесса и ставит его на ступень выше, чем понятие опасности. В самом деле, при анализе риска мы должны учитывать не только вероятность проявления оползневой опасности, но и его последствия, т.е. необходимо заранее учитывать тот материальный ущерб, который может быть причинен этим процессом [95; 99].

Следовательно, говоря о риске, нужно уметь оценивать *степень риска* — комплексную меру сравнения нормально и аномально протекающих или развивающихся процессов и явлений, структурно сочетающие в себе факторы риска и уровня материального ущерба, причиняемые ими [97].

При этом под *фактором риска* понимают признак, который самостоятельно связан с вероятностью возникновения негативного события настолько, что может быть использован для его прогнозирования [9; 18; 98; 149; 166].

Оползневые риски можно классифицировать следующим образом (см. рис. 1.1).



Рис. 1.1. Классификация оползневых рисков

Процедуры оценки и предупреждения оползневых рисков, формирующиеся в сложных природных геологических условиях, основываются на комплексе взаимосвязанных результатов инженерно-технических, экономических и других мероприятий, направленных на уменьшение возможных потерь населения и строительных объектов [1; 3; 8; 30; 38; 81; 90–91; 174; 178–179; 181; 198; 213–214].

В настоящее время не существует единой научно-обоснованной методологической базы, которая могла бы комплексно, используя данные геодезического мониторинга, оценивать как опасные оползневые процессы, так и оползневую обстановку для СС. Существующие технологии инженерно-геологических и геофизических изысканий не всегда дают возможность

результативно оценивать и достоверно картировать влияние неоднородности геологической среды на оползневый процесс.

Вопросы комплексной оценки оползневых рисков и обеспечение безопасности в сложных склоновых системах принадлежат, как мы уже указывали ранее, к разряду задач стратегического характера. Решение этих задач невозможно без снятия ряда неопределенностей, которые сами представляют довольно сложную проблему. Это:

- 1) неполнота информации о пространственно-временном распределении внешних воздействий на склоновую систему;
- 2) неполнота информации о состоянии сложных склоновых систем;
- 3) неопределенность в поведении склоновых систем.

Следовательно, чтобы решить обозначенные проблемы, необходимо создать научно-методический аппарат, учитывающий основные факторы, которые могут влиять на безопасность землепользования и жизнедеятельности. Также необходима разработка методов и математических моделей, позволяющих выполнять соответствующие количественные оценки и прогнозы.

Для получения оценки риска по конкретным строительным объектам, которые могут быть подвержены воздействиям поражающих факторов от источников оползневых опасностей, крайне важно знать информацию о частоте проявления опасных оползневых процессов, об их силе и о пространственном распределении по отношению к этим объектам. Оценка риска и прогноз оползневых процессов выполняются на некоторый заданный интервал времени в будущем.

В связи с различной силой опасных оползневых процессов и объекта влияния его отрицательных факторов, воздействующую нагрузку на объект обычно представляют случайной величиной U . Она описывается функцией распределения отрицательных факторов, которые формируются при реализации оползневой опасности, т.е. функцией $P(U < u)$.

Нужно определить по имеющимся геодезическим данным статистическую функцию распределения $\tilde{F}(u) = P(\tilde{U} < u)$, которая при $N \rightarrow \infty$ (где N — число реализаций оползневого процесса) будет приближаться к истинной функции распределения $F(u) = P(U < u)$. Затем для того, чтобы выполнить прогнозную оценку, надо статистическую функцию распределения заменить на подходящую аналитическую. Для построения аналитической кривой распределения исходный статистический ряд распределения аппроксимируется одной из дифференциальных функций теоретического распределения. При этом выбирается такая функция, которая обеспечивала бы максимальное приближение теоретических данных к эмпирическим данным [3; 83].

Таким образом, если дано количественное математическое описание условий землепользования и жизнедеятельности, то задача оценки риска с точки зрения безопасности может считаться решенной.

Главными принципами обеспечения безопасности сооружений в СС от оползневых опасностей в настоящее время являются:

- заблаговременность подготовки и осуществление противооползневых защитных мероприятий;
- дифференцированный подход к определению характера, объема и сроков проведения этих мероприятий, их необходимой достаточности, комплексности.

Из практики известно, что решение задачи по полному устранению негативных воздействий в геологической среде невозможно. Для обеспечения защиты сооружений можно только уменьшить воздействие негативных факторов до допустимых уровней [55].

В зависимости от уровня реализации определенных задач по обеспечению безопасности склоновых территорий от возможных проявлений опасных оползневых процессов характер и методы их решения существенно различаются:

- на локальном уровне решаются инженерно-технические задачи, которые связаны с выполнением определенных проектов, программ и аварийных мероприятий для предотвращения и ликвидации негативных последствий оползневых опасностей;

– на региональном уровне решаются общие задачи информационного, организационного, нормативно-правового и экономического характера.

Для того чтобы решить вышеприведенные задачи, применяются методы управления рисками природного, техногенного и антропогенного характера. Они объединены в пять ключевых групп:

- методы, базирующиеся на применении карт риска;
- координационно-управленческие;
- нормативно-правовые;
- финансовые;
- инженерно-технические [3; 18; 38; 70; 77; 90; 93–95; 97–98; 100–103; 145–147; 180; 194].

Однако главнейшим базовым аспектом проблемы геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов в склоновых системах является количественная оценка риска, возникающая вследствие реализации этих процессов.

Следовательно, чтобы решить сложную и многоаспектную проблему по геодезическому обеспечению мониторинга застроенных СС, необходимо создать современный эффективный научно-методический аппарат. Также необходимо разработать методы и математические модели, основанные на результатах геодезического мониторинга, выполняющие количественные оценки и прогнозы оползневых рисков.

1.1.2. Структурные особенности оценки риска в сложных склоновых системах

Изучение оползневых процессов всегда было и остается чрезвычайно актуальной проблемой в хозяйственной деятельности, и особенно — в области строительного производства. Из-за возможных оползневых подвижек грунта на склонах появляется опасность нарушения устойчивости зданий и сооружений. Известно немало тому примеров. Достаточно указать на значительное число катастроф, произошедших в последнее время:

– 22 марта 2014 года Соединенные Штаты Америки поразило крупное стихийное бедствие – в местности Осо, штат Вашингтон, сошел крупный оползень, который стал причиной человеческих жертв и больших имущественных потерь. Крупный оползень разрушил 49 домов и построек в округе Стилхэд Хэйвн (Steelhead Haven) в 4-х милях (6,4 км) к востоку от небольшого населенного пункта Осо (Oso), в котором проживает 180 человек. Оползень также перекрыл реку, что привело к наводнению и блокированию магистрали № 530 штата Вашингтон – основной дороги, ведущей в город Даррингтон (Darrington) с населением 1347 человек, расположенный в 15-ти милях к востоку от Осо. В результате оползня погиб по крайней мере 41 человек, двое пропали без вести, еще четверо серьезно пострадали. Оползень в Осо стал для США рекордной по числу жертв катастрофой, связанной с оползнями (рис. 1.2) [53];



Рис. 1.2. Оползень в Осо в 2014 году (США)

– в воскресенье утром 21 декабря 2015 года в городе Шэньчжэнь на юге Китая произошел сход оползня (рис. 1.3). В результате оползня в общей сложности 33 строения были разрушены или получили повреждения различной степени. В результате трагедии 73 человека погибли и 91 человек числится без вести пропавшим [202];



Рис. 1.3. Оползень в Шэньчжэне в 2015 году (Китай)

– в Нижегородской области в деревне Караулово 24 апреля 2021 года оползень обрушил несколько домов, в том числе жилой. Только по счастливой случайности никто не пострадал (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Оползень в Нижнем Новгороде в 2021 году (Россия)

Задача обеспечения безопасности склоновых систем представляет собой сложную многоуровневую и многоаспектную проблему. Для своего решения она требует не только идентификации и определения количественных характеристик возможных опасностей, но и формирования критериев безопасности, учета всей совокупности законов, управляющих действием общества в условиях проявления различных видов опасностей [3; 21; 81; 90; 102; 170].

В этой связи очень важным является разработка эффективных методов оценки физической уязвимости зданий и сооружений к различным оползневым опасностям с использованием концепции вероятностных функций повреждаемости и соответствующего определения состояний ущерба.

И первым шагом в оценке физической уязвимости является идентификация элементов склоновых систем, подверженных риску. Физические элементы, подверженные оползневой опасности, можно классифицировать по трем основным категориям:

- жилые здания;
- инженерные сооружения;
- население.

Для этой классификации требуются надежные и полные базы данных, содержащие несколько уровней информации. Сбор и архивирование данных могут осуществляться на основе различных уже существующих тематических карт (топографических, геологических, геотехнических, аэрофотоснимков, типологии зданий и т.д.). Также необходимо проводить полевые обследования для определения типологических характеристик подвергаемых воздействию элементов.

Для оползней определенного типа, механизма и интенсивности типология выявленных элементов является ключевой в методологии количественной оценки уязвимости. Геометрия, свойства материалов, возраст, уровень разработки проекта, грунты, фундаменты и тип зданий, количество этажей и т.д. относятся к типичным типологическим параметрам, которые непосредственно связаны со структурными повреждениями. На данном этапе необходимо подчеркнуть решающую роль масштаба анализа. Мы выделяем три уровня: региональный, районный и локальный. Из элементов, специфичных для местных и региональных масштабов, принято рассматривать совокупные уровни в виде однородных единиц [212]. Например, это могут быть группы зданий в пределах одной площади, квартала или района, характеризующиеся относительной однородностью типа здания, строительных материалов, этажности и распределения землепользования. В литературе имеется очень мало материалов по этому вопросу.

Выявлению надлежащих критериев для идентификации элементов риска в различных масштабах (рис. 1.5) посвящены значительные усилия в [203]. В этой связи в мелких (1:100 000) и средних (1:25 000) масштабах элементы риска определяются с точки зрения однородных зданий по совокупности. А в крупных масштабах (1:5000) и (1:2000) подверженные рискам элементы считаются как совпадающие с отдельными зданиями, которые фактически или потенциально взаимодействуют с массой тела оползня.



Рис. 1.5. Идентификация зданий, подверженных оползневому риску в различных масштабах

Получение всей информации о зданиях в мелком и среднем масштабах в целом является сложной и трудоемкой задачей. Для этого обычно применяется экспертное заключение.

Одним из специфических и весьма важных факторов оползневой риска на различных склоновых территориях являются оползневая опасность и оползневая уязвимость.

Понятия «оползень» и «оползневая безопасность» — это ключевые понятия, необходимые для описания взаимоотношений человека с окружающей его геологической средой [65; 151].

С позиций проблем изучения безопасности строительных объектов на склоновых территориях от действий опасных оползневых явлений и процессов, под теорией оползневых процессов будем понимать систему законов и закономерностей, которые определяют:

- их физическую основу;
- допустимость и обстоятельства возникновения, стадий активизации и затухания (ход оползневых процессов во времени) в связи с взаимодействием с окружающей средой;
- их воздействия на строительные объекты (деформации, повреждения, разрушения).

В таком случае под *оползневой ситуацией* будем понимать фиксированное состояние среды склоновых систем, которая определяется комплексом реализуемых в ней природных, техногенных и антропогенных оползневых процессов, прямо или косвенно оказывающих воздействие на элементы склоновых систем.

Под *оползневой опасностью* будем понимать негативную вероятностную возможность реализации оползневых процессов, протекающих в природной, техногенной и антропогенной составляющих среды склоновой системы (рис. 1.6).

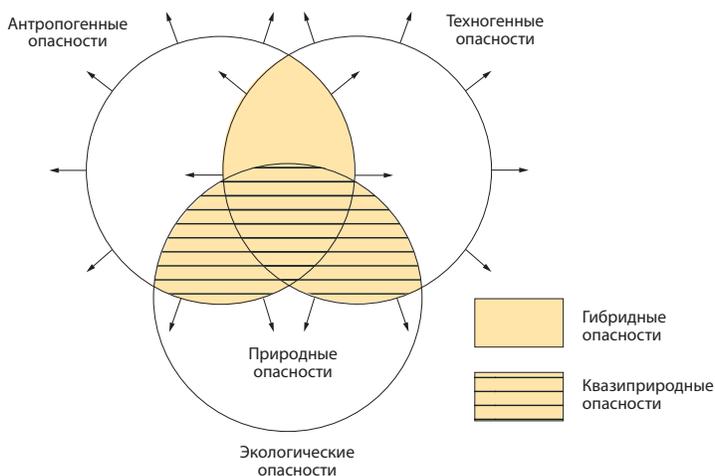


Рис. 1.6. Спектр опасности

Под *оползневой уязвимостью* будем понимать свойство любого строительного объекта терять способность к выполнению своих естественных функций вследствие его поражения оползневой опасностью определенного генезиса, интенсивности и длительности воздействия [97].

В общем виде уязвимость приводит к простой обобщенной взаимосвязи:

$$\text{Опасность} \times \text{Уязвимость} = \text{Неблагоприятные последствия.}$$

Однако если рассматривать воздействие определенного вида опасности (т.е. оползня) в общем смысле, то сразу становится очевидным, что оба элемента: риск и уязвимость — меняются с течением времени. Незначительные изменения в сроках наступления опасного события (оползневых смещений) могут привести к очень разным уровням повреждений в зависимости от того, что именно подвергается воздействию. Физическая уязвимость зданий и инфраструктуры является функцией интенсивности оползневых событий и уровня сопро-

тивления подверженных элементов, т.е. физическая уязвимость конструкций зависит не только от структурных свойств открытых элементов (типологии зданий, качества строительства, технического состояния и т.д.) [149; 150; 197; 211], но и от механизма и величины оползневых процессов. Например, здания, подверженные одному и тому же оползневому воздействию, могут испытывать различные показатели уязвимости из-за их особых различных структурных характеристик (прочности и жесткости). Кроме того, здания, обладающие точно такими же типологическими и конструктивными свойствами, могут подвергаться меньшему или большему повреждению, определяемому оползневым механизмом и их расположением относительно зоны скольжения.

Под *оползневой безопасностью* будем понимать состояние защищенности склоновой системы от воздействий опасных оползневых явлений и процессов инженерно-геологической обусловленности, а также от последствий этих воздействий.

Количественно оползневую безопасность будем определять через уровень оползневой безопасности $S_{оп}$, которая представляет собой вероятностную величину. Ее значения находятся в интервале [0; 1].

Под *оползневым риском* будем понимать предполагаемый негативный результат взаимодействия геологической среды с природным, природно-техногенным или антропогенным объектом, или группой таких объектов.

Количественно оползневой риск будем выражать через степень оползневого риска $R_{оп}$, которая также представляет собой вероятностную величину. Его значения также находятся в интервале [0; 1].

Уровень оползневой безопасности и степень оползневого риска связаны между собой следующим соотношением:

$$S_{оп} = 1 - R_{оп}, \quad (1.1)$$

где $S_{оп}$ — уровень оползневой безопасности; $R_{оп}$ — степень оползневого риска.

Под *анализом оползневого риска* для склоновой системы будем понимать совокупность процедур выявления факторов оползневого риска, определения, анализа и количественной оценки оползневого риска в текущий момент времени, прогнозирования оползневых опасностей и исследования их динамики, а также разработки стратегии обеспечения безопасности и устойчивого развития склоновых систем.

Под *количественной оценкой* оползневого риска в склоновых системах будем понимать комплексное описание аномальных оползневых процессов в этой системе, которые основаны на математическом моделировании.

Под *прогнозированием уровня оползневой безопасности* будем понимать процедуру ранжирования склоновых систем по степени оползневого риска на определенном временном интервале по данным анализа пространственно-вероятностного распределения оползневого риска.

Рассмотрим отмеченные выше проблемы оценки риска в сложных СС.

Первая проблема — неполнота информации о пространственно-временном распределении внешних воздействий на систему — в приложении к оценке рисков оползневого характера распадается на ряд следующих подпроблем:

- 1) неполнота информации о динамике опасных оползневых процессов;
- 2) неполнота информации об интенсивности опасных оползневых процессов (функция объема и скорости единовременно перемещающихся породных масс).

Вторая проблема — неполнота информации о состоянии сложных систем — в приложении к оценке рисков оползневого характера в СС, по нашему мнению, структурно состоит из следующих подпроблем:

- 1) недостаточная информация (а то и ее полное отсутствие) о характере взаимодействия между элементами СС;

2) недостаточная изученность компенсирующих механизмов в среде СС, уменьшающих последствия проявления в этой среде опасных оползневых процессов.

Третья проблема — неопределенность в поведении системы — по нашему мнению, представляет собой в приложении к решению нашей задачи комплекс следующих подпроблем:

1) поведение системы существенным образом определяется вероятностным характером как реализации опасного оползневого процесса, так и интенсивностью его проявления;

2) имеется существенная неоднозначность, неопределенность в реакции системы на воздействие опасных процессов оползневого характера.

Разрешение вышеперечисленных проблем по обеспечению оползневой безопасности в СС невозможно без обращения к математическому моделированию опасных оползневых процессов, протекающих в среде СС и оценки оползневого риска.

Следовательно, проблема оползневой безопасности является в настоящее время весьма актуальной. Для безопасного и устойчивого развития СС необходимо разработать новые методы изучения факторов, которые влияют на состояние среды СС в условиях возможной реализации оползневых опасностей. Разработка данных методов должна создаваться на основании системного подхода и аналитического анализа геодезической информации об интересующем объекте исследования, полученной из геодезического мониторинга деформационных процессов застроенных СС.

1.1.3. Факторы оползнеобразования и спектр смещений на оползневых склонах

При эксплуатации зданий и сооружений, которые были построены на склоновых территориях, из-за возможных проявлений оползневых смещений появляется потенциальная угроза нарушения устойчивости и прочности конструкций. Тогда могут произойти деформации сооружений как из-за воздействия давления неустойчивых масс грунта непосредственно на конструкции, так и вследствие разрыхления грунта в основании сооружения в результате смещения оползневых масс вниз по склону. Такое движение грунта по наклонной поверхности (проявление оползневого смещения) способно наступить по самым разным причинам:

- сдвигающие силы превышают удерживающие;
- обводнение склона и, как результат, уменьшение прочностных характеристик грунтов, слагающих склон;
- абразия склона в нижней его части морскими или речными водами и, как следствие, нарушение баланса грунтовых масс;
- ветровая эрозия поверхностных слоев;
- антропогенный фактор;
- сейсмическое воздействие и т.д. [25; 32; 120; 167].

В случаях появления оползневых подвижек на склоне возникает опасность для сооружений в результате разнообразного воздействия на них грунтовых масс. При этом возможны следующие виды нарушения устойчивости здания:

– если сооружение располагается в верхней части склона (в голове образующегося оползня), то грунт постепенно «выползает» из-под сооружения и происходит разрыхление основания (рис. 1.7, *а*). В связи с этим основание фундамента становится неоднородным. Появляются неравномерные осадки в здании и, как результат, начинают появляться вертикальные трещины;

– если сооружение располагается на оползне, то при активизации оползневых процессов происходит одновременно и смещение грунта под сооружением (рис. 1.7, *б*). Тогда могут возникнуть недопустимые деформации здания, вызванные давлением грунта на само сооружение и неравномерными перемещениями в плане отдельных его частей;

– если сооружение располагается в нижней части склона, т.е. в языке образующегося оползня, то оно испытывает только давление от смещающихся масс грунта (рис. 1.7, *в*).

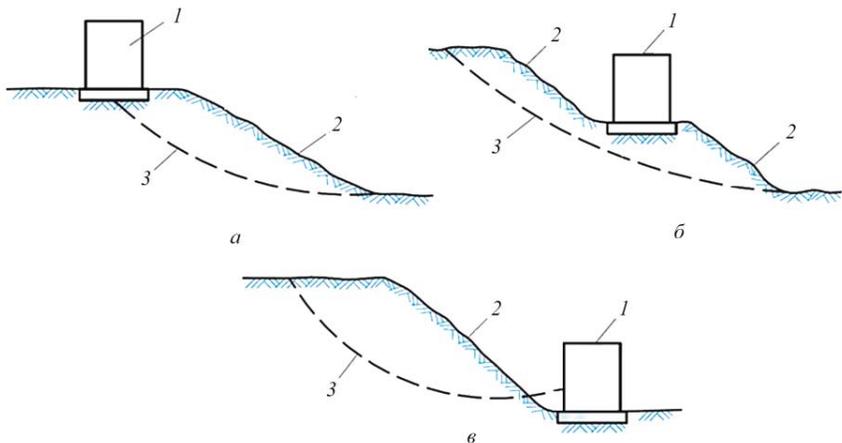


Рис. 1.7. Возможные виды нарушения устойчивости сооружений от оползневых смещений:
a — разрыхление оснований под сооружением; *б* — смещение грунта под сооружением;
в — давление сползающего грунта на сооружение;
 1 — сооружение; 2 — склон; 3 — линия поверхности скольжения

Вопросы геодезического мониторинга за перемещениями сооружений рассматриваются в ряде ранее изданных нормативных документах: санитарных нормах и правилах (СНиП), руководствах, указаниях и технической литературе, которые в настоящее время постепенно переносятся в своды правил (СП) [124]. В этих материалах изложена методика организации и проведения геодезического мониторинга за сооружениями, если имеется соответствующее решение проектной организации (п. 4.16 [141]). Эти решения принимаются:

- при наличии специальных указаний в задании на проектирование;
- если ожидаемые деформации близки к предельным;
- если применяются новые или недостаточно изученные конструкции зданий [124].

Наряду с мониторингом за осадками проводятся натурные измерения кренов высотных сооружений как в процессе их строительства, так и в период эксплуатации. Организация измерений кренов сооружений башенного типа в процессе эксплуатации необходима, так как всегда происходит неравномерный нагрев стен по технологическим причинам, например дымовых труб, а также из-за солнечного излучения. Всегда имеют место и динамические ветровые нагрузки [110].

Все эти факторы в сочетании с неравномерной осадкой фундаментов увеличивают отрицательное воздействие на устойчивость сооружения и могут вызвать деформации, превышающие предельные, что может привести к нежелательным последствиям [124; 170; 187].

Согласно СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», предельные величины деформаций и осадки оснований не должны превышать установленных проектом величин. В противном случае должны быть разработаны конструктивные решения, снижающие чувствительность сооружения или технологического оборудования к повышенной деформации основания.

До сих пор нет исследований по определению оползневых уязвимостей для различных категорий сооружений в зависимости от скоростей оползневых смещений. При наличии таких исследований, на наш взгляд, можно было бы рассчитывать оползневые риски и заранее обеспечивать их безопасность.

Ведущая роль в исследовании динамики оползневых процессов принадлежит геодезическим методам наблюдений. Результаты полученных смещений оползневого тела относи-

тельно исходного положения в течение определенного времени оказывают огромную помощь при дальнейшем анализе механизма оползневых процессов. Рассмотрим, что собой представляет оползень.

Оползни представляют собой связанное перемещение земляных (скальных) масс, которое совершается по некоторой поверхности скольжения и при этом не теряет контакт с ним. Образование оползней представляет собой весьма сложный и многофакторный процесс [40; 49; 75; 79; 104; 158; 171].

В России оползневые процессы формируются в республиках Северного Кавказа, в Краснодарском и Ставропольском краях, на Среднерусской и Смоленско-Московской возвышенностях, в Поволжье [63; 76; 79]. А также в районах, где в результате изменения техногенной и антропогенной природной обстановки выявляется возрастание интенсивности развития оползней. Особенно наглядно это заметно в пределах населенных пунктов. Оползнями поражено 4 % площади Российской Федерации и территории, 725 из 1036 городов, т.е. более 70 % городов Российской Федерации [78]. Значительная часть территории Российской Федерации (примерно 30 %) располагается в зоне возможных землетрясений с интенсивностью 7 баллов и выше, которые могут сопровождаться сейсмогенными оползнями, являющимися наиболее катастрофичными [47–48], потенциально несущими угрозу разрушительных воздействий на здания и сооружения.

Оползание склонов в большинстве случаев представляет собой длительный процесс. Выделяются два этапа [154]:

- подготовительная фаза;
- катастрофическая фаза.

Подготовительная фаза — этап накопления внутренних напряжений на склоне в результате активизации оползнеобразующих факторов. Внутренние напряжения могут отражаться в появлении глубинной ползучести.

Катастрофическая фаза — заключительный этап, когда по уже сформировавшейся поверхности скольжения происходят быстрые перемещения.

Оползни — вторичные экзогенные геологические процессы (ЭГП), условия развития которых подготовлены первичными ЭГП [12]. Они возникают:

- в результате выветривания (контакт литосферы с атмосферой);
- как следствие подмыва берега (контакт литосферы с поверхностной гидросферой);
- в результате землетрясений (контакт приповерхностной области литосферы с глубинными ее частями);
- из-за хозяйственной деятельности человека (контакт литосферы с техносферой).

Статистика оползней показывает, что 80 % проявлений оползневых процессов связаны с деятельностью человека, и только 20 % — с природными явлениями [217].

Причины возникновения оползней делятся на три группы:

- *нарушение формы склона* — может вызываться смывами дождей, разливами рек, искусственной выемкой грунта;
- *изменение структуры пород, составляющих склон*. Как правило, это вызывается грунтовыми водами, растворяющими солевые отложения, которые связывали породу. Текстура грунта становится более рыхлой, что увеличивает риск его разрушения;
- *увеличение давления на грунт* (колебания почвы, искусственные нагрузки объектов, созданных человеком, а также давление грунтовых вод, увлекающих частицы по ходу движения) [86].

Становится ясно, в связи с чем дожди являются причиной оползней. Их влияние связано с физическим разрушением склона, увеличением рыхлости грунта и усилением давления на склон. Периоды образования новых оползней и разнообразных подвижек совпадают с периодами дождей или таянием снега. Для развития оползневых процессов наиболее благоприятными являются районы гумидного климата с равномерным режимом выпадения осадков, которым к тому

же свойственны морозящие дожди. При таких условиях горные породы на склонах глубоко промачиваются и максимально насыщаются водой. Увлажнение пород увеличивает их массу и, соответственно, действие на них гравитационных сил, что сопровождается ослаблением прочности структурных связей в них, изменением консистенции грунтов до пластичной и даже текучей. Это все приводит к снижению прочности (трения и сцепления) горных пород на склоне. Оползень, вызванный ливневым дождем, перерастает в селевой поток, а возникший селевой оползень стремительно перемещается вниз по реке, уничтожая все на своем пути [79].

Таким образом, блок-схема факторов оползнеобразования выглядит следующим образом — см. рис. 1.8.

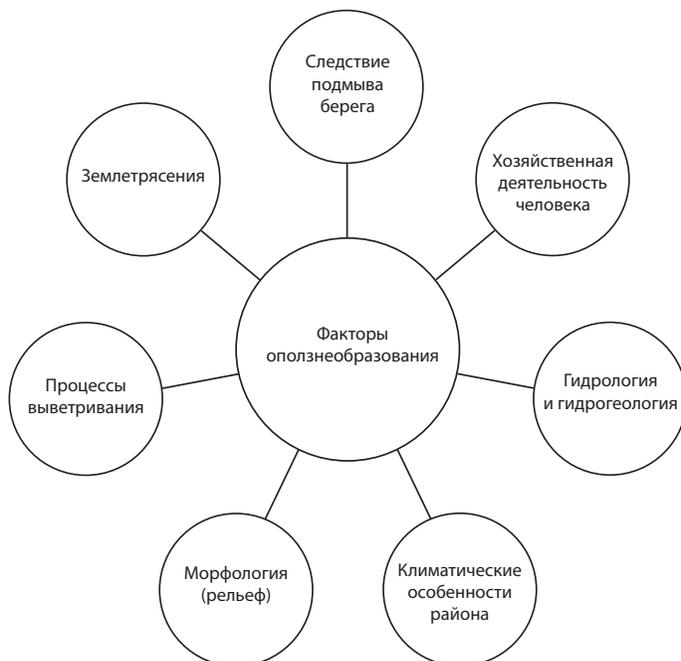


Рис. 1.8. Блок-схема факторов оползнеобразования

Также оползни делятся по механизму возникновения:

– *оползни сжатия*. Формируются при деформации грунта под вертикальным давлением, при этом происходит сжатие пластов. Верхняя часть массива проседает и образует прогиб, в котором появляется трещина под воздействием возникающего напряжения. Часть породы откалывается и начинает движение. Характерно для глинистого грунта;

– *оползни сдвига*. Происходят при накоплении сдвиговых напряжений, формируются на крутых склонах, порода сползает, скользит по поверхности. Иногда такие явления формируются на границе пород, тогда «сползать» могут значительные массивы, часто происходит сползание почвенного слоя (спływ);

– *оползни разжижения*. Возникают в породах со слабосвязанной структурой под действием гидродинамического и гидростатического давления воды. Зависят от уровня грунтовых вод и ливней. Явление характерно для глинистых и суглинистых почв, торфяных и почвенных структур;

– оползни растяжения связаны с отрывом, отколом части массива под действием растягивающих напряжений. Скалистые породы начинают разрушаться при превышении допустимого напряжения. Иногда разрывы происходят по тектоническим трещинам [86].

Блок-схема механизма возникновения оползней показана на рис. 1.9.

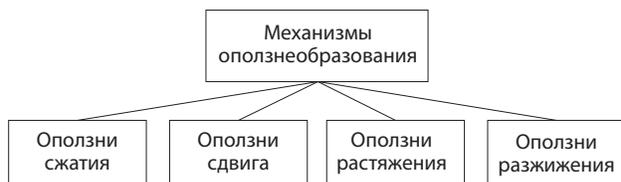


Рис. 1.9. Блок-схема механизма возникновения оползней

Исследованиями китайских ученых было установлено, что из-за кислотных дождей также происходят оползни [218]. Причина этому — выбросы ТЭЦ, работающих на сжигании угля. В результате в 2009 году случился оползень; были человеческие жертвы, погибшие и раненые.

Из большого количества факторов оползнеобразования выделяется только один, самый важный. Этот фактор и принимается в качестве основы для характеристики оползня, несмотря на весьма разнообразные условия их возникновения. Но в связи с огромным количеством этих факторов, которые влияют на оползнеобразования на склоновых территориях, по данному вопросу существуют различные мнения. Поэтому в настоящее время существуют разные классификации оползней. Одной из наиболее широко используемых генетических классификаций является классификация, разработанная А.И. Шеко [169]. Согласно его классификации оползней становится ясно, что в природе имеется огромное количество типов оползней, которые различаются между собой не только размерами и формой, формой поверхности скольжения и глубиной захвата, но и характером смещения оползневого тела, скоростью, периодичностью, состоянием поверхности и т.д.

Размеры оползневых массивов бывают разными — от нескольких кубических метров до десятков и даже сотен миллионов кубических метров. Для описания энергетических классов оползней по объему смещающихся масс придерживаются следующей шкалы — см. табл. 1.1 [65].

Таблица 1.1

Энергетические классы оползней по объему смещающихся масс

Классы масштабности оползней	Объемы смещающихся масс, м ³
Малые	До 10
Небольшие	От 10 до 200
Средние	От 200 до 1000
Большие	Десятки тысяч
Очень большие	Сотни тысяч
Огромные	Миллионы
Грандиозные	Десятки миллионов и более

Рассмотрим наиболее типичные и в то же время морфологически различные виды оползней.

Вытянутые вниз по склону длинные и узкие полосы смещающихся земляных масс называются *земляными потоками (поступательными оползнями)* (рис. 1.10). Они заполняют ложбины и извиляются как реки. Что касается скорости смещения оползневого тела, то она зависит от водонасыщенности грунтов, которые носят сезонный характер. Длина поступательных

оползней достигает сотен метров, ширина — десятков метров, а глубина имеет величину до пяти метров (оползни поверхностные или мелкие).

Векторы смещений точек оползневой сети, находящейся на поверхности оползня, практически параллельны краям оползня. На прямолинейных участках перемещение оползня совершается с равномерной скоростью. А на криволинейных участках оползневый поток придвигается к вогнутой стороне.

В отличие от поступательных оползней, *вращательные оползни* в плане выглядят следующим образом — см. рис. 1.11.

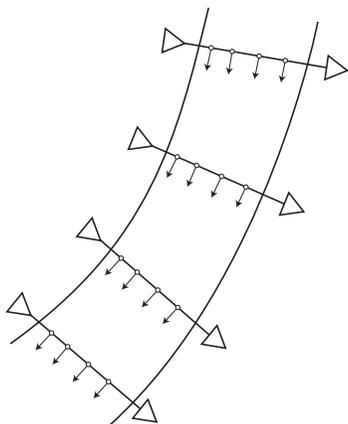


Рис. 1.10. Поступательный оползень (земляной поток)

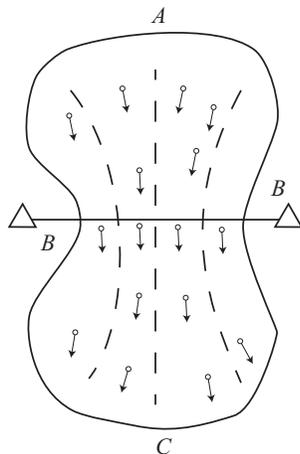


Рис. 1.11. Вращательный оползень

Во время процесса смещения эти грунтовые массивы совершают вращательные движения относительно некоторой оси. Постепенно оползневое тело заполняется трещинами, которые свидетельствуют о различных перемещениях на разных частях склоновой территории от *A* до *C*: от линии отрыва в верхней части и смещением вниз по склону до сжатия в нижней части [153; 155]. Такие оползни бывают глубокими — до 20 м и очень глубокими — больше 20 м (табл. 1.2) [86].

Таблица 1.2

Глубина захвата пород оползневыми деформациями	
Оползни	Глубина расположения (захвата) поверхности скольжения, м
Поверхностные	< 1
Мелкие	< 5
Глубокие	< 20
Очень глубокие	> 20

Описанные два типичных оползня являются довольно простыми. Многие небольшие оползни можно отнести к ним. Намного сложнее обстоят дела с круглыми оползнями. Из-за особенностей геологического строения у смещающихся земляных масс, как правило, неправильная форма, а у крупных оползней оползневое ложе имеет сложный подземный рельеф. Некоторые крупные оползни являются многоярусными: оползающие земляные массы,

напластовываясь друг на друга, формируют некоторое количество ярусов, которые смещаются с разной скоростью и по разным траекториям [156].

Геодезическим наблюдениям за динамикой склонов отводится особая роль. Значения смещений точек оползневой сети, полученные в разных циклах наблюдений, дают возможность проводить анализ динамики оползневых процессов [82].

В современном мире практически во всех областях хозяйственной, экономической, изыскательской деятельности человека возникают задачи, которые требуют знаний о динамике перемещений верхних слоев поверхности Земли. Согласно [137] необходимо проводить геодезические наблюдения, чтобы определить влияние этих смещений как на строящиеся инженерные здания и сооружения, так и на их жизнедеятельность в период эксплуатации.

В связи с этим определение пространственных координат точек оползневой сети в каждом цикле наблюдений является очень важным. По полученным координатам в разных циклах наблюдений можно вычислять значения смещений и скорость.

Эти значения имеют некоторый доверительный интервал, т.е. носят вероятностный характер. Опорные пункты, по отношению к которым определяют смещения оползневых точек, не являются абсолютно стабильными во времени. Это обстоятельство заставляет ограничиваться рассмотрением некоторых смещений относительно опорной геодезической сети.

Рассмотрим виды движений, возникающих при нарушении устойчивости оползневого склона. Для этого выделим на его поверхности элементарную площадку ΔP и поместим на ней начало системы прямоугольных пространственных координат XYZ (рис. 1.12).

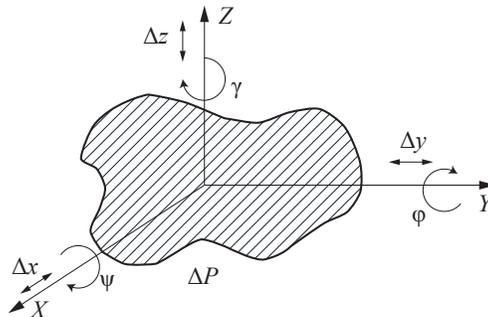


Рис. 1.12. Элементы движения на склоне

При перемещении оползневого тела на склоне площадка ΔP может совершить шесть разных движений:

- три смещения Δx , Δy , Δz , которые параллельны осям координат OX , OY и OZ ;
- три поворота вокруг тех же координатных осей OX , OY и OZ под углами φ , ψ и γ .

Таким образом, перемещаемая во времени площадка ΔP может характеризоваться поступательным и вращательным видами смещений.

Вращательное движение площадки ΔP можно выразить через пространственные координаты отдельных ее точек. Тогда по известной формуле, которая используется в инженерной геодинамике, можно вычислить величину смещения любой точки склона за определенный промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$S(t_1, t_2) = \sqrt{[x(t_2) - x(t_1)]^2 + [y(t_2) - y(t_1)]^2 + [z(t_2) - z(t_1)]^2}, \quad (1.2)$$

где $x(t_1)$, $y(t_1)$, $z(t_1)$ — пространственные координаты определенной точки площадки в момент t_1 ; $x(t_2)$, $y(t_2)$, $z(t_2)$ — пространственные координаты определенной точки площадки в момент t_2 .

Когда длина линии между двумя точками была $S(t_1)$, а затем через определенный промежуток времени Δt в момент времени t_2 стала $S(t_2)$, причем $S(t_2) \neq S(t_1)$, смещение будет равно

$$\Delta S(t_1, t_2) = S(t_2) - S(t_1). \quad (1.3)$$

Когда в процессе оползневых деформаций некоторые точки оползневого тела имеют относительные перемещения друг относительно друга, нарушается целостность этого блока оползня. От таких смещений происходят изменения НДС склона.

Оползневые смещения также классифицируют на микросмещения и макросмещения.

Микросмещения никак не выражаются и не обнаруживаются в виде тех или иных качественных изменений ни на склоне и ни на зданиях или сооружениях, которые расположены на склоне. Их можно обнаружить и зарегистрировать только специальными высокочувствительными приборами.

Макросмещения в противовес микросмещениям сопровождаются качественными различными изменениями, которые проявляются в виде трещин в зданиях и дорожных покрытиях, перекосах конструкций и др.

Таким образом, риск связан с вероятностью и масштабом неблагоприятных последствий, которые являются результатом взаимодействия опасности и уязвимости. Следовательно, как частотно-вероятностные характеристики опасности, так и различия в уязвимости и в воздействии в пространстве и времени способствуют возникновению риска (рис. 1.13).



Рис. 1.13. Диаграммное представление риска: состояние опасности и уязвимости

Поэтому простые отношения, описанные ранее, могут быть превращены в основу утверждения риска, если известны вероятности конкретных величин оползневых событий и созданы следующие взаимосвязи (1.4):

$$R_s = P(H_i)(EVE_x), \quad (1.4)$$

где R_s — конкретный риск или ожидаемая степень потерь из-за определенного класса масштабности оползня H_i , происходящих в конкретном районе за определенный период времени; $P(H_i)$ — опасность или вероятность наступления определенного класса масштабности оползня H_i , происходящие в указанном районе и временном интервале; E — общая стоимость элементов риска, находящихся в опасности из-за угрозы оползневого смещения; V — уязвимость или доля E , которые могут быть затронуты в ущерб по данному классу масштабности оползня H_i , выраженной либо в процентах от E , либо в интервале $[0, 1]$; E_x — воздействие или доля от общей стоимости, которая подвержена неблагоприятному воздействию оползня, выраженной в интервале $[0, 1]$.

Очевидно, что в действительности различные компоненты E должны быть разделены по признакам и каждый из них должен рассматриваться отдельно, что является одной из причин, по которой оценки рисков являются столь сложными. Тогда вышеуказанное отношение (1.4) запишем в виде

$$R_s = P(H_i) \sum (EVE_x). \quad (1.5)$$

Для установления оползневых рисков требуется как оценка вероятной частоты и масштабов будущих событий (скорость), так и вероятных негативных последствий, которые будут возникать для таких событий.

Таким образом, для оценки рисков склоновых систем наиболее важным является изучение процессов, связанных с деформацией оползневых склонов. Следовательно, крайне важно проведение геодезического мониторинга. Оценка влияния опасных оползневых процессов наиболее значима для решения проблемы обеспечения безопасности сооружений в склоновых системах.

1.2. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ ПРОБЛЕМЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОНИТОРИНГА И БЕЗОПАСНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОПОЛЗНЕОПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

1.2.1. Анализ существующих геодезических методов оценки и обеспечения безопасности инженерных сооружений на оползнеопасных территориях

В последнее время все большее значение в обеспечении безопасности сооружений приобретает геодезический мониторинг оползневых процессов. Для уменьшения рисков, связанных с оползнями, необходимо не только фиксировать ущерб от уже произошедших оползней, но и вести постоянно систематические геодезические наблюдения за склоновыми территориями, которые предрасположены к оползневым смещениям. И особенно за теми склоновыми территориями, которые уже застроены или которые предполагается использовать под строительство жилых, промышленных и других народнохозяйственных объектов. По нашему мнению, МЧС России необходимо разработать соответствующую программу, предусматривающую организационно-методические и технические мероприятия по ее выполнению.

Специалистам в области безопасности нужно понимать и признать, что геодезический мониторинг является важной составной частью общего комплекса изучения режима оползневых процессов при оценке и безопасности сооружений на склоне. И здесь возникает ряд практических вопросов, требующих научного анализа. Наиболее важными из них являются:

- обоснование необходимой точности геодезических наблюдений на оползневом склоне для уверенного суждения о динамике оползневого процесса;
- проектирование опорной геодезической сети на оползневом склоне;
- создание деформационной сети на оползне и на сооружениях;
- геодезический мониторинг деформаций сетей с применением современных электронных средств измерений;
- обоснование периодичности наблюдений;
- математическая обработка результатов повторных циклов наблюдений опорной и деформационной сетей.

Из вышеперечисленных вопросов наиболее значимым является вопрос о необходимой точности геодезических наблюдений [113].

Следует отметить, что как в научной литературе, так и в нормативных документах рекомендации по точности геодезических наблюдений противоречивы. Так, в [13] точность геоде-

зических наблюдений поставлена в зависимость от средств наблюдений, а в [52; 143] — в зависимости от ожидаемых величин подвижек оползня. По мнению авторов последних работ, абсолютная точность измерения оползневой деформации должна быть не более 25 % величины смещения оползня. Конкретно указаны следующие значения точности измерения:

- точность определения подвижек оползневой сети относительно опорных пунктов равна 20 мм в плане и 10 мм по высоте;

- точность определения деформаций зданий и сооружений относительно опорных пунктов при определении осадок зданий и сооружений равна 1–2 мм на скальных и 2–3 мм — на дисперсных грунтах;

- точность определения горизонтальных смещений зданий и сооружений равна 1–2 мм, крена зданий и сооружений — 2–3 мм на каждые 100 м высоты.

Иные точностные характеристики приводятся в работах [7; 58; 109], где указано, что координаты точек оползневой сети следует определять с точностью 50 мм в плане и 10 мм по высоте, а координаты стенных реперов, установленных на сооружениях, должны определяться с точностью в плане 10 мм и по высоте 2 мм соответственно.

Следует также отметить несоответствие логике рекомендацию наблюдать пункты опорной сети с точностью 50 мм, а подвижки оползня с точностью 20 мм и горизонтальные смещения сооружений с точностью 1–2 мм относительно пунктов опорной сети.

Отмеченные выше противоречия наглядно свидетельствуют о необходимости научного обоснования данного вопроса.

Некоторое теоретическое обоснование решения указанной задачи содержится в работе [33], в которой рассмотрена одна из механико-математических моделей оползневых смещений во времени. Здесь обосновывается положение, что для определения точности смещения оползня необходимо иметь представление о скорости его смещения. Для этого предлагается исходить из принципа определения минимально необходимых или максимально возможных оползневых смещений ΔS_{\max}^{\min} . Если обозначить среднеквадратическое отклонение (СКО) определения оползневых смещений через σ , то исходное условие для расчета точности геодезических наблюдений можно представить в виде

$$\Delta S_{\max}^{\min} \geq \tau \sigma, \quad (1.6)$$

где τ — коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности P (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Связь значения τ со значением вероятности $P(\tau)$

P	0,946	0,988	0,997
τ	1,96	2,58	3,00

Обозначив через σ_X , σ_Y и σ_H СКО определения оползневых смещений по осям X , Y и H соответственно, условие (1.6) примет вид

$$\Delta S_{\max}^{\min} \geq \tau \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_H^2}. \quad (1.7)$$

Воспользовавшись принципом равного влияния источников погрешностей, т.е. $\sigma_X = \sigma_Y = \sigma_H = \sigma$, получим расчетную точность наблюдений подвижек оползня:

$$\sigma \leq \frac{\Delta S_{\max}^{\min}}{\tau \sqrt{3}}. \quad (1.8)$$

Так, например, при $\Delta S_{\max}^{\min} = 10$ мм, то с вероятностью $P = 0,946$, $\tau = 1,96$ и $P = 0,997$, $\tau = 3,00$ (см. табл. 1.3) получим соответственно $\sigma \leq 2,95 \approx 3$ мм и $\sigma \leq 1,92 \approx 2$ мм.

Слабым местом в данном решении является неопределенность значений величины ΔS_{\max}^{\min} — возможных максимальных и минимальных значений оползневых смещений. Вполне очевидно, что эта исходная величина может быть получена только в результате геодезических наблюдений на протяжении нескольких циклов, позволяющих достоверно определить скорость движения оползня.

Таким образом, только решая поставленные выше вопросы, можно подойти к решению проблемы геодезического обеспечения безопасности сооружений на оползневых склонах.

1.2.2. Современная концепция совершенствования геодезических методов контроля за состоянием объектов инженерной геодинамики на оползневых территориях

Инструментом регулирования взаимодействия с природной средой для снижения уровня неблагоприятных последствий служит мониторинг природно-технических систем с включением в его состав функций управляющих воздействий. К природно-техническим системам можно отнести любые системы антропогенной трансформации природной среды [23; 96]. В частности, к этим системам относятся склоновые системы.

Важнейшей составляющей мониторинга склоновых систем является геодезический мониторинг, обеспечивающий пространственно-временное определение положения, размеров и форм контролируемых объектов территорий [132].

Требуются понимание и признание самостоятельности и универсальности геодезического мониторинга, без которого не может быть выполнен ни один вид мониторинговых исследований на Земле. При этом следует рассматривать содержание современной геодезии в широком смысле как единого междисциплинарного научно-технического и производственного комплекса.

Прогнозирование является важнейшей составляющей мониторинговых исследований поведения и состояния ответственных инженерных сооружений [165], поскольку опережающая прогнозная информация дает возможность предпринимать своевременные меры по повышению их надежности, долговечности и безопасности эксплуатации [35]. Результаты геодезических наблюдений являются единственно точной и незаменимой интегральной количественной основой, позволяющей строить прогнозные модели наблюдаемых оползневых процессов. Академик В.Е. Хаин писал, что геодезические методы являются основными при изучении современных тектонических движений и деформаций [163].

Деформационные процессы, несомненно, относятся к категории экологических [36], в исследовании которых геодезический мониторинг тесно связан с экологической геологией и инженерной геологией [64]. Очевидно, что деформационные процессы входят в число признаков, отражающих степень надежности, долговечности, безопасности эксплуатации сооружений, стадии развития опасных оползневых процессов различного происхождения.

Необходимо особо остановиться на геодезических наблюдениях — главном исходном продукте геодезического мониторинга. От полноты и надежности информации, полученной в результате геодезических наблюдений, во многом зависят точность и детальность выводов о механизме и динамике оползневых процессов. Форма представления наблюдений выражается не только непосредственной пространственно-временной измерительной информацией. Косвенные результаты наблюдений, выполненных с известной точностью, представляют топографические планы и карты, отражающие состояние территориального геопространства на определенное время. В отдельных случаях возможно и целесообразно решение только пространственных прогнозных задач с косвенным или предполагаемым учетом фактора времени. Примером может служить прогнозирование на время «икс» пространственных зон риска возникновения чрезвычайных ситуаций. По существу, любые виды геодезического обеспечения строительства, эксплуатации сооружений и в целом природно-технических систем следует рассматривать и использовать в качестве мониторинговых наблюдений. Например, результа-

ты различных видов исполнительных съемок могут служить основой для инженерного картографирования, которое позволит не только оперативно организовывать работу по контролю над функционированием инфраструктуры, но и оценивать возможные изменения условий работы несущих конструкций сооружений, связанные с возникновением в процессе строительства отклонений геометрических параметров [35].

Объектом исследования являются склоновые системы. Это означает, что в пределах строго определенной склоновой территории безопасность инженерных сооружений зависит от взаимодействия таких сооружений с грунтовыми основанием и внешней средой, информация о которых может быть представлена в виде результатов геодезических мониторинговых наблюдений. А в качестве предмета исследования рассматриваются оценки рисков в склоновых системах. Построение предмета исследования заключается в разработке адекватных математических моделей, отражающих на основе меняющихся во времени геодезических данных объективные закономерности развития деформаций. Эти модели должны обеспечивать получение обоснованных оценок оползневых рисков и безопасности сооружений.

Без знания природы и структуры объекта исследования трудно правильно ориентироваться в характере проявления причинно-следственных связей, присущих предмету исследования. Только в результате анализа таких связей можно обоснованно выбрать формы и методы математического описания, определить необходимые объемы и точность геодезических наблюдений, выработать методику оценки риска и безопасности сооружений.

Рассмотрение природы и структуры объекта исследования должно осуществляться с позиций системного подхода. Объект исследования представляется в виде системы «сооружение — внешняя среда». При организации геодезических наблюдений указанная система дополняется подсистемой геодезических наблюдений.

В контексте вышесказанного можно констатировать, что, получая такую важную количественную информацию в виде результатов геодезического мониторинга объектов склоновых систем, используют ее возможности далеко не полностью. Необходимо рассматривать геодезический мониторинг деформаций как метод, включающий комплексный математический анализ результатов мониторинговых наблюдений с построением математических моделей, обеспечивающих получение обоснованных оценок оползневых рисков и уровня оползневой безопасности.

Геодезические данные и их последующий математический анализ позволяют выполнять математическое моделирование и идентификацию НДС склоновых систем в аспекте прогноза природных и техногенных катастроф [67], т.е. для исследования сложных (нелинейных) оползневых процессов необходимо создать соответствующий математический аппарат.

Оценка риска не может быть без прогнозирования, которая является одной из основных составляющих геодезического мониторинга, направленного на исследование деформационных процессов оползневых склонов и сооружений.

Математические модели синтезируют на основе геодезической информации количественные закономерности развития деформационных оползневых процессов. Математический синтез этих закономерностей позволяет осуществлять прогнозную экстраполяцию, а количественные оценки параметров многих моделей поддаются содержательной интерпретации. В целом, совокупность операций по построению и проверке адекватности моделей, прогнозной экстраполяции и анализу полученных оценок параметров охватывает основное содержание математического моделирования, выполняемого на основе наблюдений за развитием исследуемых процессов. Его результаты могут использоваться не только для повышения надежности, долговечности, безопасности эксплуатации сооружений на основе прогнозной информации о развитии деформационных процессов, но и для совершенствования проектирования сооружений, для интерпретации и координации теорий строительных наук.

В [19; 216] предложен новый программно-целевой подход к организации геодезического мониторинга деформаций зданий и сооружений, который в отличие от детерминирован-

ного подхода, требующего строгого соблюдения основных положений научно неоправданных, устаревших нормативных материалов, позволяет синтезировать основные параметры повторных геодезических наблюдений на научно обоснованной основе с репрезентативностью и достаточной достоверностью определения деформационных характеристик зданий и сооружений.

Таким образом, для оценки риска и уровня оползневой безопасности склоновых систем роль геодезии неоспорима. Необходимо создание новой методологии геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных СС, основанной на системном подходе к результатам мониторинговых наблюдений с построением математических моделей, обеспечивающих получение обоснованных оценок оползневых рисков и уровня оползневой безопасности для проведения мероприятий по обеспечению инженерной защиты СС (рис. 1.14).

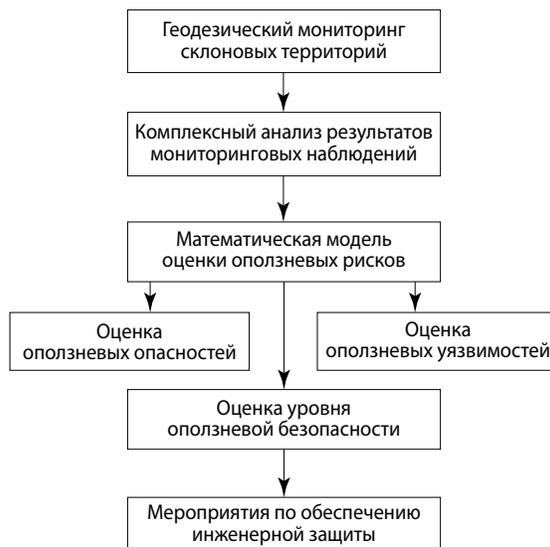


Рис. 1.14. Блок-схема исследования оползневой безопасности

Глава 2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВЫХ РИСКОВ В СКЛОНОВЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ФАКТОРОВ

2.1. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ОПАСНОСТЕЙ И ОЦЕНКИ ВЫЗЫВАЕМЫХ ИМИ РИСКОВ

Оценка оползневых рисков является важнейшим инструментом в реализации стратегии обеспечения безопасности сооружений на оползнеопасных территориях. Для принятия взвешенных и обоснованных решений по созданию системы обеспечения оползневой безопасности данные о риске являются первоосновой. Они позволяют наметить стратегические направления по обеспечению приемлемой оползневой безопасности.

Рассмотрим применяемые в настоящее время методы прогнозирования оползневых опасностей и оценки вызываемых ими рисков. Они делятся на полевые и камеральные методы [3; 61; 118; 189; 195].

К *полевым методам* относятся [90; 91]:

1) геологические, гидрологические, гидрометеорологические, геофизические, экологические и др.;

2) геодезические;

3) отбор образцов грунта и объем проб нарушенного или природного сложения (монолитов);

4) натурное моделирование развития оползневых процессов;

5) дистанционное зондирование.

К *камеральным методам* относятся:

1) методы определения физико-механических характеристик грунтов; количество осадков, роза ветров, глубина промерзания грунта; гидрологический режим рек и т.д. [79; 171];

2) методы получения топографических планов: наземные или фотограмметрические [17; 88];

3) геоинформационные методы [61].

При изучении и оценке оползневых опасностей применяются те же методы, которые применяются при мониторинговых наблюдениях с последующим прогнозированием оползневых опасностей [37; 54; 61]. Отличие состоит в следующем. Мониторинговые наблюдения и измерения выполняются многократно с определенной, заранее установленной периодичностью и полнотой. Соответственно, после каждого цикла наблюдений и измерений выполняется математическая обработка их результатов с учетом взаимоотношений отдельных групп методов исследований (рис. 2.1) [90], включающая аналитические методы (экспериментальное и математическое моделирование и прогнозирование) [3; 20; 171].

Основным считается подход, который базируется на расчетах с привлечением вероятностных (детерминированных и статистических) методов. Этот подход использовался для среднесрочных прогнозов. Другой же подход основывается на изучении имеющихся данных о предвестниках конкретных катастрофических явлений и анализе информации, полученной от мониторинговых сетей [51; 65].

Еще не так давно использовался первый подход. Прогноз давался на срок от двадцати до пятидесяти лет и более. Однако в наше время при исследовании многочисленных природно-технических систем установлено, что по прошествии десяти лет их эксплуатации изменяются инженерно-геологические условия до такой степени, что для разработки прогнозов развития опасных оползневых процессов необходимо проведение новых инженерных изысканий, и в первую очередь — проведение геодезического мониторинга [96].

Отсюда вытекает, что комплексный прогноз развития опасных оползневых процессов принимает вероятностный характер.



Рис. 2.1. Схема взаимоотношений отдельных групп методов исследований

Таким образом, на сегодняшний день применяется достаточно большое количество методов для решения задач по прогнозированию опасных природных процессов и оценки вызываемых ими рисков. Однако особенности функционирования различных застроенных склоновых систем требуют построения универсальной методологии математического моделирования и оценки оползневых рисков на основе данных геодезического мониторинга, так как их реализация может привести к дестабилизации уровня безопасности склоновой системы.

2.2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВЫХ ОПАСНОСТЕЙ

Прогнозирование оползневых процессов бывает региональным и локальным.

Региональное прогнозирование оползневых процессов заключается в оценке возможности их проявления, интенсивности развития и взаимодействия с сооружениями в пределах значительного района. При таком прогнозировании невозможно определить конкретные типы и места проявления оползневых процессов. Выделение районов осуществляется по принципу относительной однородности условий и факторов развития оцениваемого опасного процесса [162].

Локальное прогнозирование относится к конкретным типам склоновых процессов (в отличие от регионального). Имеет большое практическое значение за свою конкретность, так как полнее оценивает природу и механизм оползневого процесса.

Рассмотрим качественные и количественные методы прогнозирования оползневых опасностей с целью formalизовать методы оценок оползневых процессов на математический язык [129].

2.2.1. Качественный региональный прогноз оползневой опасности

К этому классу методов относятся:

- методы прогнозирования оползней, которые основаны на экспертных оценках;
- методы оценки устойчивости территории в баллах [84].

Методы прогнозирования оползней, основанные на экспертных оценках, содержат три составляющие:

- 1) интуитивно-логический анализ задачи;
- 2) решение и предоставление полуколичественных или качественных оценок;
- 3) обработка результатов решения.

Экспертные оценки делятся на следующие:

- индивидуальные;
- коллективные.

Коллективное мнение обладает большей точностью по сравнению с индивидуальным мнением отдельного специалиста.

Метод оценки устойчивости территории в баллах основан на качественном анализе условий проявления оползневой опасности, носит субъективный характер и позволяет получать только приблизительные оценки [12].

Геодезических работ при качественном прогнозировании оползневых опасностей нет. В дальнейших исследованиях эти методы не учитываются.

2.2.2. Количественный региональный прогноз оползневой опасности

Количественное прогнозирование оползневой опасности состоит из двух подклассов методов [162]:

- 1) детерминированные;
- 2) вероятностные.

К подклассу **детерминированных методов** относятся следующие группы:

- методы оценки проявления оползневых процессов;
- методы аналогий.

Методы оценки проявления оползневых процессов состоят из двух подгрупп:

- распространенность;
- временная изменчивость [12; 157].

Распространенность характеризуется следующими коэффициентами:

- коэффициент линейной пораженности, который рассчитывают по формуле

$$K_{л} = \frac{l}{L}, \quad (2.1)$$

где l — длина оползневой тела; L — общая длина склона;

- коэффициент площадной пораженности:

$$K_{п} = \frac{f}{F}, \quad (2.2)$$

где f — площадь оползня; F — общая площадь участка;

- коэффициент частотной пораженности:

$$K_{ч} = \frac{n}{F}, \quad (2.3)$$

где n — количество проявлений процессов на конкретном участке; F — площадь конкретного участка.

Временная изменчивость характеризуется показателем активизации оползневой опасности (аналог ускорения). Рассчитывается такой показатель по следующей формуле:

$$a = \frac{V_2 - V_1}{t}, \quad (2.4)$$

где V_1 — скорость движения оползня за прошлый год; V_2 — скорость движения оползня в текущем году; t — промежуток времени между замерами скорости оползневой опасности.

Считается, что эти коэффициенты, вычисленные по данным геодезических определений, позволяют оценить потенциальную возможность склоновой территории к возможным проявлениям оползневых смещений, и в связи с этим их рассматривают в качестве прогнозных. Но поскольку коэффициенты относятся к конкретным оползням, то лучше их рассматривать для локального прогнозирования.

Методы аналогий основаны на изучении геоморфологии развития оползней и склонов, выявлении характерных показателей, систематизации данных и сопоставлении их для разных склонов, подлежащих оценке и прогнозированию. Оценка оползневой опасности склона может быть приближенно количественной [162].

При прогнозировании методами аналогий используется такая категория, как изоморфизм инженерно-геологических условий [85]. *Изоморфизмом* определенных объемов литосферы называют равенство структур этих объемов и сходство свойств инженерно-геологических условий. Включает следующие типы методов:

- сравнительно-геологический [49];
- сравнительно-количественный [39];
- геологического подобия [107].

Сравнительно-геологический метод предполагает, что состояние прогнозируемого объекта и состояние объекта-аналога идентичны. Подразумевается, что результаты их движения за одинаковый промежуток времени должны быть близкими.

Геодезические работы не предусмотрены.

Сравнительно-количественный анализ оценивает устойчивость исследуемого склона по соотношению показателей его характеристик с показателями характеристик тех склонов, у которых устойчивость известна. Для использования метода необходимо изучить большое количество разновозрастных склонов и их устойчивость, установить связи между характеристиками. По Е.П. Емельяновой, количественные показатели, которые характеризуют основные параметры оползней, следующие:

- 1) коэффициент удлиненности $I_{удл}$:

$$I_{удл} = \frac{L}{b_{max}}, \quad (2.5)$$

где L — длина оползневого тела; b_{max} — максимальная ширина оползневого тела;

- 2) коэффициент глубины захвата $I_{гз}$:

$$I_{гз} = \frac{h_{max}}{L}, \quad (2.6)$$

где h_{max} — максимальная мощность оползневого тела; L — длина оползня;

- 3) коэффициент уплощенности $I_{упл}$:

$$I_{упл} = \frac{h_i}{b_i}, \quad (2.7)$$

где h_i — глубина оползания в одном из поперечных сечений; b_i — ширина оползневого тела в этом же самом поперечном сечении;

- 4) коэффициент кривизны склона $I_{кр}$:

$$I_{кр} = \frac{H}{R}, \quad (2.8)$$

где H — значение высоты склона; R — значение радиуса кривизны подошвы склона в плане [39].

Эти коэффициенты так же вычисляют по данным геодезических определений. Они могут быть полезными, но не более того.

Метод геологического подобия позволяет корректно подходить к обоснованию подобия оползневых склонов с точки зрения инженерной геологии. В [107] предлагается огромная совокупность количественных условий геологического подобия и возможные решения для всех способов оценки вероятных отклонений в поведении объектов прогнозирования в зависимости от степени их соответствия аналогам.

Заметим, что методы прямых инженерно-геологических аналогий имеют следующие ограничения:

- недостаточный банк данных аналогов;
- невозможность осуществления прогнозирования на больший срок, чем срок существования аналога.

И все-таки считается, что методы прямых инженерно-геологических аналогий являются наиболее перспективными методами и если увеличить банк данных по аналогам, то их развитие в будущем с практической точки зрения будет неограниченно [86].

Подкласс вероятностных методов. Еще не так давно для оценки оползневой опасности использовались в основном детерминистические методики анализа. Однако в последнее время все чаще появляются методики анализа, которые основаны на статистических методах [50; 196].

К *методам прогнозирования оползневой опасности*, основанным на статистическом подходе, относятся:

- метод геодинамического потенциала;
- регрессионный анализ;
- анализ ритмичности;
- анализ факторов оползнеобразования;
- многомерная статистика.

Метод геодинамического потенциала предполагает расчет вероятности появления (активизации) оползневой оползневой процесса в пределах рассматриваемой площади [34].

Основная идея заключается в том, что определение вероятности проявления оползней зависит от величин вероятностей влияния факторов оползнеобразования P_1, P_2, \dots, P_n . При этом величина влияния каждого фактора оползнеобразования принимается независимой от воздействия остальных факторов. Для регионального прогнозирования рекомендуется отметить такие факторы оползнеобразования:

- породы, которые слагают склоны;
- гидрогеологическая обстановка;
- нарушения тектоники;
- суммы среднесуточных осадков;
- крутизна склонов (единственный геодезический параметр);
- влияние абразии или эрозии;
- антропогенное влияние.

Метод регрессионного анализа [104] включает определение статистических зависимостей какого-то показателя от возможных количественных параметров влияния факторов оползнеобразования и в конечном счете получение регрессионного уравнения первой и второй степеней.

Метод применяется для прогнозирования степени развития оползней при возможных изменениях факторов оползнеобразования.

Метод анализа ритмичности оползневой оползневой процесса основан на выявлении периодичности активизаций оползневой оползневой процесса и ее связи с ритмами солнечной активности, выпадением осадков и другими метеорологическими параметрами [11].

Чтобы использовать этот метод, необходимы представительные и продолжительные циклы наблюдений (не геодезические методы) за оползневыми процессами с последующим достаточно сложным математическим анализом для выявления корреляционных функций по определенным специальным программам.

Полученные корреляционные функции дают возможность для изучаемого региона приблизительно выполнять прогноз по количеству оползней на ближайшие годы с их площадью и одновременно прогнозировать время ожидаемой оползневой активизации [168].

Методы статистического анализа оползневых факторов предполагают, что между зависимой переменной (нанесенной на карту распространения оползней) и независимыми переменными (несколькими способствующими факторами) есть существенная статистическая корреляция и что независимые переменные могут использоваться для прогноза возможного расположения оползней в будущем [177]. Геодезические работы не предусмотрены.

Метод многомерной статистики основан на том, что инвентаризация всех оползней непосредственно связана с землетрясениями. Это дает возможность исключить долговременные и продолжительные наблюдения.

Достоинством метода считается то, что он учитывает периодичность сейсмического воздействия для активизации прогнозируемых типов оползней. Проведенные проверки этой методики на ряде сейсмогенноопасных оползней государства Тайвань [196] показали, что методика вполне может быть применена с довольно высокой точностью. Геодезические работы не предусмотрены.

Метод может использоваться и в том случае, если необходимые для построения детерминистических моделей данные не доступны. Если же такие данные доступны, то метод может быть использован вместе с детерминистическими методиками. Это даст возможность повысить качество прогнозирования [162].

Из написанного выше можно заключить, что опасность оценивается коэффициентом линейной или площадной пораженности территории оползневым процессом по геодезическим данным [169]. Склоновые территории, на которых уже были проявления оползневых процессов, оцениваются как территории потенциально опасные, поскольку есть угроза продолжения развития оползневого процесса.

2.2.3. Количественный локальный прогноз оползневой опасности

Локальные прогнозы имеют наибольшее практическое значение, осуществляются комплексом методов и глубже оценивают природу и механизм оползневого процесса [104].

При локальном прогнозировании оползневых опасностей решают два вида задач:

- 1) расчет устойчивости склона;
- 2) оценка скорости смещения оползневых масс.

При изучении устойчивости склона используют следующие методы:

- 1) аналогий;
- 2) физического моделирования;
- 3) математического моделирования [56; 162; 183; 185].

При локальном прогнозировании оползневой опасности *методы аналогий* аналогичны региональному прогнозированию. Но этот метод практически не применяется при инженерно-геологических исследованиях, поскольку нет в достаточном количестве геологических параметров оползневых процессов.

При *методе физического моделирования* предусматривается воссоздание в физических моделях аналогичных физических полей, которые есть у объекта природы, только измененных по размерам в соответствии с масштабом моделирования. Однако для сложных инженерно-геологических условий модели не созданы, поскольку методы физического моделирования не позволяют оценивать устойчивость склонов с необходимой точностью и нуждаются в проверке и подтверждении полученных результатов. Их использование весьма затруднительно. Геодезические работы не предусмотрены.

Методы математического моделирования предусматривают построение математических моделей исследуемых оползневых процессов. При прогнозировании оползневой опасности решают две главные проблемы:

- 1) оценка устойчивости склонов, основанная на теории предельного равновесия;

2) динамика развития оползневых процессов.

В основу расчетов по устойчивости склонов положено известное условие прочности грунтов Кулона – Мора:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (2.9)$$

где τ — удельное сопротивление сдвигу; σ — нормальное напряжение; φ — угол внутреннего трения грунтов; c — удельное сцепление грунтов.

В последнее время в связи с внедрением в практику расчетов устойчивости склонов специальных программных продуктов, в основе которых положены численные методы анализа, методы математического моделирования оползневых процессов становятся все более востребованы. Программные продукты, основанные на механике сплошной среды, получили наибольшее развитие. При этом используются программы, которые основаны на методе конечных элементов PLAXIS и PHASE [56]. Этот метод является основным численным методом решения задач механики сплошной среды [162]. Из зарубежных подходов к оценке оползневых процессов следует упомянуть работы [172; 173; 182; 209].

В программах помимо геологических данных о свойствах грунтов используются данные, полученные из геодезических определений: площадь оползня, крутизна, высота, рельеф. Математическое моделирование в этом случае часто называют геомеханическим моделированием.

В заключение заметим, что качественный сравнительный анализ существующих методов оценки и прогнозирования опасных оползневых процессов для выбора оптимального метода недостаточен. Необходима разработка сравнительного анализа численных критериев эффективности различных методов оценки опасных оползневых процессов.

2.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОПАСНЫХ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

Для выполнения сравнительного анализа численных критериев эффективности различных методов изучения и прогнозирования опасных оползневых процессов установим по аналогии с [166] следующие весовые параметры P_i [129]:

- надежность (результаты оценки и вытекающие из этого выводы должны с максимальной достоверностью соответствовать реальным условиям исследуемого склона);
- результативность (получение конкретного результата за минимальный период времени);
- совокупность (в качестве входной информации применяется несколько характеристик окружающей среды);
- аналитичность (возможность использования физического либо математического моделирования);
- используемость (учитываются только те работы, где реально оценку оползневых процессов выполняли по определенным методам);
- практичность (расходы на разработку, внедрение и применение метода).

Проанализируем диапазоны изменения весов (параметров) P_i .

1. *Надежность* P_1 .

В основу определения надежности P_1 поставим площадной принцип:

$$P_1 = \frac{S}{S_0}, \quad (2.10)$$

где S — площадь оползневых тел; S_0 — общая площадь склоновой территории.

Величина параметра P_1 принадлежит отрезку $[0; 1]$.

2. *Результативность* P_2 .

По нашему мнению, здесь уместно ввести следующие численные значения весов P_{2-j} :

$P_{2-1} = 0,00$ — использовать результаты с последующей обработкой и интерпретацией невозможно;

$P_{2-2} = 0,25$ — результаты, полученные в течение продолжительного периода времени (более одного года), неоднозначны, но их можно использовать в дальнейших исследованиях;

$P_{2-3} = 0,50$ — результаты, полученные в течение небольшого промежутка времени (от месяца до года), неоднозначны, но их можно использовать в дальнейших исследованиях;

$P_{2-4} = 0,75$ — результаты, полученные в течение продолжительного периода времени (более одного года), однозначны;

$P_{2-5} = 1,00$ — результаты, полученные в течение небольшого промежутка времени (от месяца до года), однозначны.

3. Совокупность P_3 .

Параметр определяется количеством исходных характеристик геосреды, и численные значения весов P_{3-j} следующие:

$P_{3-1} = 0,2$ — используется одна входная характеристика;

$P_{3-2} = 0,4$ — используются две или три входные характеристики;

$P_{3-3} = 0,6$ — используются четыре или пять входных характеристик;

$P_{3-4} = 0,8$ — используются шесть или семь входных характеристик;

$P_{3-5} = 1,0$ — используются более семи входных характеристик.

Очевидно, что все входные характеристики должны быть получены из достоверных источников информации и быть достаточно надежными.

4. Аналитичность P_4 .

Здесь нами предлагаются следующие значения величин весов P_{4-j} :

$P_{4-1} = 0,0$ — методы моделирования (как физического, так и математического) отсутствуют;

$P_{4-2} = 0,5$ — применяется один из видов моделирования (физического или математического) изучаемого процесса. Модель детерминированная или вероятностная;

$P_{4-3} = 1,0$ — используются физическое и математическое моделирование одновременно.

5. Используемость P_5 .

В зависимости от использования того или другого метода для оценки риска значения весов P_{5-j} следующие:

$P_{5-1} = 0,25$ — метод применялся один раз;

$P_{5-2} = 0,50$ — метод применялся два раза к различным склонам;

$P_{5-3} = 0,75$ — метод применялся три раза;

$P_{5-4} = 1,00$ — метод применялся более трех раз.

6. Практичность P_6 .

Это наиболее неопределенный параметр, так как неизвестны истинные затраты на весь цикл работ этих методов (разработка, внедрение, апробация). Объективно можно судить о нем по стоимости оборудования, которое задействовано в реализации конкретного метода. По этой причине для данного параметра используем следующую шкалу значений весов P_{6-j} :

$P_{6-1} = 0,1$ — использовалась аэротехника;

$P_{6-2} = 0,4$ — использовалось дорогостоящее лабораторное оборудование;

$P_{6-3} = 0,7$ — использовались лабораторное оборудование и компьютерные комплексы;

$P_{6-4} = 1,0$ — использовался один базовый компьютерный комплект.

Представим указанные выше численные значения весов P_{i-j} для каждого параметра P_i как случайную вектор-строку $\|P_i\|$ и рассчитаем модуль вектора эффективности V_{eff} по следующей формуле:

$$|V_{eff}| = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_{i-j}^2}{\sum_{i=1}^n (\max P_{i-j})^2}}, \quad (2.11)$$

где n — количество параметров, $n = 6$.

Так как для сравнительного анализа методов целесообразно рассчитывать относительную эффективность метода и при этом максимальное значение параметров $\max P_i = 1$, то

$$|\max V_{eff}| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\max P_{i-j})^2} = \sqrt{n},$$

т.е. максимальная абсолютная эффективность метода составит $|\max V_{eff}| = \sqrt{n}$.

Тогда формула (2.11) примет вид

$$|V_{eff}| = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_{i-j}^2}{n}}. \quad (2.12)$$

На основании численного метода выполнен по формуле (2.12), собственно, сам сравнительный анализ эффективности применения нескольких методов, которые были рассмотрены в разделе 2.2, т.е. было выполнено тестирование разработанного численного метода (табл. 2.1 и рис. 2.2–2.12).

Таблица 2.1

**Численный критерий параметров сравнительного анализа
эффективности существующих методов оценки оползневых опасностей**

Оценочные параметры P_i	Обозначения параметров	Название метода							
		Оценка проявления оползневых процессов	Метод аналогий	Метод геодинамического потенциала	Регрессионный анализ	Анализ ритмичности	Статистический анализ оползневых факторов	Многомерная статистика	Математическое моделирование
Надежность	P_1	0,50	0	0,40	0,50	0	0	0,70	0,90
Результативность	P_2	1,00	0,75	0,25	0,75	0	0	0,75	1,00
Совокупность	P_3	0,80	1,00	1,00	1,00	0,40	0,40	0,20	1,00
Аналитичность	P_4	1,00	0,50	0	0	0	0	0	1,00
Используемость	P_5	0,50	0,50	0,50	1,00	0	0,25	0,25	1,00
Практичность	P_6	0,70	0,40	0,40	0,70	0,40	1,00	1,00	1,00
Относительная эффективность метода	V_{eff}	0,78	0,61	0,52	0,74	0,23	0,45	0,60	0,98

Значения параметров P_i ($i = 1, \dots, 6$) для приведенных в табл. 2.1 методов оценки оползневой опасности в склоновых системах определены на основе градации диапазонов значений весов P_{i-j} , которые были рассмотрены выше, исходя из содержательных описаний методов в работах [34; 39; 50; 83–84; 86; 107].

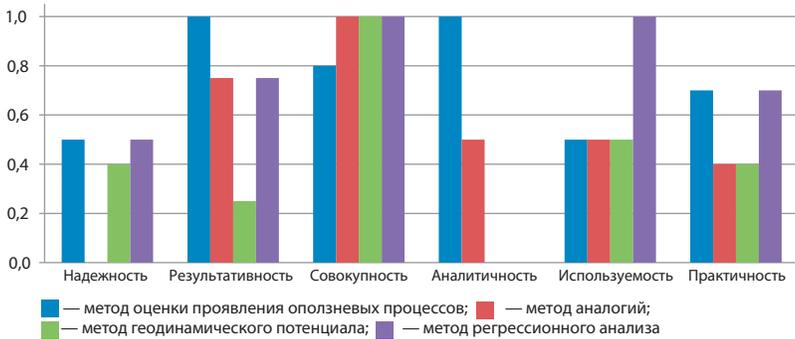


Рис. 2.2. Сравнительная диаграмма характеристик оценочных параметров метода оценки проявления оползневых процессов, метода аналогий, метода геодинамического потенциала и метода регрессионного анализа

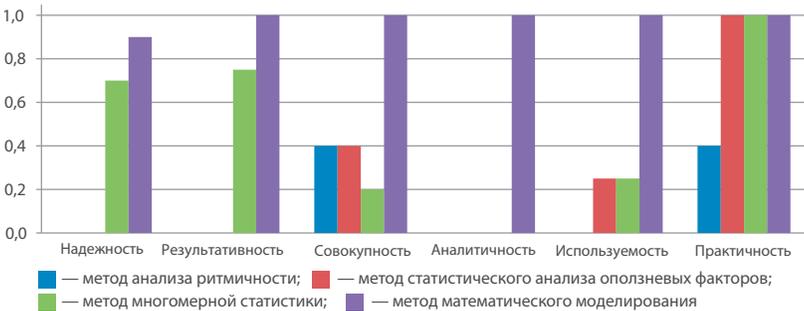


Рис. 2.3. Сравнительная диаграмма характеристик оценочных параметров метода анализа ритмичности, метода статистического анализа оползневых факторов, метода многомерной статистики и метода математического моделирования



Рис. 2.4. Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода оценки проявления оползневых процессов



Рис. 2.5. Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода аналогий

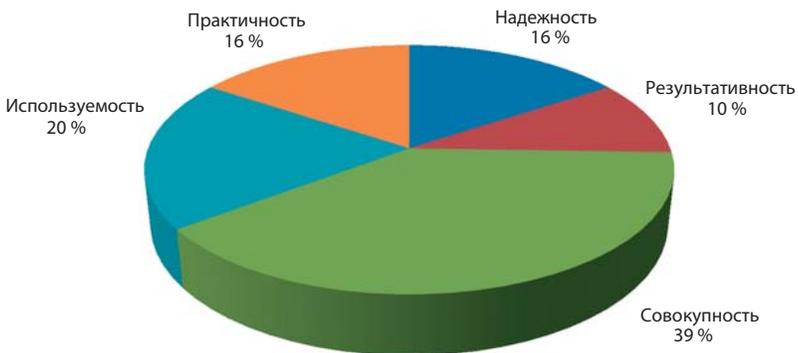


Рис. 2.6. Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода геодинамического потенциала

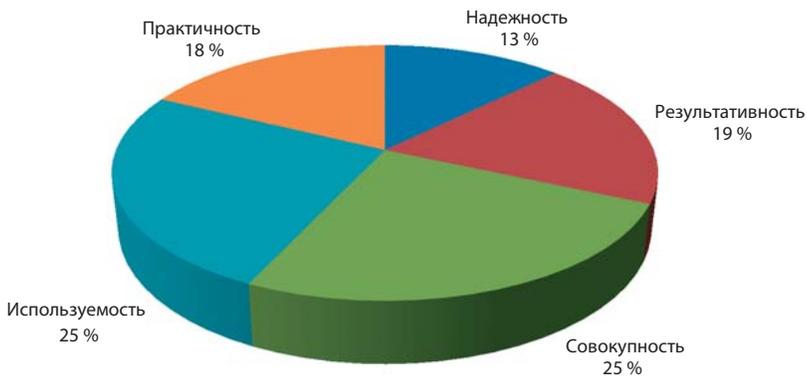


Рис. 2.7. Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода регрессионного анализа

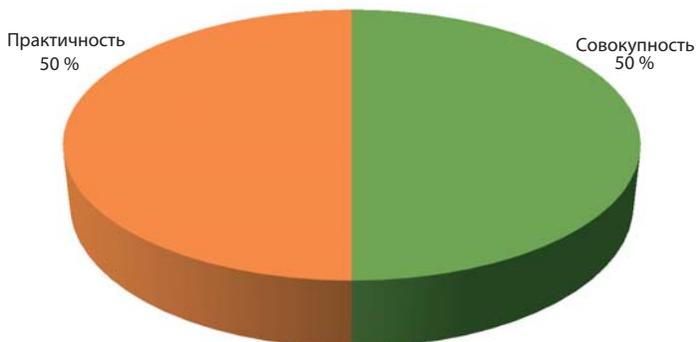


Рис. 2.8. Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода анализа ритмичности

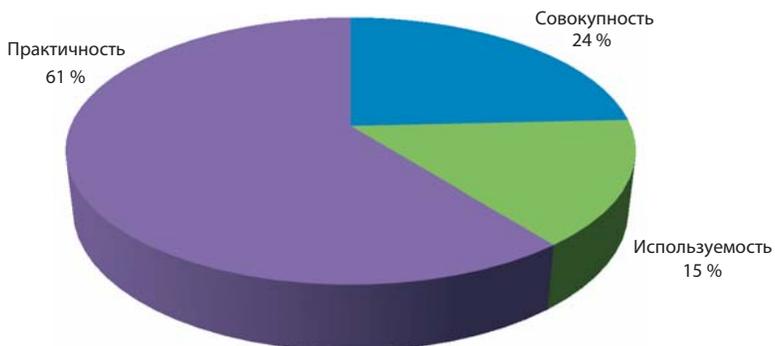


Рис. 2.9. Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода статистического анализа оползневых факторов

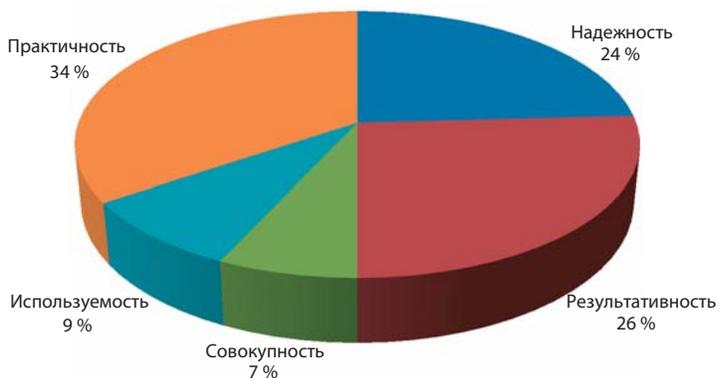


Рис. 2.10. Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода многомерной статистики

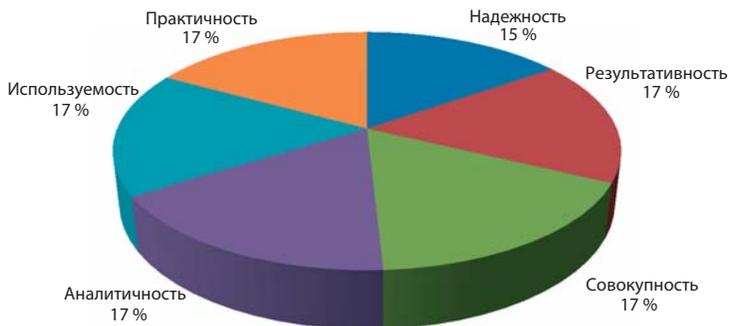


Рис. 2.11. Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода математического моделирования

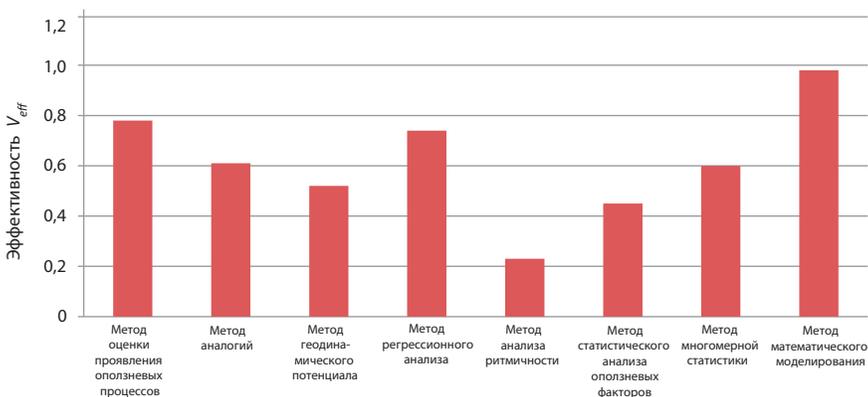


Рис. 2.12. Сравнительная эффективность методов оценки и прогноза оползневых процессов

Таким образом, предлагаемый нами сравнительный анализ численных критериев эффективности различных методов оценки опасных оползневых процессов позволяет достаточно рационально выполнять оценку их эффективности. Результаты тестирования показали, что метод математического моделирования НДС геосреды СС является наиболее предпочтительным для оценки опасностей и рисков оползневых процессов.

2.4. МЕТОДИКА АНАЛИЗА ОПОЛЗНЕВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СРЕДЫ СКЛОНОВЫХ СИСТЕМ

Рассмотрим методику анализа оползневой устойчивости среды СС, основанную на комплексном подходе. Комплексный подход предполагает использование геодезических методов, инженерно-геологического метода и метода математического моделирования. Обоснованность предлагаемого метода заключается в том, что кроме учета данных инженерно-геологических изысканий склоновых территорий и их способов обработки использовать данные геодезического мониторинга этой склоновой территории как наиболее информативный и достоверный способ получения пространственных данных об объекте. Совместная математическая обработка инженерно-геологических и геодезических данных в виде математического моделирования и будет составлять комплексный подход к определению степени устойчивости склона.

Предлагаемый комплексный подход наглядно представлен в виде блок-схемы на рис. 2.13.

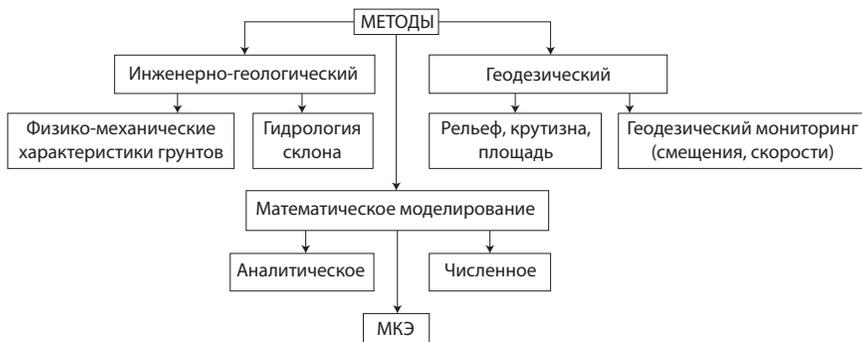


Рис. 2.13. Методы комплексного подхода к анализу оползневой устойчивости склоновых территорий

Краткая характеристика каждого блока приведенной схемы.

Геодезический метод — метод получения объективной информации о рельефе местности, площади, крутизне склона, полученный по результатам топографической съемки с использованием современных геодезических приборов — электронных тахеометров. Геодезический мониторинг за телом оползня в течение определенного периода времени дает информацию о динамике оползневых процессов.

Инженерно-геологический метод — метод получения объективной информации о физико-механических характеристиках грунтов на оползневых участках исследуемого склона, который основан на проведении измерений в скважинах, пробуренных в приповерхностных слоях геологических пород.

Метод математического моделирования — это комплекс операций аналитического и численного моделирования процессов и явлений с применением средств компьютерной техники, который направлен на построение многовариантной схемы развития оползневых процессов с вероятностной оценкой приоритетности того или иного сценария развития рассматриваемого процесса, а также экстраполяции такого развития на заданный временной интервал [166].

Перейдем к рассмотрению этапов исследований, реализуемых при изучении вопроса об оползневой устойчивости СС.

Первый этап — сбор исходной информации. Выполняется путем изучения архивных материалов и отчетов по инженерно-геологическим и инженерно-геодезическим изысканиям. Если же исследование проводится впервые, то по нему должны быть выполнены инженерные изыскания, в которых в обязательном порядке выполняются геологоразведочные работы по всем приоритетным профилям, детальная топографическая съемка и геодезический мониторинг, лабораторные испытания опытных геологических образцов.

Второй этап начинается с разработки математической модели оползневой ситуации на склоновой территории, сложившейся на момент исследования, куда должны войти архивные данные либо данные, полученные на первом этапе.

Существует целый комплекс математических методов: методы, основанные на «теории функции комплексного переменного» [60; 166]; «теории интегральных преобразований Лапласа, Ганкеля, Меллина, Фурье – Бесселя, синус (косинус)-преобразования и др.» [6; 112]; «теории спектрального Фурье-анализа» [74]; «на методе конечных элементов (МКЭ)» [22; 46; 160].

Как видно, в литературе достаточно много внимания уделено математическим методам моделирования. Наиболее широкое распространение в геомеханике получил МКЭ, который

в сочетании с мощными ЭВМ допускает использование моделей материалов практически любой степени сложности [160; 210] в существующих системах автоматизации инженерных расчетов и анализа, таких как: ANSYS, LS-DYNA, Nastran, Abaqus, T-FLEXCAE, Deform, Qform, PLAXIS. Последняя выгодно отличается от своих аналогов простым пользовательским интерфейсом, высокой точностью расчетов, а также учетом нелинейности сыпучей среды. Для расчета НДС оползневого склона выполняются геотехнические расчеты методом конечных элементов в программном комплексе PLAXIS 3D.

Целью таких расчетов являются прогнозирование деформаций склоновой территории, а также общая устойчивость геотехнической системы [180]. Правильный выбор модели позволит наиболее адекватно учесть как первичную, так и вторичную консолидацию грунта, а также его переуплотненное состояние и смоделировать поведение грунта во времени.

Построенную на основании метода конечных элементов математическую модель оползневой устойчивости склона следует наполнить исходными данными, подготовка которых осуществляется на *третьем этапе*.

Отметим, что вся исходная информация — геодезическая и геологическая — представляет собой набор цифровых карт в электронном виде и что необходимую информацию можно получать непосредственно из них.

На *четвертом этапе* выполняется расчет компонент тензора геодинамических напряжений (нормальных и касательных) и векторов смещений оползня в плане — в случае двумерной задачи или в пространстве — в случае трехмерной задачи. Математическая модель оптимизируется путем ввода данных физико-механических характеристик геосреды. Это дает возможность приблизить построенную модель к реальной геодинамической ситуации.

Процедура графической интерпретации расчетных данных по составляющим вектора смещений на склоне выполняется на *пятом этапе*. Полный вектор смещений характеризует как процессы сжатия-растяжения оползня (нормальные напряжения), так и процессы сдвига (касательные напряжения). Строятся карты изополей деформаций склона в трехмерной математической модели в плоскости XOZ и (или) YOZ .

На *шестом этапе* выполняется анализ полученных карт. Такая наглядная форма дает возможность представить скрытую динамику оползневого процесса.

Кроме того, значения векторов смещений оползня в каждом цикле геодезического мониторинга позволяют корректировать расчетные характеристики грунтов для расчета устойчивости склонов и оценить динамику оползневых процессов. Все расчеты по определению смещения оползневого тела как единого целого в пространстве в каждом цикле выполняются по авторской компьютерной программе «Расчет величин смещений оползней (длина, направление)» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663549).

На *седьмом этапе* в рамках комплексного подхода решаемых задач самым важным является оценка деформации склона в долгосрочной перспективе, что позволяет моделировать оползневую ситуацию с точки зрения прогнозных оценок. Моделирование оползневого процесса выполняется по нескольким сценариям. Выбор сценария зависит в основном от двух параметров: сжимаемости грунтов и времени окончания вторичной консолидации (параметров, которые позволяют оценить необходимость мер по инженерной защите склонов). Вариации этих показателей накладываются на статическую модель устойчивости склона; выполняется аппроксимация модели к выбранному сценарию развития оползневой ситуации.

Рассмотренные выше этапы для наглядности представим в виде блок-схемы (рис. 2.14).

Нужно еще раз подчеркнуть: в комплексном подходе используются только научно обоснованные методы, которые подтверждены практикой. Помимо этого предполагается, что рассматриваемый подход можно быстро и легко перенастроить на любую другую выбранную склоновую систему.

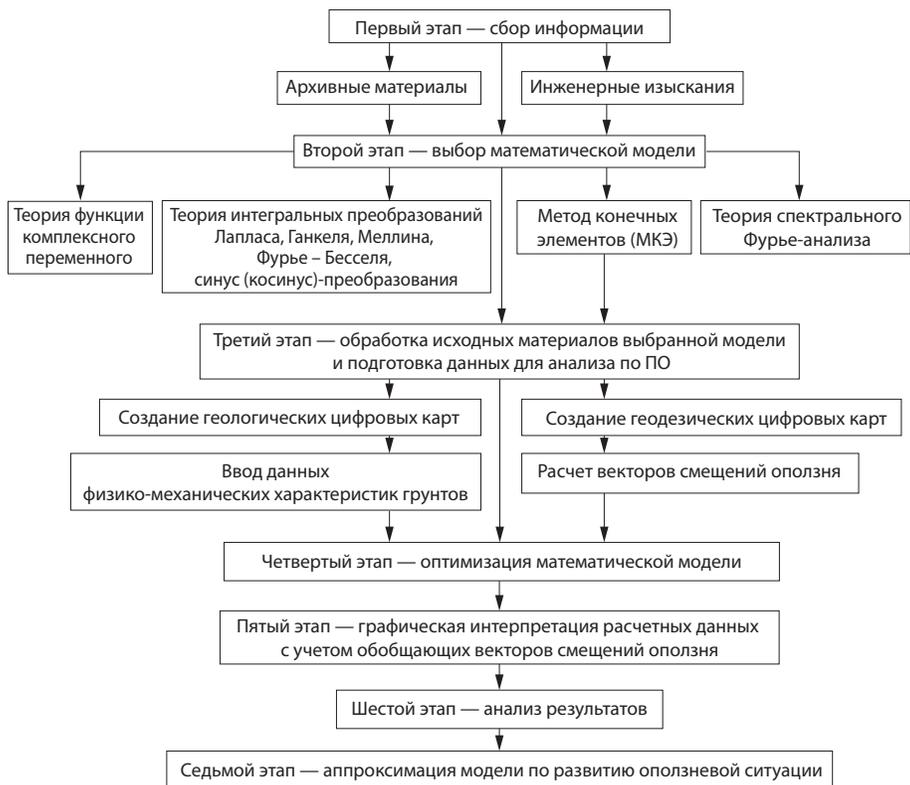


Рис. 2.14. Блок-схема комплексного подхода по определению степени устойчивости склона

С позиций комплексного подхода могут быть решены следующие задачи:

- 1) комплексная оценка состояния среды СС;
- 2) исследование оползневой ситуации и оценка уровня оползневой риска в СС;
- 3) проектирование противооползневых мероприятий по обеспечению безопасности сооружений;
- 4) построение математических моделей по обеспечению безопасного и устойчивого развития СС.

Подводя итог к вышесказанному, отметим, что, по нашему мнению, предлагаемая методика анализа оползневой устойчивости среды СС, которая основана на комплексном подходе, дает возможность наиболее адекватно и эффективно решать проблемы обеспечения безопасности сооружений и комплексной оценки оползневой риска в СС. Пример использования этой методики дан в главе 7.

Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОСТАНОВКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

3.1. ОСОБЕННОСТИ ПОСТАНОВКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

Основным принципом построения специальных планово-высотных опорных сетей на оползневых склонах является обеспечение заданных допусков определения смещений оползневых точек [2; 33; 113; 153]. При этом следует учитывать, что условия выполнения измерений на оползневых склонах вносят свои отличительные особенности по сравнению с установленной методикой построения государственной опорной геодезической сети. Основные факторы, обуславливающие эти особенности, сводятся к следующему:

- стороны опорных сетей на оползневых склонах значительно короче, чем в государственных геодезических сетях, поэтому погрешности центрировок и редукций больше влияют на результаты измерений;

- из-за значительных наклонов визирных лучей увеличивается влияние погрешностей приборов;

- природные условия, зелененность и застройка создают над склоном микроклимат с быстро изменяющимися температурными полями, которые искривляют визирные лучи и ухудшают результаты измерений.

При разработке проектов планово-высотных опорных сетей для геодезических наблюдений на склоне необходимо выполнять следующие требования:

- места закладки пунктов должны быть удобными для наблюдений и обеспечивать их сохранность и стабильность на достаточно большой промежуток времени;

- схемы построения должны быть простыми (типовыми);

- стоимость создания сетей должна быть минимальной.

Опорная сеть должна быть рассчитана на несколько лет работы. В течение этого времени могут быть различные непредвиденные события, в частности повреждение или даже уничтожение опорных знаков.

Все опорные реперы связываются между собой и создают наблюдательную опорную сеть, состоящую из геодезических четырехугольников. Схемы построения опорной сети в виде замкнутого полигонометрического четырехугольника — наиболее маневренный, мобильный и рациональный вид построения сети. Наблюдательную сеть можно привязать к государственной или к городской опорной триангуляционной сети, а можно оставить свободной.

К полевым работам относятся установка и закрепление реперов, которые представляют собой постоянные геодезические знаки, значительная часть длины которых расположена ниже уровня земной поверхности. Глубина их заложения, как правило, не должна быть меньше глубины промерзания грунта.

Выбор места установки и соблюдения соответствующей технологии закрепления пунктов специальных планово-высотных опорных сетей на местности является одним из ответственных этапов общего комплекса изучения режима оползневых процессов. Важная роль при этом отводится конструктивным особенностям центров и наружных знаков.

В процессе детальной рекогносцировки окончательно выбирают места закладки опорных пунктов и производят их установку согласно рабочим чертежам. Места для установки опорных реперов должны быть легкодоступны, с хорошей видимостью и расположены на устойчивых участках — на бровках и на межоползневых гребнях. Это возможно в верхних отделах оползня, в области его цирка, так как в данных зонах преобладают отрицательные формы рельефа и гребни возвышаются над оползневыми цирками.

В нижних отделах оползней, в области его языка, в связи с преобладанием положительных форм рельефа устойчивые полосы у бортов оползня часто оказываются расположенными

ниже, чем тело оползня, и поэтому видимость бывает недостаточной. Кроме того, на оползневых косогорах часто отдельные оползни бывают хорошо разграничены в области цирков, разделены гребнями, которые можно удобно использовать для установки опорных реперов. В нижних частях косоголов сползающие земляные массы отдельных оползней обычно сливаются, и порой бывает трудно найти устойчивые участки.

Иногда в некотором отдалении от оползня возвышаются пункты (останцы, выступающие участки бровки, искусственные сооружения и т.д.), обладающие прекрасной видимостью по отношению к оползню. Естественно, что такие пункты выбирают при разбивке опорной сети.

Закладку глубинных реперов производят в присутствии инженера-геолога. При бурении ведут инженерно-геологический журнал и по каждой скважине составляют геологическую колонку. Основанием репера должен быть практически несжимаемый слой породы, который укажет инженер-геолог.

Конструкции знаков плановых опорных сетей обязательно должны быть такими, чтобы обеспечить принудительную центровку приборов и визирных целей, что в значительной мере упрощает производство полевых измерений и повышает точность их результатов, хотя можно применять и обычные.

Рекомендуется вначале не устанавливать окончательно опорные реперы в выбранных пунктах, а закреплять их временными кольями, так как при размещении знаков оползневой сети может оказаться, что они не обеспечиваются видимостью с некоторых опорных реперов и что иногда требуется их небольшое смещение, чтобы видимость была хорошей. Следует также предусматривать будущее смещение оползневого знака и так назначать их положение, чтобы при своем смещении они не выходили из пределов видимости.

В результате проведения геодезических работ на оползневых склонах и мониторинга оползневых процессов получают информацию о крутизне склона, высоте склона, об объемах смещающихся масс и о скорости смещения оползня. Эта весьма важная информация, по которой будет определяться интегральный уровень оползневой опасности.

Постановка систематических натуральных наблюдений за состоянием зданий и сооружений, расположенных на оползнях, является одной из ответственных задач. В первую очередь такие наблюдения преследуют цель обеспечить увеличение долговечности и надежности эксплуатируемых и строящихся сооружений. С другой стороны, изучение их деформаций дает обширную информацию о распределении напряжений и зон деформаций на оползневом склоне. Кроме того, на сооружениях оползневые процессы проявляют себя значительно раньше, чем на поверхности склона. В результате проведенного мониторинга деформаций зданий и сооружений получают информацию об осадках, о горизонтальных сдвигах, кренах и раскрытиях трещин. Эта весьма важная информация, по которой будет определяться интегральный уровень оползневой уязвимости.

3.2. СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ОПОЛЗНЕЙ

Инструментом регулирования взаимодействия с природной средой для снижения уровня неблагоприятных последствий служит мониторинг природно-технических систем с включением в его состав функций управляющих воздействий. К природно-техническим системам можно отнести любые системы антропогенной трансформации природной среды [23; 96]. В частности, к этим системам относятся склоновые территории.

Важнейшей составляющей мониторинга природно-технических систем является геодезический мониторинг, обеспечивающий пространственно-временное определение положения, размеров и форм контролируемых объектов территорий. В зависимости от конкретных условий оползневого склона разработано и применяется на практике достаточно много методов определения оползневых смещений, большинство из которых основано

на применении геодезических методов. Преимущество геодезических методов заключается в возможности получения величины абсолютных смещений оползней. Основными из этих методов являются: триангуляция, трилатерация, геодезические засечки (прямые, обратные, боковые и линейно-угловые), полигонометрия, ГНСС-определения (ГНСС — глобальная навигационная спутниковая система), координатный метод, лазерное сканирование, стереофотограмметрия, геометрическое и тригонометрическое нивелирование [5; 186; 192; 199; 201; 204; 215]. При этом первые четыре метода могут применяться как самостоятельно, так и в их различных сочетаниях. Методы геометрического и тригонометрического нивелирования всегда сопутствуют названным выше методам и дополняют друг друга. Кроме того, при аэро- или наземной фотограмметрии можно получить координаты точек, контурные карты и поперечные сечения оползней. Фотограмметрия позволяет также провести количественный анализ изменения морфологии склона, а также определить векторы движения оползня.

В настоящее время важнейшими средствами проведения повторных геодезических наблюдений являются электронные тахеометры, лазерные сканеры и глобальные навигационные спутниковые системы (рис. 3.1). Для обработки результатов наблюдений используются разнообразные программные продукты, например: AutoCAD, Microstation, Credo и др.



Рис. 3.1. Принципиальная схема сочетания методов ГНСС и наземной съемки для изучения оползней

Геодезические методы через сеть точек, связанных между собой измерениями углов и/или расстояний, обычно обеспечивают достаточную избыточность наблюдений для математической обработки и оценки точности. Они дают глобальную информацию о поведении оползня. Геодезические методы традиционно используются в основном для определения абсолютных смещений выбранных точек на поверхности оползня относительно некоторых опорных точек, которые считаются устойчивыми.

При медленных скоростях смещений необходима высокая точность наблюдений, следовательно, это условие является обязательным требованием, предъявляемым к используемым методам [5; 186; 192; 199; 201; 204; 215].

Самым распространенным наземным методом наблюдений за сетью оползневых точек является координатный метод. Современные технологии в координатном методе обеспечивают электронные тахеометры, способные измерять углы с точностью $\pm 0,5''$ и расстояния с точностью $\pm 1 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} \text{ мм}$ до 3500 м (Leica Geosystems). Тахеометры позволяют определять координаты оползневых точек в течение довольно короткого периода времени. В координатном методе плано-высотное положение оползневых точек определяется непосредственно с опорных пунктов, что исключает накопление погрешностей измерений. Универсальность метода позволяет применять его практически в любых условиях склона с минимальными затратами труда. Для достижения приемлемой точности повторных геодезических наблюдений разработаны специальные конструкции грунтовых реперов для закрепления оползневых точек, визирных целей [33].

Данные дистанционного зондирования Земли в исследованиях оползней активно используются с 90-х годов XX века. Эти данные применяются как для идентификации и картографирования оползней, так и для мониторинга и анализа динамики оползневых процессов. Для указанных целей привлекают съемки в видимой, ближней инфракрасной, тепловой инфракрасной, радиоволновой и ультрафиолетовой зонах спектра. В последнее время исследования оползней средствами космической съемки расширились за счет съемок в радиодиапазоне, поскольку радарная интерферометрия позволяет обнаруживать деформации и смещения земной поверхности в доли сантиметров [66]. Спутниковая радарная интерферометрия, например InSAR, — метод измерений, использующий эффект интерференции электромагнитных волн. Основная идея метода заключается в формировании интерферограммы, которая представляет собой результат композиции двух радиолокационных изображений одной и той же территории, содержащих информацию об амплитуде и фазе сигнала и полученных идентичными радарными из близко расположенных точек орбиты. Для обработки данных спутниковой радарной интерферометрии используется следующее свободное программное обеспечение: SNAP (SentiNel Application Platform); GMTSAR — пакет для обработки радарных снимков, основанный на утилитах GMT (Generic Mapping Tools); StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers); DORIS (Delft Object-oriented Radar Interferometric Software); RAT (Radar Tools); ROI_PAC (Repeat Orbit Interferometry PACkage). При идентификации оползней основными источниками данных являются аэрофотоснимки, часто объединенные с данными спутниковых снимков в видимом (оптическом) или радиодиапазонах. При мониторинге оползней, предполагающем оценку их динамического состояния, основным источником сведений являются космические снимки. В настоящее время разработано большое количество программ по обработке цифровых снимков, таких как COLMAP, Meshroom, MicMac, Regard3D, VisualSFM, Fotomod и др.

Применение ГИС-технологий дает возможности оперативного выделения оползнеопасных участков на значительных территориях на основе применения автоматизированных средств измерений, обработки и наглядного представления земной поверхности, включающих методы воздушного лазерного сканирования для построения цифровых моделей рельефа местности [61].

Еще одним из современных методов по наблюдениям за сетью оползневых точек являются GPS-технологии (Global Positioning System). GPS состоит из 32-х искусственных спутников Земли семейства NAVSTAR. Такое количество спутников необходимо для обеспечения работоспособности системы навигации. Также в систему входят спутниковые приемники, находящиеся в геодезическом высокоточном оборудовании. Описание выполнения работ по развитию спутниковой геодезической сети сгущения при использовании базовых станций дано в [108]. Задача приемников уловить и записать данные, принимаемые от спутниковых передатчиков. Камеральная обработка результатов спутниковых наблюдений выполняется с использованием пакета программ Trimble Total Control 2.73 [57].

3.3. Обоснование точности геодезических наблюдений деформаций оползней

При повторных геодезических наблюдениях деформаций инженерных сооружений точность наблюдений принято ставить в зависимости от изменения величины самой деформации в плане [14; 72; 118]:

$$\frac{\sigma_S}{S} \leq \frac{1}{\tau}, \quad (3.1)$$

где σ_S — среднеквадратическое отклонение измерения деформации; S — величина деформации в плане; τ — коэффициент, зависящий от вида распределения погрешностей и уровня доверительной вероятности (как правило, закон распределения погрешностей геодезических измерений близок к нормальному).

Нам представляется, что применительно к оползневым процессам целесообразно использовать принцип (3.1) совместно с ранее упомянутым предположением в работе [33] о связи точности наблюдений за оползнем с его скоростью. Тогда вместо (3.1) запишем

$$\frac{\sigma_S}{S} = \frac{\sigma_V \Delta t}{V \Delta t} = \frac{\sigma_V}{V} \leq \frac{1}{\tau}, \quad (3.2)$$

где

$$V = \frac{S_{j+1} - S_j}{\Delta t}; \quad (3.3)$$

S — величина смещения оползня; j — номер цикла наблюдений; Δt — интервал времени между циклами наблюдений.

В работе [72] показано, что в зависимости от доверительной вероятности $P = 0,946...0,997$ предельное отношение $\frac{1}{\tau}$ следует принимать (по правилам 2σ) равными $\frac{1}{4} \dots \frac{1}{6}$.

По правилам теории погрешностей [10] определим среднеквадратическую погрешность (СКП) m_V функции (3.3), приняв наблюдения в циклах равноточными:

$$m_V = \sqrt{\frac{m_S^2 + m_S^2}{\Delta t^2}} = 1,41 \frac{m_S}{\Delta t}. \quad (3.4)$$

Так как СКП m стремится к своему теоретическому значению СКО σ , то $m_V \approx \sigma_V$ и $m_S \approx \sigma_S$. Подставив (3.4) в (3.2), получим

$$1,41 \frac{m_S}{\Delta t} \leq \frac{1}{4}. \quad (3.5)$$

Окончательно получим

$$\sigma_S \leq 0,2V\Delta t. \quad (3.6)$$

В табл. 3.1 приведены значения СКО смещения σ_S для разных скоростей смещения оползня V в интервале времени между циклами наблюдений $\Delta t = 1$ месяц.

Таблица 3.1

Значения СКО σ_S смещений в зависимости от скоростей

V , мм/мес.	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
σ_S , мм	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20

В последние годы в геодезической практике используются точные и высокоточные геодезические приборы — электронные тахеометры Leica, Sokkia, Topcon и др. Эти приборы позволяют получать в результате наблюдений пространственные координаты оползневых точек

непосредственно на дисплее приборов с их сохранением в оперативной памяти приборов и с возможностью дальнейшего экспорта данных на компьютер. Приведем расчет точности для координатного способа повторных геодезических наблюдений.

В этом способе координаты точки оползневой сети относительно исходного пункта определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} X_i &= X_0 + D_{0-i} \sin z_{0-i} \cos \alpha_{0-i}; \\ Y_i &= Y_0 + D_{0-i} \sin z_{0-i} \sin \alpha_{0-i}; \\ H_i &= H_0 + D_{0-i} \cos z_{0-i} + i - v, \end{aligned} \quad (3.7)$$

где X_0, Y_0, H_0 — координаты исходного пункта; D_{0-i} — наклонное расстояние; z_{0-i} — зенитное расстояние; α_{0-i} — дирекционный угол; i — высота прибора; v — высота цели.

Пренебрегая погрешностями исходных пунктов, высоты прибора и высоты цели, найдем СКП определения координат оползневых точек:

$$\begin{aligned} m_{X_i} &= \sqrt{m_{X_0}^2 + \sin^2 z_{0-i} \cos^2 \alpha_{0-i} m_D^2 + D_{0-i}^2 \cos^2 z_{0-i} \cos^2 \alpha_{0-i} \frac{m_z^2}{\rho^2} + D_{0-i}^2 \sin^2 z_{0-i} \sin^2 \alpha_{0-i} \frac{m_a^2}{\rho^2}}; \\ m_{Y_i} &= \sqrt{m_{Y_0}^2 + \sin^2 z_{0-i} \sin^2 \alpha_{0-i} m_D^2 + D_{0-i}^2 \cos^2 z_{0-i} \sin^2 \alpha_{0-i} \frac{m_z^2}{\rho^2} + D_{0-i}^2 \sin^2 z_{0-i} \cos^2 \alpha_{0-i} \frac{m_a^2}{\rho^2}}; \\ m_{H_i} &= \sqrt{m_{H_0}^2 + \cos^2 z_{0-i} m_D^2 + D_{0-i}^2 \sin^2 z_{0-i} \frac{m_z^2}{\rho^2}}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

где m_D — СКП наклонного расстояния; m_z — СКП зенитного расстояния; m_a — СКП дирекционного угла; ρ — число секунд в одном радиане, равное 206 265".

СКП пространственного положения координат оползневой точки:

$$m_i = \sqrt{m_{X_i}^2 + m_{Y_i}^2 + m_{H_i}^2}. \quad (3.9)$$

Подставим (3.8) в (3.9) и приведем подобные члены. Получим

$$m_i = \sqrt{m_0^2 + \sin^2 z_{0-i} (\cos^2 \alpha_{0-i} + \sin^2 \alpha_{0-i}) m_D^2 + \cos^2 z_{0-i} m_D^2 + D_{0-i}^2 \cos^2 z_{0-i} \frac{m_z^2}{\rho^2} (\cos^2 \alpha_{0-i} + \sin^2 \alpha_{0-i}) + D_{0-i}^2 \sin^2 z_{0-i} \frac{m_a^2}{\rho^2} (\sin^2 \alpha_{0-i} + \cos^2 \alpha_{0-i}) + D_{0-i}^2 \sin^2 z_{0-i} \frac{m_z^2}{\rho^2}}. \quad (3.10)$$

Так как СКП m_a и m_z характеризуется СКП m_β измерения углов электронным тахеометром, то формула (3.10) примет вид

$$m_i = \sqrt{m_0^2 + m_D^2 + D_{0-i}^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2} (1 + \sin^2 z_{0-i})}. \quad (3.11)$$

Поскольку смещения оползневых точек определяют по разностям их координат, полученных в разных циклах наблюдений, то формула для вычисления СКП перемещения будет равна

$$m_{S_i} = \sqrt{2} \sqrt{m_D^2 + D_{0-i}^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2} (1 + \sin^2 z_{0-i})}. \quad (3.12)$$

Так, например, при $D = 100$ м, $z = 30^\circ$, $m_D = 2$ мм, $m_0 = 3$ мм, $m_\beta = 2''$ получим $m_{S_i} = 4$ мм, т.е. погрешность перемещения точки составит 4 мм.

3.4. ОБОСНОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЕФОРМАЦИЙ ОПОЛЗНЕЙ

Одним из основных показателей, характеризующих динамику оползневых процессов, является скорость смещения оползня. От скорости оползня зависит устойчивость оползневого склона и, соответственно, безопасность зданий и сооружений. В [79] приведена классификация скорости смещения оползней с оценкой их движения (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Скорости смещения оползней

Класс скоростей	Скорость смещения	Оценка движения
6	3 м/с	Исключительно быстрое
5	0,3 м/мин	Очень быстрое
4	1,5 м/сут	Быстрое
3	1,5 м/мес.	Умеренное
2	1,5 м/год	Очень медленное
1	0,06 м/год	Исключительно медленное

По результатам повторных геодезических наблюдений скорость смещения оползня вычислим по формуле (3.3) со среднеквадратической погрешностью, вычисляемой по формуле (3.4). Остается нерешенным вопрос о периодичности геодезического мониторинга.

Вопросам обоснования периодичности наблюдений в технической литературе было уделено недостаточно внимания. На практике, как правило, назначается некоторая более или менее произвольная периодичность наблюдений, скорее связанная с производственными возможностями, чем с характером оползания. Это приводит к потерям информационных характеристик точности наблюдений. Одним из примеров такой некорректности может служить рекомендация выполнять полный цикл наблюдений на оползнях в среднем один раз в год или 2–4 цикла в год, если проводятся строительные работы на объекте (подрезка склона, обводнения его при наполнении водохранилища и др.) [138; 139], которая игнорирует необходимость учитывать влияние сезонных изменений климатических воздействий [35].

Нам представляется более логичным, если частота наблюдений будет находиться в зависимости от скорости смещения оползня [127]. Если скорость оползня оценивается, например, как исключительно медленное, то не имеет смысла в частых наблюдениях. И наоборот.

В механике смещения S на оползневых склонах относятся к неравномерным движениям со скоростью V в течение интервала времени Δt между циклами измерений и определяются как

$$S = V\Delta t. \quad (3.13)$$

Поставим условие, чтобы смещения S , вычисляемые по формуле (3.13), были бы меньше критического смещения $S_{\text{крит}}$, т.е.

$$V\Delta t \leq S_{\text{крит}} \quad (3.14)$$

Тогда интервал времени Δt между циклами наблюдений можно вычислить по формуле

$$\Delta t \leq \frac{S_{\text{крит}}}{V}. \quad (3.15)$$

Необходимо определить $S_{\text{крит}}$. Здесь возможно следующее соображение.

Для определения $S_{\text{крит}}$ рассмотрим медленные смещения. Именно на таких оползневых склонах, как правило, ведется строительство. Их всего два: исключительно медленные и очень медленные. Скорость смещения у исключительно медленных $V = 0,06$ м/год, а у очень медленных скорость смещения $V = 1,5$ м/год (см. табл. 3.2). Тогда

$$S_{\text{крит}} \leq \frac{V_1 + V_2}{2} \Delta t. \quad (3.16)$$

Подставив данные скоростей в формулу (3.16), получим, что в год $S_{\text{крит}}$ составляет

$$S_{\text{крит}} \leq 0,78 \text{ м,}$$

а в месяц

$$S_{\text{крит}} \leq 65 \text{ мм.}$$

Тогда по формуле (3.15) получаем

$$\Delta t \leq \frac{65 \text{ мм}}{V}.$$

С учетом этого приведем в табл. 3.3 значения интервала времени Δt между циклами наблюдений при соответствующих скоростях смещения оползней.

Таблица 3.3

Значения интервала времени Δt между циклами наблюдений при различных скоростях смещения оползней

V , мм/мес.	5	10	15	20	30	40	45	50	60	70	80	90	100
Δt , мес.	13	6,5	4,3	3,2	2,2	1,6	1,4	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6

Исходя из общих предположений о ходе оползневых смещений, рекомендуется временной интервал Δt задавать в начале наблюдений. Затем в процессе наблюдений его необходимо корректировать: периодичность наблюдений должна изменяться в соответствии с изменениями скорости движения оползня. В периоды активизации она должна увеличиваться и уменьшаться в периоды угасания.

Блок-схема периодичности наблюдений за смещениями оползней показана на рис. 3.2.

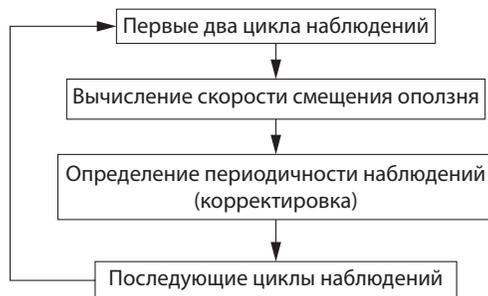


Рис. 3.2. Блок-схема периодичности наблюдений

Пример. Если $V = 30$ мм/мес., то СКО смещения $\sigma_S = 6$ мм (см. табл. 3.2). При $D = 100$ м, $z = 10^\circ$ и технических характеристиках тахеометра $m_D = 3$ мм и $m_\beta = 5''$ найдем погрешность смещения оползневой точки:

$$m_{S_i} = \sqrt{2} \sqrt{(3 \text{ мм})^2 + 2 \left(10\,000 \frac{5''}{206\,265''} \right)^2} 1,030 = 5 \text{ мм.}$$

Эта погрешность соответствует скорости смещения оползневой точки. Следующий цикл наблюдений необходимо выполнять через 2,2 месяца (см. табл. 3.3).

Если $V = 15$ мм/мес., то $\sigma_S = 3$ мм. Тогда при $D = 100$ м нужно подобрать прибор с более высокими точностными характеристиками: $m_D = 3$ мм и $m_\beta = 2''$. Тогда $m_{S_i} = 3$ мм. Следующий цикл наблюдений — через 4,3 месяца.

Таким образом, вовремя проведенные наблюдения за смещением оползня дадут возможность своевременно принять необходимые меры по обеспечению безопасности сооружений, возведенных на склоновых территориях.

3.5. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ ОПОРНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ НА СКЛОНОВЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

В целях экономической эффективности геодезические измерения элементов опорной сети должны выполняться оперативно, в кратчайшие сроки, с минимальными затратами полевых и камеральных работ, что будет иметь место при оптимальном числе пунктов сети и оптимальном количестве избыточных измерений. Так как освоение оползневого склона возможно только при исключительно медленных скоростях движения оползня ($V = 0,06$ м/год) и очень медленных ($V = 1,5$ м/год), то для регистрации столь малых подвижек необходимы максимально возможная точность наблюдений деформационных оползневых точек на теле оползня и еще более высокая точность при контроле стабильности пунктов опорной сети, размещенных за границами тела оползневого склона.

С позиции их назначения основным требованием к таким сетям является стабильность положения пунктов во времени. Это обстоятельство накладывает особые требования как на технологию создания таких деформационных сетей, так и на специфику их математической обработки — проверку стабильности положения пунктов сети в каждом цикле наблюдений. В этой связи необходимо создание методики, которая должна включать решение следующих задач:

- создание опорной локальной сети в условной системе координат;
- контроль над стабильностью сети;
- создание деформационной сети (на оползне и зданиях);
- методика циклических наблюдений за деформационной сетью;
- обработка циклов наблюдений.

Современные средства геодезических измерений позволяют модифицировать традиционные методы создания опорных (локальных) сетей на оползневых склонах посредством внедрения линейно-угловых сетей в виде полигонометрических ходов заданной точности.

3.5.1. Метод полигонометрии

Довольно эффективным методом при наблюдениях за смещениями сооружений, которые имеют вытянутую форму, является метод полигонометрии. Такими сооружениями могут быть магистральные дороги, берегоукрепительные сооружения и др.

Методом полигонометрии опорная сеть создается, как правило, в виде отдельного хода (рис. 3.3), опирающегося на два исходных пункта A , B и направления.

Интересная идея по проектированию полигонометрического хода заданной точности опубликована в [42]. Разовьем эту идею для создания опорной сети для наблюдений деформаций сооружений, возведенных на склоновых территориях.

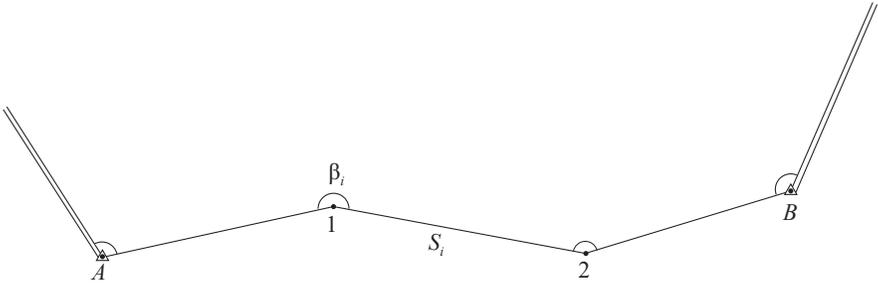


Рис. 3.3. Вытянутый ход полигонометрии

В последнее время довольно часто требование к точности хода задается в виде выражения

$$M = Tm, \quad (3.17)$$

где T — коэффициент обеспечения точности измерений (для нашей задачи логично иметь $1 < T < 4$); m — точность измерений.

Основу расчетов для проектирования составляет решение известного точностного уравнения:

$$M = \mu \sqrt{P^{-1}}, \quad (3.18)$$

где M — СКП заданной функции; μ — СКП результата измерения (угла или стороны), вес P которого принимаем равным единице (СКП единицы веса); P^{-1} — обратный вес оцениваемой функции.

Сравнивая формулу (3.18) с формулой (3.17), видим, что

$$P^{-1} = T^2. \quad (3.19)$$

Формула (3.18) решает прямую задачу оценки точности сети, а вытекающая из нее формула

$$m = \frac{M}{T} = \frac{M}{\sqrt{P^{-1}}} \quad (3.20)$$

решает обратную задачу оценки точности сети. По этим двум формулам оценивается качество составленного проекта геодезической сети, т.е. сети, геометрические параметры которой (форма, размер) уже определены — отражены на топографическом плане. В этом случае из двух величин в правой части формул (3.18) и (3.20) неизвестной является лишь обратный вес P^{-1} искомой функции, зависящий от геометрии сети [124]. При классическом решении оценки качества проекта сети геометрическая схема ее на плане уже определена. Следовательно, значение обратного веса P^{-1} заданной функции вычисляется либо по способу метода наименьших квадратов, либо по приближенным формулам.

Но в ситуации, представленной формулой (3.17), все три элемента формул (3.18) и (3.19) известны априори, т.е. еще до разработки плана геометрической схемы сети обратный вес P^{-1} функции уже задан. Следовательно, в этом случае необходимо определить геометрические параметры предполагаемого к созданию на объекте работ полигонометрического хода, удовлетворяющего всем трем заданным значениям элементов формул (3.18) и (3.20) [124].

Соответствующий анализ выполним на примере вытянутого равностороннего и уравненного по углам полигонометрического хода. СКП взаимного положения конечных точек такого хода (СКП функции) определяется формулой

$$M^2 = m_S^2 n + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 \frac{(n+3)}{12}, \quad (3.21)$$

где m_S — СКП измерения сторон, мм; m_β — СКП измерения углов, с; L — длина хода, мм; n — число сторон хода; $\rho = 206\,265''$.

Выразив длину L хода в километрах и нормировав соответственно $\rho = 0,206\,265''$ (размерности m_S и m_β при этом остаются прежними), преобразуем выражение (3.21) к виду

$$M^2 = m_S^2 \left[n + \frac{m_\beta^2}{m_S^2 \rho^2} L_{\text{км}}^2 \frac{(n+3)}{12} \right]. \quad (3.22)$$

Из сравнения формул (3.22) и (3.18) следует, что СКП единицы веса $\mu = m_S$ (обратный вес измеренных сторон $Q_S = 1$), а выражение в скобках есть обратный вес P^{-1} функции рассматриваемого полигонометрического хода:

$$P^{-1} = \left[n + \frac{m_\beta^2}{m_S^2 \rho^2} L_{\text{км}}^2 \frac{(n+3)}{12} \right]. \quad (3.23)$$

Отношение квадратов СКП во втором слагаемом формулы (3.23) есть обратный вес Q_β измеренных углов:

$$\frac{m_\beta^2}{m_S^2} = Q_\beta. \quad (3.24)$$

С учетом этого и ранее принятого значения $\rho = 0,206\,265''$ формула (3.23) примет вид:

$$P^{-1} = n + 2Q_\beta L_{\text{км}}^2 (n+3). \quad (3.25)$$

Обозначим

$$2Q_\beta L_{\text{км}}^2 = K, \quad (3.26)$$

где K — геометрический коэффициент хода.

С учетом (3.26) преобразуем формулу (3.25) к следующему виду:

$$P^{-1} = n + K(n+3). \quad (3.27)$$

Два слагаемых формулы (3.27) являют собой вклад в значение обратного веса P^{-1} хода: погрешностей линейных (через число сторон n) и угловых (через выражение $K(n+3)$) измерений. Последний вклад, в свою очередь, зависит от двух параметров — обратного веса углов Q_β и длины хода $L_{\text{км}}$ [124].

Из формул (3.26) и (3.27) следуют два очевидных вывода.

1. Обратный вес Q_β измеренных углов полигонометрического хода обратно пропорционален удвоенному квадрату его длины, выраженной в километрах:

$$Q_\beta = \frac{K}{2L_{\text{км}}^2}. \quad (3.28)$$

2. Обратный вес P^{-1} хода не может быть меньше числа сторон в нем, т.е. всегда $n < T^2$ (при $K = 1$ будем иметь $P^{-1} = T^2 = 2n + 3$).

Но каковы должны быть значения параметров Q_β , $L_{\text{км}}$ и n хода, при которых будет выполняться условие (3.20), соответствующее условию (3.17)? Рассмотрим два возможных варианта решения этого вопроса.

ВАРИАНТ 1. *Принять условие $Q_\beta = q_1 Q_S = q_1$ (так как $Q_S = 1$), где q_1 — коэффициент пропорциональности обратных весов угловых и линейных измерений.*

Задавая различными значениями длины хода $L_{\text{км}}$ и коэффициентом $q_1 = Q_\beta$ по формуле (3.27), получим геометрический коэффициент хода K , а далее из формулы (3.26) для заданного значения $T = \sqrt{P^{-1}}$ (формула (3.19)) вычислим допустимую длину хода [124]:

$$L_{\text{км}} = \sqrt{\frac{T^2 - n}{2q_1(n+3)}} = \sqrt{\frac{T^2 - n}{2Q_\beta(n+3)}}. \quad (3.29)$$

У современных электронных тахеометров точность измерения расстояний при использовании отражателя $m_S = 2$ мм. А точность измерения углов m_β зависит от точности тахеометров. Она может быть 1", 2" и 3". Тогда соответственно: $q_1 = 0,25; 1,0; 2,25$.

Рассчитаем по формуле (3.29) допустимую длину полигонометрического хода для различных значений T , n и q_1 . Результаты вычислений приведены в табл. 3.4 [124].

Таблица 3.4

Допустимая длина хода $L_{\text{км}}$ для различных значений $q_1 = Q_\beta$, n и $T = \sqrt{P^{-1}}$

$T = 3$				$T = 2$			
n	$q_1 = 0,25$	$q_1 = 1,0$	$q_1 = 2,25$	n	$q_1 = 0,25$	$q_1 = 1,0$	$q_1 = 2,25$
1	2,00	1,00	0,67	1	1,22	0,61	0,41
2	1,67	0,84	0,56	2	0,89	0,45	0,30
3	1,41	0,71	0,47	3	0,58	0,29	0,19
4	1,20	0,60	0,40				
5	1,00	0,50	0,33				
6	0,82	0,41	0,27				
7	0,63	0,32	0,21				

Табл. 3.4 позволяет подбирать различные варианты геометрических и точностных параметров предполагаемого к проектированию полигонометрического хода, который при конкретном значении СКП линейных измерений будет удовлетворять условию (3.17). Имея в ней СКП единицы веса $\mu = m_S$, СКП угловых измерений вычисляется, согласно принятому выше условию, по формуле

$$m_\beta = \mu \sqrt{q_1} = m_S \sqrt{Q_\beta}. \quad (3.30)$$

При фиксированном значении m_β вычисляем коэффициент q_1 и для него по формуле (3.29) определяем допустимую длину хода $L_{\text{км}}$.

При любом наборе из табл. 3.4 геометрических параметров хода при заданном значении T погрешность M в формуле (3.17) останется постоянной. Следует выбрать наиболее приемлемый для реальных условий вариант и составить проект хода, выдерживая его расчетные геометрические параметры. При этом следует соблюдать примерно равные длины сторон [124]:

$$S_{\text{км}} = \frac{L_{\text{км}}}{n}. \quad (3.31)$$

ВАРИАНТ 2. Принять условие $n = q_2 K(n + 3)$, где q_2 — назначаемый коэффициент пропорциональности вкладов среднеквадратических погрешностей линейных и угловых измерений в обратный вес P^{-1} хода.

Из формул (3.22) и (3.27) видно, что данное условие соответствует известным в теории ошибок принципам *равного влияния* и *ничтожного влияния* двух величин на конечный результат вычислений, в нашем случае — влияние измерений сторон S (левая часть принимаемого условия) и углов β (правая часть условия) на обратный вес P^{-1} полигонометрического хода [124].

При $q_2 = 1$ влияние обратных весов угловых и линейных измерений одинаково. Из (3.27) получим

$$n = \frac{T^2}{2} \text{ и } K = \frac{T^2}{2(n+3)} = \frac{n}{n+3}. \quad (3.32)$$

При $q_2 = 0,25$ влияние обратного веса угловых измерений несущественно. При этом

$$n = \frac{T^2}{5} \text{ и } K = \frac{4n}{n+3}. \quad (3.33)$$

При $q_2 = 2,25$ несущественно влияние обратного веса линейных измерений. Здесь имеем

$$n = \frac{T^2}{1,44} \text{ и } K = \frac{0,44n}{n+3}. \quad (3.34)$$

Таким образом, в данном варианте выстраивается следующая методика решения задачи.

1. По заданному значению коэффициента T в формуле (3.17) определяем по формуле (3.19) допустимый обратный вес P^{-1} проектируемого полигонометрического хода: $P^{-1} = T^2$.

2. По вычисленному значению коэффициента пропорциональности q_2 из соответствующей формулы (3.32), (3.33) или (3.34) определяем допустимое число сторон n в проектируемом ходе и значение коэффициента K .

Если по условиям объекта число сторон в ходе заранее определено, то значение K вычисляем из формулы (3.27). Получим

$$K = \frac{T^2 - n}{n + 3}. \quad (3.35)$$

3. По принятому значению Q_β из формулы (3.26) определяем для расчетного в пункте 2 значения K допустимую длину $L_{\text{км}}$ проектируемого хода:

$$L_{\text{км}} = \sqrt{\frac{K}{2Q_\beta}}. \quad (3.36)$$

Если для конкретных условий объекта длина хода $L_{\text{км}}$ фиксирована, то из формулы (3.26) при полученном в пункте 2 значении K определяем допустимое значение Q_β :

$$Q_\beta = \frac{K}{2L_{\text{км}}^2}. \quad (3.37)$$

4. Из формулы (3.36) по ранее полученным допустимым значениям n и $L_{\text{км}}$ (пункты 2 и 3) вычисляем примерное значение длины S сторон хода, которой следует придерживаться при проектировании масштабной геометрической схемы хода.

Таким образом, геометрические параметры предполагаемого полигонометрического хода определены и можно приступать к его проектированию на плане объекта, сообразуясь с его топографией, формой и размером.

Последний вариант решения поставленной задачи является более обоснованным, простым и, что существенно для производства, более мобильным, чем первый, требующий предварительного составления вариантной табл. 3.4.

В обоих вариантах оценка точностных характеристик хода после расчета его геометрических параметров выполняется следующим образом:

а) задавая численным значением СКП единицы веса $m = \mu = m_S$ при принятом ранее коэффициенте T (пункт 1), по формуле (3.17) найдем абсолютное значение СКП запроектированного хода M и его относительную погрешность, определяющую нормативную точность;

б) из формулы (3.24) при ранее определенных значениях Q_β и m_S вычисляем допустимое значение m_β :

$$m_\beta = m_S \sqrt{Q_\beta}. \quad (3.38)$$

Приведем пример расчетов по варианту 2 геометрических параметров полигонометрического хода и его точностных характеристик. Пошаговый порядок решения задачи будет следующим.

1. Пусть в формуле (3.17) задан коэффициент $T = 2$. По формуле (3.18) находим обратный вес хода:

$$P^{-1} = T^2 = 4.$$

2. Далее принимаем $q_2 = 1$ и по формулам (3.32) находим максимально допустимое число сторон n в ходе и его геометрический коэффициент K :

$$n = \frac{T^2}{2} = \frac{4}{2} = 2; K = \frac{n}{n+3} = \frac{2}{2+3} = 0,40.$$

3. Принимаем $Q_\beta = 1$ и по формуле (3.36) находим максимально допустимую длину хода:

$$L = \sqrt{\frac{K}{2Q_\beta}} = \sqrt{\frac{0,40}{2}} = 0,45 \text{ км}.$$

4. Из формулы (3.31) определяем примерную длину сторон:

$$S = \frac{L}{n} = \frac{450}{2} = 225 \text{ м}.$$

5. Рассчитаем далее точностные характеристики хода с данными геометрическими параметрами. Примем СКП единицы веса (т.е. ошибку линейных измерений) $m_S = \mu = 2$ мм и по формуле (3.17) определим абсолютную и относительную СКП хода:

$$M = Tm_S = 2 \cdot 2 = 4 \text{ мм} \quad \text{и} \quad \frac{M}{L} = \frac{0,004}{450} = \frac{1}{112\,500}.$$

6. По формуле (3.30) определяем допустимую СКП измерения углов:

$$m_\beta = m_S \sqrt{Q_\beta} = 2\sqrt{1} = 2''.$$

В итоге, не составляя еще проекта полигонометрического хода, отвечающего заданному в формуле (3.17) коэффициенту $T = 2$ и условию $\mu = m_S$, мы определили его допустимые геометрические параметры и точностные характеристики. При этом мы приняли за единицу веса результаты измерения сторон S хода ($P_S = Q_S = 1$, $\mu = m_S$) и численные значения трех следующих характеристик хода: СКП единицы веса ($\mu = m_S = 2$ мм), коэффициента пропорциональности q_2 вкладов в обратный вес хода ошибок линейных и угловых измерений ($q_2 = 1$) и обратного веса Q_β угловых измерений ($Q_\beta = 1$). В итоге проектируемый ход должен иметь следующие геометрические параметры: $L = 0,45$ км [124]; $n = 2$; $S = 225$ м и точностные характеристики: $m_S = 2$ мм; $m_\beta = 2''$; $M = Tm_S = 2 \cdot 2 = 4$ мм. Учитывая, что полигонометрический ход прокладывается в прямом и обратном направлениях (как замкнутый ход), то погрешность определения координат точек уменьшается в корень из двух, т.е.

$$M = \frac{4 \text{ мм}}{\sqrt{2}} = 2,8 \text{ мм}.$$

Таким образом, показан принципиально новый подход к проектированию полигонометрических ходов: геометрические параметры хода, отвечающие и заданной точности, и условиям района работ, могут быть довольно просто рассчитаны заранее, еще до нанесения его на план объекта. Это ни в коем случае не исключает классическую оценку хода, нанесенного на план по расчетным выше параметрам, поскольку выдержать их абсолютно строго практически невозможно. Но можно быть уверенным, что заданные формулой (3.17) точностные характеристики запроектированного хода и полученные при окончательной его обработке не будут существенно отличаться [124].

3.5.2. Линейно-угловые сети

Из предыдущего параграфа следует, что среди способов построения геодезических сетей наибольшую точность обеспечивают линейно-угловые сети, т.е. наиболее оптимальным решением по созданию опорной геодезической сети на оползневых склонах шириной до пяти-сот метров являются замкнутые полигонометрические ходы из четырех пунктов. Эти опорные сети должны обеспечить наблюдения за деформационной оползневой сетью, а также за деформациями сооружений, находящихся на оползнях.

Отсюда вытекают задачи, которые требуют своего разрешения [134]:

- типовая схема построения опорной сети;
- предрасчет точности определения положения пунктов опорной сети;
- методика полевых работ;
- полевые измерения;
- уравнивание сети;
- оценка точности сети.

Полевые измерения выполняются точными либо высокоточными электронными тахеометрами Leica, Sokkia, Topcon и др.

Полученные результаты геодезических измерений дают возможность уравнивать сеть и получить координаты пунктов этой сети с оценкой точности. Пример уравнивания такой сети выполним на конкретном примере оползневого склона Карамышевской набережной (красным цветом показан контур оползня) (рис. 3.4).

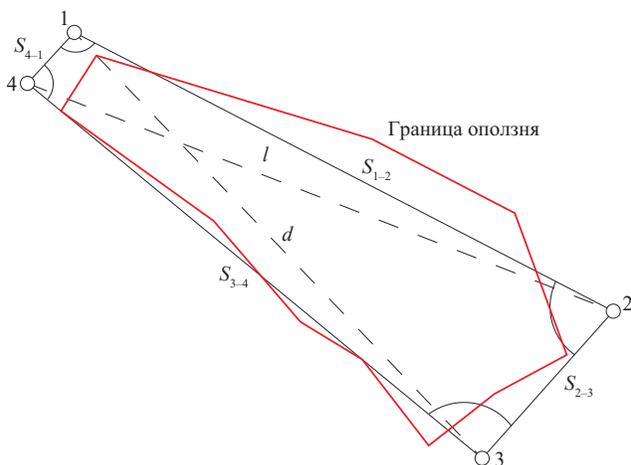


Рис. 3.4. Опорная сеть с неизмеряемыми диагоналями l и d на оползневом склоне Карамышевской набережной (1–4 — пункты опорной сети)

При этом подлежат измерению все четыре угла и все четыре стороны. В данном полигоне полигонометрии имеются три избыточных измерения, что позволяет надежно контролировать качество полевых работ. Уравнивание этого полигона целесообразно выполнять коррелятным способом метода наименьших квадратов по двум причинам. Во-первых, для вычисления допустимых невязок необходимо составить соответствующее условное уравнение, т.е. выполнить самую важную и трудоемкую часть алгоритма коррелятного способа. Во-вторых, коррелятный способ позволяет получать в ходе реализации алгоритма обратные веса уравненных измерений, сравнение которых с обратными весами неуровненных измерений дает наглядное представление о качестве геометрии запроектированной сети.

Для целостного изложения методики геодезического мониторинга склоновых территорий нам придется останавливаться и на известных в геодезии теоретических положениях. В связи с этим ниже приведем строгий алгоритм коррелятного способа уравнивания метода наименьших квадратов применительно к сети рис. 3.4.

В результате измерений получены следующие результаты:

– углы: $\beta_1 = 103^\circ 16' 26''$;

$\beta_2 = 75^\circ 52' 55''$;

$\beta_3 = 91^\circ 43' 31''$;

$\beta_4 = 89^\circ 07' 11''$;

– длины сторон: $S_{1-2} = 375,540$ м;

$S_{2-3} = 122,810$ м;

$S_{3-4} = 363,741$ м;

$S_{4-1} = 42,163$ м.

При коррелятном способе три условных уравнения поправок в измерения (одно — углов и два — диагоналей) имеют вид

$$\begin{aligned} \sum_1^4 v_\beta + W_\beta &= 0; \\ v_{d_1} - v_{d_2} &= 0; \\ v_{d_1} - v_{d_2} &= 0. \end{aligned} \quad (3.39)$$

С учетом фундаментального уравнения трилатерации [43–44]

$$\frac{v_\beta \sin \beta}{\rho} = A_\beta v_a - B_\beta v_b - C_\beta v_c, \quad (3.40)$$

в которой коэффициенты A_β , B_β , C_β соответственно равны

$$A_\beta = \frac{1}{h_a} = \frac{a}{bc \sin \beta}; \quad B_\beta = \sqrt{A_\beta^2 - \frac{1}{b^2}}; \quad C_\beta = \sqrt{A_\beta^2 - \frac{1}{c^2}}, \quad (3.41)$$

где h_a — высота треугольника, проведенная из вершины угла β на противоположную сторону a , линейные условные уравнения примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho A_1} v_1 + \frac{B_1}{A_1} v_{s_4} + \frac{C_1}{A_1} v_{s_1} - \frac{1}{\rho A_3} v_3 - \frac{B_3}{A_3} v_{s_3} - \frac{C_3}{A_3} v_{s_2} + W_{2-4} &= 0; \\ \frac{1}{\rho A_2} v_2 + \frac{B_2}{A_2} v_{s_1} + \frac{C_2}{A_2} v_{s_2} - \frac{1}{\rho A_4} v_4 - \frac{B_4}{A_4} v_{s_3} - \frac{C_4}{A_4} v_{s_4} + W_{1-3} &= 0. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Угловая невязка вычисляется по формуле

$$W_\beta = \sum_1^4 \beta_i - 360^\circ, \quad (3.43)$$

а допустимое значение угловой невязки:

$$W_{\beta_{\text{дон}}} = 2m_\beta \sqrt{n}. \quad (3.44)$$

Линейные (диагональные) невязки равны

$$\begin{aligned} W_l &= l_1 - l_2; \\ W_d &= d_1 - d_2, \end{aligned} \quad (3.45)$$

а допустимое значение линейной невязки:

$$W_{\text{доп}} = 2\mu\sqrt{\sum R_i^2}, \quad (3.46)$$

где l_1, l_2, d_1, d_2 — длины диагоналей, вычисленные из соответствующих противоположащих треугольников; $\mu = m_S$ — СКП единицы веса, которая при априорной оценке точности берется по паспортным данным тахеометра (в данном случае равна 2 мм); R_i — коэффициенты соответствующего условного уравнения поправок в измерения.

Составим таблицу коэффициентов условных уравнений (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Таблица коэффициентов условных уравнений

v_{β_1}	v_{β_2}	v_{β_3}	v_{β_4}	v_{S_1}	v_{S_2}	v_{S_3}	v_{S_4}
+1	+1	+1	+1	0	0	0	0
$+\frac{1}{\rho A_1}$	0	$-\frac{1}{\rho A_3}$	0	$+\frac{C_1}{A_1}$	$-\frac{C_3}{A_3}$	$-\frac{B_3}{A_3}$	$+\frac{B_1}{A_1}$
0	$+\frac{1}{\rho A_2}$	0	$-\frac{1}{\rho A_4}$	$+\frac{B_2}{A_2}$	$+\frac{C_2}{A_2}$	$-\frac{B_4}{A_4}$	$-\frac{C_4}{A_4}$

В матричной форме это выглядит следующим образом:

$$R_{38} = \begin{pmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +\frac{1}{\rho A_1} & 0 & -\frac{1}{\rho A_3} & 0 & +\frac{C_1}{A_1} & -\frac{C_3}{A_3} & -\frac{B_3}{A_3} & +\frac{B_1}{A_1} \\ 0 & +\frac{1}{\rho A_2} & 0 & -\frac{1}{\rho A_4} & +\frac{B_2}{A_2} & +\frac{C_2}{A_2} & -\frac{B_4}{A_4} & -\frac{C_4}{A_4} \end{pmatrix}. \quad (3.47)$$

По теореме косинусов дважды вычислим диагонали l и d (см. рис. 3.4):

– диагональ l вычислим из треугольника 4–1–2, а затем из треугольника 2–3–4;

– диагональ d вычислим из треугольника 3–4–1 и из треугольника 1–2–3:

$$\begin{aligned} l_{4-1-2}^2 &= S_{4-1}^2 + S_{1-2}^2 - 2S_{4-1}S_{1-2} \cos \beta_1; \\ l_{2-3-4}^2 &= S_{2-3}^2 + S_{3-4}^2 - 2S_{2-3}S_{3-4} \cos \beta_3; \\ d_{3-4-1}^2 &= S_{3-4}^2 + S_{4-1}^2 - 2S_{3-4}S_{4-1} \cos \beta_4; \\ d_{1-2-3}^2 &= S_{1-2}^2 + S_{2-3}^2 - 2S_{1-2}S_{2-3} \cos \beta_2. \end{aligned} \quad (3.48)$$

С учетом результатов полевых измерений имеем:

$$l_1 = \sqrt{42,163^2 + 375,540^2 - 2 \cdot 42,163 \cdot 375,540 \cdot \cos 103^\circ 16' 26''} = 387,40048 \text{ м};$$

$$l_2 = \sqrt{122,810^2 + 363,741^2 - 2 \cdot 122,810 \cdot 363,741 \cdot \cos 91^\circ 43' 31''} = 387,40115 \text{ м};$$

$$d_1 = \sqrt{363,741^2 + 42,163^2 - 2 \cdot 363,741 \cdot 42,163 \cdot \cos 89^\circ 07' 11''} = 365,53249 \text{ м};$$

$$d_2 = \sqrt{375,540^2 + 122,810^2 - 2 \cdot 375,540 \cdot 122,810 \cdot \cos 75^\circ 52' 55''} = 365,53155 \text{ м}.$$

По формулам (3.41) вычислим коэффициенты фундаментального уравнения трилатерации и проконтролируем их по формуле

$$A_{\beta}a - B_{\beta}b - C_{\beta}c = 0. \quad (3.49)$$

Получим (см. рис. 3.4):

$$A_1 = 2,51381; B_1 = 0,83311; C_1 = 2,49967.$$

Контроль: $2,51381 \cdot 3,8740048 - 0,83311 \cdot 0,42163 - 2,49967 \cdot 3,75540 = 0.$

$$A_2 = 0,81725; B_2 = 0,77265; C_2 = 0,06977.$$

Контроль: $0,81725 \cdot 3,6553155 - 0,77265 \cdot 3,75540 - 0,06977 \cdot 1,22810 = 0.$

$$A_3 = 0,86762; B_3 = 0,29956; C_3 = 0,82291.$$

Контроль: $0,86762 \cdot 3,8740012 - 0,29956 \cdot 1,22810 - 0,82291 \cdot 3,63741 = 0.$

$$A_4 = 2,38371; B_4 = 2,36780; C_4 = 0,23851.$$

Контроль: $2,38371 \cdot 3,6553249 - 2,36780 \cdot 3,63741 - 0,23851 \cdot 0,42163 = 0.$

Тогда (3.47) примет вид

$$R_{38} = \begin{pmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0,1929 & 0 & -0,5588 & 0 & +0,994 & -0,948 & -0,345 & +0,331 \\ 0 & +0,5932 & 0 & -0,2034 & +0,945 & +0,0854 & -0,993 & -0,100 \end{pmatrix}.$$

Искомый вектор поправок выглядит следующим образом:

$$V_{81} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \end{pmatrix}. \quad (3.50)$$

Система условных уравнений поправок:

$$R_{38}V_{81} + W_{31} = 0, \quad (3.51)$$

в которой вектор невязок W_{31} равен

$$W_{31} = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{pmatrix}. \quad (3.52)$$

Подставляя данные измерений в формулы (3.43) и (3.45), найдем невязки W_i :

$$W_{\beta} = 103^{\circ}16'26'' + 75^{\circ}52'55'' + 91^{\circ}43'31'' + 89^{\circ}07'11'' - 360^{\circ}00'00'' = +3'';$$

$$W_l = 387,40048 \text{ м} - 387,40115 \text{ м} = -0,67 \text{ мм};$$

$$W_d = 365,53249 \text{ м} - 365,53155 \text{ м} = +0,94 \text{ мм}.$$

Допустимые значения невязок:

$$W_{\beta_{\text{доп}}} = 2 \cdot 2'' \sqrt{4} = 8'';$$

$$\sum R_l^2 = \sqrt{0,19^2 + 0,56^2 + 0,99^2 + 0,95^2 + 0,34^2 + 0,33^2} = \sqrt{2,46};$$

$$\sum R_d^2 = \sqrt{0,59^2 + 0,20^2 + 0,94^2 + 0,085^2 + 0,99^2 + 0,10^2} = \sqrt{2,29};$$

$$W_{l_{\text{доп}}} = 2 \cdot 2 \text{ мм} \sqrt{2,46} = 6,3 \text{ мм};$$

$$W_{d_{\text{доп}}} = 2 \cdot 2 \text{ мм} \sqrt{2,29} = 6,1 \text{ мм}.$$

Тогда вектор невязок W_{31} равен

$$W_{31} = \begin{pmatrix} +3 \\ -0,67 \\ +0,94 \end{pmatrix}.$$

Для дальнейших вычислений образуем транспонированную матрицу коэффициентов условных уравнений:

$$R_{83}^T = \begin{pmatrix} +1 & +0,1929 & 0 \\ +1 & 0 & +0,5932 \\ +1 & -0,5588 & 0 \\ +1 & 0 & -0,2034 \\ 0 & +0,994 & +0,945 \\ 0 & -0,948 & +0,0854 \\ 0 & -0,345 & -0,993 \\ 0 & +0,331 & -0,100 \end{pmatrix}.$$

Следуя алгоритму метода наименьших квадратов, для решения условных уравнений поправок (3.51) перейдем к нормальным уравнениям

$$N_{33}k_{31} + W_{31} = 0, \tag{3.53}$$

где N_{33} — матрица коэффициентов для нормальных уравнений, равная

$$N_{33} = R_{38} R_{83}^T; \tag{3.54}$$

k — коррелата (неопределенный множитель Лагранжа), равная

$$k_{31} = -N_{33}^{-1}W_{31}, \tag{3.55}$$

где N_{33}^{-1} — обратная матрица коэффициентов нормальных уравнений, т.е. матрица, отвечающая условию (контроль матрицы N_{33}^{-1})

$$N_{33}^{-1}N_{33} = E. \tag{3.56}$$

Найдем матрицу N_{33} , равную произведению матриц R_{38} и R_{83}^T . Получим

$$N_{33} = \begin{pmatrix} +4 & -0,366 & +0,390 \\ -0,366 & +2,465 & +1,168 \\ +0,390 & +1,168 & +2,290 \end{pmatrix}.$$

Систему коррелятных уравнений поправок найдем по следующему выражению:

$$V_{81} = R_{83}^T k_{31}, \quad (3.57)$$

где k_{31} — коррелаты.

В системе уравнений (3.57) — восемь неизвестных поправок и три неизвестных коррелаты, а число уравнений в системе равно восьми. В связи с этим система имеет бесчисленное множество решений. Для однозначного решения системы на искомые поправки наложим дополнительное условие $[pV^2] = \min$, или в матричной форме $V^T p V = \min$, которое позволяет получить уравненные значения измеренных величин с максимально возможным весом [10].

Поскольку за СКП единицы веса приняли равноточно измеренные стороны ($P_S = 1$), то веса измеренных углов β_i , вычисляемые по формуле

$$P_{\beta_{\text{изм}}} = \left(\frac{m_S(\text{мм})}{m_{\beta_{\text{изм}}}(\text{с})} \right)^2, \quad (3.58)$$

будут равны $P_{\beta} = 1$ мм/с. Тогда, соответственно, обратные веса:

$$Q_S = \frac{1}{P_S} \quad \text{и} \quad Q_{\beta} = \frac{1}{P_{\beta}(\text{мм/с})}.$$

Подставив (3.57) в (3.51), получим систему нормальных уравнений коррелат:

$$R_{83} R_{83}^T + W_{31} = 0, \quad (3.59)$$

или с учетом (3.54):

$$N_{33} k_{31} + W_{31} = 0. \quad (3.60)$$

Найдем обратную матрицу N_{33}^{-1} :

$$N_{33}^{-1} = \begin{pmatrix} +0,266 & +0,803 & -0,0862 \\ +0,0803 & +0,559 & -0,299 \\ -0,0862 & -0,299 & +0,604 \end{pmatrix}.$$

Произведение матрицы N_{33} на обратную N_{33}^{-1} дает единичную матрицу E (формула (3.56)). Подстановка данных дает следующий результат:

$$E = \begin{pmatrix} +0,266 & +0,803 & -0,0862 \\ +0,0803 & +0,559 & -0,299 \\ -0,0862 & -0,299 & +0,604 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +4 & -0,366 & +0,390 \\ -0,366 & +2,465 & +1,168 \\ +0,390 & +1,168 & +2,290 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Коррелаты k_{31} найдем из (3.55):

$$k_{31} = - \begin{pmatrix} +0,266 & +0,803 & -0,0862 \\ +0,0803 & +0,559 & -0,299 \\ -0,0862 & -0,299 & +0,604 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +3 \\ -0,67 \\ +0,94 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,633 \\ +0,415 \\ -0,509 \end{pmatrix}.$$

Из (3.57) найдем вектор поправок:

$$V_{81} = \begin{pmatrix} +1 & +0,1929 & 0 \\ +1 & 0 & +0,5932 \\ +1 & -0,5588 & 0 \\ +1 & 0 & -0,2034 \\ 0 & +0,994 & +0,945 \\ 0 & -0,948 & +0,085 \\ 0 & -0,345 & -0,993 \\ 0 & +0,331 & -0,100 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -0,633 \\ +0,415 \\ -0,509 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,583 \\ -0,965 \\ -0,895 \\ -0,560 \\ -0,0693 \\ -0,437 \\ +0,363 \\ +0,188 \end{pmatrix}$$

Контроль уравнивания выполним подстановкой уравненных значений результатов измерений в условные уравнения (3.51). В правой части должны получиться нули:

$$\begin{pmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0,1929 & 0 & -0,5588 & 0 & +0,994 & -0,948 & -0,345 & +0,331 \\ 0 & +0,5932 & 0 & -0,2034 & +0,945 & +0,085 & -0,993 & -0,100 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -0,583 \\ -0,965 \\ -0,895 \\ -0,560 \\ -0,0693 \\ -0,437 \\ +0,363 \\ +0,188 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} +3 \\ -0,67 \\ +0,94 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Вычислим уравненные значения измеренных величин и их функций. Уравненные значения измеренных величин рассчитаем по формуле [10]

$$\overline{\lambda}_i = \lambda_i + V_i \tag{3.61}$$

Получим:

$$\overline{\beta}_1 = 103^\circ 16' 26'' - 0,58'' = 103^\circ 16' 25,42'';$$

$$\overline{\beta}_2 = 75^\circ 52' 55'' - 0,96'' = 75^\circ 52' 54,04'';$$

$$\overline{\beta}_3 = 91^\circ 43' 31'' - 0,90'' = 91^\circ 43' 30,10'';$$

$$\overline{\beta}_4 = 89^\circ 07' 11'' - 0,56'' = 89^\circ 07' 10,44'';$$

$$\overline{S}_{1-2} = 375,540 \text{ м} - 0,1 \text{ мм} = 375,5399 \text{ м};$$

$$\overline{S}_{2-3} = 122,810 \text{ м} - 0,4 \text{ мм} = 122,8096 \text{ м};$$

$$\overline{S}_{3-4} = 363,741 \text{ м} + 0,4 \text{ мм} = 363,7414 \text{ м};$$

$$\overline{S}_{4-1} = 42,163 \text{ м} + 0,2 \text{ мм} = 42,1632 \text{ м}.$$

Перейдем к апостериорной оценке точности и вычислим СКП единицы веса μ и ее надежность m_μ по формулам:

$$\mu = \sqrt{\frac{pV^2}{r}}; \quad m_\mu = \frac{\mu}{\sqrt{2r}}, \quad (3.62)$$

где r — число избыточных измерений ($r = 3$).

Получим:

$$\mu = \sqrt{\frac{2,743}{3}} = 0,96 \text{ мм} = 1,0 \text{ мм};$$

$$m_\mu = \frac{0,96}{\sqrt{6}} = 0,4 \text{ мм}.$$

Для вычисления весов функций уравненных значений измеренных величин и вычисления среднеквадратических погрешностей функций уравненных значений измеренных величин необходимо по уравненным значениям получить координаты пунктов опорной сети. Значения уравненных координат пунктов приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Уравненные координаты пунктов опорной сети

Пункты	X , м	Y , м
1	+12329,713	-2871,100
2	+12158,594	-2536,812
3	+12066,226	-2617,746
4	+12297,596	-2898,416

Оценку точности опорной сети m_F выполним по формуле

$$m_F = \mu\sqrt{Q_F}, \quad (3.63)$$

где μ — СКП единицы веса; Q_F — обратный вес функции.

Обратный вес функции вычислим по формуле

$$Q_F = fQ_{yp}f^T = \begin{pmatrix} Q_X & Q_{XY} \\ Q_{XY} & Q_Y \end{pmatrix}, \quad (3.64)$$

где f — вектор коэффициентов заданной функции (выраженный в линейной форме); Q_{yp} — матрица обратных весов уравненных измерений; f^T — транспонированный вектор f .

Наиболее удаленным пунктом сети от исходного является пункт 3. Матрица f коэффициентов оцениваемых функций — координат X , Y пункта 3 (относительно исходного пункта 1 и исходного направления 1–2. За исходное направление 1–2 всегда следует выбирать наиболее длинную сторону четырехугольника):

– явный вид функций:

$$\begin{aligned} F_X &= S_{1-2} \cos \alpha_{1-2} + S_{2-3} \cos(\alpha_{1-2} + 180^\circ - \beta_2); \\ F_Y &= S_{1-2} \sin \alpha_{1-2} + S_{2-3} \sin(\alpha_{1-2} + 180^\circ - \beta_2). \end{aligned} \quad (3.65)$$

Линеаризуем функции (3.65) с учетом (3.61) разложением их в ряд Тейлора, ограничиваясь при этом первыми членами разложения. Получим матрицу коэффициентов весовых функций:

$$Q_V = \begin{pmatrix} +0,318 & +0,196 & +0,176 & +0,311 & +0,0510 & -0,191 & +0,0780 & +0,0767 \\ +0,196 & +0,376 & +0,269 & +0,160 & +0,161 & +0,115 & -0,237 & -0,0593 \\ +0,176 & +0,269 & +0,351 & +0,205 & -0,154 & +0,227 & -0,0003 & -0,0849 \\ +0,311 & +0,160 & +0,205 & +0,326 & -0,0573 & -0,152 & +0,159 & +0,0676 \\ +0,0510 & +0,161 & -0,154 & -0,0573 & +0,530 & -0,236 & -0,366 & +0,0630 \\ -0,191 & +0,115 & +0,227 & -0,152 & -0,236 & +0,555 & -0,141 & -0,217 \\ +0,0780 & -0,237 & -0,0003 & +0,159 & -0,366 & -0,141 & +0,457 & +0,0841 \\ +0,0767 & -0,0593 & -0,0849 & +0,0676 & +0,0630 & -0,217 & +0,0841 & +0,0871 \end{pmatrix};$$

— матрицу обратных весов уравненных результатов измерений (3.67):

$$Q_{\text{уп}} = \begin{pmatrix} +3,682 & -0,196 & -0,176 & -0,311 & -0,051 & +0,191 & -0,078 & +0,077 \\ -0,196 & +3,624 & -0,269 & -0,159 & -0,161 & -0,115 & +0,237 & +0,059 \\ -0,176 & -0,269 & +3,649 & -0,205 & +0,154 & -0,227 & +0,00025 & +0,085 \\ -0,311 & -0,159 & -0,205 & +3,674 & +0,057 & +0,152 & -0,159 & -0,068 \\ -0,051 & -0,161 & +0,154 & +0,057 & +0,470 & +0,236 & +0,366 & -0,063 \\ +0,191 & -0,115 & -0,227 & +0,152 & +0,236 & +0,445 & +0,141 & +0,217 \\ -0,078 & +0,237 & +0,00025 & -0,159 & +0,366 & +0,141 & +0,543 & -0,084 \\ +0,077 & +0,059 & +0,085 & -0,068 & -0,063 & +0,217 & -0,084 & +0,913 \end{pmatrix}.$$

По формуле (3.64) получим матрицу обратных весов весовых функций — координат X и Y пункта 3:

$$Q_F = \begin{pmatrix} +1,533 & +0,262 \\ +0,262 & +0,384 \end{pmatrix}.$$

По главной диагонали стоят значения обратных весов координат X , Y пункта 3 ($Q_X = 1,5333$ и $Q_Y = 0,384$). Недиагональные элементы — корреляционные отношения координат пункта 3.

Выполним оценку точности сети. Найдем среднеквадратические погрешности координат m_X и m_Y пункта 3:

$$m_X = \mu\sqrt{Q_X} = 1,0 \text{ мм}\sqrt{1,533} = 1,2 \text{ мм};$$

$$m_Y = \mu\sqrt{Q_Y} = 1,0 \text{ мм}\sqrt{0,384} = 0,6 \text{ мм}.$$

Точная оценка положения пункта 3:

$$M_3 = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2 - 2m_X m_Y} = \sqrt{1,2^2 + 0,6^2 - 2 \cdot 1,2 \cdot 0,6} = 0,6 \text{ мм}.$$

Как видно из предыдущих расчетов, математическая обработка результатов геодезических измерений опорной сети по методу наименьших квадратов довольно сложна и требует применения компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения. Но при ее наличии задача решается однозначно и, главное, с высокой точностью.

Можно было, конечно, уравнивать эту сеть методом наименьших квадратов, как обычный полигонометрический ход, в программе Credo_Dat 3.0. Тогда поправки в углы и в длины линий будут:

$$V_1 = -1''; V_2 = 0''; V_3 = -1''; V_4 = -1'';$$

$$V_{S_{1-2}} = 0 \text{ мм}; V_{S_{2-3}} = 0 \text{ мм}; V_{S_{3-4}} = 0 \text{ мм}; V_{S_{4-1}} = 0 \text{ мм}.$$

Уравненные значения измеренных величин следующие:

$$\bar{\beta}_1 = 103^{\circ}16'25''; \quad \bar{\beta}_2 = 75^{\circ}52'55''; \quad \bar{\beta}_3 = 91^{\circ}43'30''; \quad \bar{\beta}_4 = 89^{\circ}07'10'';$$

$$\bar{S}_{1-2} = 375,540 \text{ м}; \quad \bar{S}_{2-3} = 122,810 \text{ м}; \quad \bar{S}_{3-4} = 363,741 \text{ м}; \quad \bar{S}_{4-1} = 42,163 \text{ м}.$$

Значения уравненных координат пунктов приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Уравненные координаты пунктов опорной сети

Пункты	X, м	Y, м
1	+12 329,713	-2871,100
2	+12 158,594	-2536,812
3	+12 066,225	-2617,747
4	+12 297,596	-2898,416

Оценка точности сети: среднеквадратические погрешности координат m_X и m_Y пункта 3:

$$m_X = 1 \text{ мм}; \quad m_Y = 1 \text{ мм}.$$

Точечная оценка положения пункта 3:

$$M_3 = 1,4 \text{ мм}.$$

Сравнивая СКП точки 3, замечаем, что погрешность точки 3 в первом способе уравнивания в 2,3 раза меньше, чем во втором, что вызвано большей жесткостью уравнивания сети.

Таким образом, замкнутые полигонометрические ходы из четырех пунктов можно рекомендовать для построения опорной геодезической сети на оползневых склонах.

3.6. ОБОСНОВАНИЕ ТОЧНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ ДЕФОРМАЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, ВОЗВЕДЕННЫХ НА СКЛОНОВЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Для определения горизонтальных и вертикальных смещений зданий и сооружений, возведенных в оползневой зоне, необходимо проведение повторных геодезических наблюдений, к которым предъявляются особые требования. Они являются одними из ответственных работ в общем комплексе геотехнического мониторинга на оползневых склонах и преследуют цель обеспечить увеличение долговечности и надежности эксплуатируемых и строящихся зданий и сооружений и, соответственно, уменьшить риски их разрушений. Кроме того, на зданиях и сооружениях оползневые процессы проявляют себя значительно раньше, чем непосредственно на поверхности склона. Для изучения деформаций (осадок, горизонтальных сдвигов, кренов) в характерных местах здания, как правило, на уровне цокольного этажа монтируют стенные реперы и определяют их координаты [110]. В последующих циклах наблюдений определяют изменения их планового и высотного положения за выбранный промежуток времени [16; 73; 124].

Для нахождения абсолютных высотных деформаций S периодически определяют их высотные отметки H относительно исходных (неподвижных) пунктов. Осадка вычисляется по формуле

$$S = H_{\text{тек}} - H_{\text{нач}}, \quad (3.69)$$

где $H_{\text{тек}}$, $H_{\text{нач}}$ — отметки в текущем и начальном моментах времени соответственно.

При этом за осадками рекомендуется наблюдать методами геометрического нивелирования.

Горизонтальное смещение $q_{X,Y}$ деформационной марки определяется по разности ее координат в текущий и начальный моменты времени ($X_{\text{тек}}, Y_{\text{тек}}$) и ($X_{\text{нач}}, Y_{\text{нач}}$):

$$\begin{aligned} q_X &= X_{\text{тек}} - X_{\text{нач}}; \\ q_Y &= Y_{\text{тек}} - Y_{\text{нач}}. \end{aligned} \quad (3.70)$$

По результатам наблюдений деформаций зданий и сооружений составляют техническое заключение о состоянии и прогнозе развития выявленных деформаций, вырабатывают рекомендации по проведению соответствующих мероприятий, предупреждающих негативные последствия критических деформаций [119].

Точность, полнота и достоверность полученных данных по деформациям во многом зависят от расположения и количества марок, что зависит от цели проведения работ, вида деформаций, конструкции здания, его отдельных элементов и пр. [117; 208]. При применении современных электронных тахеометров в качестве деформационных марок могут служить катафотные пленочные отражатели, которые надо закреплять на уровне цокольного этажа и на уровне последнего этажа здания под крышей. Но в этом случае невозможно применение геометрического нивелирования.

Тогда возникает вопрос о точности наблюдений деформаций зданий, выполняемых электронными тахеометрами [117; 124; 208]. Остановимся на теоретическом анализе данной задачи.

Погрешности смещений m_{q_X} и m_{q_Y} по осям X и Y (q_X и q_Y) вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} m_{q_X} &= 1,4m_X; \\ m_{q_Y} &= 1,4m_Y, \end{aligned} \quad (3.71)$$

где m_X и m_Y — погрешности определения координат X_i и Y_i .

Следовательно,

$$\begin{aligned} m_X &= \frac{m_{q_X}}{1,4}; \\ m_Y &= \frac{m_{q_Y}}{1,4}. \end{aligned} \quad (3.72)$$

Так как для второго класса точности точность определения горизонтальных смещений равна 5 мм [87], то

$$m_X = m_Y = 3,5 \text{ мм}.$$

В координатном методе наблюдений координаты деформационной точки определяют относительно исходного пункта полярным способом. Тогда координаты i -й деформационной марки X_i и Y_i вычисляются по формулам:

$$X_i = X_P + \Delta X_{P-i} = X_P + D_{P-i} \sin z_{P-i} \cos \alpha_{P-i}; \quad (3.73)$$

$$Y_i = Y_P + \Delta Y_{P-i} = Y_P + D_{P-i} \sin z_{P-i} \sin \alpha_{P-i},$$

где X_P, Y_P — координаты станции P , определяемые методом обратной линейно-угловой засечкой от опорных пунктов; $\Delta X_{P-i}, \Delta Y_{P-i}$ — приращения координат между пунктами P и i ; D_{P-i} — длина наклонного расстояния линии $P-i$; z_{P-i} — зенитное расстояние линии $P-i$; α_{P-i} — дирекционный угол линии $P-i$.

Точность определения координат:

$$m_{X_i} = \sqrt{m_{X_P}^2 + \sin^2 z_{P-i} \cos^2 \alpha_{P-i} m_{D_{P-i}}^2 + D_{P-i}^2 \cos^2 z_{P-i} \cos^2 \alpha_{P-i} \frac{m_{z_{P-i}}^2}{\rho^2} + D_{P-i}^2 \sin^2 z_{P-i} \sin^2 \alpha_{P-i} \frac{m_{\alpha_{P-i}}^2}{\rho^2}}; \quad (3.74)$$

$$m_{Y_i} = \sqrt{m_{Y_P}^2 + \sin^2 z_{P-i} \sin^2 \alpha_{P-i} m_{D_{P-i}}^2 + D_{P-i}^2 \cos^2 z_{P-i} \sin^2 \alpha_{P-i} \frac{m_{z_{P-i}}^2}{\rho^2} + D_{P-i}^2 \sin^2 z_{P-i} \cos^2 \alpha_{P-i} \frac{m_{\alpha_{P-i}}^2}{\rho^2}},$$

где m_{X_P} и m_{Y_P} — среднеквадратические погрешности определения координат X и Y станции P ; $m_{D_{P-i}}$ — СКП длины наклонного расстояния; $m_{z_{P-i}}$ — СКП зенитного расстояния; $m_{\alpha_{P-i}}$ — СКП дирекционного угла; ρ — число секунд в одном радиане, равное 206 265".

Для СКП определения положения станции m_3 , полученной обратной линейно-угловой засечкой (рис. 3.5), воспользуемся численным примером математической обработки по изложенной методике, рассмотренной в разделе 3.5.

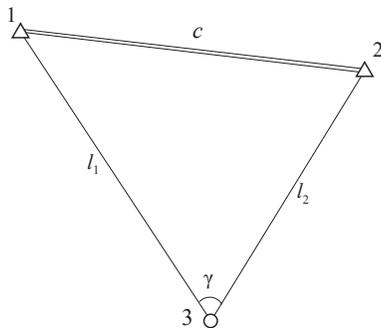


Рис. 3.5. Схема обратной линейно-угловой засечки

Было получено

$$m_3 = 1,7 \text{ мм.}$$

Так как

$$m_3 = \sqrt{m_{X_P}^2 + m_{Y_P}^2}, \quad (3.75)$$

то

$$m_{X_3} \text{ и } m_{Y_3} = 1,2 \text{ мм.}$$

Рассчитаем точность определения координат по формуле (3.74) при следующих данных: $m_\beta = 2''$; $D = 50 \text{ м}$; $m_D = 3 \text{ мм}$; $z = 60^\circ$; $\alpha = 45^\circ$.

Получим

$$m_{X_i} = \sqrt{(1,2 \text{ мм})^2 + \sin^2 60^\circ \cos^2 45^\circ (3 \text{ мм})^2 + (50 \text{ м})^2 \cos^2 60^\circ \cos^2 45^\circ \left(\frac{2''}{206 265''}\right)^2 + (50 \text{ м})^2 \sin^2 60^\circ \sin^2 45^\circ \left(\frac{2}{206 265}\right)^2} = 2,2 \text{ мм};$$

$$m_{Y_i} = \sqrt{(1,2 \text{ мм})^2 + \sin^2 60^\circ \sin^2 45^\circ (3 \text{ мм})^2 + (50 \text{ м})^2 \cos^2 60^\circ \sin^2 45^\circ \left(\frac{2''}{206 265''}\right)^2 + (50 \text{ м})^2 \sin^2 60^\circ \cos^2 45^\circ \left(\frac{2}{206 265}\right)^2} = 2,2 \text{ мм.}$$

Вычисленные значения среднеквадратических погрешностей горизонтальных смещений хорошо согласуются с табл. 2 из [87] для второго класса точности (табл. 3.8).

Таблица 3.8

Допустимые погрешности деформаций

Класс точности определения деформационных характеристик	Типы зданий и сооружений	СКП определения деформационных характеристик, мм	
		вертикальных	горизонтальных
I	Уникальные; находящиеся в эксплуатации более 50-ти лет; возведенные на скальных и полускальных грунтах	1	2
II	Возведенные на песчаных, глинистых и других сжимаемых грунтах	2	5
III	Возведенные на насыпных, просадочных, заторфованных и других сильно сжимаемых грунтах	5	10
IV	Земляные сооружения	10	15

Другим способом решения задачи по вычислению СКП определения положения станции, полученной обратной линейно-угловой засечкой, приведено в [27]:

$$m_3 = m_\beta \sqrt{\frac{\rho^2 c^2 + (P_{l_1} + P_{l_2}) l_1^2 l_2^2}{\rho^2 [P_{l_1} (l_2 - l_1 \cos \gamma)^2 + P_{l_2} (l_1 - l_2 \cos \gamma)^2] + P_{l_1} P_{l_2} l_1^2 l_2^2 \sin^2 \gamma}}, \quad (3.76)$$

где m_β — СКП измерения горизонтального угла; c — длина базиса между исходными пунктами; l_i — линейные измерения; P_{l_i} — веса линейных измерений, равные $\left(\frac{m_\beta}{m_{l_i}}\right)^2$; γ — прилежащий к определяемой станции горизонтальный угол.

Но при тех же данных измерений СКП определения положения станции величина m_3 получилась равной 2,7 мм, что больше на 1 мм.

Высоту i -й деформационной точки вычисляют по формуле [24]:

$$H_i = H_P + h_{P-i} = H_P + D_{P-i} \cos z_{P-i}, \quad (3.77)$$

где H_P — высота станции P ; h_{P-i} — превышение между станцией и деформационной точкой; D_{P-i} — расстояние от станции до деформационной марки; z_{P-i} — зенитное расстояние между станцией и деформационной маркой.

Точность определения высоты деформационной точки:

$$m_{H_i} = \sqrt{m_{H_P}^2 + \cos^2 z_{P-i} m_{D_{P-i}}^2 + D_{P-i}^2 \sin^2 z_{P-i} \frac{m_{z_{P-i}}^2}{\rho^2}}, \quad (3.78)$$

где $m_{D_{P-i}}$ — СКП измерения наклонных расстояний; $m_{z_{P-i}}$ — СКП измерения зенитных расстояний.

Высота станции H_P определяется обратной высотной засечкой и вычисляется по формуле

$$H_P = H_{исх} + D \cos z, \quad (3.79)$$

где $H_{исх}$ — высота исходного пункта.

Пренебрегая погрешностью исходных пунктов, СКП определения высоты станции, полученную обратной высотной засечкой, вычисляют по формуле

$$m_{H_P} = \sqrt{\cos^2 z m_D^2 + D^2 \sin^2 z \frac{m_z^2}{\rho^2}}. \quad (3.80)$$

При $D = 100$ м; $m_D = 2$ мм; $z = 60^\circ$ получим

$$m_{H_p} = \sqrt{\cos^2 60^\circ (2 \text{ мм})^2 + (100 \text{ м})^2 \sin^2 60^\circ \left(\frac{2''}{206\,265''} \right)^2} = 1,6 \text{ мм.}$$

По формуле (3.78) вычислим погрешность определения высоты деформационной точки:

$$m_{H_i} = \sqrt{(1,6 \text{ мм})^2 + \cos^2 60^\circ (2 \text{ мм})^2 + (50 \text{ м})^2 \sin^2 60^\circ \left(\frac{2''}{206\,265''} \right)^2} = 1,7 \text{ мм.}$$

Погрешность определения осадки вычисляют по формуле

$$m_S = m_H \sqrt{2}. \quad (3.81)$$

Тогда для нашего примера будем иметь

$$m_S = 1,7 \text{ мм} \sqrt{2} = 2,4 \text{ мм.}$$

Погрешность осадки, вычисленная по формуле (3.81), оказалась больше допустимой (см. табл. 3.8). Тогда для повышения точности обратную высотную засечку следует выполнять с двух исходных пунктов. В этом случае погрешность уменьшится и составит

$$m_S = \frac{2,4 \text{ мм}}{\sqrt{2}} = 1,7 \text{ мм.}$$

3.7. КОРРЕКТИРОВКА РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Строительство в условиях современных городов часто сопровождается рядом трудностей, таких как сложные инженерно-геологические условия, здания и сооружения окружающей застройки, неблагоприятные геологические процессы, динамические нагрузки от транспорта, изменчивость гидрологических условий района при строительстве подземных частей зданий и т.д. Данные процессы в той или иной мере оказывают влияние на устойчивость и осадки зданий и сооружений, что вызывает необходимость разработки методов их учета. Ввиду геоморфологических особенностей в г. Москве зачастую возникает необходимость строительства зданий и сооружений на откосах и склонах. Строительство на откосах и склонах может быть осложнено рядом факторов, в том числе их предельным равновесием и ползучестью грунтов основания. Данный процесс хорошо изучен и описывается рядом различных характеристик грунтов. Однако при строительстве зданий и сооружений на откосах и склонах сложными грунтами, проявляющими признаки ползучести, формируется сложное НДС, учесть которое возможно только численными методами. Оценка НДС откосов и склонов с учетом зданий и сооружений, возводимых на их поверхности, во времени — сложная задача, требующая дополнительных исследований, направленных на уточнение характеристик грунтов основания для создания геомеханической модели, наиболее точно моделирующей их поведение. Стоит отметить, что для создания геомеханической модели, в полной мере отражающей деформируемость рассматриваемого склона, инженерно-геологические изыскания требуют высокой квалификации специалистов и должны выполняться с достаточной точностью. Однако даже такие меры зачастую не могут гарантировать достаточную точность результатов расчета геомеханической модели по следующим причинам:

- сложность доставки в лабораторию образцов грунта ненарушенной структуры;
- осреднение характеристик деформируемости и прочности в рамках одного инженерно-геологического элемента (ИГЭ);
- недостаточный объем инженерно-геологических изысканий.

Учитывая написанное выше, можно сделать вывод о необходимости методов комплексного изучения откосов и склонов для наиболее точных расчетов по первой и второй группам предельных состояний.

При проектировании зданий и сооружений на откосах и склонах возникает необходимость наиболее точного прогноза напряжений и деформаций в основании. При этом следует учитывать как деформации поверхности склона, возникающие в процессе строительства, так и деформации, возникающие в процессе эксплуатации зданий и сооружений. Особенно стоит учитывать деформации поверхности склона во времени при проявлении в грунтах основания процессов вторичной ползучести. Предложенная в данной работе методика позволяет прогнозировать деформации поверхности склона во времени при проявлении процессов вторичной консолидации в грунтах основания. Данная методика основана на комплексном анализе НДС откосов и склонов методами инженерной геологии, геодезии и геомеханики. Ниже приведены основные положения расчетов НДС откосов и склонов, изменяющегося во времени.

Для комплексной оценки НДС склона был разработан следующий алгоритм расчетов [125; 206]:

- 1) создание трехмерной геомеханической модели склона с учетом результатов инженерно-геологических изысканий;
- 2) расчет деформаций склона во времени в период инженерно-геодезических изысканий;
- 3) сравнение результатов расчета геомеханической модели склона с результатами геодезического мониторинга;
- 4) корректировка расчетных характеристик грунтов, слагающих массив, с учетом результатов повторных геодезических наблюдений;
- 5) расчет деформаций склона во времени с учетом откорректированных параметров грунтов;
- 6) сравнение полученных результатов расчета с окончательными результатами геодезического мониторинга;
- 7) расчет времени окончания вторичной консолидации грунтов, слагающих склон, с учетом первоначальных и откорректированных параметров грунтов;
- 8) комплексный количественный анализ деформаций склона во времени с учетом и без учета результатов геодезического мониторинга;
- 9) моделирование зданий различной этажности на плитном фундаменте одинаковой площади на бровке склона для оценки критической нагрузки (этажности) зданий.

Полученные результаты на этапе предварительного расчета НДС сравниваются с результатами геодезического мониторинга, включающими четыре первых цикла. Далее на основе сравнения корректируются значения физико-механических характеристик грунтов. Результаты расчета с откорректированными характеристиками грунтов в последующем сравниваются с результатами геодезического мониторинга по всем циклам.

В п. 5.5.1.2 [143] говорится о необходимости уточнения расчетных физико-механических характеристик грунтов основания, но не сказано, как это сделать.

Предложим методику корректировки расчетных характеристик грунтов, слагающих склон, используя данные скоростей смещения оползня по нескольким циклам геодезического мониторинга.

Сущность предлагаемого метода заключается в изучении геодезическими методами деформаций склона во времени от выбора площадки строительства до окончательного утверждения проекта, что в среднем занимает не менее полугода. Результаты геодезических исследований могут учитываться далее в расчетах НДС склона численными методами. Следовательно, длительность геодезического мониторинга в таком случае будет напрямую влиять на точность результатов расчета.

При деформировании склонов как под действием нагрузки от сооружений, так и от собственного веса грунтов в основании формируется сложное НДС, описание которого без использования численных методов расчета является трудоемкой задачей. В результате ис-

пользования численных методов решается обратная задача — получение скоростей оползня на определенный период времени. Автором же предлагается способ по оценке изменения НДС откосов и склонов во времени с учетом результатов повторных геодезических наблюдений, т.е. решается прямая задача. В полученных значениях скоростей в неявном виде уже присутствуют расчетные характеристики грунтов склона. Таким образом, сущность способа заключается в увеличении или уменьшении деформационных характеристик грунта на основе поправочного коэффициента, получаемого при сравнении данных предварительных расчетов МКЭ и результатов повторных геодезических наблюдений. Поправочный коэффициент следует использовать при вычислении всех деформационных характеристик грунтов основания, так как оценить влияние каждой из деформационных характеристик грунтов основания не представляется возможным. Однако возможна ситуация, когда результаты расчета с откорректированными параметрами и результаты повторных геодезических наблюдений могут существенно различаться. Такое может произойти в том случае, если изменение НДС основания происходит не по всей глубине геомеханической модели. В этом случае следует корректировать деформационные характеристики грунтов основания на меньшую глубину и методом последовательных итераций добиваться сходимости результатов мониторинга и расчета МКЭ.

На рис. 3.6 показана блок-схема этого метода.

Пример реализации предлагаемого метода корректировки показан в главе 7.

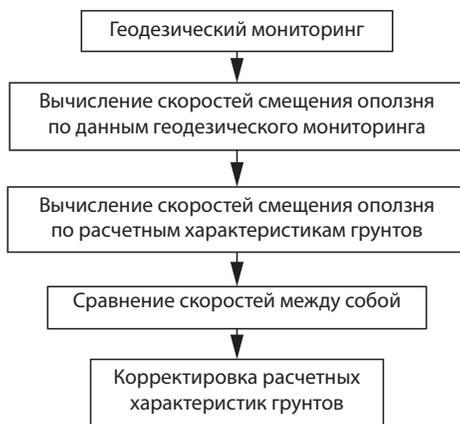


Рис. 3.6. Блок-схема по корректировке расчетных характеристик грунтов

Глава 4. ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБОБЩЕННОГО СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЭЛЛИпсоИДА СМЕЩЕНИЙ ОПОЛЗНЕЙ

4.1. МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТОЙЧИВОГО РАВНОВЕСИЯ ОПОЛЗНЯ

Безопасность зданий и сооружений на оползневых склонах зависит от состояния оползня: находится ли он в состоянии устойчивости или смещается с определенной скоростью.

Есть огромное количество типов оползней, отличающихся между собой формой поверхности скольжения [86; 153; 162]. Рассмотрим математическую модель оползня, тело которого является массой произвольной плотности, а форма его ложа — произвольной поверхностью. Эта модель позволяет выявить момент начала оползневой процесса и определить основные проблемы в задаче его прогнозирования как с точки зрения оползневой поверхности, так и его последствий для зданий и сооружений [130]. Выбор такой формы ложа оползня вызван тем, что необходимо знать, в течение какого времени оползень не представляет опасности.

Для простоты задачи выберем стандартную прямоугольную систему координат $OXYZ$ с началом в вершине поверхности, описывающей форму ложа оползня (рис. 4.1).

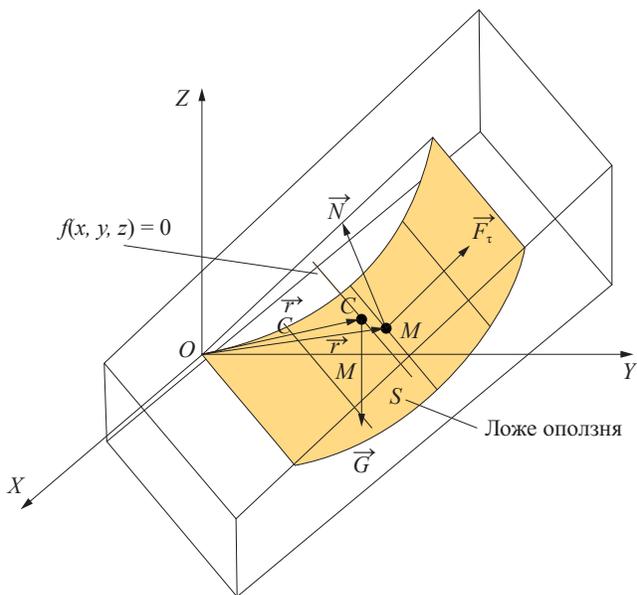


Рис. 4.1. Схема образования формы ложа оползня

Тогда уравнение поверхности в самом общем случае имеет вид

$$f(x, y, z) = 0, \tag{4.1}$$

где $f(x, y, z)$ — произвольная непрерывная и дифференцируемая функция. На рис. 4.1 дано начальное положение оползня (до начала процесса оползания): M — произвольная точка оползня; $\vec{r} = \vec{OM}$ — радиус-вектор точки M ; $\vec{F}_t(x, y, z)$ — вектор силы сцепления (трения) в расчете на единицу площади поверхности скольжения оползня S , направленный по касательной к поверхности скольжения; $\vec{N}(x, y, z)$ — вектор нормальной силы трения в расчете

на единицу площади поверхности скольжения оползня S , направленный по нормали к поверхности скольжения. Силы \vec{F}_τ и \vec{N} приложены в точке M ; $C(x_0, y_0, z_0)$ — центр тяжести тела оползня; $\vec{r} = \vec{OC}(X_0, Y_0, Z_0)$ — радиус-вектор центра тяжести оползня; \vec{G} — вес тела оползня.

Вектор нормальной силы трения \vec{N} направлен по градиенту к поверхности ложа оползня и на основании формулы (4.1) имеет вид:

$$\vec{N} = k(x, y, z) \text{grad}(f). \quad (4.2)$$

Или в проекциях на оси координат $OXYZ$

$$\begin{cases} \vec{N}_x = k(x, y, z) \frac{\partial f}{\partial x}; \\ \vec{N}_y = k(x, y, z) \frac{\partial f}{\partial y}; \\ \vec{N}_z = k(x, y, z) \frac{\partial f}{\partial z}, \end{cases} \quad (4.3)$$

где $k(x, y, z)$ — коэффициент трения, зависящий от положения точки на ложе оползня. В простейшем случае — константа.

Что касается вектора силы сцепления \vec{F}_τ , то его направление и длина касательной к ложу поверхности S неопределенны и могут быть произвольными. В проекциях на оси координат он будет

$$\vec{F}_\tau = \vec{F}_{\tau x} \vec{i} + \vec{F}_{\tau y} \vec{j} + \vec{F}_{\tau z} \vec{k}, \quad (4.4)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — направляющие векторы системы координат.

Из теоретической механики известно, что для равновесия твердого тела при $t_0 \leq t \leq t_1$ необходимо и достаточно, чтобы в момент времени t_0 тело покоилось, а главный вектор $R^{(e)}$ и главный момент внешних сил $M_O^{(e)}$ относительно произвольно выбранного полюса O при $t_0 \leq t \leq t_1$ равнялась нулю, т.е. $R^{(e)} = 0$ и $M_O^{(e)} = 0$ [68].

Уравнения равновесия тела оползня в самом общем случае имеют вид:

$$\begin{cases} \vec{R} = 0, \\ \vec{M}_O = 0. \end{cases} \quad (4.5)$$

где \vec{R} — главный вектор внешних сил, вычисляемый по формуле

$$\vec{R} = \iint_S (\vec{G} + \vec{F}_\tau + \vec{N}) dS, \quad (4.6)$$

или в координатах:

$$\vec{R} = \vec{R}_x \vec{i} + \vec{R}_y \vec{j} + \vec{R}_z \vec{k}; \quad (4.7)$$

\vec{M}_O — главный момент внешних сил относительно начала координат, вычисляемый по формуле

$$\vec{M}_O = \iint_S [\vec{r}_m (\vec{F}_\tau + \vec{N}) + \vec{r}_O \vec{G}] dS, \quad (4.8)$$

или в координатах:

$$\vec{M}_O = \vec{M}_{Ox} \vec{i} + \vec{M}_{Oy} \vec{j} + \vec{M}_{Oz} \vec{k}. \quad (4.9)$$

Здесь

$$\begin{cases} \vec{M}_{Ox} = \begin{vmatrix} y & z \\ \vec{F}_{ty} + \vec{N}_y & \vec{F}_{tz} + \vec{N}_z \end{vmatrix} + y_0 G; \\ \vec{M}_{Oy} = \begin{vmatrix} z & x \\ \vec{F}_{tz} + \vec{N}_z & \vec{F}_{tx} + \vec{N}_x \end{vmatrix} - x_0 G; \\ \vec{M}_{Oz} = \begin{vmatrix} x & y \\ \vec{F}_{tx} + \vec{N}_x & \vec{F}_{ty} + \vec{N}_y \end{vmatrix}. \end{cases} \quad (4.10)$$

В формулах (4.6) и (4.8) интегрирование идет по общей поверхности S тела оползня и ложа. Уравнения равновесия (4.5) в координатах:

$$\begin{cases} R_x = 0; \\ R_y = 0; \\ R_z = 0; \\ \vec{M}_{Ox} = 0; \\ \vec{M}_{Oy} = 0; \\ \vec{M}_{Oz} = 0. \end{cases} \quad (4.11)$$

Уравнения (4.11) в частном случае описывают модели, рассмотренные в работе [120].

Таким образом получено условие устойчивости оползня, имеющего наиболее общую форму. Согласно (4.11) устойчивость оползня определяется значениями сил \vec{F}_i и \vec{N} , веса тела оползня \vec{G} , расположением его центра тяжести $C(x_0, y_0, z_0)$, размерами оползня, видом функции $f(x, y, z)$, формой поверхности S .

4.2. МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТОЙЧИВОГО РАВНОВЕСИЯ ОПОЛЗНЯ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ СКОЛЬЖЕНИЯ

В работе [164] предпринята попытка описания механико-математической модели оползня, тело которого является однородной массой, а форма его ложа в вертикальном продольном разрезе представляет собой *параболическую кривую*. По мнению автора, эта модель позволяет выявить принципиальные вопросы оползневой проблемы и определить основные проблемы в задаче его прогнозирования.

Рассмотрим механико-математическую модель оползня, тело которого является однородной массой (частный случай), но форма его ложа есть цилиндрическая поверхность в вертикальном продольном разрезе, представляющая собой кривую произвольного вида. Выбор такой модели ложа оползня вызван двумя причинами. Во-первых, результаты натуральных наблюдений [41] указывают, что в большинстве случаев форма ложа оползня близка в сочетании с прямолинейными участками к цилиндрической поверхности специального вида. Во-вторых, в местах стыка цилиндрической поверхности и прямой конца оползня отсутствует явление кинематического удара, что эквивалентно непрерывности вектора скорости скольжения тела оползня.

Для простоты задачи выберем стандартную прямоугольную систему координат Oxy с началом в вершине кривой, описывающей форму ложа в вертикальном продольном разрезе оползня (рис. 4.2). Уравнение кривой имеет вид

$$y = f(x), \quad (4.12)$$

где $f(x)$ — произвольная функция переменной x , $f(0) = 0$. На рис. 4.2 показано начальное положение оползня (до начала процесса оползания): M — произвольная точка оползня; $\vec{r} = \vec{OM}$ —

радиус-вектор; γ — угол наклона \vec{r} к оси Ox ; $\vec{\tau}$ — вектор силы сцепления (трения) в расчете на единицу длины ложа, направленной по касательной к кривой; α — угол между \vec{r} и $\vec{\tau}$; β — угол между касательной к кривой в точке $M(x, y)$ и осью Ox ; C — центр тяжести тела оползня; \vec{G} — вес этого тела; h — плечо момента силы \vec{G} относительно точки O ; l — горизонтальный размер тела оползня.

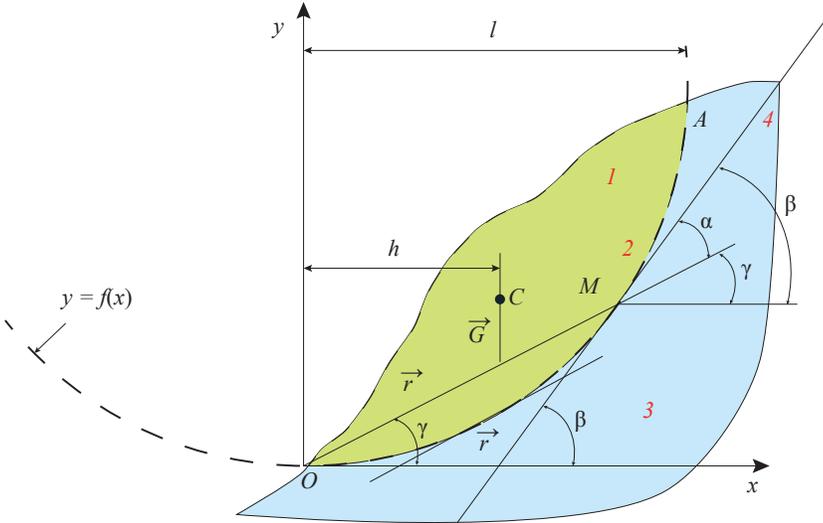


Рис. 4.2. Продольный разрез оползня:

1 — тело оползня; 2 — ложе оползня; 3 — коренная порода; 4 — касательная к кривой в точке M

Сдвигающая сила \vec{G} создает момент относительно точки O :

$$m_0(\vec{G}) = Gh. \quad (4.13)$$

Сила сцепления (сопротивление скольжению), действующая вдоль элементарной дуги dS кривой, создает момент сопротивления относительно той же точки O , равный

$$m_0(\vec{\tau}ds) = [|\vec{r} \vec{\tau} dS|] r \tau \sin \alpha ds. \quad (4.14)$$

Отсюда суммарный момент сил M_0^C сопротивления вдоль линии ложа:

$$M_0^C = \sum m_0(\vec{\tau}dS) = \oint_L \tau r \sin \alpha dS. \quad (4.15)$$

Проекция R^C на ось y суммы всех сил сопротивления R^C вдоль линии ложа:

$$R^C = \oint_L \tau \sin \beta dS. \quad (4.16)$$

В формулах (4.15) и (4.16) интегрирование ведется вдоль кривой $f(x)$ от точки O до точки A . Преобразуем криволинейные интегралы (4.15) и (4.16) в обычные определенные интегралы.

Для этого заметим, что

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{df(x)}{dx} = f'_x;$$

$$\sin \beta = \frac{f'_x}{\sqrt{1+(f'_x)^2}};$$

$$\sin \alpha = \sin(\beta - \gamma) = \frac{x \sin \beta - y \cos \beta}{r} = \frac{xf'_x - f(x)}{r\sqrt{1+(f'_x)^2}};$$

$$dS = \sqrt{1+(f'_x)^2} dx.$$

Используя эти соотношения, и условия постоянства силы сцепления τ вдоль всей дуги OA , криволинейные интегралы (4.15) и (4.16) будут иметь вид как

$$M_0^C = \tau \int_0^l (xf'_x - f(x)) dx; \quad (4.17)$$

$$R^C = \tau \int_0^l f'_x dx = \tau f(l). \quad (4.18)$$

Предельное состояние равновесия определяется уравнениями статики, которые с учетом (4.13), (4.17) и (4.18) для рассматриваемого вида оползня в самом общем случае имеют следующую структуру:

$$\begin{cases} \sum m_0 = m_0(\bar{G}) - M_0^C = 0; \\ \sum R_i^C = -G + R^C = 0, \end{cases} \quad (4.19)$$

или

$$\begin{cases} Gh - \tau \int_0^l (xf'_x - f(x)) dx; \\ \tau f(l) - G = 0. \end{cases} \quad (4.20)$$

Тело оползня будет находиться в состоянии устойчивого равновесия, если

$$\begin{cases} Gh > \tau \int_0^l (xf'_x - f(x)) dx; \\ G < \tau f(l), \end{cases} \quad (4.21)$$

в противном случае никакого равновесия не будет, т.е. оползень начнет движение.

Система (4.21) примет вид

$$\frac{\tau \int_0^l (xf'_x - f(x)) dx}{h} < G < \tau f(l), \quad (4.22)$$

или

$$\tau \int_0^l (xf'_x - f(x)) dx < hG < h\tau f(l). \quad (4.23)$$

Проинтегрируем левую часть неравенства (4.23). При $y = ax$ получим

$$\tau \int_0^l (ax - ax) dx = 0 \quad (4.24)$$

и

$$G \leq \tau al. \quad (4.25)$$

В этом случае тело оползня будет находиться в состоянии устойчивого равновесия. Если же

$$G > \tau al, \quad (4.26)$$

равновесия не будет и оползень начнет движение.

При $y = ax^2$ имеем

$$\tau \int_0^l (2ax^2 - ax^2) dx = \tau \int_0^l ax^2 dx = \tau a \frac{x^3}{3} \Big|_0^l = \frac{1}{3} \tau al^3. \quad (4.27)$$

Тогда, если

$$Gh - \frac{1}{3} \tau al^3 > 0, \quad (4.28)$$

тело оползня будет находиться в состоянии устойчивого равновесия. В противном случае, если

$$Gh - \frac{1}{3} \tau al^3 < 0, \quad (4.29)$$

равновесия не будет, т.е. оползень начнет движение.

Заметим, что неравенства (4.28) и (4.29) получены так же и в работе [164].

Согласно (4.22) и следствий из него, устойчивость оползня определяется значением силы сцепления $\bar{\tau}$, массой тела оползня G , расположением его центра тяжести (или плечом h момента силы тяжести), горизонтальным размером l тела, видом функции $y = f(x)$ на промежутке $[0; l]$. Первоочередная задача в проблеме разработки прогностического метода заключается в установлении их реальных значений. Помимо этой задачи существуют и другие не менее сложные задачи: как учесть неоднородность тела оползня (например слоистость), его обводненность, геолого-геофизические особенности пород, слагающих тело оползня и окружающей среды, влияние естественных и антропогенных факторов и т.д. Даже выбор формы ложа оползня и расположение осей координат, определение размеров тела оползня, наиболее точно согласующихся с реальными параметрами оползня в том или ином оползневом регионе, являются не простыми задачами.

Таким образом, получено условие устойчивости оползня, имеющего ложе формы, наиболее близкой к цилиндрической. На основе рассмотренной механико-математической модели оползня определен круг наиболее важных проблем (аналогично общему случаю), решение которых также может позволить разработать теоретический и практический методы прогноза оползневых процессов и его влияния на безопасность зданий и инженерных сооружений, расположенных на оползневых склонах.

4.3. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ УСТОЙЧИВОГО РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ОПОЛЗНЯ

В разделах 4.1 и 4.2 дано описание оползня в виде механико-математической модели с одинаковой однородной массой тела оползня. Различие состоит в формах поверхности скольжения: в одном случае она представляет собой параболическую кривую, а в другой — цилиндрическую поверхность, являющуюся кривой произвольного вида $y = f(x)$ (формулы (4.5), (4.6) и (4.8)). В формулах (4.6) и (4.8) интегрирование идет по общей поверхности S тела оползня [130].

Известно, что «если (F_1, F_2, \dots, F_k) — система внешних сил, приложенных к твердому телу, а x_i, y_i, z_i — координаты точек приложения силы F_i ($i = 1, 2, \dots, k$) в декартовой прямоугольной системе координат с началом в полюсе O , то необходимые и достаточные условия равновесия твердого тела (4.5) запишутся в виде следующих шести равенств» [68]:

$$\sum_{i=1}^k F_{ix} = 0; \quad \sum_{i=1}^k F_{iy} = 0; \quad \sum_{i=1}^k F_{iz} = 0; \quad (4.30)$$

$$\sum_{i=1}^k (y_i F_{iz} - z_i F_{iy}) = 0; \quad (4.31)$$

$$\sum_{i=1}^k (z_i F_{ix} - x_i F_{iz}) = 0;$$

$$\sum_{i=1}^k (x_i F_{iy} - y_i F_{ix}) = 0.$$

Тогда применительно к оползням уравнения равновесия (4.30) и (4.31) в прямоугольных декартовых координатах будут в виде (4.11).

Согласно (4.11) устойчивость оползня определяется значением сил \vec{F}_τ и \vec{N} , массой тела оползня, расположением его центра тяжести, размерами оползня, видом функции $f(x, y, z)$, формой поверхности скольжения S (см. рис. 4.1) [130].

Разработанные формулы при наличии сведений о расположении центра тяжести, горизонтального размера, массы тела оползня и вектора силы сцепления позволяют оценить устойчивость оползня, имеющего наиболее близкую к реальности параболическую форму поверхности скольжения. При этом следует отметить, что на практике полученные формулы использовать затруднительно, так как установить реальные значения горизонтального размера, массы тела оползня и сведений о расположении его центра тяжести, так же как и данных о векторе силы сцепления, достаточно сложно.

В связи с этим решение задачи по оценке равновесного состояния оползня предлагается осуществлять с позиций комплексного подхода, позволяющего перевести теоретические формулы в эмпирические [135]. Эмпирические формулы устраняют затруднения по установлению сведений о том, находится ли оползень в состоянии равновесия или нет.

Для решения задачи выбрана стандартная прямоугольная система координат Гаусса – Крюгера (ОХУН), применяемая в геодезии, с началом в вершине, расположенной на дневной поверхности оползня (рис. 4.3).

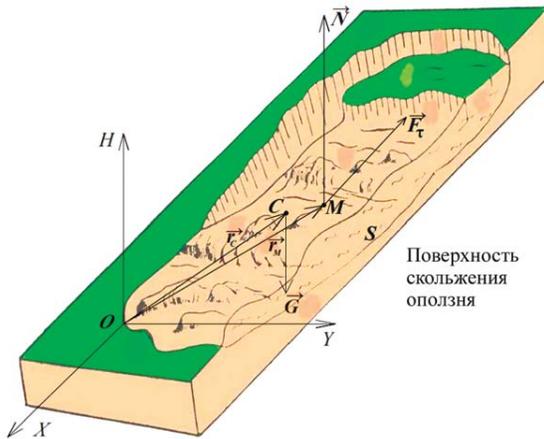


Рис. 4.3. Описание оползня в прямоугольной системе координат Гаусса – Крюгера

На рис. 4.3 показано: начальное положение O оползня; $M(X_i, Y_i, H_i)$ — один из пунктов деформационной сети на поверхности оползня; $\vec{r} = \vec{OM}(X_i, Y_i, H_i)$ — радиус-вектор пункта M ;

$\vec{F}_\tau(X_i, Y_i, H_i)$ — вектор силы сцепления, который направлен по касательной к поверхности скольжения; $\vec{N}(X_i, Y_i, H_i)$ — вектор нормальной силы трения, который направлен по нормали к поверхности скольжения; $C(X_0, Y_0, H_0)$ — центр тяжести тела оползня; $\vec{r} = \vec{OC}(X_0, Y_0, H_0)$ — радиус-вектор центра тяжести оползня; \vec{G} — вектор силы тяжести оползня, направленный отвесно.

Для численного определения уравнения поверхности оползня, включая поверхность скольжения в выбранной системе координат, определяем координаты X , Y и H пунктов деформационной сети, находящихся на дневной поверхности оползня, используя современные электронные тахеометры.

Соответствующие значения координат пунктов деформационной сети представим в виде табл. 4.1.

Таблица 4.1

Значения координат пунктов деформационной сети

№ пунктов	X	Y	H
1	X_1	Y_1	H_1
2	X_2	Y_2	H_2
...
n	X_n	Y_n	H_n

Заметим:

1) длина и направление вектора силы сцепления $\vec{F}_\tau(X_i, Y_i, H_i)$ в плоскости касательной поверхности скольжения в точке $M(X_i, Y_i, H_i)$ неопределенны и могут быть произвольными.

В проекциях на оси координат вектор силы сцепления будет $\vec{F}_{\tau M(X_i, Y_i, H_i)}$ ($\vec{F}_{\tau X_i}, \vec{F}_{\tau Y_i}, \vec{F}_{\tau H_i}$);

2) вектор нормальной силы трения $\vec{N}(X_i, Y_i, H_i)$ в плоскости касательной поверхности скольжения в точке $M(X_i, Y_i, H_i)$ не определен и может быть произвольным. В проекциях на оси координат он будет $\vec{N}_{M(X_i, Y_i, H_i)}$ ($\vec{N}_{X_i}, \vec{N}_{Y_i}, \vec{N}_{H_i}$).

В общем случае система уравнений равновесия тела оползня имеет вид

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [\vec{F}_\tau(X_i, Y_i, H_i) + \vec{N}(X_i, Y_i, H_i)] + \vec{G} = 0; \\ \sum_{i=1}^n [\vec{r}_i(\vec{F}_\tau(X_i, Y_i, H_i) + \vec{N}(X_i, Y_i, H_i))] + \vec{r}_0 \vec{G} = 0. \end{cases} \quad (4.32)$$

Первое уравнение системы (4.32) выражает тот факт, что главный вектор внешних сил равен нулю.

Второе уравнение системы (4.32) выражает тот факт, что главный момент внешних сил относительно начала координат равен нулю.

В прямоугольных координатах система уравнений (4.32):

1) проекции главного вектора внешних сил на оси координат равны нулю:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [\vec{F}_{\tau X}(X_i, Y_i, H_i) + \vec{N}_X(X_i, Y_i, H_i)] = 0; \\ \sum_{i=1}^n [\vec{F}_{\tau Y}(X_i, Y_i, H_i) + \vec{N}_Y(X_i, Y_i, H_i)] = 0; \\ \sum_{i=1}^n [\vec{F}_{\tau H}(X_i, Y_i, H_i) + \vec{N}_H(X_i, Y_i, H_i)] - G = 0; \end{cases} \quad (4.33)$$

2) проекции главного момента внешних сил на оси координат равны нулю:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \left| \begin{array}{cc} Y_i & H_i \\ \vec{F}_{\tau Y_i} + \vec{N}_{Y_i} & \vec{F}_{\tau H_i} + \vec{N}_{H_i} \end{array} \right| + Y_0 G = 0; \\ \sum_{i=1}^n \left| \begin{array}{cc} H_i & X_i \\ \vec{F}_{\tau H_i} + \vec{N}_{H_i} & \vec{F}_{\tau X_i} + \vec{N}_{X_i} \end{array} \right| - X_0 G = 0; \\ \sum_{i=1}^n \left| \begin{array}{cc} X_i & Y_i \\ \vec{F}_{\tau X_i} + \vec{N}_{X_i} & \vec{F}_{\tau Y_i} + \vec{N}_{Y_i} \end{array} \right| = 0. \end{cases} \quad (4.34)$$

В уравнениях (4.33) и (4.34) суммирование осуществляется по всей поверхности S тела оползня (по дневной поверхности и по поверхности скольжения).

Системы уравнений (4.33) и (4.34) в частном случае включают ранее рассмотренные в параграфе 4.2 и в работе [120] модели.

Полученные уравнения равновесия в координатах (4.11) и (4.32) показывают, что устойчивость оползня зависит от значений:

- сил сцепления \vec{F}_τ и трения \vec{N} ;
- веса тела оползня G ;
- расположения его центра тяжести $C(X_0, Y_0, H_0)$;
- размеров оползня;
- количества пунктов деформационной сети, приближенно описывающей форму дневной поверхности оползня, и количества скважин, приближенно описывающих форму поверхности скольжения S (чем больше пунктов деформационной сети и скважин, тем точнее будут описаны эти поверхности).

Для получения объема оползневого тела необходимо знать поверхность скольжения оползня. Возможные методы определения поверхности скольжения оползня и предъявляемые к ним точностные требования проанализированы в работе [62]. Тогда в соответствии с геометрией указанной в [62] сети общий объем оползневого тела будет равен сумме частных объемов прямоугольных фигур сети:

$$V_{\text{оп}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n, \quad (4.35)$$

где $V_{\text{оп}}$ — объем оползневого тела; V_i — объемы отдельных фигур оползневой сети, равные

$$V_i = abH_{\text{cp}} = ab \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4}, \quad (4.36)$$

где a и b — стороны квадрата (прямоугольника) сети; H_i — высоты поверхности скольжения оползня.

Вес тела оползня \vec{G} , направленного вертикально вниз (в силу гравитации) и приложенного в центре тяжести оползня, можно получить как сумму произведений объемов отдельных фигур оползневой сети V_i на соответствующую плотность грунта ρ_i :

$$G = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i. \quad (4.37)$$

Таким образом, комплексный подход, объединяющий инженерно-геологическую и геодезическую информацию, дает возможность практически вплотную подойти к вопросам определения устойчивого равновесия оползней, поскольку позволяет установить наиболее реальные значения параметров, входящих в формулы, составляющие сущность описанного подхода, ко-

торые, в свою очередь, будут зависеть от количества пунктов деформационной сети и скважин. Как точно эти формулы позволяют определять устойчивое равновесие оползня? Данный вопрос остается открытым и требует дальнейшего исследования методами теории погрешностей и проведения инженерных изысканий на конкретном экспериментальном склоне. Апробация и верификация представленной методики являются важнейшим этапом ее внедрения в практику исследований.

4.4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ВИДЕ ОБОБЩЕННЫХ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКИХ ЭЛЛИПСОИДОВ СМЕЩЕНИЙ ОПОЛЗНЕЙ

Факторы оползнеобразования проявляются не во всех участках оползня одновременно и не действуют в равной степени; нередко в теле оползня образовывается оползневый очаг, который затем распространяется поступательно. Для анализа всей этой обстановки необходимы тщательные и систематические геодезические наблюдения [153].

При изучении динамики оползней одной из основных задач является организация циклов повторных геодезических наблюдений за сетью оползневых точек. По полученным координатам точек вычисляют векторы и скорости смещений оползней.

В связи с неравномерными смещениями в разных частях тела оползня оползневая сеть так же будет деформироваться неравномерно. Поэтому важной задачей является определение направления движения оползня и величины его смещения.

Существующая методика по вычислению на плоскости векторов смещений оползневых точек основана на градиентном подходе [153]. Но этот метод дает представление только о смещениях отдельных точек. Информация о результирующем векторе смещения отсутствует.

В работах [113; 115] приводится методика вычисления результирующего вектора и его направления, которая наиболее точно в [114] характеризует поведение оползня в плане (на плоскости). Автор назвал ее обобщенным среднеквадратическим эллипсом смещений оползней.

Поскольку оползень движется по наклонной поверхности, нам представляется, что характер поведения оползня нужно рассматривать в пространстве. Это позволит полнее подойти к механико-математической модели оползневого процесса, которая необходима для оценки его последствий для зданий и сооружений [120], что, в свою очередь, должна привести к снижению рисков в строительстве и, соответственно, к увеличению безопасности.

Для этого необходимо вывести поверхность эллипсоида с произвольно ориентированными в пространстве главными осями [121].

Как известно, общее выражение для плотности нормального закона распределения в пространстве любого числа измерений n (x_1, x_2, \dots, x_n) имеет вид

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\sqrt{|C|}}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} (x_i - m_{x_i})(x_j - m_{x_j})}, \quad (4.38)$$

где $|C|$ — определитель матрицы C ; $C = \|c_{ij}\|$ — матрица, обратная корреляционной матрице K , т.е. если корреляционная матрица

$$K = \|K_{ij}\|, \quad (4.39)$$

то элементы этой матрицы

$$c_{ij} = (-1)^{i+j} \frac{M_{ij}}{|K|}, \quad (4.40)$$

где $|K|$ — определитель корреляционной матрицы; M_{ij} — минор этого определителя, полученный из него вычеркиванием i -й строки и j -го столбца, $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Причем

$$|C| = \frac{1}{|K|}. \quad (4.41)$$

Из общего соотношения (4.38) можно получить все формы нормального закона для любого числа измерений и для любых видов зависимости между случайными величинами [15]. В частности, в [15] подробно рассмотрены случаи $n = 1; 2$.

Здесь мы рассмотрим случай, когда $n = 3$.

Для этого случая формула (4.38) примет вид

$$f(x_1, x_2, x_3) = \frac{\sqrt{|C|}}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{ij} (x_i - m_{x_i})(x_j - m_{x_j})}. \quad (4.42)$$

Корреляционная матрица K будет равна

$$K = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{vmatrix}. \quad (4.43)$$

Используя коэффициенты корреляции r_{ij} , которые связаны с элементами корреляционной матрицы $\|K_{ij}\|$ формулами

$$K_{ij} = r_{ij} \sigma_i \sigma_j, \quad (4.44)$$

где [15]

$$\sigma_i = \sqrt{D_i}; \quad \sigma_j = \sqrt{D_j}; \quad r_{ij} = 1; \quad (4.45)$$

D_i — дисперсия; σ_i — среднеквадратическое отклонение соответствующей случайной величины, формула (4.43) примет вид

$$K = \begin{vmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 r_{12} & \sigma_1 \sigma_3 r_{13} \\ \sigma_1 \sigma_2 r_{12} & \sigma_2^2 & \sigma_2 \sigma_3 r_{23} \\ \sigma_1 \sigma_3 r_{13} & \sigma_2 \sigma_3 r_{23} & \sigma_3^2 \end{vmatrix}. \quad (4.46)$$

Определитель $|K|$ корреляционной матрицы (4.46) равен

$$|K| = \sigma_1^2 \sigma_2^2 \sigma_3^2 \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} \\ r_{12} & 1 & r_{23} \\ r_{13} & r_{23} & 1 \end{vmatrix},$$

или, разлагая, например, по первой строке, получим

$$|K| = \sigma_1^2 \sigma_2^2 \sigma_3^2 (1 - r_{12}^2 - r_{23}^2 - r_{13}^2 + 2r_{12}r_{23}r_{13}). \quad (4.47)$$

Отсюда, используя формулу (4.41), найдем определитель $|C|$, имеющий вид

$$|C| = \frac{1}{|\sigma_1^2 \sigma_2^2 \sigma_3^2 (1 - r_{12}^2 - r_{23}^2 - r_{13}^2 + 2r_{12}r_{23}r_{13})|}. \quad (4.48)$$

Элементы матрицы $\|c_{ij}\|$, $i, j = 1, 2, 3$, равны

$$C = \begin{vmatrix} \frac{\sigma_2^2 \sigma_3^2 (1 - r_{23}^2)}{|K|} & \frac{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3^2 (r_{13} r_{23} - r_{12})}{|K|} & \frac{\sigma_1 \sigma_3 \sigma_2^2 (r_{12} r_{23} - r_{13})}{|K|} \\ \frac{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3^2 (r_{13} r_{23} - r_{12})}{|K|} & \frac{\sigma_1^2 \sigma_3^2 (1 - r_{13}^2)}{|K|} & \frac{\sigma_1^2 \sigma_2 \sigma_3 (r_{13} r_{12} - r_{23})}{|K|} \\ \frac{\sigma_1 \sigma_3 \sigma_2^2 (r_{12} r_{23} - r_{13})}{|K|} & \frac{\sigma_1^2 \sigma_2 \sigma_3 (r_{13} r_{12} - r_{23})}{|K|} & \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2 (1 - r_{12}^2)}{|K|} \end{vmatrix}. \quad (4.49)$$

Рассмотрим теперь поверхность плотности нормального распределения функцией трех переменных x_1, x_2, x_3 , представленной формулой (4.42).

Записав уравнение этой поверхности в переменных x, y, z , получим

$$f(x, y, z) = \frac{\sqrt{|C|}}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{1}{2} \left[c_{11}(x-m_x)^2 + 2c_{12}(x-m_x)(y-m_y) + 2c_{13}(x-m_x)(z-m_z) + c_{22}(y-m_y)^2 + 2c_{23}(z-m_z)(y-m_y) + c_{33}(z-m_z)^2 \right]}, \quad (4.50)$$

где c_{ij} даются матрицей, которая определяется формулой (4.42), и имеют вид

$$C = \begin{vmatrix} \frac{\sigma_y^2 \sigma_z^2 (1 - r_{yz}^2)}{|K|} & \frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 (r_{xz} r_{yz} - r_{xy})}{|K|} & \frac{\sigma_x \sigma_z \sigma_y^2 (r_{xy} r_{yz} - r_{xz})}{|K|} \\ \frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 (r_{xz} r_{yz} - r_{xy})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_z^2 (1 - r_{xz}^2)}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y \sigma_z (r_{xz} r_{xy} - r_{yz})}{|K|} \\ \frac{\sigma_x \sigma_z \sigma_y^2 (r_{xy} r_{yz} - r_{xz})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y \sigma_z (r_{xz} r_{xy} - r_{yz})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 - r_{xy}^2)}{|K|} \end{vmatrix}. \quad (4.51)$$

В сечении поверхности распределения (4.50) плоскостями, перпендикулярными оси $f(x, y, z)$, будем иметь уравнение

$$c_{11}(x - m_x)^2 + 2c_{12}(x - m_x)(y - m_y) + 2c_{13}(x - m_x)(z - m_z) + c_{22}(y - m_y)^2 + 2c_{23}(z - m_z)(y - m_y) + c_{33}(z - m_z)^2 = \lambda^2, \quad (4.52)$$

где λ — произвольная константа.

Поскольку $r_{ij} < 1$, значения коэффициентов $c_{ij} > 0$. Отсюда заключаем, что поверхность (4.52) есть поверхность эллипсоида с произвольно ориентированными в пространстве главными осями и с центром в точке $P(m_x, m_y, m_z)$.

Главные оси $C < B < A$ эллипсоида (4.52) на основании равенства (4.51) являются корнями следующего уравнения третьей степени относительно переменной λ :

$$\begin{vmatrix} \frac{\sigma_y^2 \sigma_z^2 (1 - r_{yz}^2)}{|K|} - \lambda & \frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 (r_{xz} r_{yz} - r_{xy})}{|K|} & \frac{\sigma_x \sigma_z \sigma_y^2 (r_{xy} r_{yz} - r_{xz})}{|K|} \\ \frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 (r_{xz} r_{yz} - r_{xy})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_z^2 (1 - r_{xz}^2)}{|K|} - \lambda & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y \sigma_z (r_{xz} r_{xy} - r_{yz})}{|K|} \\ \frac{\sigma_x \sigma_z \sigma_y^2 (r_{xy} r_{yz} - r_{xz})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y \sigma_z (r_{xz} r_{xy} - r_{yz})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 - r_{xy}^2)}{|K|} - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (4.53)$$

Решив уравнение (4.53) относительно λ , которое всегда имеет три действительных корня, найдем их в порядке возрастания $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$. Главные оси $C < B < A$ так же в порядке возрастания будут иметь вид

$$C = \sqrt{\frac{1}{\lambda_1}}; \quad B = \sqrt{\frac{1}{\lambda_2}}; \quad A = \sqrt{\frac{1}{\lambda_3}}. \quad (4.54)$$

Формулы (4.54) полностью решают задачу нахождения главных осей эллипсоида (4.52). Смещение оползневого тела равно

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} = \sqrt{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3}}. \quad (4.55)$$

Все вышеприведенные формулы имеют место в общем случае при любых случайных величинах x, y, z .

Рассмотрим теперь весьма важный для практики случай, когда смещения оползневых точек по осям X, Z и Y, Z независимы, а по осям X и Y зависимы. Тогда коэффициенты корреляции r_{xy}, r_{xz}, r_{yz} и определитель K корреляционной матрицы удовлетворяют условию

$$\begin{cases} r_{xy} \neq 0, r_{xz} = 0, r_{yz} = 0; \\ K = \sigma_x^2 \sigma_y^2 \sigma_z^2 (1 - r_{xy}^2). \end{cases} \quad (4.56)$$

Определим в этом случае главные оси эллипсоида смещения оползня.

Учитывая условия (4.56), уравнение (4.53) для определения главных осей будет иметь вид

$$\begin{vmatrix} \frac{\sigma_y^2 \sigma_z^2}{|K|} - \lambda & -\frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 r_{xy}}{|K|} & 0 \\ -\frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 r_{xy}}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_z^2}{|K|} - \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 - r_{xy}^2)}{|K|} - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (4.57)$$

Соотношение (4.57), раскрывая определитель, эквивалентно уравнению

$$\left(\frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 - r_{xy}^2)}{|K|} - \lambda \right) \begin{vmatrix} \frac{\sigma_y^2 \sigma_z^2}{|K|} - \lambda & -\frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 r_{xy}}{|K|} \\ -\frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 r_{xy}}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_z^2}{|K|} - \lambda \end{vmatrix} = 0,$$

или, раскрывая определитель второго порядка, эквивалентно уравнению

$$\left(\frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 - r_{xy}^2)}{|K|} - \lambda \right) \left(\left(\frac{\sigma_y^2 \sigma_z^2}{|K|} - \lambda \right) \left(\frac{\sigma_x^2 \sigma_z^2}{|K|} - \lambda \right) - \left(-\frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 r_{xy}}{|K|} \right)^2 \right) = 0. \quad (4.58)$$

Учитывая формулу (4.56) и введя обозначения:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{\sigma_y^2 (1 - r_{xy}^2)}; & a_2 = \frac{1}{\sigma_x^2 (1 - r_{xy}^2)}; \\ a_3 = \left(\frac{r_{xy}}{\sigma_x \sigma_y (1 - r_{xy}^2)} \right)^2, \end{cases} \quad (4.59)$$

уравнение (4.58) примет вид

$$\left(\frac{1}{\sigma_z^2} - \lambda\right) \left((a_1 - \lambda)(a_2 - \lambda) - a_3\right) = 0.$$

Или в окончательном виде:

$$\left(\frac{1}{\sigma_z^2} - \lambda\right) \left[\lambda^2 - (a_1 + a_2)\lambda + a_1 a_2 - a_3\right] = 0. \quad (4.60)$$

Решая квадратное уравнение (4.60), найдем $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{1}{\sigma_z^2}; \\ \lambda_2 = \frac{a_1 + a_2 + \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + 4a_3}}{2}; \\ \lambda_3 = \frac{a_1 + a_2 - \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + 4a_3}}{2}. \end{cases}$$

Согласно (4.54) оси эллипсоида будут равны

$$\begin{cases} C = \sigma_z; \\ B = \sqrt{\frac{2}{a_1 + a_2 + \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + 4a_3}}}; \\ A = \sqrt{\frac{2}{a_1 + a_2 - \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + 4a_3}}}. \end{cases} \quad (4.61)$$

Смещение R будет равно

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}. \quad (4.62)$$

Угол между осью абсцисс и большой полуосью эллипсоида вычислим по следующей формуле:

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{2a_1 a_2}{a_1 - a_2} \right). \quad (4.63)$$

Таким образом, получено кубическое уравнение для определения в общем случае главных осей A, B, C среднеквадратического эллипсоида смещения оползня. В частном случае, когда коэффициенты корреляции r_{xz}, r_{yz} незначимы, получены формулы для расчета главных осей среднеквадратического эллипсоида смещений оползня и для полного смещения оползня. В случае, когда σ_z — неслучайная величина, все выводы совпадают с выводами, полученными в [118].

Глава 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТАНОВКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ И ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНАХ

5.1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИЛЫ И УСКОРЕНИЯ ОПОЛЗНЯ. КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЯ

В случае оползания, начинающегося при статических условиях, ускорение создается силой тяжести, которая действует в вертикальном направлении и может быть разложена на две составляющие: параллельно и перпендикулярно к склону.

Следовательно, увеличение силы, вызывающей обрушение, может быть обусловлено либо возрастанием массы оползневого тела, либо увеличением ускорения [123].

На рис. 5.1 представлены упрощенная схема движения массива грунта по наклонной поверхности скольжения и силы, действующие на массу горных пород.

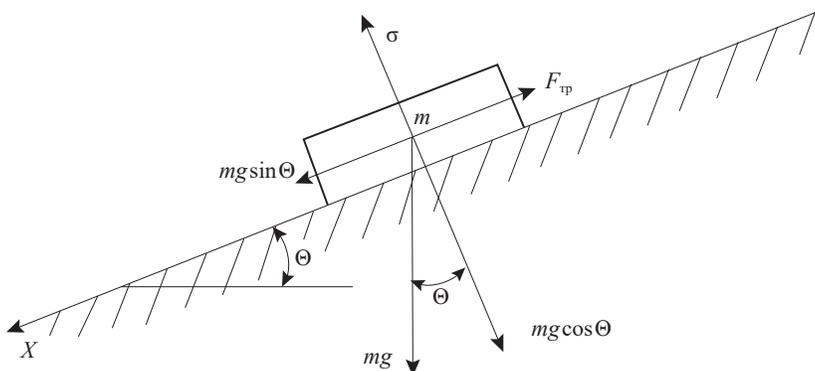


Рис. 5.1. Схема движения массива грунта по наклонной поверхности скольжения и силы, действующие на массу горных пород

Смещающая сила ($mg \sin \theta - F_{тр}$) определяется через величину веса mg , действующего на грунт, крутизны склона θ и силы трения $F_{тр}$.

Для определения силы трения необходимо знать прочность грунтов. Условие прочности грунта выражается условием прочности Кулона – Мора (2.14) [29; 152; 209].

Значения ϕ и c выбирают из специальных таблиц, в которых даны нормативные значения удельных сцепления и углов внутреннего трения для пылевато-глинистых грунтов четвертичных отложений [128].

Здесь с большим запасом надежности следует достаточное условие начала оползания, которое, исходя из рис. 5.1, имеет вид [122; 205]

$$mg \sin \theta > F_{тр}. \tag{5.1}$$

Известно, что

$$mg \sin \theta - F_{тр} = ma; \tag{5.2}$$

$$mg \cos \theta = \sigma S,$$

где a — ускорение оползневой массы; S — площадь оползня.

Сила трения сцепления оползневое тела с учетом (2.9) равна

$$F_{\text{тр}} = \tau S = mg \cos \theta \operatorname{tg} \varphi + cS. \quad (5.3)$$

Подставим уравнение (5.3) в уравнение (5.2). Получим

$$mg \sin \theta - mg \cos \theta \operatorname{tg} \varphi - cS = ma. \quad (5.4)$$

Так как правая часть формулы (5.4) представляет собой силу, то окончательно получим формулу силы смещения оползня:

$$F = mg \sin \theta - mg \cos \theta \operatorname{tg} \varphi - cS. \quad (5.5)$$

По формуле (5.5), определив по данным инженерных изысканий входящие в нее параметры оползня, можно рассчитать силу его смещения F .

Сокращая формулу (5.4) на массу m , будем иметь

$$g \sin \theta - g \cos \theta \operatorname{tg} \varphi - \frac{cS}{m} = a. \quad (5.6)$$

Вполне очевидно, что при движении оползня ускорение a должно быть положительным, т.е. выражение

$$\sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \varphi - \frac{cS}{mg} > 0 \quad (5.7)$$

есть необходимое условие для начала движения оползня. При $a < 0$ движение оползня маловероятно.

Из (5.7) видно, что подвижность оползня зависит от крутизны склона θ , угла внутреннего трения φ , удельного сцепления c , площади S склона и массы оползня m , которая, в свою очередь, зависит от глубины поверхности скольжения и состава грунтов.

Скорость оползня можно найти из (5.6):

$$V = t \left(g \sin \theta - g \cos \theta \operatorname{tg} \varphi - \frac{cS}{m} \right). \quad (5.8)$$

Рассмотрим случаи, когда на поверхности скольжения параметры φ и c являются переменными, зависящими от x (начала линии отрыва). Тогда необходимо выполнить анализ формулы (5.7) при различных c и φ по всей длине L линии скольжения [207].

Пусть φ и c зависят от x . Рассмотрим случай, когда эти величины постоянны на некоторых промежутках, вообще говоря, различных. Пусть φ постоянно на k отрезках (разбиение K), c постоянно на n отрезках (разбиение N). Тогда неравенство примет вид

$$mg(\sin \theta - \cos \theta \sum_{i=1}^{i=k} \operatorname{tg} \varphi_i) - S \sum_{j=1}^{j=n} c_j > 0. \quad (5.9)$$

Выберем в качестве разбиения M рассматриваемого отрезка L объединение разбиений K и N . Тогда неравенство можно записать как

$$mg(\sin \theta - \cos \theta \sum_{i=1}^{i=m} \operatorname{tg} \varphi_i) - S \sum_{i=1}^{i=m} c_i > 0. \quad (5.10)$$

Случай, когда для каждого c_j выполнено условие

$$mg(\sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \varphi_i) - Sc_i > 0,$$

тривиален и не требует особого анализа.

Пусть на некоторых (одном или больше) промежутках i_t это неравенство не выполняется из-за значительной величины c_t . Тогда условием движения оползня будет

$$mg(\sin\theta - \cos\theta \sum_{i=1}^{i=m} \operatorname{tg} \varphi_i) - S \sum_{i=1}^{i=m} c_i > S \sum_{i_t} c_{i_t}, \quad (5.11)$$

где в левой части неравенства (5.11) во вторую сумму не входят слагаемые с номерами i_t .

Аналогично для Φ_{i_h} на отрезках i_h , на которых каждое Φ_{i_h} достаточно мало, будем иметь:

$$mg(\sin\theta - \cos\theta \operatorname{tg} \varphi_{i_h}) - S c_{i_h} < 0; \quad (5.12)$$

$$-mg(\sin\theta - \cos\theta \sum_{i_h} \operatorname{tg} \varphi_{i_h}) + S \sum_{i_h} c_{i_h} > 0; \quad (5.13)$$

$$\left[mg(\sin\theta - \cos\theta \sum_{i=1}^{i=m} \operatorname{tg} \varphi_i) - S \sum_{i=1}^{i=m} c_i \right] > -mg(\sin\theta - \cos\theta \sum_{i_h} \operatorname{tg} \varphi_{i_h}) + S \sum_{i_h} c_{i_h}, \quad (5.14)$$

или, что то же самое:

$$\left[mg(\sin\theta - \cos\theta \sum_{i=1}^{i=m} \operatorname{tg} \varphi_i) \right] - S \sum_{i=1}^{i=m} c_i + mg(\sin\theta - \cos\theta \sum_{i_h} \operatorname{tg} \varphi_{i_h}) > 0, \quad (5.15)$$

где в стоящие в квадратных скобках суммы не входят слагаемые с номерами i_h .

Аналогично рассмотрим оползень с круглоцилиндрической поверхностью скольжения. Пусть тело оползня покоится на дуге окружности, ограниченной линиями с углами наклона γ_0 и γ_ω . Угол наклона γ_0 перпендикулярен v_0 , а угол наклона γ_ω перпендикулярен v_ω . Разобьем дугу на k равных отрезков таким образом, чтобы внутри каждого отрезка φ и c были постоянными, и заменим малые дуги хордами (рис. 5.2).

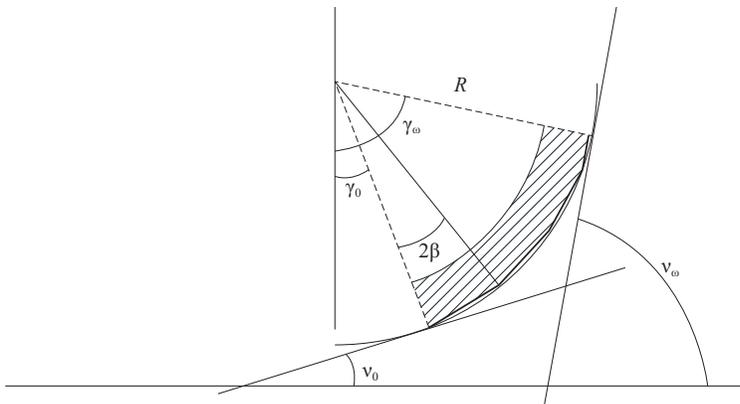


Рис. 5.2. Разбиение дуги на k равных отрезков

Тогда неравенство запишется в виде

$$\sum_{i=1}^{i=k} m_i g(\sin\theta_i - \cos\theta_i \operatorname{tg} \varphi_i) - \sum_{i=1}^{i=k} S_i c_i > 0, \quad (5.16)$$

где $S_i = 2Ra \sin \beta$; a — ширина оползня; R — радиус кривой, по которой происходит скольжение;

$$\beta = \frac{(\gamma_\omega - \gamma_0)}{2k}.$$

В итоге

$$\sum_{i=1}^{i=k} m_i g (\sin \theta_i - \cos \theta_i \operatorname{tg} \varphi_i) - \sum_{i=1}^{i=k} 2Ra \sin \beta c_i > 0; \quad (5.17)$$

$$g \sum_{i=1}^{i=k} m_i (\sin \theta_i - \cos \theta_i \operatorname{tg} \varphi_i) - 2Ra \sin \beta \sum_{i=1}^{i=k} c_i > 0. \quad (5.18)$$

Поскольку $m_i = \rho h' S_i$, где h' постоянна, если постоянна глубина расположения поверхности скольжения оползня, а ρ — плотность грунта. Тогда

$$h' S g \sum_{i=1}^{i=k} \rho_i \sin \theta_i - \sum_{i=1}^{i=k} \rho_i \cos \theta_i \operatorname{tg} \varphi_i - 2Ra \sin \beta \sum_{i=1}^{i=k} c_i > 0. \quad (5.19)$$

Таким образом, по формулам (5.15) и (5.19) можно рассчитать возможность движения оползня для прямолинейных и круглоцилиндрических поверхностей ложа оползней соответственно. В первом приближении можно провести только геодезические изыскания (они намного дешевле) и, подставив примерные значения параметров c и φ , выполнить численный анализ и уже иметь некоторое представление о возможности смещения оползня. Если же провести вторично геодезические изыскания, то уже по двум циклам наблюдений можно точно судить об оползневых подвижках. И в случае выявления подвижек оползня необходимо проводить геодезический мониторинг, а инженерно-геологические изыскания выполнять только в период предпроектных работ.

Известно, что оползни, подпадающие под оценку смещения «исключительно медленные», постепенно переходят в стадию «очень медленные», потом — в стадии «умеренное», «быстрое» и т.д. Тогда ускорение оползневых тел можно рассчитать по формуле

$$a = \frac{V_1 - V_0}{t}. \quad (5.20)$$

В качестве примера рассмотрим «быстрое» ($V = 1,5$ м/сут) и «умеренное» ($V = 1,5$ м/мес.) ускорения движения. Получим

$$a = \frac{1,5 \text{ м/сут} - 0,05 \text{ м/сут}}{1 \text{ сут}} = 1,45 \text{ м/сут}^2.$$

Аналогично рассчитаем ускорения для всех типов оползней. Результаты занесем в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Ускорения оползней

Оценка движения	Скорость движения	Ускорения
Исключительно быстрое	3 м/с	3,0 м/с ²
Очень быстрое	0,3 м/мин	
Быстрое	1,5 м/сут	0,3 м/мин ²
Умеренное	1,5 м/мес.	1,45 м/сут ²
Очень медленное	1,5 м/год	1,4 м/мес. ²
Исключительно медленное	0,06 м/год	1,44 м/год ²

Массы оползневых тел в зависимости от их объемов вычислим по формуле

$$m = V\rho, \quad (5.21)$$

где V — объем оползня; ρ — плотность глины, равная 1,91 т/м³.

Массы оползневых тел в зависимости от объемов приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Массы оползневых тел в зависимости от объемов	
Объемы смешивающихся масс, м ³	Масса <i>m</i> , т
10 и менее	От 19,1 и менее
От 10 до 100	19,1–191
От 100 до 1000	191–1910
От 1000 до 100 000	1910–191 000
От 100 000 до 1 000 000	191 000–1 910 000
От 1 000 000 до 10 000 000	1 910 000–19 100 000
От 10 000 000 и более	От 19 100 000 и более

Рассчитаем силу смещения оползней для разных по классу оползневых тел в зависимости от их массы и ускорения. Результаты запишем в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Сила смещения оползневого тела

Классы масштабности оползней	Масса <i>m</i> , т	Ускорение <i>a</i>	Сила <i>F</i>
Малые	До 19,1	1,44 м/год ²	27,5 т·м/год ²
		1,4 м/мес. ²	26,7 т·м/мес. ²
		1,45 м/сут ²	27,7 т·м/сут ²
		0,3 м/мин ²	5,7 т·м/мин ²
		3,0 м/с ²	57,3 т·м/с ²
Небольшие	До 191	1,44 м/год ²	275 т·м/год ²
		1,4 м/мес. ²	267 т·м/мес. ²
		1,45 м/сут ²	277 м/сут ²
		0,3 м/мин ²	57 т·м/мин ²
		3,0 м/с ²	573 т·м/с ²
Средние	До 1910	1,44 м/год ²	2750 т·м/год ²
		1,4 м/мес. ²	2670 т·м/мес. ²
		1,45 м/сут ²	2770 м/сут ²
		0,3 м/мин ²	570 т·м/мин ²
		3,0 м/с ²	5730 т·м/с ²

Классы масштабности оползней	Масса m , т	Ускорение a	Сила F
Большие	До 191 000	1,44 м/год ²	27 500 т·м/год ²
		1,4 м/мес. ²	26 700 т·м/мес. ²
		1,45 м/сут ²	27 700 м/сут ²
		0,3 м/мин ²	5700 т·м/мин ²
		3,0 м/с ²	57 300 т·м/с ²
Очень большие	До 1 910 000	1,44 м/год ²	275 000 т·м/год ²
		1,4 м/мес. ²	267 000 т·м/мес. ²
		1,45 м/сут ²	277 000 м/сут ²
		0,3 м/мин ²	57 000 т·м/мин ²
		3,0 м/с ²	573 000 т·м/с ²
Огромные	До 19 100 000	1,44 м/год ²	2 750 000 т·м/год ²
		1,4 м/мес. ²	2 670 000 т·м/мес. ²
		1,45 м/сут ²	2 770 000 м/сут ²
		0,3 м/мин ²	570 000 т·м/мин ²
		3,0 м/с ²	5 730 000 т·м/с ²
Грандиозные	Более 19 100 000 (напр. 50 000 000)	1,44 м/год ²	27 500 000 т·м/год ²
		1,4 м/мес. ²	26 700 000 т·м/мес. ²
		1,45 м/сут ²	27 700 000 м/сут ²
		0,3 м/мин ²	5 700 000 т·м/мин ²
		3,0 м/с ²	57 300 000 т·м/с ²

Анализ табл. 5.3 показывает, что чем больше масштабность оползня и чем больше его ускорение, тем больше и сила оползня, которая может стать причиной возникновения в различных строительных конструкциях деформаций и напряжений вплоть до разрушения.

Для масс $m = 100\,000$ т и $150\,000$ т на площади $S = 2$ га рассчитаем по формуле (5.7) возможность сдвига оползней при крутизнах склона $\theta = 20^\circ, 40^\circ$ и 60° , нормативных значений удельного сцепления c и углов внутреннего трения φ для пылевато-глинистых грунтов четвертичных отложений. Результаты сведем в табл. 5.4:

Таблица 5.4

Возможность сдвига оползней при различной крутизне склона

Грунт	Показатель текучести I_L , масса $m = 100\ 000$ т, площадь $S = 2$ га	Характеристика c (кПа) и φ (град.)	Значения c и φ при коэффициенте пористости e						
			0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Глина	$0 < I_L \leq 0,25$	c	–	81	68	54	47	41	36
		φ	–	21	20	19	18	16	14
	$\theta = 20^\circ$	–	–1,7	–1,4	–1,1	–0,9	–0,8	–0,6	
	$\theta = 40^\circ$	–	–1,4	–1,0	–0,7	–0,6	–0,4	–0,3	
	$\theta = 60^\circ$	–	–1,1	–0,7	–0,4	–0,3	–0,1	0	
	$0,25 < I_L \leq 0,5$	c	–	–	57	50	43	37	32
		φ	–	–	18	17	16	14	11
	$\theta = 20^\circ$	–	–	–1,1	–1,0	–0,8	–0,6	–0,5	
	$\theta = 40^\circ$	–	–	–0,8	–0,6	–0,5	–0,3	–0,2	
	$\theta = 60^\circ$	–	–	–0,5	–0,3	–0,2	–0,01	+0,1	
	$0,5 < I_L \leq 0,75$	c	–	–	45	41	36	33	29
		φ	–	–	15	14	12	10	7
$\theta = 20^\circ$	–	–	–0,8	–0,7	–0,6	–0,5	–0,4		
$\theta = 40^\circ$	–	–	–0,5	–0,4	–0,3	–0,2	–0,04		
$\theta = 60^\circ$	–	–	–0,2	–0,1	+0,03	+0,1	+0,2		
Глина	$0 < I_L \leq 0,25$ $m = 150\ 000$ т	c	–	81	68	54	47	41	36
		φ	–	21	20	19	18	16	14
	$\theta = 20^\circ$	–	–1,1	–0,9	–0,7	–0,6	–0,5	–0,4	
	$\theta = 40^\circ$	–	–0,8	–0,6	–0,4	–0,2	–0,1	0	
	$\theta = 60^\circ$	–	–0,4	–0,2	0	+0,1	+0,2	+0,3	
	$0,25 < I_L \leq 0,5$	c	–	–	57	50	43	37	32
		φ	–	–	18	17	16	14	11
	$\theta = 20^\circ$	–	–	–0,7	–0,6	–0,5	–0,4	–0,3	
	$\theta = 40^\circ$	–	–	–0,4	–0,3	–0,2	–0,1	+0,1	
	$\theta = 60^\circ$	–	–	–0,1	0	+0,1	+0,2	+0,3	
	$0,5 < I_L \leq 0,75$	c	–	–	45	41	36	33	29
		φ	–	–	15	14	12	10	7
$\theta = 20^\circ$	–	–	–0,5	–0,4	–0,3	–0,3	–0,2		
$\theta = 40^\circ$	–	–	–0,2	–0,1	–0,01	+0,06	+0,2		
$\theta = 60^\circ$	–	–	+0,1	+0,2	+0,3	+0,3	+0,4		

Анализируя данные табл. 5.4, замечаем, что при увеличении крутизны склона θ , уменьшении показателя текучести I_L , уменьшении угла внутреннего трения φ , уменьшении удельного сцепления грунта c , увеличении массы оползня m для равных площадей формируются условия для смещений оползней.

Для остальных классов масштабностей оползней знаки у смещений при тех же параметрах θ (град.), c (кПа) и φ (град.) повторяются.

Выше по предложенной методике приведены примеры расчетов смещений оползней для нормативных значений их масс m и геотехнических характеристик θ (град.), c (кПа) и φ (град.). Для реальных оползней требуется проведение натурных изысканий оползня, важнейшим из которых является геодезический мониторинг. Геодезические наблюдения позволяют находить абсолютные значения численных характеристик оползня и определять степень надежности прогнозирования оползневых рисков.

5.2. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПОЛЗНЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ

Как известно, под оползневой опасностью обычно понимают проявление и активизацию развития оползневого процесса [86; 90]. Вероятность проявления этого процесса необходимо предсказать для того, чтобы учесть возможный материальный ущерб и соответствующие затраты на его ликвидацию.

Выше нами было выведено неравенство (5.7), позволяющее рассчитывать потенциальную возможность момента движения оползня. Эта целевая функция есть необходимое условие для начала движения оползня. Заметим, что подобное решение в оползневедении предложено впервые.

Ряд параметров, входящих в формулу (5.7), определяется эмпирически, т.е. из измерений [126]:

- крутизны склона θ ;
- угла внутреннего трения φ ;
- удельного сцепления грунта c ;
- площади оползня S ;
- массы оползня m .

Следовательно, данные параметры носят вероятностный характер, накладывающий некоторую неопределенность на результат расчета по формуле (5.7). Этот результат будет отягощен погрешностью M_0 , зависящей от погрешностей указанных выше эмпирических параметров m_θ , m_φ , m_c , m_S , m_m [28]. Результат расчета по формуле (5.7), полученный без учета этих погрешностей, может оказаться противоположным результату, полученному с их учетом. Таким образом, задача анализа интервальных оценок точности расчета для формулы (5.7) является в теме оползневых рисков весьма актуальной.

Соответствующий анализ выполним на основе теории погрешностей измерений [10; 59]. Согласно положениям этой теории формула для оценки точности неравенства (5.7) примет вид

$$M_0^2 = \cos^2 \theta \frac{m_\theta^2}{\rho^2} + \sin^2 \theta \operatorname{tg}^2 \varphi \frac{m_\varphi^2}{\rho^2} + \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} \right)^2 \cos^2 \theta \frac{m_c^2}{\rho^2} + \left(\frac{S}{mg} \right)^2 m_c^2 + \left(\frac{c}{mg} \right)^2 m_S^2 + \left(\frac{cS}{m^2 g} \right)^2 m_m^2, \quad (5.22)$$

где m_θ — погрешность определения крутизны склона; m_φ — погрешность определения угла внутреннего трения; m_c — погрешность определения удельного сцепления грунта; m_S — погрешность определения площади оползня; m_m — погрешность определения массы оползня.

Представление о точностных характеристиках эмпирических параметров можно получить из материалов геодезических и инженерно-геологических изысканий. Параметры θ , φ и c получают методами прямых (непосредственных) измерений, а значение площади S и массы m — косвенным измерением через определение объема V и плотности грунта ρ , связанных с m известной математической зависимостью.

Для получения объема оползневой тела необходимо знать поверхность скольжения оползня (ПСО). Возможные методы определения ПСО оползня и предъявляемые к ним точностные требования проанализированы в работе [62]. Установлено, что требование к точности

определения ПСО, указанное в нормативном документе [111] получать с точностью построения рельефа земной поверхности в 0,1 м лишено основания: даже в наиболее точном способе определения высот ПСО скважинной инклинометрией является крайне сложной задачей из-за труднодоступности ПСО и погрешности ее фиксации на значительных глубинах. К тому же для построения ПСО с точностью топографической съемки рельефа земной поверхности в масштабе 1:500 потребуется проводить скважинную инклинометрию по сетке квадратов размером в 15–20 м ([137], прил. Г). Такая высокая частота разведочных скважин не является характерной даже при ответственном строительстве, где детальные инженерно-геологические изыскания, согласно документу ([138], табл. 7.1), нормируются с частотой 25–50 м. В рамках существующих измерительных технологий практически достигаемая точность высот ПСО при инженерно-геологических изысканиях составляет 1 м.

В работе [62] взамен дорогостоящему и трудоемкому методу скважинной инклинометрии предложен метод определения ПСО по данным геодезического мониторинга на дневной поверхности оползневого склона. Метод предусматривает построение специальной геодезической сети (оползневой сети) (рис. 5.3), которая представляет собой регулярную сеть прямоугольников и квадратов, вершины которых выбираются с учетом границ и рельефа оползневого склона.

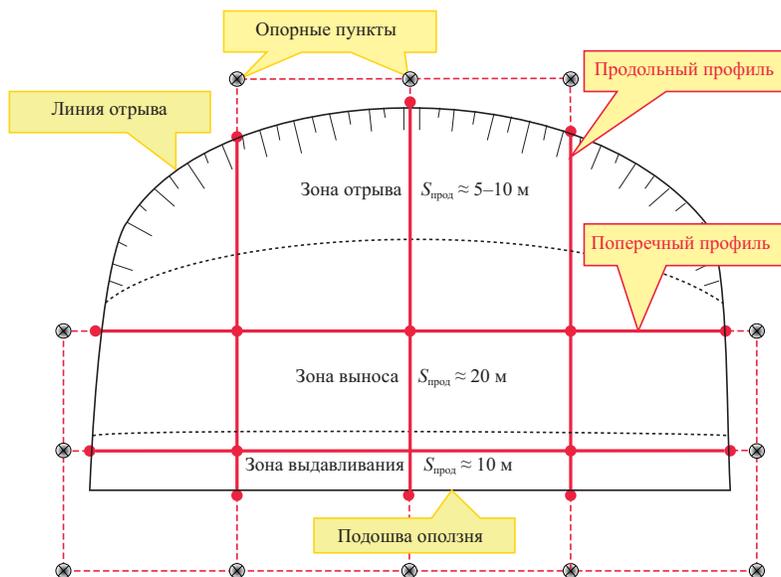


Рис. 5.3. Проект оползневой сети

В соответствии с геометрией указанной выше сети общий объем оползневого тела будет равен сумме частных объемов прямоугольных фигур сети:

$$V_{\text{оп}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n, \quad (5.23)$$

где $V_{\text{оп}}$ — объем оползневого тела; V_i — объем отдельных фигур оползневой сети, равный

$$V_i = abH_{\text{ср}} = ab \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4}, \quad (5.24)$$

где a и b — стороны квадрата (прямоугольника); H_i — высоты ПСО.

В соответствии с формулой (5.24) и положениями «Теории ошибок измерений» [59], получим формулу для определения точности объема отдельных фигур:

$$m_{V_i}^2 = \left(\frac{1}{4}b(H_1 + H_2 + H_3 + H_4)\right)^2 m_a^2 + \left(\frac{1}{4}a(H_1 + H_2 + H_3 + H_4)\right)^2 m_b^2 + 4\left(\frac{1}{4}ab\right)^2 m_H^2. \quad (5.25)$$

Приведем подобные члены:

$$m_{V_i}^2 = \left(\frac{1}{4}(H_1 + H_2 + H_3 + H_4)\right)^2 (a^2 + b^2)m_S^2 + \frac{1}{4}a^2b^2m_H^2. \quad (5.26)$$

Так как точность определения высот ПСО в сто раз меньше точности определения сторон, то, используя известный в теории принцип «ничтожного влияния», будем иметь

$$m_{V_i} = \frac{1}{2}abm_H. \quad (5.27)$$

Тогда точность вычисления объема всего оползневоего тела (5.23) будет такова:

$$m_{V_{\text{он}}}^2 = m_{V_1}^2 + m_{V_2}^2 + \dots + m_{V_n}^2 = nm_{V_i}^2. \quad (5.28)$$

Применив к формуле (5.28) принцип равноточного влияния, получим

$$m_{V_{\text{он}}} = m_{V_i}\sqrt{n}. \quad (5.29)$$

Для примера рассчитаем по формулам (5.23), (5.24) объем $V_{\text{он}}$ и по формуле (5.29) — погрешность $m_{V_{\text{он}}}$ для оползневого склона размерами 100×200 м при $a = b = 20$ м, $H_{\text{ср}} = 10$ м, $n = 50$, приняв следующие значения СКП измерений: $m_a = m_b = m_S = 0,01$ м, $m_{H_1} = m_{H_2} = m_{H_3} = m_{H_4} = m_H = 1$ м:

$$V_{\text{он}} = 200\,000 \text{ м}^3; \quad m_{V_{\text{он}}} = 2828 \text{ м}^3; \quad \frac{m_{V_{\text{он}}}}{V_{\text{он}}} = \frac{1}{70}.$$

Используя формулу (5.21), получим выражение для расчета точности M определения массы оползня m :

$$M = \sqrt{\rho^2 m_{V_{\text{он}}}^2 + V_{\text{он}}^2 m_\rho^2}. \quad (5.30)$$

Для глинистых грунтов находим следующие значения: $\rho = 1,91$ т/м³, $m_\rho = 0,01$ т/м³ [30].

По формулам (5.21) и (5.30) рассчитаем массу оползневоего тела и ее точность:

$$m = 2000 \text{ м}^3 \cdot 1,91 \text{ т/м}^3 = 38\,200 \text{ т};$$

$$M = \sqrt{(1,91 \text{ т/м}^3)^2 \cdot (2828 \text{ м}^3)^2 + (200\,000 \text{ м}^3)^2 \cdot (0,01 \text{ т/м}^3)^2} = 5760 \text{ т}.$$

Вычислим относительную погрешность массы оползневоего тела m :

$$\frac{M}{m} = \frac{5760 \text{ т}}{382\,000 \text{ т}} = \frac{1}{66}.$$

Теперь можно перейти к вычислению неравенства (5.7) и по формуле (5.22) выполнить оценку точности этого неравенства, приняв для показателя текучести глины $0 < I_L \leq 0,25$ численные значения параметров $\varphi = 10^\circ$, $c = 33$ кПа, крутизну склона $\theta = 19^\circ$, площади $S = 20\,000 \text{ м}^2$ с погрешностью $m_S = 2,2 \text{ м}^2$, а значения погрешностей $m_\varphi = m_\theta = 1^\circ$, $m_c = 1$ кПа [28]. Получим

$$\sin 19^\circ - \cos 19^\circ \cdot \text{tg} 10^\circ - \frac{33 (\text{т/м} \cdot \text{с}^2) \cdot 20\,000 \text{ м}^2}{382\,000 \text{ т} \cdot 9,8 (\text{м/с}^2)} = -0,02;$$

$$M_0 = \sqrt{\cos^2 19^\circ \left(\frac{1^\circ}{57,3^\circ}\right)^2 + \sin^2 19^\circ \operatorname{tg}^2 10^\circ \left(\frac{1^\circ}{57,3^\circ}\right)^2 \cos^2 19^\circ \left(\frac{1^\circ}{57,3^\circ}\right)^2 + \left(\frac{20\,000 \text{ м}^2}{382\,000 \text{ т} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2}\right)^2 (1 \text{ т/м} \cdot \text{с}^2) + \left(\frac{33 \text{ (т/м} \cdot \text{с}^2)}{382\,000 \text{ т} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2}\right)^2 (2,2 \text{ м}^2)^2 + 0,02 + \left(\frac{33 \text{ (т/м} \cdot \text{с}^2) \cdot 20\,000 \text{ м}^2}{(382\,000 \text{ т})^2 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2}\right)^2 (5760 \text{ т})^2}$$

Предельное значение погрешности неравенства будет равно

$$\Delta_{\text{пред}} = \tau M_0 = 2 \cdot 0,02 = 0,04,$$

где τ — коэффициент, равный 2 при заданной вероятности $P = 0,95$.

Тогда доверительный интервал находится в пределах $[-0,06; +0,02]$.

Отсюда следует, если потенциальная возможность момента смещения оползня, вычисленная по формуле (5.20), получилась отрицательной, то это означает, что смещения оползня не будет. Однако выполненный для целевой функции (5.7) анализ интервальных оценок точности показывает, что такую возможность исключать не следует и что ее необходимо учитывать при освоении склоновой территории под строительство.

Выполним анализ влияния параметров, входящих в формулу (5.8), на скорость смещения оползня на основе положений теории погрешностей измерений. Дисперсия (5.8) будет равна

$$\sigma_V^2 = \left(\frac{\partial V}{\partial \theta} \sigma_\theta\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \varphi} \sigma_\varphi\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial c} \sigma_c\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial S} \sigma_S\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial m} \sigma_m\right)^2. \quad (5.31)$$

Взяв частные производные этой функции по каждому из параметров, получим коэффициенты при всех пяти аргументах:

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = \operatorname{tg}(\cos \theta + \sin \theta \cdot \operatorname{tg} \varphi); \quad \frac{\partial V}{\partial \varphi} = \operatorname{tg} \cos \theta \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi}\right);$$

$$\frac{\partial V}{\partial c} = t \frac{S}{m}; \quad \frac{\partial V}{\partial S} = t \frac{c}{m}; \quad \frac{\partial V}{\partial m} = -t \frac{cS}{m^2}.$$

Переходя к среднеквадратическим погрешностям, будем иметь

$$m_V^2 = t^2 \left\{ g^2 \cos^2 \theta \frac{m_\theta^2}{\rho^2} + g^2 \sin^2 \theta \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \frac{m_\varphi^2}{\rho^2} + g^2 \cos^2 \theta \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi}\right)^2 \frac{m_\varphi^2}{\rho^2} + \frac{S^2}{m^2} m_c^2 + \frac{c^2}{m^2} m_S^2 + \frac{c^2 S^2}{(m^2)^2} m_m^2 \right\}. \quad (5.32)$$

Рассмотрим следующий пример. Пусть даны: $\theta = 25^\circ$; $\varphi = 14^\circ$; $c = 37 \text{ кПа}$; $S = 10 \text{ га}$; $h = 10 \text{ м}$; $\rho = 1,91 \text{ т/м}^3$. Будем иметь

$$V = \left(9,8 \text{ м/с}^2 \sin 25^\circ - 9,8 \text{ м/с}^2 \cos 25^\circ \operatorname{tg} 14^\circ - \frac{37 \text{ т/(м} \cdot \text{с}^2) 100\,000 \text{ м}^2}{1\,910\,000 \text{ т}} \right) c = -0,01 \text{ м/с}.$$

Выполним анализ полученного результата. Знак « \leftarrow » указывает на то, что оползень стоит на месте. Однако результат, близкий к нулю, означает, что оползень находится в НДС и при срабатывании одного из оползневых факторов оползень придет в движение.

При заданных выше значениях получим следующие значения коэффициентов уравнения (5.32):

$$m_r^2 = t^2(0,023m_0^2 + 0,026m_\phi^2 + 0,0027m_c^2 + 3,8 \cdot 10^{-10}m_s^2 + 1,0 \cdot 10^{-12}m_m^2). \quad (5.33)$$

Вычислим сумму коэффициентов уравнения (5.33). Получим $\Sigma = 0,052$. Примем эту сумму за 100 % и найдем процентное отношение каждого коэффициента. Получим:

$$\frac{0,023}{0,052} \cdot 100 \% = 45 \%;$$

$$\frac{0,026}{0,052} \cdot 100 \% = 50 \%;$$

$$\frac{0,0027}{0,052} \cdot 100 \% = 5 \%.$$

Таким образом, на скорость смещения оползня V влияют в основном крутизна склона θ , угол внутреннего трения грунтов ϕ и удельное сцепление грунтов c .

5.3. Учет влияния сейсмического воздействия на скорость смещения оползней

Сейсмически вызванные оползни представляют собой одну из наиболее важных побочных опасностей, связанных с землетрясениями [47]. На них обычно приходится значительная доля общего ущерба от землетрясений, связанного с человеческими потерями и ущербом окружающей среде. Оползни, вызванные землетрясениями, представляют серьезную опасность во многих регионах. Некоторые из наиболее выраженных сейсмически индуцированных оползней в разное время произошли в России, Таджикистане, Тайване, Калифорнии, Японии, Италии, Китае и других странах, что привело к многочисленным жертвам и огромному (прямому и косвенному) ущербу инфраструктуре. Например, в январе 2001 года землетрясение магнитудой 7,6 балла у берегов Сальвадора вызвало многочисленные оползни по всей стране, включая оползень Лас-Колинас к югу от Сан-Сальвадора. Оползень похоронил более 400 домов и убил 1000 человек.

Для оценки сейсмоопасности оползневых явлений, вызванных землетрясениями, предложены разные методы различной сложности, включая оценку вероятности возникновения оползня, коэффициента устойчивости склона и постоянного смещения оползня по поверхности скольжения с использованием численных МКЭ [190]. Также была небольшая работа по количественной оценке, физической уязвимости от оползней, вызванных землетрясениями. Методология оценки уязвимости от многих опасностей, приведенная в [200], может рассматриваться как исключение. Однако вышеупомянутая методология, основанная исключительно на экспертном суждении, предполагает высокую степень субъективности и упрощения, поскольку она не учитывает различные типы и механизмы оползней, типологию зданий, жесткость фундамента и различные состояния повреждений.

В [193] разработана важная типовая модель опасности, которая определила взаимосвязь между сейсмической активностью и оползнем. Модель являлась результатом детального изучения 40 исторических крупных землетрясений (магнитуда $M = 5,2...9,5$) из основных сейсмических регионов мира наряду с сотнями событий меньшей величины в США.

Среди ключевых моментов модели:

- наименьшее значение магнитуды землетрясений, которые могут вызвать смещение оползней, составляет около $M = 4,0$;

- количество оползней, вызванных землетрясением, обычно увеличивается с увеличением величины события. Землетрясения с магнитудой $M < 5,5$, как правило, вызывают несколько десятков оползней в лучшем случае, в то время как землетрясения с магнитудой $M > 8,0$ обычно приводят к многим тысячам отказов устойчивости склонов;

– максимальная площадь, затронутая оползневой активностью, увеличивается примерно с 0 км^2 при $M = 4,0$ до $500\,000 \text{ км}^2$ при $M = 9,2$;

– максимальное расстояние от эпицентра землетрясения до предела оползневой активности колеблется от 0 км при $M = 4,0$ до около 500 км при $M > 9,0$.

Сейсмогравитационные деформации — подготовленные к смещению сейсмическими процессами оползни, обвалы, лавины, которые случаются позже при афтершоках или дождях [89], поскольку уменьшаются характеристики грунтов c и φ . Таким образом, при землетрясениях магнитудой от $M \geq 4$ оползень активизируется и начинает двигаться с определенной скоростью. Чем больше магнитуда землетрясения, тем больше скорость движения оползня. Соответственно увеличиваются оползневые риски и уменьшается безопасность сооружений.

В действующих нормативных документах вопросы возможного влияния сейсмогенных оползней на безопасность зданий и сооружений не учитываются. Они либо ориентированы на решение задач проектирования отдельных объектов в условиях возможного сейсмического воздействия, но без рассмотрения вероятного развития сейсмогравитационных дислокаций [140], либо определяют требования к изучению, оценке и прогнозу склоновых процессов, но без учета сейсмических воздействий на их развитие [143–144].

Учет сейсмического воздействия при расчете устойчивости склонов и откосов осуществляется добавлением к расчетным усилиям так называемой сейсмической силы. Сейсмическая сила является объемной. В расчетах, как правило, используется расчетное сейсмическое воздействие, которое определяется по формуле

$$j_{\text{расч}} = j_0 + m, \quad (5.34)$$

где j_0 — расчетная сейсмичность для данного района; m — сейсмическая характеристика, учитывающая увеличение сейсмичности в баллах в зависимости от грунтов, слагающих склон.

Рассмотрим ситуацию, когда землетрясение провоцирует активизацию оползневых процессов.

Учет сейсмического воздействия включает:

- метод фиктивного откоса;
- метод фиктивного сейсмического угла.

Суть *метода фиктивного откоса* заключается в повороте склона на угол $\Delta\theta$, на который отклоняется от вертикали равнодействующая гравитационной и горизонтально направленной сейсмической сил. Действие землетрясения моделируется кратковременным наклоном склона на угол $\Delta\theta$, величина которого в зависимости от коэффициента сейсмичности ε приведена в табл. 5.5 [50].

Таблица 5.5

Увеличение крутизны склона в зависимости от интенсивности землетрясений

Показатели	Сейсмическая балльность района			
	6	7	8	9
Коэффициент сейсмичности ε (в долях ускорения свободного падения g)	0,05	0,1	0,2	0,4
Увеличение крутизны склона $\Delta\theta$ в градусах	3	6	12	24

Применительно к формуле (5.8) скорость оползня будет вычисляться по формуле

$$V = t \left(g \sin(\theta + \Delta\theta) - g \cos(\theta + \Delta\theta) \operatorname{tg} \varphi - \frac{cS}{m} \right). \quad (5.35)$$

При тех же данных и $\varepsilon = 0,2$ и $\Delta\nu = 12^\circ$ получим скорость $V = 2 \text{ м/с}$.

Суть метода сейсмического угла заключается в том, что действие землетрясения моделируется за счет уменьшения угла внутреннего трения грунтов основных деформирующихся горизонтов на величину сейсмического угла и за счет изменения величины нормального давления:

$$F_{P_S} = \operatorname{tg}(\varphi - \delta) + \frac{c}{P_S}, \quad (5.36)$$

где F_{P_S} — коэффициент сопротивления грунта сдвигу с учетом сейсмичности; φ — угол внутреннего трения; c — сцепление; δ — сейсмический угол, $\delta = \operatorname{arctg} \varepsilon$ (ε — коэффициент сейсмичности); P_S — величина нормального давления с учетом сейсмичности, $P_S = P(1 + \varepsilon)$ (P — величина нормального давления без учета сейсмичности).

Величина сейсмического угла в зависимости от величины сейсмического ускорения приведена в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Величины расчетных значений сейсмического ускорения и сейсмического угла

Показатели	Сейсмическая балльность района			
	6	7	8	9
Коэффициент сейсмичности ε (в долях ускорения свободного падения g)	0,05	0,1	0,2	0,4
Сейсмический угол δ в градусах	3	6	12	24

Используя формулу (5.8), скорость вычислим по формуле:

$$V = t \left(g \sin \theta - g \cos \theta \operatorname{tg}(\varphi - \delta) - \frac{cS}{m(1 + \varepsilon)} \right). \quad (5.37)$$

При тех же данных и $\varepsilon = 0,2$, $\delta = 12^\circ$ получим скорость $V = 2$ м/с.

5.4. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА СКОРОСТЬ СМЕЩЕНИЯ ОПОЛЗНЕЙ

Из климатических и метеорологических характеристик наибольшее влияние оказывают атмосферные осадки (количество, режим выпадения и вид), испарение, температурный режим. Длительные морозящие дожди при низкой величине испарения способствуют инфильтрации воды в породы, насыщению их водой и потере прочности [26]. Режим осадков оказывает влияние на гидрологический режим.

Действие грунтовых вод на состояние оползневого склона проявляется различными путями, вызывая изменение НДС массива и физико-механических свойств грунтов, а также обуславливая развитие фильтрационных деформаций и, в частности, сдвиговую прочность, уменьшая величину сопротивления сдвигу. При этом вода за счет возникновения порового давления изменяет величину напряжений, действующих на скелет грунта.

Насыщая грунты, вода изменяет их физико-механические характеристики (сдвиговую прочность), уменьшая величину сопротивления сдвигу, снижая нормальные напряжения в плоскости сдвига [26].

Как известно, влияние порового давления на сопротивление сдвигу описывается уравнением

$$\tau = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (5.38)$$

где u — поровое давление.

Рассмотрим ситуацию, когда поровое давление максимально, т.е. $u = \sigma$. Тогда скорость движения оползня можно вычислить по следующей формуле:

$$V = t \left(g \sin \theta - \frac{cS}{m} \right). \quad (5.39)$$

При тех же исходных данных получим скорость $V = 2$ м/с.

Получается, что если оползень находится в НДС, то землетрясение магнитудой $M = 8$ провоцирует такую же скорость смещения оползня, как и проливной дождь, способствующий поднятию уровня грунтовых вод. Соответственно, при меньшей магнитуде (меньшем количестве осадок) уменьшается скорость смещения оползня. При $M = 6$ скорость смещения оползня будет «очень быстрое» с переходом в «исключительно быстрое».

Следовательно, при проектировании зданий на оползневых склонах, находящихся в сейсмоопасных районах, необходимо учитывать по сейсмологическим картам как временное влияние землетрясений, так и их балльность для расчета скорости смещений оползней.

Аналогично необходимо учесть такие опасные гидрометеорологические явления, как дожди, ливни и снег, которые напрямую влияют на характеристики грунтов склонов φ и c , особенно в период проведения предпроектных работ.

Глава 6. МЕТОДОЛОГИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ РИСКОВ В СКЛОНОВЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ФАКТОРОВ

6.1. АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ РИСКОВ В СКЛОНОВЫХ СИСТЕМАХ, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ ОПОЛЗНЕВЫХ ФАКТОРОВ

Обоснование уровня безопасности оползневых процессов производится на основании результатов повторных геодезических наблюдений. Оценка риска оползневых процессов является основной задачей прогноза развития оползневых процессов на данной склоновой территории, которая зависит как от степени оползневой опасности, так и от степени оползневой уязвимости.

При поражении склоновых территорий оползневыми процессами они перестают быть достаточно надежными для сооружений вследствие нарушения устойчивости. Если уровень развития оползневых процессов превышает некоторую критическую величину, то склоновые территории могут представлять собой определенную степень опасности (становятся оползнеопасными). Это приводит к необходимости характеризовать возникающую опасность не только качественно, но и количественно.

Первый этап — предполагаемый уровень безопасности и его ранжирование

Во второй главе нами довольно подробно были описаны существующие региональные и локальные прогнозы оползневых опасностей. Поскольку каждый отдельный оползень имеет свои, только ему присущие особенности, то основным признаком ранжирования безопасности являются локальные оползнеопасные склоны. При этом основным показателем, влияющим на уровень предполагаемой безопасности, есть оценка степени оползневых рисков.

Если на территории района имеется несколько оползнеопасных склонов, то можно перейти к следующему уровню ранжирования — районному. Далее, если регион состоит из нескольких районов, то следующий уровень ранжирования — региональный.

Второй этап — оценка оползневой безопасности по результатам повторных геодезических наблюдений

Оползневые процессы оцениваются целым комплексом различных параметров. Какая-то часть из них является на определенный момент времени известной, а другая — неизвестной. В связи с этим задача должна решаться по двум направлениям. Первое направление — сбор исходной информации, по данным которой составляется «портрет» процесса в его первом приближении (ретроспективный образ). Второе направление — подготовка данных для определения параметров оползневого процесса. Эти данные дают возможность строить перспективный образ оползневого процесса; подготовка данных должна быть получена на основании очень качественного геодезического мониторинга. Существенным шагом при создании перспективного образа оползневого процесса является построение его математической модели, которая оптимизируется набором исходных данных. За построенной математической моделью, а также при анализе результатов проведенного моделирования необходим постоянный контроль. Он заключается в сопоставлении математической модели с ретроспективным образом изучаемого процесса. Далее, используя информацию о параметрах среды, полученных из архивных источников и на основании результатов повторных геодезических наблюдений, выполняется комплексная оценка оползневого риска. Все это дает возможность спрогнозировать дальнейшее развитие оползневой ситуации на рассматриваемом оползневом склоне на определенный промежуток времени и приступить (при необходимости) к построению стратегии обеспечения оползневой безопасности.

Третий этап — выработка рекомендаций, созданных на основании принятой стратегии обеспечения безопасности сооружений в склоновой системе

Так как стратегия имеет вероятностный характер, то за первым, промежуточным, уровнем принятия решений необходим контроль.

Сам процесс управления осуществляется техническими методами, а именно инженерная защита сооружений от опасных оползневых процессов и постоянный контроль за состоянием оползня и сооружениями (рис. 6.1).

Такие методы управления позволяют оптимизировать разработанную ранее стратегию обеспечения безопасности СС. Затем выполняются прогноз развития ситуации на интересующей склоновой территории на заданный период времени, а также разработка новых рекомендаций. При этом роль геодезического мониторинга еще более возрастает.

Использование подобной циклической схемы третьего этапа (см. рис. 6.1), по мнению автора, позволит добиться значительного совершенствования стратегии обеспечения безопасности сооружений в достаточно сжатые сроки, что, в свою очередь, создаст предпосылки для безопасного и устойчивого развития СС.

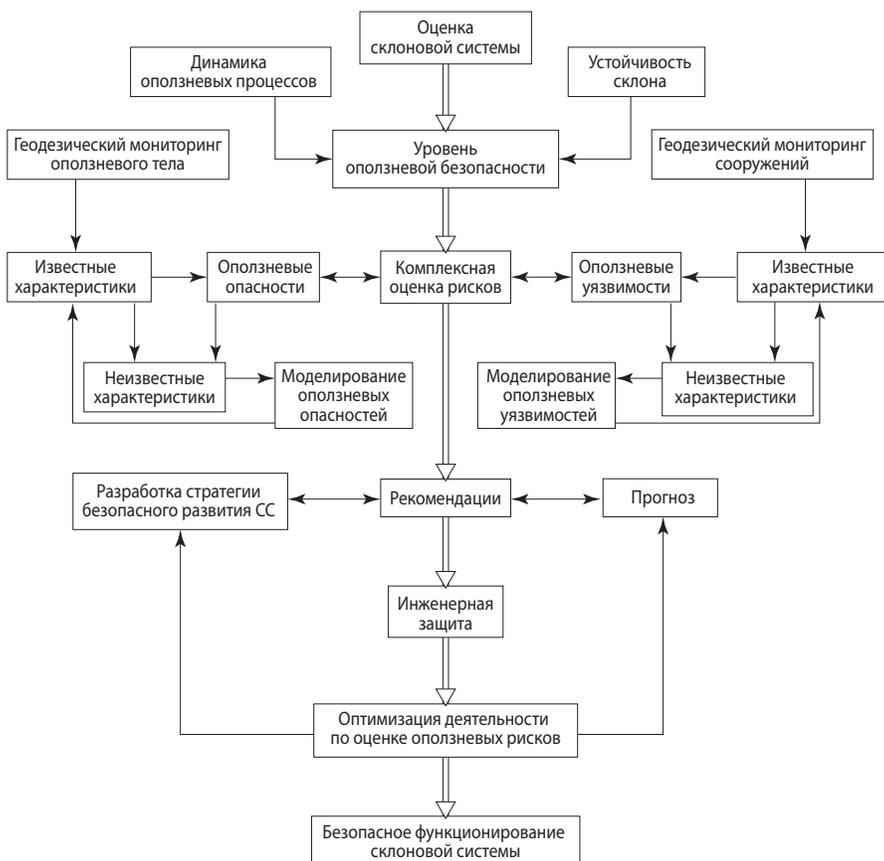


Рис. 6.1. Алгоритм комплексной оценки оползневых рисков в СС

6.2. ПРОЦЕДУРА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА И УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ СКЛОНОВЫХ СИСТЕМ

Важной составной частью алгоритма комплексной оценки оползневых рисков в СС является процедура оценки степени оползневого риска и уровня оползневой безопасности этих систем. Исходя из теоретической модели представления среды СС, предложим структуру процедуры оценки степени оползневого риска и, соответственно, уровня оползневой безопасности СС (рис. 6.2).

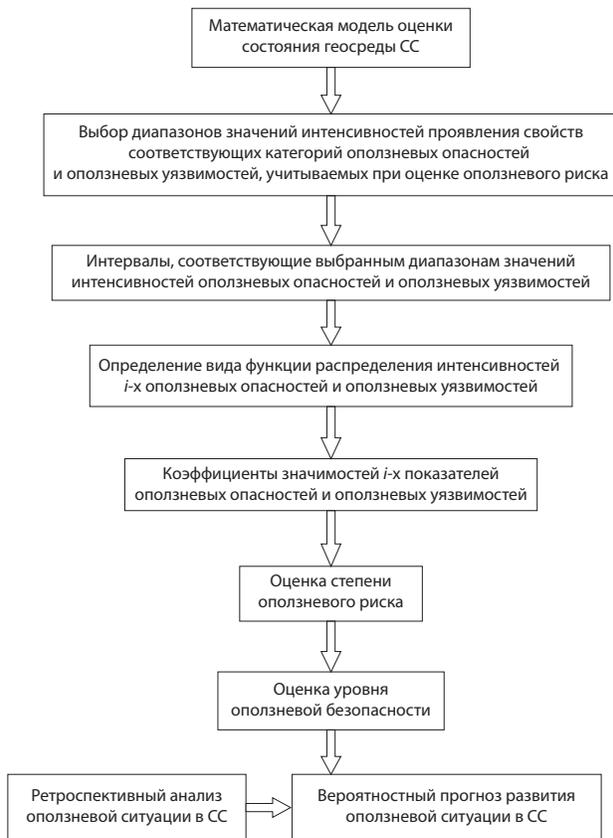


Рис. 6.2. Процедура оценки степени оползневых рисков и уровня оползневой безопасности в СС

Для удобства анализа этого вопроса рассмотрим данную процедуру в обратном порядке [131].

1. Уровень оползневой безопасности $S_{\text{оп}}$ (изменяется в пределах от 0 до 1) будем рассчитывать по формуле

$$S_{\text{оп}} = 1 - R_{\text{оп}}, \quad (6.1)$$

где $R_{\text{оп}}$ — степень оползневого риска, $R_{\text{оп}} \in [0; 1]$.

Из формулы (6.1) следует, что оценка уровня оползневой безопасности сводится к задаче определения степени оползневого риска для СС. Такая задача должна решаться исключительно на основании комплексного анализа всех возможных негативных воздействий на данную систему со стороны оползневых процессов.

2. Степень оползневого риска в СС будем определять по формуле

$$R_{\text{оп}} = P(H)V_m(H), \tag{6.2}$$

где $P(H)$ — интегральный критерий уровня оползневой опасности (безразмерный коэффициент), который представляет собой долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной ситуации (сочетания показателей опасности) на склоновой территории. Он должен занимать место между «идеальным» вариантом $P(H)^{\text{ид}} = 0$ и «негативно идеальным» вариантом $P(H)^{\text{нег.ид}} = 1$; $V_m(H)$ — интегральный критерий уровня оползневой уязвимости (безразмерный коэффициент), который представляет собой долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной ситуации (сочетания показателей уязвимости) на склоновой территории. Он также должен занимать место между «идеальным» вариантом $V_m(H)^{\text{ид}} = 0$ и «негативно идеальным» вариантом $V_m(H)^{\text{нег.ид}} = 1$.

6.2.1. Определение интегрального критерия уровня оползневой опасности

Интегральный критерий уровня оползневой опасности может быть вычислен по формуле

$$P(H) = k_{\text{норм}} \sum_{i=1}^n \delta_i W_i, \tag{6.3}$$

где δ_i — коэффициент значимости i -го показателя опасности; W_i — значение весового коэффициента i -го показателя опасности; $k_{\text{норм}}$ — нормирующий множитель, приводящий к $0 \leq P(H) \leq 1$.

Таким образом, оценка ключевой определяемой величины — степени оползневого риска — сводится к задаче определения коэффициентов значимости оползневых опасностей и их весовых коэффициентов.

Коэффициент значимости i -го показателя опасности δ_i представляет собой вероятность реализации i -й опасности оползневого процесса, при этом интенсивность проявлений свойств соответствующей ему категории оползневой опасности относится к определенному диапазону величин $[a; b]$, значения которых являются «рисковыми». Тогда коэффициент значимости i -го риска оползневой опасности определяется на основании соотношения

$$\delta_i = \int_a^b f(B_i) dB_i, \tag{6.4}$$

где B_i — интенсивность проявления свойств оползневой опасности в зависимости от ее потенциальной разрушительной силы, соответствующей i -му показателю оползневой опасности; $f(B_i)$ — закон распределения (плотность вероятностей) интенсивности проявления свойств i -го показателя опасности оползневого процесса.

Закон распределения $f(B_i)$ строится стандартным образом в виде гистограммы при использовании границы интервалов группировки значений интенсивности проявления свойств показателей опасности оползневого процесса. По горизонтальной оси откладывают интервалы, соответствующие выбранным диапазонам значений, а по вертикальной оси — величины, соответствующие плотности частоты попадания значений интенсивностей в каждый диапазон. Строится кривая (линия тренда), аппроксимированная в виде полиномиальной зависимости для каждого i -го показателя опасности оползневого процесса. И эта зависимость далее характеризует искомый закон распределения $f(B_i)$.

Некоторые значения проявления характеристик интенсивности опасности оползневых процессов взяты из фрагмента общей шкалы опасности оползневых процессов [99] (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Фрагмент общей шкалы опасности оползневых процессов

Показатели оползневых процессов	Категории опасности оползневых процессов			
	Чрезвычайно опасные (катастрофические)	Весьма опасные	Опасные	Умеренно опасные
Подверженность территории оползневому процессу, %	> 30	30–10	10–1	< 1
Площадь разового поражения, км ²	2–1	1–0,5	0,5–0,01	< 0,01
Объем смещаемых пород, млн м ³	20–10	10–5	5–0,001	< 0,001
Повторяемость, случаев/год	< 0,1	0,1–0,25	0,25–0,75	> 0,75
Ущерб экономический разовый, млн руб. в ценах 1990 г.	До 20	До 2	До 0,2	< 0,2

Поскольку под *оползневой опасностью* понимают негативную для нее вероятностную возможность реализации оползневых процессов, протекающих в природной, техногенной и антропогенной составляющих среды склоновой системы, то определим ее следующими показателями, которые можно получить из геодезических параметров:

- а) крутизна θ склона;
- б) высота H склона;
- в) объем V смещающихся пород;
- г) скорость v смещения оползня.

Для крутизны склонов применена следующая градация:

- умеренно опасные: 4–8°;
- опасные: 8–20°;
- весьма опасные: 20–35°;
- чрезвычайно опасные: > 35°.

Для высот склонов применена следующая градация:

- умеренно опасные: < 40 м;
- опасные: 40–250 м;
- весьма опасные: 250–400 м;
- чрезвычайно опасные: > 400 м.

Для скоростей смещения оползней применим следующую градацию:

- умеренно опасные: 0–1,5 м/год;
- опасные: 1,5–3 м/год;
- весьма опасные: 3–4,5 м/год;
- чрезвычайно опасные: 4,5–6 м/год.

Распределения вероятностей проявления показателей интенсивности свойств оползневого процесса, принадлежащих к «рисковым» интервалам разбиения диапазона опасности оползневых процессов, показаны на рис. 6.3–6.6:

а) крутизна склона;

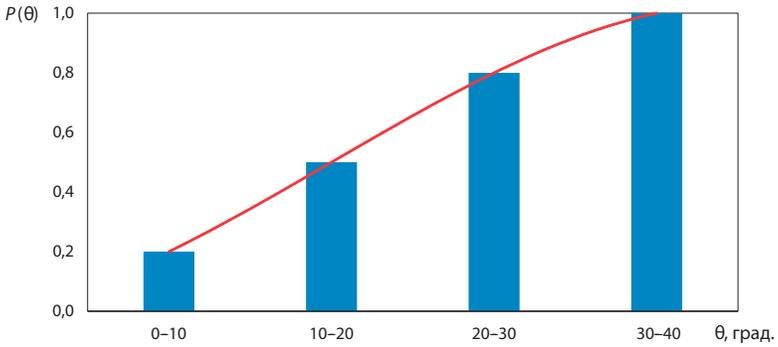


Рис. 6.3. Функция распределения вероятностей проявления интенсивности крутизны $P(\theta)$ склона

б) высота склона;

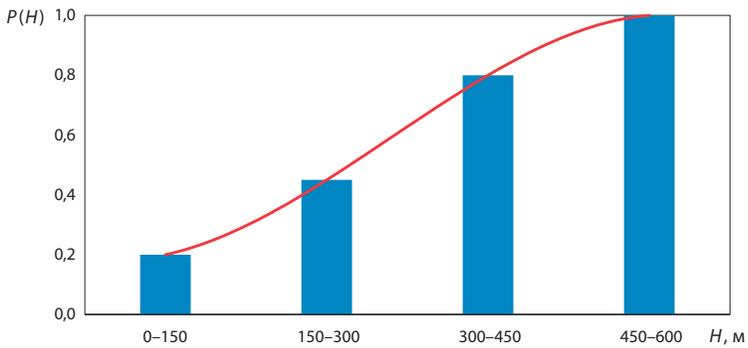


Рис. 6.4. Функция распределения вероятностей проявления интенсивности высоты $P(H)$ склона

в) объем смещающихся пород;

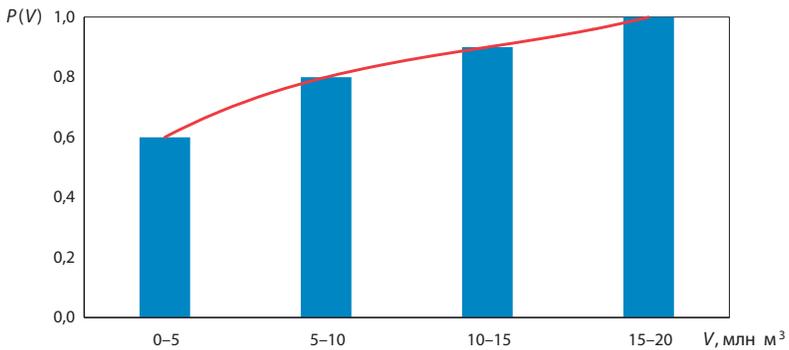


Рис. 6.5. Функция распределения вероятностей проявления интенсивности объемов смещающихся пород $P(V)$

г) скорость смещения оползня.

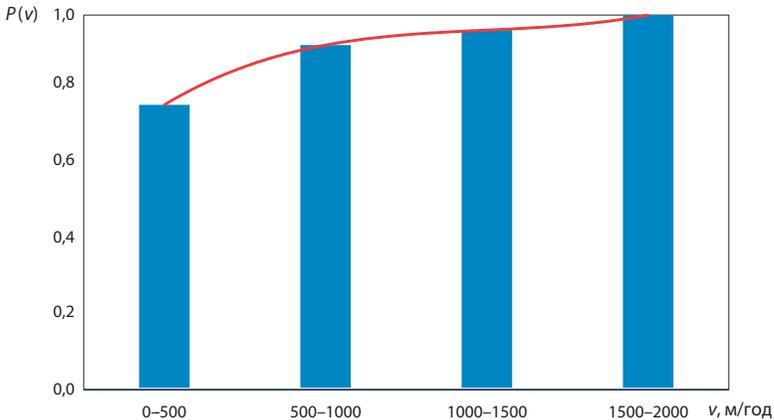


Рис. 6.6. Функция распределения вероятностей проявления интенсивности скорости смещения $P(v)$ оползня

Получим следующие соотношения полиномиальных зависимостей для законов распределения вероятностей интенсивности проявления:

– крутизны склона:

$$f(\theta) = -0,0167\theta^3 + 0,1\theta^2 + 0,1167\theta - 1 \cdot 10^{-12}; \quad (6.5)$$

– высоты склона:

$$f(H) = -0,0417H^3 + 0,3H^2 - 0,358H + 0,3; \quad (6.6)$$

– объемов смещающихся пород:

$$f(V) = 0,0167 V^3 - 0,15 V^2 + 0,5333 V + 0,2; \quad (6.7)$$

– скорости смещения оползня:

$$f(v) = 0,025 v^3 - 0,225 v^2 + 0,7 v + 0,2. \quad (6.8)$$

Коэффициенты значимости оползневых опасностей на основании соотношения (6.4) для данных показателей опасностей имеют вид

$$\delta_\theta \cong 0,20; \quad \delta_H \cong 0,20; \quad \delta_V \cong 0,60; \quad \delta_v \cong 0,70.$$

Для определения весовых коэффициентов рассмотренных ранее оползневых опасностей для всех категорий, воспользуемся табл. 6.1. При расчете необходимо учитывать такой показатель, как подверженность территории оползневому процессу (табл. 6.2).

**Структура комплексной подверженности территории
оползневым процессам**

Категории опасности оползневых процессов	Подверженность территории оползневым процессам, %
Умеренно опасные	1,0
Опасные	5,5
Весьма опасные	20,0
Чрезвычайно опасные	40,0

Весовые коэффициенты оползневой опасности W_i рассчитываем по следующей формуле:

$$W_i = \frac{Z_i}{\sum_{i=1}^n Z_i}, \quad (6.9)$$

где Z_i — значимость весового коэффициента i -й категории оползневой опасности.

Сами величины Z_i определим на основании соотношения

$$Z_i = \frac{S_i}{S}, \quad (6.10)$$

где S_i — площадь территории, %, подверженной i -й категории оползневой опасности; S — общая площадь подверженности территории оползневым процессам.

Значения величин W_i и Z_i приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Значения величин W_i и Z_i

Категории опасности оползневых процессов	Значимость Z_i	Весовой коэффициент оползневой опасности W_i
Умеренно опасные	0,01	0,02
Опасные	0,055	0,08
Весьма опасные	0,20	0,30
Чрезвычайно опасные	0,40	0,60
Σ	0,665	1,00

Анализ результатов исследований показателей оползневой опасности на возможность реализации оползневых процессов на склоновых территориях позволяет рекомендовать следующие ранжированные по степени значимости δ_i и оцененные по соответствующей шкале весов W_i количественные оценки оползневой опасности, в которой каждой категории опасности присвоен соответствующий код (табл. 6.4):

Количественные оценки оползневой опасности

Показатели оползневой опасности	Категории опасности	Код	Весовой коэффициент W_i	Коэффициент значимости δ_i
Крутизна склона	Умеренно опасные	0	0,02	0,20
	Опасные	1	0,08	
	Весьма опасные	2	0,30	
	Чрезвычайно опасные	3	0,60	
Высота склона	Умеренно опасные	0	0,02	0,20
	Опасные	1	0,08	
	Весьма опасные	2	0,30	
	Чрезвычайно опасные	3	0,60	
Объемы смещающихся масс	Умеренно опасные	0	0,02	0,60
	Опасные	1	0,08	
	Весьма опасные	2	0,30	
	Чрезвычайно опасные	3	0,60	
Скорость смещения оползня	Умеренно опасные	0	0,02	0,70
	Опасные	1	0,08	
	Весьма опасные	2	0,30	
	Чрезвычайно опасные	3	0,60	
Скорость смещения оползня	Умеренно опасные	0	0,02	0,70
	Опасные	1	0,08	
	Весьма опасные	2	0,30	
	Чрезвычайно опасные	3	0,60	

Таким образом, уровень оползневой опасности склоновых территорий зависит от четырех-мерного вектора ранжировок.

Результат этой методики представлен в виде табл. 6.5.

Таблица 6.5

Оценка критерия уровня оползневой опасности $P(H)$ ($k = 0,9804$)

Код	$P(H)$	Код	$P(H)$	Код	$P(H)$	Код	$P(H)$
0000	0,0333	1000	0,0451	2000	0,0882	3000	0,1471
0001	0,0745	1001	0,0863	2001	0,1294	3001	0,1882
0002	0,2255	1002	0,2373	2002	0,2804	3002	0,3392
0003	0,4314	1003	0,4431	2003	0,4863	3003	0,5451
0010	0,0686	1010	0,0804	2010	0,1235	3010	0,1824
0011	0,1098	1011	0,1216	2011	0,1647	3011	0,2235
0012	0,2608	1012	0,2726	2012	0,3157	3012	0,3745
0013	0,4667	1013	0,4784	2013	0,5216	3013	0,5804
0020	0,1980	1020	0,2098	2020	0,2529	3020	0,3118
0021	0,2392	1021	0,2510	2021	0,2941	3021	0,3529
0022	0,3902	1022	0,4020	2022	0,4451	3022	0,5039

Код	$P(H)$	Код	$P(H)$	Код	$P(H)$	Код	$P(H)$
0023	0,5961	1023	0,6078	2023	0,6510	3023	0,7098
0030	0,3745	1030	0,3863	2030	0,4294	3030	0,4882
0031	0,4157	1031	0,4275	2031	0,4706	3031	0,5294
0032	0,5667	1032	0,5784	2032	0,6216	3032	0,6804
0033	0,7726	1033	0,7843	2033	0,8275	3033	0,8863
0100	0,0451	1100	0,0569	2100	0,1000	3100	0,1588
0101	0,0863	1101	0,0980	2101	0,1412	3101	0,2000
0102	0,2373	1102	0,2490	2102	0,2922	3102	0,3510
0103	0,4431	1103	0,4549	2103	0,4980	3103	0,5569
0110	0,0804	1110	0,0922	2110	0,1353	3110	0,1941
0111	0,1216	1111	0,1333	2111	0,1765	3111	0,2353
0112	0,2726	1112	0,2843	2112	0,3275	3112	0,3863
0113	0,4784	1113	0,4902	2113	0,5333	3113	0,5922
0120	0,2098	1120	0,2216	2120	0,2647	3120	0,3235
0121	0,2510	1121	0,2627	2121	0,3059	3121	0,3647
0122	0,4020	1122	0,4137	2122	0,4569	3122	0,5157
0123	0,6078	1123	0,6196	2123	0,6628	3123	0,7216
0130	0,3863	1130	0,3980	2130	0,4412	3130	0,5000
0131	0,4275	1131	0,4392	2131	0,4824	3131	0,5412
0132	0,5784	1132	0,5902	2132	0,6333	3132	0,6922
0133	0,7843	1133	0,7961	2133	0,8392	3133	0,8980
0200	0,0882	1200	0,1000	2200	0,1431	3200	0,2020
0201	0,1294	1201	0,1412	2201	0,1843	3201	0,2431
0202	0,2804	1202	0,2922	2202	0,3353	3202	0,3941
0203	0,4863	1203	0,4980	2203	0,5412	3203	0,6000
0210	0,1235	1210	0,1353	2210	0,1784	3210	0,2373
0211	0,1647	1211	0,1765	2211	0,2196	3211	0,2784
0212	0,3157	1212	0,3275	2212	0,3706	3212	0,4294
0213	0,5216	1213	0,5333	2213	0,5765	3213	0,6353
0220	0,2529	1220	0,2647	2220	0,3078	3220	0,3667
0221	0,2941	1221	0,3059	2221	0,3490	3221	0,4078
0222	0,4451	1222	0,4569	2222	0,5000	3222	0,5588
0223	0,6510	1223	0,6628	2223	0,7059	3223	0,7647
0230	0,4294	1230	0,4412	2230	0,4843	3230	0,5431
0231	0,4706	1231	0,4824	2231	0,5255	3231	0,5843
0232	0,6216	1232	0,6333	2232	0,6765	3232	0,7353
0233	0,8275	1233	0,8392	2233	0,8824	3233	0,9412
0300	0,1471	1300	0,1588	2300	0,2020	3300	0,2608
0301	0,1882	1301	0,2000	2301	0,2431	3301	0,3020
0302	0,3392	1302	0,3510	2302	0,3941	3302	0,4529
0303	0,5451	1303	0,5569	2303	0,6000	3303	0,6588

Код	$P(H)$	Код	$P(H)$	Код	$P(H)$	Код	$P(H)$
0310	0,1824	1310	0,1941	2310	0,2373	3310	0,2961
0311	0,2235	1311	0,2353	2311	0,2784	3311	0,3373
0312	0,3745	1312	0,3863	2312	0,4294	3312	0,4882
0313	0,5804	1313	0,5922	2313	0,6353	3313	0,6941
0320	0,3118	1320	0,3235	2320	0,3667	3320	0,4255
0321	0,3529	1321	0,3647	2321	0,4078	3321	0,4667
0322	0,5039	1322	0,5157	2322	0,5588	3322	0,6177
0323	0,7098	1323	0,7216	2323	0,7647	3323	0,8235
0330	0,4882	1330	0,5000	2330	0,5431	3330	0,6020
0331	0,5294	1331	0,5412	2331	0,5843	3331	0,6431
0332	0,6804	1332	0,6922	2332	0,7353	3332	0,7941
0333	0,8863	1333	0,8980	2333	0,9412	3333	1,0000

В случае если геодезический мониторинг проводится на склоне, который потенциально может быть застроен, то формула (6.3) (интегральный критерий уровня оползневой опасности) будет представлять собой оценку экологического риска:

$$R_{\text{эк}} = k_{\text{норм}} \sum_1^n \delta_i W_i. \quad (6.11)$$

6.2.2. Определение интегрального критерия уровня оползневой уязвимости

Интегральный критерий уровня оползневой уязвимости вычислим по формуле:

$$V_m(H) = k_{\text{норм}} \sum_1^n \delta_i W_i, \quad (6.12)$$

где δ_i — коэффициент значимости i -го показателя уязвимости; W_i — значение весового коэффициента i -го показателя уязвимости; $k_{\text{норм}}$ — нормирующий множитель, приводящий к $0 \leq V_m(H) \leq 1$.

Таким образом, оценка ключевой определяемой величины — степени оползневого риска — сводится к задаче определения коэффициентов значимости оползневых уязвимостей, а также их весовых коэффициентов.

Коэффициент значимости i -го оползневого риска δ_i представляет собой вероятность реализации i -й уязвимости оползневого процесса, при этом интенсивность проявлений свойств соответствующей ему категории оползневой уязвимости относится к определенному диапазону величин $[a; b]$, значения которых являются «рисковыми». Тогда коэффициент значимости i -го риска оползневой уязвимости определяется на основании соотношения (6.4) по аналогии с оползневой опасностью. В этом случае:

B_i — интенсивность проявления свойств оползневой уязвимости в зависимости от их потенциальной разрушительной силы, соответствующей i -му показателю оползневой уязвимости;

$f(B_i)$ — закон распределения (плотность вероятностей) значений интенсивности проявления свойств i -го показателя уязвимости оползневого процесса.

Коэффициент значимости i -го показателя уязвимости δ_i подобен коэффициенту значимости i -го показателя опасности. Тогда коэффициент значимости i -го показателя оползневой уязвимости определяется на основании соотношения (6.4) по аналогии с оползневой опасностью.

Поскольку под *оползневой уязвимостью* понимают свойство любого строительного объекта терять способность к выполнению своих естественных функций вследствие его поражения оползневой опасностью [97] определенной интенсивности и длительности воздействия, то находим ее следующими показателями, которые получаем по результатам повторных геодезических наблюдений:

- трещины сооружений;
- осадки сооружений;
- горизонтальные перемещения сооружений;
- крены сооружений.

Степень уязвимости по всем четырем показателям устанавливаем по одному из четырех категорий уязвимости, принимая во внимание известные значения параметров отличительных признаков (табл. 6.6).

Таблица 6.6

Шкала оползневой уязвимости

Показатели оползневых уязвимостей	Категории оползневой уязвимости			
	Чрезвычайно опасные	Весьма опасные	Опасные	Умеренно опасные
Трещины, мм	> 1	1	< 1	–
Осадки, см	> 16	12–16	10–12	< 10
Горизонтальные перемещения, м	1,5	1,0	0,5	0,2
Крены	0,004	0,0035	0,003	0,002

Распределение вероятностей проявления показателей интенсивности свойств оползневого процесса, принадлежащих к «рисковым» интервалам разбиения диапазона уязвимости оползневых процессов, показаны на рис. 6.7–6.10:

а) трещины;

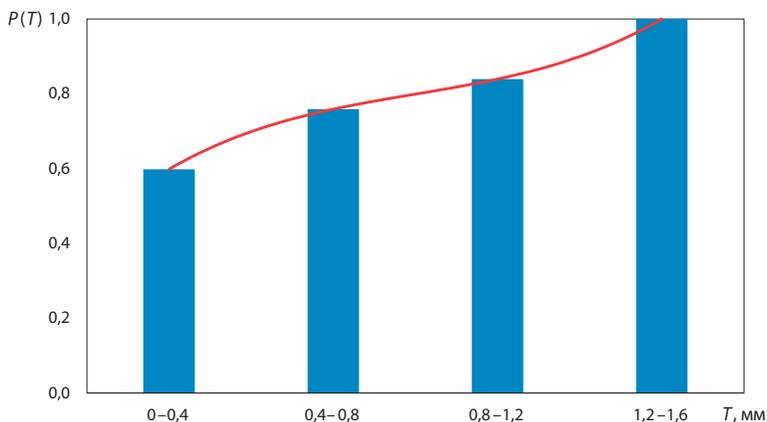


Рис. 6.7. Функция распределения вероятностей проявления интенсивности трещин $P(T)$ сооружений

б) осадки;

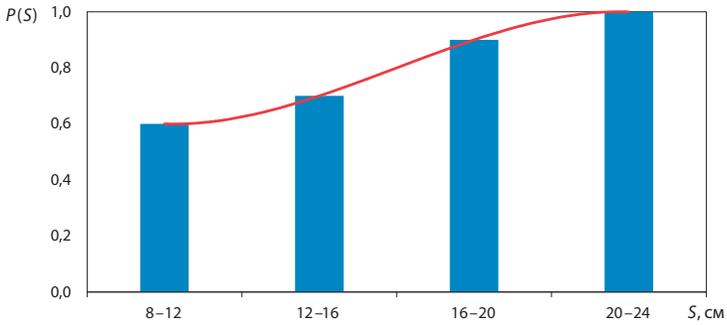


Рис. 6.8. Функция распределения вероятностей проявления интенсивности осадки $P(S)$ сооружений

в) горизонтальные перемещения сооружений;

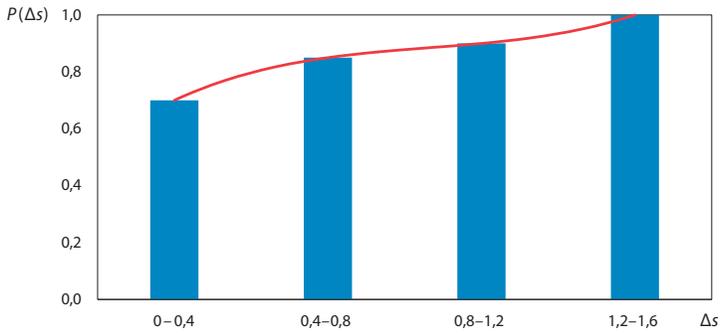


Рис. 6.9. Функция распределения вероятностей проявления интенсивности горизонтальных перемещений $P(\Delta s)$ сооружений

г) крен сооружений.

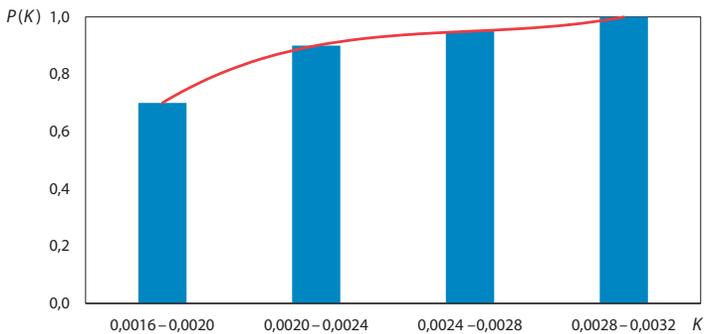


Рис. 6.10. Функция распределения вероятностей проявления интенсивности крена $P(K)$ сооружений

Определим соотношения полиномиальных зависимостей для следующих функций распределения вероятностей интенсивности проявления оползневой уязвимости сооружений: – трещин:

$$f(T) = 0,0333T^3 - 0,25T^2 + 0,716T - 1 \cdot 10^{-12}; \quad (6.13)$$

– осадок:

$$f(S) = -0,0333S^3 + 0,25S^2 - 0,4167S + 0,8; \quad (6.14)$$

– горизонтальных перемещений:

$$f(\Delta s) = 0,025\Delta s^3 - 0,2\Delta s^2 + 0,57\Delta s + 0,3; \quad (6.15)$$

– крена:

$$f(K) = 0,025K^3 - 0,225K^2 + 0,7K + 0,2. \quad (6.16)$$

Коэффициенты значимости оползневых уязвимостей на основании соотношения (6.4) для данных показателей уязвимостей имеют вид:

$$\delta_T \cong 0,50; \quad \delta_S \cong 0,60; \quad \delta_{\Delta s} \cong 0,70; \quad \delta_K \cong 0,70.$$

Определим весовые коэффициенты рассмотренных оползневых уязвимостей для всех категорий уязвимостей. Для этого необходимо воспользоваться табл. 6.1. Для расчета рассмотрим такие показатели, как подверженность территории оползневым процессам и повторяемость.

После перемножения соответственно по категориям этих показателей между собой может быть получена структура комплексной уязвимости склоновой территории от оползневых процессов с учетом повторяемости (табл. 6.7).

Таблица 6.7

Структура комплексной подверженности территории оползневым процессам

Категории опасности оползневых процессов	Подверженность территории оползневым процессам, %, с учетом повторяемости в год
Умеренно опасные	0,75
Опасные	2,75
Весьма опасные	3,50
Чрезвычайно опасные	4,00

Весовые коэффициенты оползневой уязвимости W_i рассчитаны по аналогии с весовыми коэффициентами оползневой опасности по формулам (6.9) и (6.10):

$$W_i = \frac{Z_i}{\sum_{i=1}^n Z_i},$$

где Z_i — значимость весового коэффициента i -й категории оползневой уязвимости.

Сами величины Z_i определим на основании соотношения

$$Z_i = \frac{S_i}{S},$$

где S_i — площадь территории, %, подверженной i -й категории оползневой уязвимости с учетом повторяемости случаев в год; S — общая площадь, %, подверженности территории оползневым процессам.

Значения величин W_i и Z_i приведены в табл. 6.8.

Таблица 6.8

Значения величин W_i и Z_i

Категории опасности оползневых процессов	Значимость Z_i	Весовой коэффициент оползневой уязвимости W_i
Умеренно опасные	0,0075	0,07
Опасные	0,0275	0,25
Весьма опасные	0,0350	0,32
Чрезвычайно опасные	0,0400	0,36
Σ	0,11	1,00

Анализ результатов исследований показателей оползневой уязвимости вероятностной возможности поражения зданий и сооружений оползневой опасностью вследствие реализации оползневых процессов позволяет рекомендовать следующие ранжированные по степени значимости δ_i и оцененные по соответствующей шкале весов W_i количественные оценки оползневой уязвимости, в которой каждой категории уязвимости присвоен соответствующий код (табл. 6.9).

Таблица 6.9

Количественные оценки оползневой уязвимости

Показатели оползневой уязвимости	Категории уязвимости	Код	Весовой коэффициент W_i	Коэффициент значимости δ_i
Трещины	Умеренно опасные	0	0,07	0,50
	Опасные	1	0,25	
	Весьма опасные	2	0,32	
	Чрезвычайно опасные	3	0,36	
Осадки сооружений	Умеренно опасные	0	0,07	0,60
	Опасные	1	0,25	
	Весьма опасные	2	0,32	
	Чрезвычайно опасные	3	0,36	
Горизонтальные перемещения сооружений	Умеренно опасные	0	0,07	0,70
	Опасные	1	0,25	
	Весьма опасные	2	0,32	
	Чрезвычайно опасные	3	0,36	
Крены сооружений	Умеренно опасные	0	0,07	0,70
	Опасные	1	0,25	
	Весьма опасные	2	0,32	
	Чрезвычайно опасные	3	0,36	

Таким образом, уровень оползневой уязвимости склоновых территорий так же зависит от четырехмерного вектора ранжировок.

Результат этой методики представлен в виде табл. 6.10.

Таблица 6.10

Оценка критерия уровня оползневой уязвимости $V_m(H)$ ($k_{норм} = 1,1111$)

Код	$V_m(H)$	Код	$V_m(H)$	Код	$V_m(H)$	Код	$V_m(H)$
0000	0,1944	1000	0,2944	2000	0,3333	3000	0,3556
0001	0,3344	1001	0,4344	2001	0,4733	3001	0,4956
0002	0,3889	1002	0,4889	2002	0,5278	3002	0,5500
0003	0,4200	1003	0,5200	2003	0,5589	3003	0,5811
0010	0,3344	1010	0,4344	2010	0,4733	3010	0,4956
0011	0,4744	1011	0,5744	2011	0,6133	3011	0,6355
0012	0,5289	1012	0,6289	2012	0,6678	3012	0,6900
0013	0,5600	1013	0,6600	2013	0,6989	3013	0,7211
0020	0,3889	1020	0,4889	2020	0,5278	3020	0,5500
0021	0,5289	1021	0,6289	2021	0,6678	3021	0,6900
0022	0,5833	1022	0,6833	2022	0,7222	3022	0,7444
0023	0,6144	1023	0,7144	2023	0,7533	3023	0,7755
0030	0,4200	1030	0,5200	2030	0,5589	3030	0,5811
0031	0,5600	1031	0,6600	2031	0,6989	3031	0,7211
0032	0,6144	1032	0,7144	2032	0,7533	3032	0,7755
0033	0,6455	1033	0,7455	2033	0,7844	3033	0,8067
0100	0,3144	1100	0,4144	2100	0,4533	3100	0,4756
0101	0,4544	1101	0,5544	2101	0,5933	3101	0,6155
0102	0,5089	1102	0,6089	2102	0,6478	3102	0,6700
0103	0,5400	1103	0,6400	2103	0,6789	3103	0,7011
0110	0,4544	1110	0,5544	2110	0,5933	3110	0,6155
0111	0,5944	1111	0,6944	2111	0,7333	3111	0,7555
0112	0,6489	1112	0,7489	2112	0,7878	3112	0,8100
0113	0,6800	1113	0,7800	2113	0,8189	3113	0,8411
0120	0,5089	1120	0,6089	2120	0,6478	3120	0,6700
0121	0,6489	1121	0,7489	2121	0,7878	3121	0,8100
0122	0,7033	1122	0,8033	2122	0,8422	3122	0,8644
0123	0,7344	1123	0,8344	2123	0,8733	3123	0,8955
0130	0,5400	1130	0,6400	2130	0,6789	3130	0,7011
0131	0,6800	1131	0,7800	2131	0,8189	3131	0,8411
0132	0,7344	1132	0,8344	2132	0,8733	3132	0,8955

Код	$V_m(H)$	Код	$V_m(H)$	Код	$V_m(H)$	Код	$V_m(H)$
0133	0,7655	1133	0,8655	2133	0,9044	3133	0,9267
0200	0,3611	1200	0,4611	2200	0,5000	3200	0,5222
0201	0,5011	1201	0,6011	2201	0,6400	3201	0,6622
0202	0,5556	1202	0,6555	2202	0,6944	3202	0,7167
0203	0,5867	1203	0,6867	2203	0,7255	3203	0,7478
0210	0,5011	1210	0,6011	2210	0,6400	3210	0,6622
0211	0,6411	1211	0,7411	2211	0,7800	3211	0,8022
0212	0,6955	1212	0,7955	2212	0,8344	3212	0,8567
0213	0,7267	1213	0,8267	2213	0,8655	3213	0,8878
0220	0,5556	1220	0,6555	2220	0,6944	3220	0,7167
0221	0,6955	1221	0,7955	2221	0,8344	3221	0,8567
0222	0,7500	1222	0,8500	2222	0,8889	3222	0,9111
0223	0,7811	1223	0,8811	2223	0,9200	3223	0,9422
0230	0,5867	1230	0,6867	2230	0,7255	3230	0,7478
0231	0,7267	1231	0,8267	2231	0,8655	3231	0,8878
0232	0,7811	1232	0,8811	2232	0,9200	3232	0,9422
0233	0,8122	1233	0,9122	2233	0,9511	3233	0,9733
0300	0,3878	1300	0,4878	2300	0,5267	3300	0,5489
0301	0,5278	1301	0,6278	2301	0,6667	3301	0,6889
0302	0,5822	1302	0,6822	2302	0,7211	3302	0,7433
0303	0,6133	1303	0,7133	2303	0,7522	3303	0,7744
0310	0,5278	1310	0,6278	2310	0,6667	3310	0,6889
0311	0,6678	1311	0,7678	2311	0,8067	3311	0,8289
0312	0,7222	1312	0,8222	2312	0,8611	3312	0,8833
0313	0,7533	1313	0,8533	2313	0,8922	3313	0,9144
0320	0,5822	1320	0,6822	2320	0,7211	3320	0,7433
0321	0,7222	1321	0,8222	2321	0,8611	3321	0,8833
0322	0,7767	1322	0,8767	2322	0,9155	3322	0,9378
0323	0,8078	1323	0,9078	2323	0,9467	3323	0,9689
0330	0,6133	1330	0,7133	2330	0,7522	3330	0,7744
0331	0,7533	1331	0,8533	2331	0,8922	3331	0,9144
0332	0,8078	1332	0,9078	2332	0,9467	3332	0,9689
0333	0,8389	1333	0,9389	2333	0,9778	3333	1,0000

6.2.3. Категории степени оползневой риска

Описание категорий по степени оползневой риска можно рекомендовать следующим образом — см. табл. 6.11.

Таблица 6.11

Описание категорий по степени оползневой риска

Обозначение категории	Степень оползневой риска	Описание категории оползневой риска
$R < 0,1$	Очень низкий	Не влечет за собой снижение качества функционирования зданий и сооружений, не создает угрозу здоровью людей
$0,1 \leq R < 0,3$	Низкий	Может повлечь за собой снижение эффективности функционирования зданий и сооружений, не создает угрозу здоровью людей
$0,3 \leq R < 0,5$	Средний	Может повлечь за собой серьезный ущерб зданиям и сооружениям, но создает малую угрозу здоровью людей
$0,5 \leq R < 0,7$	Высокий	Может повлечь за собой значительный ущерб зданиям и сооружениям, возможны травмы людей
$R \geq 0,7$	Очень высокий	Влечет за собой полное разрушение зданий и сооружений и гибель людей

6.3. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА РАЙОНОВ И РЕГИОНОВ (РАНЖИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ)

Если на территории определенного района находится несколько склоновых территорий, по которым проведены исследования по степени опасности и уязвимости, то степень риска поражения оползневыми процессами определится по формуле:

$$R_{\text{р-на}} = \frac{\sum_{i=1}^k P(H)_i V_m(H)_i S_i}{\sum_{i=1}^k S_i} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i S_i}{\sum_{i=1}^k S_i}, \quad (6.17)$$

где k — количество склоновых территорий в районе, подверженных оползневому процессам; S_i — площади склоновых территорий, для которых оценены степени риска поражения оползневым процессом.

Аналогично можно рассчитать степень риска поражения оползневыми процессами целого региона:

$$R_{\text{рег}} = \frac{\sum_{i=1}^k R_{\text{р-на},i} S_{\text{р-на},i}}{\sum_{i=1}^k S_{\text{р-на},i}}, \quad (6.18)$$

где k — количество районов в регионе, подверженных оползневому процессам; S_i — площади районов, для которых оценены степени риска поражения оползневым процессом.

По результатам оценки рисков склоновых территорий можно составить карты рисков локального, районного и регионального масштабов.

Все это дает возможность спрогнозировать развитие оползневой ситуации на интересующей склоновой территории на заданный момент времени и при необходимости приступить к построению стратегии обеспечения оползневой безопасности СС.

Таким образом, для оценки рисков склоновых систем наиболее важным является изучение процессов, связанных с деформацией оползневых склонов по результатам повторных геодезических наблюдений, а алгоритм комплексной оценки оползневых рисков в СС представляет собой совокупность процедур системного подхода к геодезической информации. Следо-

вательно, крайне важно проведение геодезического мониторинга. Оценка влияния опасных оползневых процессов наиболее значима для решения проблемы обеспечения безопасности сооружений в склоновых системах.

6.4. ПРОГНОЗ СКОРОСТИ СМЕЩЕНИЯ ОПОЛЗНЕЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ РИСКОВ

Для прогнозирования оползневых рисков в будущем следует знать возможные скорости оползневых смещений.

Увеличение скорости смещения оползня может быть вызвано различными причинами: осадками в виде дождей или таянием снега весной и осенью. Тогда уменьшаются значения сцепления c и угол внутреннего трения грунтов φ .

По данным скоростей смещения оползня в каждом цикле наблюдений, получаемых по результатам геодезического мониторинга, построим график скорости и аппроксимируем ее соответствующим уравнением регрессии, которая с каждым циклом будет уточняться. Экстраполируем на определенный период времени, получим возможные скорости смещения оползня в будущем.

Рассмотрим следующий пример. Смоделируем возрастание скорости смещения оползня в течение нескольких лет. Результаты скоростей, полученных по данным геодезического мониторинга, показаны в табл. 6.12.

Таблица 6.12

Скорость смещения оползня

t , год	1	2	3	4	5
V , м/год	0,251	0,634	1,337	2,279	3,550

По результатам мониторинга, являющимся исходными для анализа изучаемого процесса на данном склоне, возникает вопрос об их аппроксимации, т.е. в отыскании оптимальной функциональной закономерности рядов скоростей [116].

При методе аналитического подбора функции используем метод наименьших квадратов. Суть метода наименьших квадратов состоит в отыскании параметров функции, минимизирующих ее отклонение от точек исходного временного ряда ($\sum \Delta^2 = \min$). Такими функциями, которые соответствуют физической сущности рассматриваемого процесса, являются степенная и полиномиальная функции.

Для каждого из этих видов зависимостей найдем уравнения регрессии и построим графики, используя программное обеспечение Excel 2016.

Степенная аппроксимация и уравнение регрессии выглядят следующим образом (рис. 6.11).

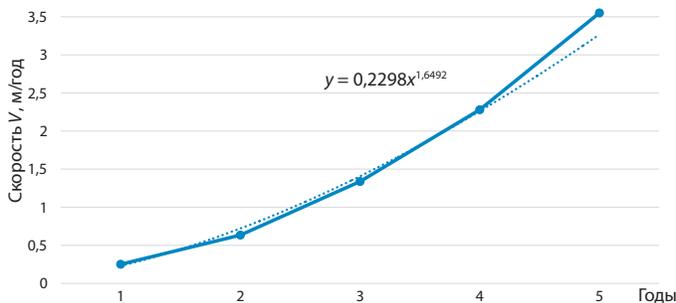


Рис. 6.11. Степенная аппроксимация скорости смещения оползня

Полиномиальная аппроксимация второй степени и уравнение регрессии представлены на рис. 6.12.

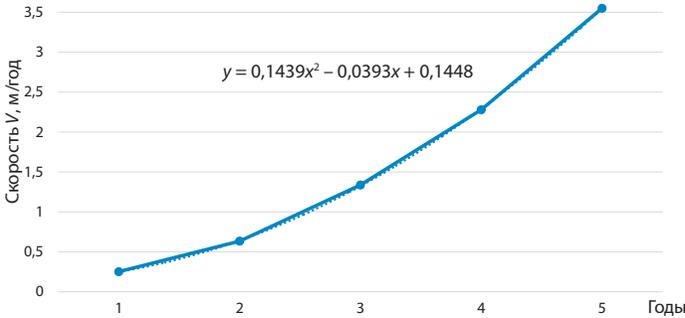


Рис. 6.12. Полиномиальная аппроксимация скорости смещения оползня

Выполним оценку точности аппроксимации этих уравнений. Подставим данные скоростей V из табл. 6.12 в полученные уравнения, вычислим разности Δ между вычисленным значением $y_{\text{выч}}$ и исходным, а затем Δ^2 , которые дают следующие значения (табл. 6.13 и 6.14).

Таблица 6.13

Степенная аппроксимация

$y_{\text{выч}}$	0,230	0,721	1,408	2,261	3,267
y	0,251	0,634	1,337	2,279	3,550
$\Delta = y_{\text{выч}} - y$	-0,021	+0,087	+0,071	-0,018	-0,283
Δ^2	0,000441	0,007569	0,005041	0,000324	0,080089

$\sum \Delta^2 = 0,093464 \text{ м}^2$. СКП интерполяции:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,093464}{5-1}} = 0,153 \text{ м.}$$

Таблица 6.14

Полиномиальная аппроксимация

$y_{\text{выч}}$	0,249	0,642	1,322	2,290	3,546
y	0,251	0,634	1,337	2,279	3,550
$\Delta = y_{\text{выч}} - y$	-0,002	+0,008	-0,015	+0,011	-0,004
Δ^2	0,000004	0,000064	0,000225	0,000121	0,000016

$\sum \Delta^2 = 0,000430 \text{ м}^2$. СКП интерполяции:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,000430}{5-1}} = 0,010 \text{ м.}$$

Таким образом, получается, что наиболее достоверной является функция, полученная по полиномиальной зависимости:

$$y = 0,1439x^2 - 0,0393x + 0,1448. \tag{6.19}$$

Используя формулу (6.19), выполним экстраполяцию на период через шесть лет. Получим возможную скорость смещения оползня, равную 17,124 м/год (рис. 6.13).

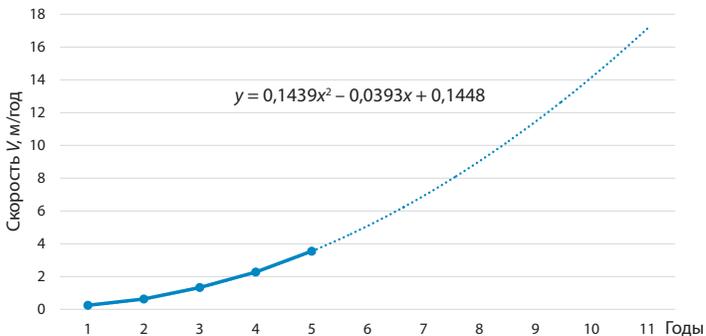


Рис. 6.13. Экстраполяция полиномиальной аппроксимации скорости смещения оползня

Таким образом, для вычисления скорости смещения оползней роль геодезического мониторинга несомненна. По результатам повторных геодезических наблюдений можно строить графики скоростей и аппроксимировать ее полиномиальной функцией как наиболее достоверной. Использование такой функции даст возможность спрогнозировать дальнейшую динамику оползневых смещений. Следовательно, зная возможные последствия, можно будет заранее провести необходимые мероприятия по инженерной защите территорий для обеспечения безопасности сооружений.

6.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА

Исходной информацией для оценки оползневого риска служат результаты анализа оползневого риска, а также их сопоставление с критерием допустимого (приемлемого) оползневого риска.

Для оценки последствий от воздействия опасных оползневых процессов определяются негативные эффекты:

- экономические — возможный ущерб от деформаций и разрушений зданий и сооружений;
 - социальные — вероятность нанесения травм населению вплоть до смертельных случаев.
- Рассмотрим каждую из негативных эффектов в отдельности.

Экономические. Если на оползневом склоне находятся $N_{зд}$, которые периодически подвергаются оползневой опасности H , то вероятность поражения зданий равна [81; 97; 99]:

$$P = \frac{N_H}{N_{зд}}. \tag{6.20}$$

Эту вероятность называют степенью уязвимости зданий при воздействии оползневой опасности, или просто уязвимостью, и обозначают как $V_m(H)$.

Поскольку на оползневом склоне могут быть здания разных типов и разной этажности, то оценку экономического риска производят отдельно. Для того, чтобы уточнить оценку экономического риска разрушения либо повреждения однотипных объектов оползневой опасностью H , используют формулу [81; 95; 97; 99; 106; 184; 194]

$$R_c(H) = P^*(H)V_m(H)V_c(H)D_e, \tag{6.21}$$

где $P^*(H)$ — повторяемость во времени оползневой опасности H , численно равная ее статистической вероятности; $V_m(H)$ — степень уязвимости зданий при воздействии оползневой опасно-

сти H ; $V_e(H)$ — степень уязвимости зданий при оползневой опасности H ; вычисляется по формуле (2.12); D_e — общая стоимость зданий.

Заменяем значение $P^*(H)$ на значение $P(H)$, которое получим по формуле (6.3), а $V_m(H)$ — по формуле (6.11). Тогда будем иметь

$$R_e(H) = P(H)V_m(H)V_e(H)D_e, \quad (6.22)$$

или

$$R_e(H) = R_{\text{оп}}V_e(H)D_e. \quad (6.23)$$

Допустимое значение оценки экономического риска равно 20 % стоимости зданий. Тогда оценку экономического риска можно получить по формуле

$$R_e(H)_{\text{доп}} = R_{\text{оп}}V_e(H)0,2D_e^{-1}. \quad (6.24)$$

Социальные. Социальный риск от оползневой опасности устанавливается применительно к вероятности гибели населения, т.е. оценка социального риска гибели от оползневой опасности связана с последовательным установлением вероятностей поражения и разрушения зданий и вероятности нахождения людей в этих зданиях в момент развития оползневой опасности. Вероятность нахождения людей в этих зданиях в момент развития оползневой опасности является степенью уязвимости населения во времени. Она вычисляется по формуле

$$V_s^t(H) = \frac{t_d t_y}{24 \cdot 365}, \quad (6.25)$$

где t_d и t_y — длительность пребывания группы людей или определенного индивидуума в границах, поражаемых с разными исходами зданий в течение дня и года.

В таком случае социальный риск гибели или ранения населения от оползневой опасности H предлагают вычислять по формуле

$$R_S(H) = P^*(H)V_m(H)V_e(H)V_S^t(H)V_S^S(H)D_p, \quad (6.26)$$

где $V_S^S = P_1P^{-1}$ — величина уязвимости людей в границах зданий с установленной степенью разрушенности; P_1 — число погибших людей в этих зданиях; P — общее количество людей, находившихся в этих зданиях; D_p — общая численность населения в определенной зоне поражения [99].

С учетом формулы (6.2) формулу (6.26) перепишем в виде

$$R_S(H) = R_{\text{оп}}V_e(H)V_S^t(H)V_S^S(H)D_p. \quad (6.27)$$

6.6. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ ОПОЛЗНЕВЫМ РИСКОМ

Обеспечение безопасности зданий, сооружений и защиты населения от опасных оползневых процессов является одной из основных функций государства. До недавнего времени практическая деятельность по реализации этой функции базировалась на концепции «абсолютной надежности» объектов строительства, технологических процессов и производств, исходящей из недопущения катастрофических отказов и потерь за установленный срок.

По оценкам западных специалистов, вероятность отказа зданий и сооружений составляет примерно 10^{-3} для предельных состояний второй группы и 10^{-5} — для состояний с катастрофическими последствиями [4].

В действительности указанная аварийность существенно выше в зонах развития опасных оползневых процессов, где даже небольшие по интенсивности оползневые воздействия прак-

тически мгновенно выявляют все упущения инженерных изысканий, проектных решений и дефекты строительства [92]. Вспомним Чечено-Ингушетию, где 10 марта 1989 года произошли обширные оползни, от которых пострадали 82 населенных пункта. Оползнями были повреждены 2518 домов и 104 объекта народного хозяйства. Материальный ущерб от этих оползней составил \$390 млн [77]; Нефтегорск, 1995 год, где во время землетрясения и последовавшими за ним оползнями, сошедшими с гор, было разрушено множество зданий, сооружений и дорог.

Что же необходимо сделать для обеспечения безопасности зданий, сооружений и защиты населения? Рядом авторов предлагается повысить обоснованность проектных решений, особенно в части прогноза негативных воздействий опасных оползневых процессов, а также переходить на новые вероятностные методы нормирования надежности с использованием показателей оценки риска [145; 148].

Для получения точных и достоверных показателей оползневого риска (и карт оползневого риска) по всем склоновым территориям Российской Федерации должна быть разработана и осуществлена федеральная программа по геодезическому мониторингу этих территорий.

Для России среднепогодное значение индивидуального риска гибели населения от опасных геологических природных процессов составляет в настоящее время $1 \cdot 10^{-6}$ чел/год [136]. По нашему мнению, эта величина должна быть принята в качестве допустимого индивидуального риска гибели населения при оползневых катастрофах.

Тогда, зная вероятность наступления события $P(H)$ оползневой опасности H , можно допустимое значение оценки социального риска вычислять по формуле

$$R_S(H) = R_{\text{оп}} V_e(H) \cdot 10^{-6}. \quad (6.28)$$

Управление оползневом риском должно быть направлено на снижение оползневой опасности (укрепление склона, дренаж, планировка и другие инженерные решения), на защиту территории от воздействия опасных оползневых процессов (устройство контрбанкетов, контрфорсов и удерживающих конструкций), на снижение пространственно-временной вероятности нахождения объектов риска в опасной зоне (создание систем мониторинга и оповещения населения) [69]. Другим направлением решения данной задачи может быть недопущение воздействия оползней на людей и инженерные сооружения — планирование землепользования [71; 188].

На практике эффективное снижение риска оползней должно осуществляться на местном или региональном уровне. На местном уровне разработка мер по снижению риска, например системы раннего предупреждения, может основываться на ряде разумных сценариев и включать следующие этапы:

- определить сценарии для факторов оползнеобразования и оценить вероятность возникновения оползня;
- оценить объем и протяженность оползня и рассчитать его смещение для каждого сценария;
- оценить потери по всем элементам риска для каждого сценария и сравнить оцененный риск с критериями допустимости риска;
- при необходимости принять соответствующие меры по снижению риска.

Глава 7. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СМЕЩЕНИЙ ОПОЛЗНЕЙ

7.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА

Оползневые процессы на территории г. Москвы связаны с массивами обводненных пород, слагающих зону активного водообмена до глубин 100–200 м. Почти 3 % территории Москвы занимают оползневые и оползнеопасные зоны, в основном на берегах р. Москвы и ее притоков [80].

Наблюдения за оползневыми процессами в Москве начали проводить с 1954 года. Наблюдательная сеть на 1 января 2005 года представляла собой 423 геодезических репера и марки, 100 простейших грунтовых марок, 536 гидрологических створов, 3030 пунктов геофизических наблюдений, 35 режимных скважин. Частота наблюдений — преимущественно 1 раз в год [105].

По материалам инженерно-геологических изысканий были выполнены лабораторные испытания грунтов с целью последующего их учета в ПК PLAXIS.

В табл. 7.1 приведены рекомендуемые значения физико-механических характеристик грунтов по результатам лабораторных изысканий. Данные значения были приняты для расчета НДС склона с учетом ползучести грунтов основания.

Таблица 7.1

**Значения физико-механических характеристик грунтов,
принятые в расчете НДС в ПК PLAXIS**

ИГЭ	γ , кН/м ³	e , д.е.	C_s , д.е.	C_v , д.е.	C_u , д.е.	c , кПа	ϕ , град.
ИГЭ Н1 и Н2	18,2	0,82	0,00015	0,00006	0,0002	9	4
ИГЭ–1	17,9	0,85	0,00009	0,000032	0,00015	10	5
ИГЭ–2	17,6	0,74	0,00025	0,00009	0,00035	8	7
ИГЭ–3	18,5	0,92	0,00018	0,00005	0,00023	11	3
ИГЭ–4	19,1	0,87	0,00022	0,00008	0,00031	12	6
ИГЭ–5	18,7	0,95	0,00013	0,00005	0,00022	8	4

При дальнейших исследованиях все эти параметры деформируемости грунтов будут подвержены корректировке.

7.2. ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКИХ ЭЛЛИпсоИдов СМЕЩЕНИЙ ОПОЛЗНЕЙ НА ПРИМЕРЕ КАРАМЫШЕВСКОГО ОПОЛЗНЯ

Для определения динамики оползневого процесса на Карамышевском оползневом склоне, находящемся на левом берегу р. Москвы на участке Карамышевской набережной в районе коттеджного поселка «Годуново» (Москва), в 2007 году создали оползневую сеть, состоящую из 46 точек. Площадь оползня — около 1,5 га. В 2006 году здесь произошла активизация оползневого процесса, сопровождающаяся образованием нового оползневого блока. Участок изучался ФГУП «Геоцентр-Москва» совместно с ГУП «Мосгоргеотрест» и ФГУП «ГСПИ». При выполнении геодезических измерений использовались методы полигонометрии и геометрического нивелирования. Плановые и высотные координаты пунктов оползневой сети даны в прил. А. Измерения проводились электронным тахеометром Trimble 3603DR и цифровым нивелиром Trimble Dini 0.3.

Программой геодезических наблюдений предусматривалось определение плановых и высотных смещений оползня. Интервал времени между циклами наблюдений был установлен в среднем 15 дней. Всего проведено 8 циклов начиная с февраля месяца 2007 года (см. прил. А). Точность определения плановых координат пунктов составила 3 мм, а определения высот — 2 мм. После соответствующей математической обработки автором получены планово-высотные смещения всех точек оползневой сети, представленные в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Плановые и высотные смещения точек оползневой сети

Пункты	Оси	Смещения, мм						
		22 февраля	9 марта	22 марта	6 апреля	18 апреля	16 мая	6 июня
1	X	-3	15	-12	7	0	-13	-12
	Y	2	5	6	-18	7	-1	-3
	H	3	1	-3	0	1	1	-1
2	X	-6	15	-5	-1	0	-17	-4
	Y	-1	7	7	-20	6	4	-5
	H	3	0	-3	-1	2	0	-1
3	X	-5	17	-4	-4	2	-20	5
	Y	-1	7	6	-19	8	1	-3
	H	2	0	-4	-2	1	-2	0
4	X	-8	18	-6	6	-8	-16	3
	Y	-2	6	15	-29	9	0	-17
	H	2	0	-1	0	1	0	0
5	X	-6	10	-1	1	-1	-19	15
	Y	1	11	3	-17	9	6	-18
	H	0	0	0	0	1	0	0
6	X	-3	15	5	-8	1	-23	28
	Y	-10	11	0	-6	5	6	-31
	H	0	0	0	0	1	0	1
7	X	-18	13	-11	-22	-6	-33	1
	Y	-14	-10	0	-24	1	-23	3
	H	3	4	-5	0	1	0	-1
8	X	-19	11	-13	-18	-5	-35	16
	Y	-13	-7	-4	-20	-2	-25	-5
	H	2	2	-2	0	1	0	-1
9	X	-23	15	-9	-13	-2	-26	23
	Y	-14	0	-2	-22	-1	-20	3
	H	-3	-3	-6	-3	-2	-5	-3
10	X	-16	12	-6	-16	2	-27	8
	Y	-6	-7	2	-22	-1	-16	3
	H	-11	-9	-15	-13	-8	-18	-7
11	X	7	-7	-3	-16	0	-11	-12
	Y	4	-19	9	-26	0	4	-10
	H	-6	-12	-16	-30	0	-33	-9

Пункты	Оси	Смещения, мм						
		22 февраля	9 марта	22 марта	6 апреля	18 апреля	16 мая	6 июня
12	<i>X</i>	-2	1	-3	-10	11	-7	-2
	<i>Y</i>	15	-16	14	-22	11	9	1
	<i>H</i>	0	0	0	0	1	0	0
13	<i>X</i>	-16	12	-19	-31	-1	-30	38
	<i>Y</i>	-10	-20	-5	-22	4	-23	-3
	<i>H</i>	4	1	-2	1	1	1	1
14	<i>X</i>	-22	24	-25	-29	-9	-23	-3
	<i>Y</i>	-8	-26	0	-18	6	-28	3
	<i>H</i>	3	1	-1	0	1	0	1
15	<i>X</i>	-21	4	-14	-22	-5	-34	4
	<i>Y</i>	-12	-15	-6	-19	-1	-24	-3
	<i>H</i>	2	1	-1	0	1	1	1
16	<i>X</i>	-14	4	-15	-17	-3	-34	4
	<i>Y</i>	-13	-10	-8	-17	-1	-26	3
	<i>H</i>	0	0	-2	-1	0	0	0
17	<i>X</i>	-13	4	-14	-13	-6	-25	5
	<i>Y</i>	-11	-6	-5	-13	2	-20	5
	<i>H</i>	-15	-12	-17	-17	-9	-22	-8
18	<i>X</i>	-13	1	-19	-15	1	-23	-12
	<i>Y</i>	10	-23	4	-21	6	-12	1
	<i>H</i>	-23	-20	-23	-24	-13	-32	-12
19	<i>X</i>	-6	-1	-13	-18	3	-24	-1
	<i>Y</i>	6	-25	3	-24	3	-13	-3
	<i>H</i>	-24	-20	-24	-27	-13	-33	-13
20	<i>X</i>	-6	8	-4	-6	8	-16	7
	<i>Y</i>	14	-15	6	-4	5	-3	2
	<i>H</i>	0	0	0	0	1	1	1
21	<i>X</i>	-4	10	-16	1	9	-17	7
	<i>Y</i>	3	-17	9	-12	11	-4	0
	<i>H</i>	0	0	0	0	1	1	1
22	<i>X</i>	-16	7	-22	-16	-11	-30	-4
	<i>Y</i>	1	-2	-14	-30	-24	28	-14
	<i>H</i>	4	1	-2	0	1	1	0
23	<i>X</i>	-18	0	-10	-25	-6	-31	5
	<i>Y</i>	-3	-19	-12	-13	1	-30	8
	<i>H</i>	3	0	-2	0	0	0	0
24	<i>X</i>	-10	-4	-13	-19	-11	-25	-1
	<i>Y</i>	-4	-18	-11	-13	5	-33	8
	<i>H</i>	1	0	-2	0	0	0	0
25	<i>X</i>	-5	-3	-8	-14	-5	-22	1
	<i>Y</i>	-5	-10	-14	-9	4	-34	14
	<i>H</i>	-16	-14	-20	-20	-11	-24	-10

Пункты	Оси	Смещения, мм						
		22 февраля	9 марта	22 марта	6 апреля	18 апреля	16 мая	6 июня
26	<i>X</i>	-13	10	-19	-11	-10	-32	16
	<i>Y</i>	-7	-12	-13	-13	3	-7	-3
	<i>H</i>	-22	-18	-22	-24	-13	-31	-13
27	<i>X</i>	-9	-2	-14	-15	2	-24	1
	<i>Y</i>	0	-20	0	-20	5	-18	1
	<i>H</i>	-23	-20	-24	-26	-13	-33	-14
28	<i>X</i>	-3	4	-3	-8	12	-8	1
	<i>Y</i>	0	-14	2	-4	12	-2	1
	<i>H</i>	1	-1	1	-1	1	0	0
29	<i>X</i>	-5	14	-13	0	11	-16	5
	<i>Y</i>	1	-9	3	-9	16	-8	3
	<i>H</i>	0	0	1	0	1	0	1
30	<i>X</i>	-4	-7	-5	-25	-6	-27	-5
	<i>Y</i>	3	-24	0	-19	-1	-13	0
	<i>H</i>	2	0	-3	-1	0	-1	-1
31	<i>X</i>	-8	-5	-4	-24	-10	-20	-5
	<i>Y</i>	3	-26	-5	-15	1	-18	1
	<i>H</i>	4	2	-6	-3	0	1	-1
32	<i>X</i>	-6	-3	0	-18	-12	-15	0
	<i>Y</i>	5	-20	-2	-12	3	-14	3
	<i>H</i>	-7	-7	-13	-12	-6	-13	-6
33	<i>X</i>	0	-8	-2	-21	-10	-10	-5
	<i>Y</i>	-7	-19	-18	-17	1	-28	1
	<i>H</i>	-10	-9	-13	-12	-7	-15	-7
34	<i>X</i>	1	6	-4	-11	6	-13	3
	<i>Y</i>	-9	5	0	-10	9	-11	12
	<i>H</i>	-1	0	-1	0	0	-1	0
35	<i>X</i>	-2	9	-7	-4	8	-7	-2
	<i>Y</i>	4	-13	7	-4	12	-7	10
	<i>H</i>	-4	0	0	1	0	0	2
36	<i>X</i>	-7	13	-8	-3	8	-6	3
	<i>Y</i>	0	-2	0	3	11	-7	5
	<i>H</i>	-1	1	0	1	1	0	0
37	<i>X</i>	-5	0	6	-29	1	-14	-7
	<i>Y</i>	12	-17	7	-8	-2	5	-2
	<i>H</i>	4	-1	-5	0	0	0	-1
38	<i>X</i>	-1	4	10	-23	-2	-3	-3
	<i>Y</i>	7	-10	8	-7	-1	11	0
	<i>H</i>	3	9	-7	-3	0	-2	-1
39	<i>X</i>	-2	3	9	-22	-1	-5	-5
	<i>Y</i>	6	-12	6	-7	-3	6	3
	<i>H</i>	0	-2	-7	-6	-1	-5	-2

Пункты	Оси	Смещения, мм						
		22 февраля	9 марта	22 марта	6 апреля	18 апреля	16 мая	6 июня
40	X	3	3	8	-21	1	-4	-8
	Y	6	-10	3	-7	-2	7	-6
	H	-4	-5	-11	-9	-3	-9	-2
41	X	8	0	0	-14	-2	1	13
	Y	4	-6	1	9	0	9	-2
	H	0	-1	0	0	0	-1	2
42	X	7	-5	0	3	-5	0	7
	Y	0	-2	-2	4	3	0	4
	H	-1	0	0	1	0	-1	-1
43	X	-10	-2	-15	-18	0	-19	-7
	Y	4	-19	8	-23	7	-4	-4
	H	-19	-15	-19	-20	0	-37	-10
44	X	1	-4	-13	-15	3	-23	-6
	Y	-1	-18	4	-23	9	-14	9
	H	-19	-16	-20	-22	-11	-27	-11
45	X	-3	-1	-9	-25	6	-27	-1
	Y	-15	-5	6	-25	7	-16	2
	H	-17	-14	-19	-20	-10	-26	-9
46	X	4	7	-7	-3	4		0
	Y	-2	-5	7	-12	11		0
	H	0	1	-2	-1	0	-1	0

Согласно параграфу 4.3 построим среднеквадратические эллипсоиды смещений оползней для каждого цикла наблюдений.

Если векторы всех наблюдаемых точек отнести к началу условной системы пространственных координат, то получается нормальное поле распределения векторов смещений в пространстве (рис. 7.1).

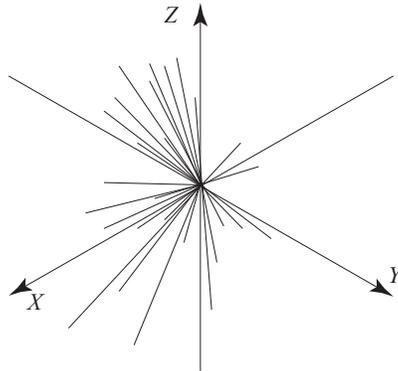


Рис. 7.1. Нормальное поле распределения векторов смещений в пространстве

Рассмотрим рассеивание случайной векторной величины, представляющей собой результирующий вектор смещения оползня в пространстве. Для этого возьмем в обработку 46 векторов первого цикла наблюдений (табл. 7.2, столбец «22 февраля»). Все расчеты по определению смещения оползневого тела как единого целого в пространстве в каждом цикле были выполнены по авторской компьютерной программе «Расчет величин смещений оползней (длина, направление)».

Полуоси эллипсоида вычислим по формуле (4.53), а коэффициенты, входящие в них, по формуле (4.51). Исходя из эмпирических данных, получим следующие числовые значения:

$$A = 9,4 \text{ мм}; \quad B = 8,7 \text{ мм}; \quad C = 5,6 \text{ мм}.$$

Величина смещения, вычисленная по формуле (4.54), равна

$$R = \sqrt{9,4^2 + 8,7^2 + 5,6^2} = 14 \text{ мм}.$$

Угол между осью абсцисс и большой полуосью эллипсоида определяется по формуле (4.55). Подстановка числовых значений дает следующую величину угла:

$$\varphi = +30^\circ.$$

Эллипсоид смещения оползня в первом цикле показан на рис. 7.2.

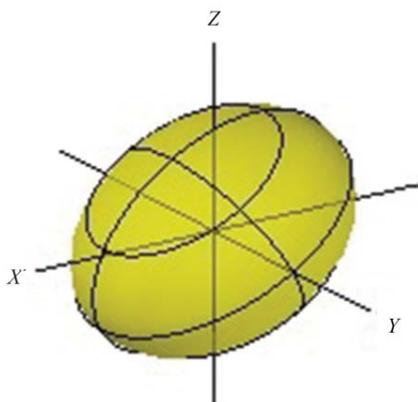


Рис. 7.2. Среднеквадратический эллипсоид смещения оползня в 1-м цикле

Знак угла положительный, следовательно, вычисленный угол откладывается от оси абсцисс в 1-й четверти.

Последующий контроль геодезических наблюдений за динамикой оползня сводится к производству повторных циклов, вычислению вектора смещения оползня и сравнению его с эллипсоидом смещения предыдущего цикла (табл. 7.2, столбец «9 марта»).

Значения полуосей эллипсоида смещений во втором цикле:

$$A = 11,4 \text{ мм}; \quad B = 7,3 \text{ мм}; \quad C = 5,9 \text{ мм}.$$

Величина смещения $R = 15 \text{ мм}$.

Угол между осью абсцисс и большой полуосью эллипсоида составляет $\varphi = +38^\circ$.

Эллипсоид смещения оползня во 2-м цикле показан на рис. 7.3.

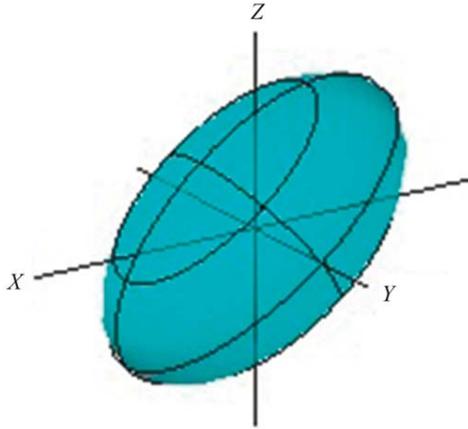


Рис. 7.3. Среднеквадратический эллипсоид смещения оползня во 2-м цикле

Наложим среднеквадратический эллипсоид смещения оползня, полученный во 2-м цикле, на среднеквадратический эллипсоид, полученный в 1-м цикле, и сравним между собой (рис. 7.4).

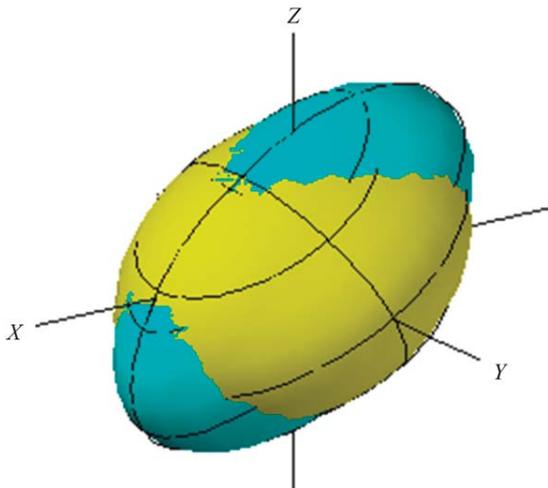


Рис. 7.4. Наложение эллипсоида второго цикла на первый

По рис. 7.4 видно, что эллипсоид смещений оползня во 2-м цикле больше эллипсоида смещений оползня 1-го цикла, что указывает на изменение скорости смещения оползня в сторону увеличения, хотя и незначительное, и что смещение происходит в одном направлении.

Так как были проведены 7 циклов наблюдений за смещениями оползня, то и вычислены были 7 среднеквадратических эллипсоидов смещений оползня, наложение которых друг на друга позволяет получить в наглядной форме математическую модель смещения оползня, а также значения величин смещений оползня (табл. 7.3).

**Значения величин смещений оползня,
полученные по среднеквадратическим эллипсоидам смещений оползня**

Циклы	1	2	3	4	5	6	7
R , мм	14	15	14	16	10	21	14

На графике (рис. 7.5) показана зависимость смещений оползня от циклов наблюдений, полученных по среднеквадратическим эллипсоидам смещений оползня.

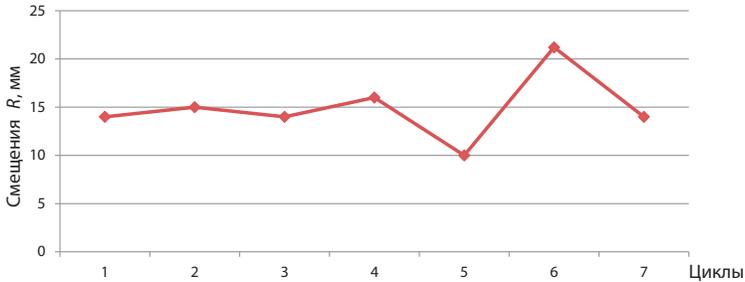


Рис. 7.5. График смещений оползня

По графику видно, что оползень движется в среднем по 15 мм за один цикл, т.е. скорость смещения $V = 30$ мм/мес. Тогда следующий цикл наблюдений, согласно табл. 3.2, следует проводить через 2,2 месяца.

7.3. ПОСТРОЕНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Ниже приводится методика корреляционного анализа по данным геодезических наблюдений за смещением Карамышевского оползня [165; 128]. Экспериментальные данные сведены в табл. 7.4. Смещения точек от исходного положения даны в миллиметрах (смещения рассматриваются как модули смещений).

Таблица 7.4

Смещения точек оползневой сети от исходного положения

Точки	Смещения, мм						
	1	2	3	4	5	6	7
1	4,5	20,3	34,0	53,4	61,0	74,0	86,4
2	6,8	23,3	32,4	52,5	55,9	73,3	79,1
3	5,5	23,8	32,0	51,5	58,4	78,5	84,4
4	8,4	27,4	43,6	73,2	76,5	92,5	109,8
5	6,1	21,0	24,1	41,2	49,0	68,9	92,3
6	10,2	28,8	33,8	43,8	53,9	77,6	119,4
7	23,2	40,0	52,0	84,5	149,3	189,6	192,9
8	23,4	36,5	50,3	77,2	141,2	184,2	201,0
9	27,2	42,4	53,3	79,1	132,6	165,7	189,1
10	20,2	36,8	52,9	83,0	152,2	188,4	199,4

Точки	Смещения, мм						
	1	2	3	4	5	6	7
11	10,2	33,7	52,3	94,9	168,7	203,4	221,5
12	15,2	31,3	45,6	69,7	72,8	84,3	86,7
13	19,2	42,5	62,3	100,3	176,7	214,5	252,7
14	23,5	59,0	84,0	118,1	194,1	230,4	234,7
15	24,3	39,8	55,1	84,2	163,0	204,6	209,7
16	19,3	30,1	47,2	71,3	138,3	181,1	186,2
17	22,9	37,3	59,6	84,7	173,0	211,8	223,3
18	27,8	58,1	88,3	123,6	238,3	279,5	295,8
19	25,5	57,3	85,2	125,6	245,5	288,3	302,6
20	15,7	32,7	39,9	47,1	53,7	70,0	77,4
21	5,0	24,7	43,1	55,1	62,1	79,6	86,7
22	16,4	23,8	50,0	84,0	174,3	215,3	229,9
23	18,6	37,6	53,3	81,5	156,2	199,4	208,8
24	10,7	29,2	46,3	69,3	139,4	180,8	189,0
25	17,8	35,3	60,7	86,7	181,1	228,7	246,0
26	26,2	50,1	82,2	111,7	227,9	273,0	294,6
27	24,7	53,1	81,3	117,5	236,0	279,9	293,9
28	3,0	17,6	21,3	30,3	35,0	43,3	44,7
29	5,1	21,7	35,1	44,1	51,3	69,1	75,1
30	5,4	30,4	36,2	67,6	129,7	159,7	164,7
31	9,7	36,3	45,3	73,8	140,1	167,0	172,1
32	10,8	32,3	45,6	70,4	135,3	160,1	165,9
33	12,4	34,7	57,3	86,9	175,7	209,0	217,1
34	8,8	16,6	20,7	35,5	40,5	57,6	70,0
35	4,3	20,1	30,0	35,7	42,6	52,5	62,8
36	8,4	21,6	29,6	34,0	41,9	51,2	57,0
37	13,4	30,5	41,1	71,2	99,6	114,5	121,8
38	8,0	21,8	36,3	60,6	72,4	83,9	87,1
39	6,4	18,9	32,0	55,9	79,4	88,7	94,8
40	7,9	19,5	33,9	57,8	92,9	105,0	115,0
41	9,3	15,3	16,4	33,1	43,9	53,0	66,3
42	6,7	12,1	14,1	19,2	22,5	24,5	32,5
43	21,9	46,4	71,9	107,3	196,3	238,2	251,0
44	19,0	43,3	67,7	102,9	199,9	237,4	252,9
45	22,9	37,6	59,1	99,6	191,3	231,4	241,6
46	4,2	12,8	21,1	33,5	38,9	39,9	40,9

В прил. Б даны семь планов с изолиниями (рис. Б.1–Б.7), проведенных через 1 мм, выполненных при использовании программы Autodesk AutoCAD Civil 3D 2016.

На планах выбираем линию достаточной длины S, расположенную случайным образом относительно направления смещения оползня. По этой линии отложим равные отрезки. На концах отрезков определяем значения величин смещений и получаем множество реализаций случайной последовательности смещений. В табл. 7.5 приведены значения всех реализаций.

Таблица 7.5

Множество реализаций случайной последовательности смещений

Циклы	Реализации, мм									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	19,2	23,1	23,5	23,8	24,0	21,2	21,1	25,6	24,8	20,0
2	42,5	58,0	53,1	47,1	41,0	34,0	34,0	49,1	52,0	42,3
3	62,3	82,6	75,2	66,0	56,9	50,5	53,9	76,0	76,8	58,3
4	100,3	117,0	107,8	97,0	86,3	76,7	78,7	107,0	105,5	76,3
5	176,7	192,9	184,5	174,7	164,8	148,4	156,9	210,2	194,6	124,1
6	214,5	229,4	222,5	214,3	206,1	190,9	197,7	250,4	229,9	150,0
7	252,7	235,4	227,0	219,1	211,2	196,0	206,2	264,7	244,2	160,8

В табл. 7.6 показаны оценки математического ожидания для случайных величин $X(1), X(2), \dots, X(10)$, вычисленных по формуле

$$M_x(Z) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (7.1)$$

Таблица 7.6

Математические ожидания случайных величин

$M(Z)$	124,03	134,06	127,66	120,29	112,90	102,53	106,93	140,43	132,54	90,26
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------

На рис. 7.6 показаны все 10 реализаций, которые представляют собой случайную функцию.

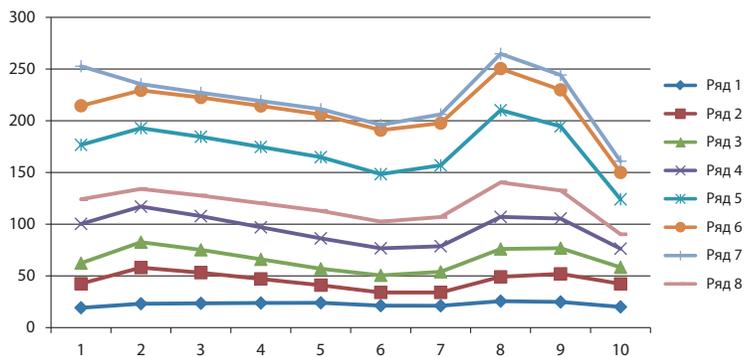


Рис. 7.6. Графики реализаций случайной последовательности смещений случайной функции

Функция, построенная по математическим ожиданиям, показана на рисунке коричневым цветом (ряд 8).

В табл. 7.7 приведены оценки для элементов корреляционной матрицы: дисперсий и корреляционных моментов, вычисленных по формуле

$$D_x(Z) = \frac{[(X - m_x)^2]}{n - 1}. \quad (7.2)$$

Таблица 7.7

Оценки элементов корреляционной матрицы — дисперсий и корреляционных моментов

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8254,18	7696,42	7510,60	7345,16	7180,52	6729,24	7083,99	8977,99	8064,58	4973,85
–	7309,68	7120,11	6940,38	6761,64	6325,22	6655,92	8459,55	7609,99	4693,66
–	–	6941,47	6773,73	6606,82	6182,83	6505,12	8259,07	7423,64	4574,12
–	–	–	6619,78	6466,45	6054,79	6369,50	8075,74	7251,51	4462,88
–	–	–	–	6326,52	5927,19	6234,33	7893,06	7080,11	4352,28
–	–	–	–	–	5555,87	5843,17	7391,28	6627,96	4074,87
–	–	–	–	–	–	6147,57	7780,28	6977,22	4288,86
–	–	–	–	–	–	–	9866,70	8855,90	5445,11
–	–	–	–	–	–	–	–	7955,18	4897,39
–	–	–	–	–	–	–	–	–	3023,81

В табл. 7.7 по главной диагонали стоят оценки дисперсий, которые представлены в табл. 7.8.

Таблица 7.8

Оценки дисперсий

8254,18	7309,68	6941,47	6619,78	6326,52	5555,87	6147,57	9866,70	7955,18	3023,81
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

В табл. 7.9 представлены оценки среднеквадратических отклонений по каждому циклу, вычисленные по формуле

$$\sigma_x(Z) = \sqrt{D_x(Z)}. \quad (7.3)$$

Таблица 7.9

Оценки среднеквадратических отклонений

90,85	85,50	83,32	81,36	79,54	74,54	78,41	99,33	89,19	54,99
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Разделив значения табл. 7.8 на произведения соответствующих среднеквадратических отклонений из табл. 7.7, получим таблицу значений нормированной корреляционной функции [15] (табл. 7.10).

Значения нормированной корреляционной функции

1,000	0,991	0,992	0,994	0,994	0,994	0,994	0,995	0,995	0,996
–	1,000	1,000	0,998	0,994	0,993	0,993	0,996	0,998	0,998
–	–	1,000	0,999	0,997	0,996	0,996	0,998	0,999	0,998
–	–	–	1,000	0,999	0,998	0,998	0,999	0,999	0,998
–	–	–	–	1,000	1,000	1,000	0,999	0,998	0,995
–	–	–	–	–	1,000	1,000	0,998	0,997	0,994
–	–	–	–	–	–	1,000	0,999	0,998	0,995
–	–	–	–	–	–	–	1,000	1,000	0,997
–	–	–	–	–	–	–	–	1,000	0,999
–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,000

Выполним проверку гипотезы однородности полученных оценок по статистическим критериям.

Построим доверительный интервал для математического ожидания случайной величины. В качестве исходного положения примем $\Delta_{\text{пред}} = 3\sigma$, где $\Delta_{\text{пред}}$ — предельная величина погрешности измерения. Имеем (см. табл. 7.7 и 7.9):

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^n M_x(Z)}{n} = \frac{1191,63}{10} = 119,163 \text{ мм}; \quad (7.4)$$

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_x(Z)}{n} = \frac{68000,751}{10} = 6800,08 \text{ мм}^2. \quad (7.5)$$

По табл. 5 приложения [15] для $n - 1 = 9$ и $\beta = 0,99$ находим, что $t_\beta = 3,25$. Тогда

$$\varepsilon_\beta = t_\beta \sqrt{\frac{\bar{D}}{n}} = 3,25 \sqrt{\frac{6800,08}{10}} = 84,75 \text{ мм}. \quad (7.6)$$

Доверительный интервал будет равен

$$I_\beta = (\bar{M} - \varepsilon_\beta < \bar{M} < \bar{M} + \varepsilon_\beta) = 34,41 \text{ мм} < 119,16 \text{ мм} < 203,91 \text{ мм}. \quad (7.7)$$

Возвращаясь к табл. 7.6, замечаем, что все значения $M_x(Z)$ находятся в пределах доверительного интервала, а потому гипотезу о стационарности случайной функции по математическим ожиданиям можно принять.

Однородность ряда дисперсий установим по критерию Кохрена, имеющего вид

$$G = \frac{\sigma_{\text{max}}^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_i^2}. \quad (7.8)$$

Данные из табл. 7.9 подставляем в формулу. Вычисление критерия G даст нам величину

$$G = \frac{9866,70}{68000,75} = 0,1451.$$

Из таблиц распределения G при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $n = 9$ и $k = 7$ находим

$$G_p = 0,3259$$

и

$$G < G_p.$$

Полученный результат указывает на незначимость расхождений между дисперсиями, что говорит об однородности полученной информации.

На основании выполненных проверок можно принять гипотезу стационарности случайной функции, а следовательно, имеем право усреднять оценки математических ожиданий, дисперсий и среднеквадратических отклонений, т.е.

$$\begin{aligned} \bar{m}_x(Z) &= \frac{m_x(1) + m_x(2) + \dots + m_x(10)}{10} = 119,163 \approx 119 \text{ мм}; \\ \bar{D}_x(Z) &= \frac{D_x(1) + D_x(2) + \dots + D_x(10)}{10} = 6800,08 \approx 6800 \text{ мм}^2; \\ \bar{\sigma}_x(Z) &= \sqrt{\bar{D}_x(Z)} = 82,46 \approx 82 \text{ мм}. \end{aligned} \tag{7.9}$$

Выполним оценку значимости полученных величин $\bar{m}_x(Z)$ и $\bar{\sigma}_x(Z)$:

$$\begin{aligned} m_{\bar{m}_x(Z)} &= \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}} = \sqrt{\frac{2251,218}{10}} = 15,004 \approx 15 \text{ мм}; \\ m_{\bar{\sigma}_x(Z)} &= \frac{\bar{m}_x(Z)}{\sqrt{2n}} = \frac{15,004}{\sqrt{20}} = 3,4 \text{ мм}; \\ \sigma_{\bar{m}_x(Z)} &= \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}} = \sqrt{\frac{1247,999}{10}} = 11,171 \approx 11 \text{ мм}; \\ \sigma_{\bar{\sigma}_x(Z)} &= \frac{\sigma_{\bar{\sigma}_x(Z)}}{\sqrt{2n}} = \frac{11,171}{\sqrt{20}} = 2,5 \text{ мм}. \end{aligned} \tag{7.10}$$

По результатам анализа построим нормированную корреляционную функцию стационарного процесса, которой можно заменить случайную функцию $X(Z)$.

Для стационарного процесса корреляционная функция зависит только от $\tau = Z' - Z$, следовательно, при постоянном τ нормированная корреляционная функция должна быть постоянной. В табл. 7.10 постоянному τ соответствуют главная диагональ ($\tau = 0$) и параллели этой диагонали ($\tau = 1, \tau = 2, \dots$). Усредняя оценки нормированной корреляционной функции вдоль этих параллелей главной диагонали, получим значение функции $\rho_x(\tau)$ [15] (табл. 7.11).

Таблица 7.11

Значение функции $\rho_x(\tau)$

τ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ρ	1,000	0,998	0,997	0,996	0,996	0,996	0,997	0,997	0,997	0,996

На рис. 7.7 представлен график этой функции.

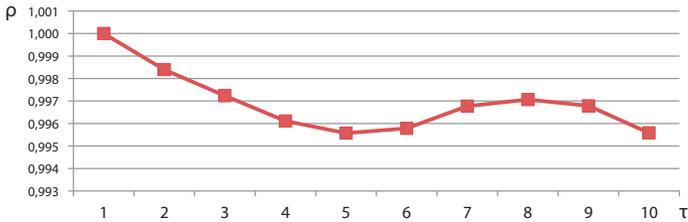


Рис. 7.7. График нормированной корреляционной функции смещений оползня

Проведем анализ графика нормированной корреляционной функции. Замечаем:

- с увеличением аргумента происходит монотонное достаточно медленное уменьшение корреляционной функции, т.е. с увеличением расстояний между точками;
- поскольку $\rho_{\text{эмп}}$ не пересекает ось абсцисс, то это значит, что между значениями случайной функции на всем промежутке наблюдений положительная корреляция;
- медленное убывание корреляционной функции свидетельствует о существенной корреляционной связи между сечениями случайной функции, т.е. о тесной зависимости между смещениями оползневых точек. И это естественно, так как оползень движется равномерно в одном направлении.

Плавный характер изменения корреляционной функции подтверждает, что структура случайного процесса, т.е. характер смещений оползня по выбранной случайным образом линии, происходит плавно, без разрывов.

Сделаем определенные выводы относительно стационарности случайной функции. Математическое ожидание для стационарной случайной функции должно быть постоянным. Результаты вычислений показывают, что в пределах эксперимента это требование соблюдается. То же самое можно сказать о среднеквадратических отклонениях нормированной корреляционной функции вдоль параллелей главной диагонали.

В качестве аппроксимирующей функции выберем экспоненциальную функцию. Эмпирическое уравнение:

$$\rho = 0,9986e^{-3E-04x}. \tag{7.11}$$

График аппроксимирующей функции представлен на рис. 7.8.

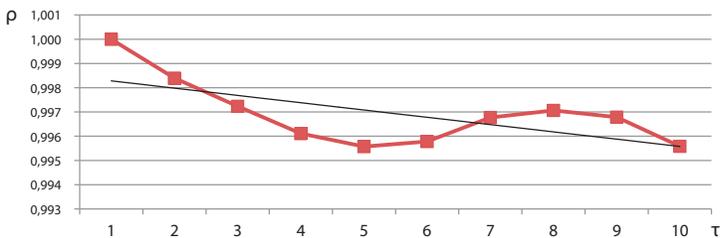


Рис. 7.8. График аппроксимирующей функции смещений оползня

Таким образом, проведенный корреляционный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- оползень активен, оползневые смещения не затухают. Оползень продолжает смещаться. Следует и далее проводить геодезические наблюдения. При необходимости предусмотреть мероприятия по инженерной защите;

– медленное убывание корреляционной функции свидетельствует о существенной корреляционной связи между сечениями случайной функции, т.е. о тесной зависимости между смещениями оползневых точек;

– аппроксимация нормированной корреляционной функции зависимостью вида $\rho = 0,9986e^{-3E-04x}$ позволяет применить указанный подход для прогноза величин смещений оползня.

Теперь перейдем к рассмотрению случайной функции во времени. Вычислим значения относительных величин смещений оползневых точек. Полученные для каждого цикла наблюдений значения смещений в миллиметрах показаны в табл. 7.12.

Таблица 7.12

Значения относительных величин смещений точек оползневой сети

Точки	Циклы						
	1	2	3	4	5	6	7
1	4,7	15,8	13,7	19,3	7,1	13,1	12,4
2	6,8	16,6	9,1	20,0	6,3	17,5	6,5
3	5,5	18,4	8,2	19,5	8,3	20,1	5,8
4	8,5	19,0	16,2	29,6	12,1	16,0	17,3
5	6,1	14,9	3,2	17,0	9,1	19,9	23,4
6	10,4	18,6	5,0	10,0	5,7	23,8	41,7
7	23,0	16,9	11,9	32,6	6,1	40,0	3,4
8	23,1	13,2	13,8	26,9	5,2	43,2	16,8
9	27,1	15,2	10,9	25,8	3,2	33,0	22,9
10	20,3	16,6	16,1	30,1	8,4	36,5	11,0
11	10,0	23,4	18,6	42,7	0,0	35,0	18,0
12	15,1	16,0	14,3	24,2	15,4	11,6	2,0
13	19,3	23,3	19,7	38,0	4,3	38,0	38,5
14	23,6	35,4	25,0	34,1	10,5	36,4	4,0
15	24,3	15,6	15,3	29,1	5,5	41,2	5,3
16	19,1	10,8	17,1	24,1	3,2	42,7	4,8
17	22,7	14,3	22,4	25,0	11,0	38,9	10,9
18	28,2	30,2	30,3	35,5	14,4	41,3	16,9
19	25,5	31,8	27,9	40,3	14,1	43,1	13,8
20	15,2	17,0	7,2	7,2	9,5	16,3	7,3
21	5,0	19,7	18,4	12,0	13,7	17,2	7,5
22	16,5	7,4	26,1	34,0	26,6	41,4	14,9
23	18,5	19,0	15,8	28,2	5,7	43,0	9,3
24	10,8	18,4	17,1	23,0	12,3	41,7	8,5
25	17,5	17,5	25,4	25,8	12,9	47,4	17,1
26	26,5	23,8	32,2	29,4	17,0	45,0	21,1
27	24,7	28,4	28,1	36,1	14,4	44,4	13,8
28	3,2	14,6	3,7	9,0	16,4	8,7	2,0
29	5,1	16,6	13,4	9,0	19,7	18,1	5,6

Точки	Циклы						
	1	2	3	4	5	6	7
30	5,4	25,0	5,7	31,4	6,3	29,9	4,9
31	9,4	26,6	9,0	28,5	9,9	26,7	5,1
32	10,5	21,4	13,4	24,6	13,7	24,5	6,3
33	12,2	22,3	22,6	29,7	12,7	33,8	8,2
34	9,1	7,8	4,1	14,9	10,9	17,1	12,1
35	6,0	15,8	9,9	5,7	14,4	9,9	10,4
36	7,1	13,2	8,0	4,3	13,9	9,5	5,7
37	13,6	17,0	10,7	30,1	2,3	14,6	7,7
38	7,7	13,8	14,5	24,2	2,1	12,0	2,9
39	6,3	12,5	13,1	23,9	3,1	9,3	5,8
40	7,8	11,7	14,3	23,8	3,8	12,2	10,2
41	8,9	6,0	1,1	16,6	1,9	9,1	13,4
42	7,1	5,4	2,0	5,0	6,3	1,5	7,9
43	21,8	24,5	25,5	35,3	6,7	42,2	12,9
44	19,1	24,2	24,4	35,4	14,7	38,0	15,3
45	22,9	14,7	21,5	40,3	13,2	40,8	9,4
46	4,5	8,6	10,1	12,4	11,6	0,7	0,4

В прил. В приведены семь планов, построенных в программе Autodesk AutoCAD Civil 3D 2016 (рис. В.1–В.7). Изолинии проведены через 1 мм.

На полученные планы нанесем ту же самую линию S . Также откладываем равные отрезки. На концах отрезков в точках S_j определим значения величин смещений и получим множество реализаций случайной последовательности смещений (табл. 7.13).

Таблица 7.13

Значения реализаций случайной последовательности смещений

Реализации	Циклы						
	1	2	3	4	5	6	7
1	19,3	23,3	19,7	38,0	4,3	38,0	38,5
2	23,4	34,6	24,6	34,3	10,2	36,5	5,8
3	23,8	29,4	22,0	32,6	9,0	37,9	4,4
4	24,0	23,1	19,0	31,0	7,4	39,4	4,8
5	24,2	16,8	15,9	29,4	5,8	40,9	5,2
6	21,1	12,8	16,5	26,2	4,1	42,1	5,1
7	21,0	12,8	19,9	24,7	7,2	40,7	8,0
8	25,8	23,4	26,9	31,1	12,8	40,3	14,3
9	25,1	27,0	24,8	28,9	13,1	35,5	14,6
10	20,1	22,0	16,0	18,0	11,3	25,9	10,9

В табл. 7.14 показаны оценки математического ожидания для случайных величин $X(1)$, $X(2)$, ..., $X(7)$.

Таблица 7.14

Оценки математического ожидания случайной последовательности смещений

t	1	2	3	4	5	6	7
$M_x(t)$	19	17	16	22	7	30	7

График функции, построенный по математическим ожиданиям, показан на рис. 7.9.

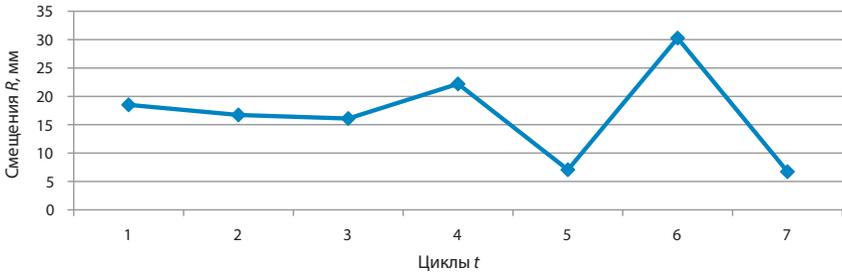


Рис. 7.9. График, построенный по математическим ожиданиям случайной последовательности смещений

Совместим два графика: график, построенный по математическим ожиданиям случайных величин смещений, и график, полученный по обобщенным среднеквадратическим эллипсоидам смещений (рис. 7.10), — и проанализируем.

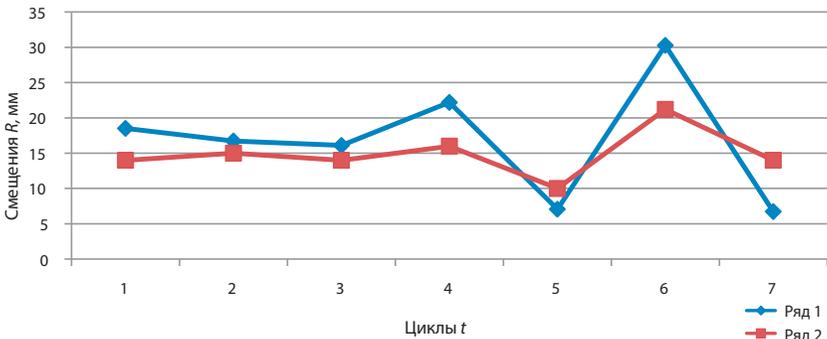


Рис. 7.10. Совмещение графиков:

ряд 1 — график, построенный по математическим ожиданиям;

ряд 2 — график, построенный по обобщенным среднеквадратическим эллипсоидам смещений оползня

Можно сделать следующие выводы:

- график случайной функции и график, построенный по обобщенным среднеквадратическим эллипсоидам смещений, совпали. Это означает, что построенные независимо друг от друга графики подтверждают достоверность данных о смещениях оползня;
- оползень продолжает смещаться. Циклы наблюдений необходимо продолжить и при необходимости предусмотреть противооползневые защитные мероприятия.

7.4. РАСЧЕТЫ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СКЛОНОВ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ КАРАМЫШЕВСКОГО ОПОЛЗНЯ

Прежде чем перейти к расчету НДС склона на примере Карамышевского оползня, рассчитаем оценку его риска. По данным геодезических измерений известны:

- крутизна склона — $20,6^\circ$ (весьма опасные);
- высота склона — 30 м (умеренно опасные);
- объем смещающегося грунта — примерно 0,18 млн м^3 (опасные);
- скорость смещения оползня — около 20 см/год (умеренно опасные).

По табл. 6.5 определяем код оценки критерия уровня опасности реализации оползневых процессов: 2010. Это значит, что

$$P(H) = 0,1235.$$

Так как зданий и сооружений на оползневом склоне нет, то эта величина является одновременно и экологическим риском, т.е.

$$R_{\text{ЭК}} = 0,1235,$$

что в соответствии с табл. 6.11 относится к категории опасности «низкая».

Перейдем к расчетам. При проектировании зданий и сооружений на откосах и склонах возникает необходимость наиболее точного прогноза напряжений и деформаций в основании. При этом необходимо учитывать как деформации поверхности склона, возникающие в процессе строительства, так и деформации, возникающие в процессе эксплуатации зданий и сооружений. Особенно стоит учитывать деформации поверхности склона во времени при проявлении в грунтах основания процессов вторичной ползучести. Предложенная в данной работе методика позволяет прогнозировать деформации поверхности склона во времени при проявлении процессов вторичной консолидации в грунтах основания. Данная методика основана на комплексном анализе НДС откосов и склонов методами инженерной геологии, геодезии и геомеханики. Ниже приведены основные положения расчетов НДС откосов и склонов, изменяющегося во времени, а также результаты расчетов по данной методике на примере склона на Карамышевской набережной р. Москвы.

Для комплексной оценки НДС склона применим методику, разработанную в параграфе 3.8.

Для оценки устойчивости склона с учетом параметров ползучести грунтов была построена трехмерная геомеханическая модель габаритами $390 \times 320 \times 62$ м, состоящая из 55 269 конечных элементов. Расчетная схема модели в различных плоскостях показана на рис. 7.11 и 7.12.

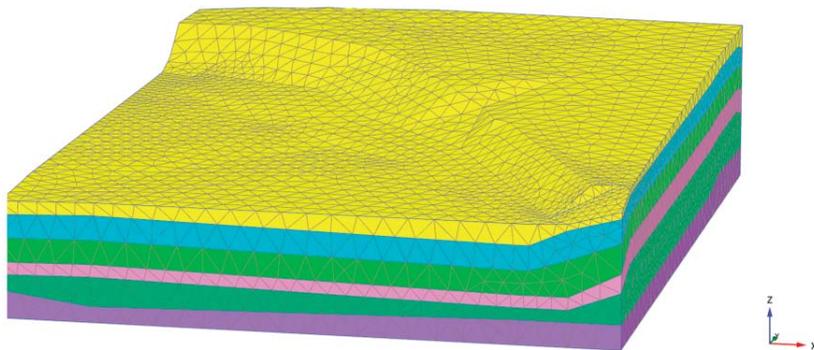


Рис. 7.11. Расчетная схема трехмерной геомеханической модели в плоскости XOZ

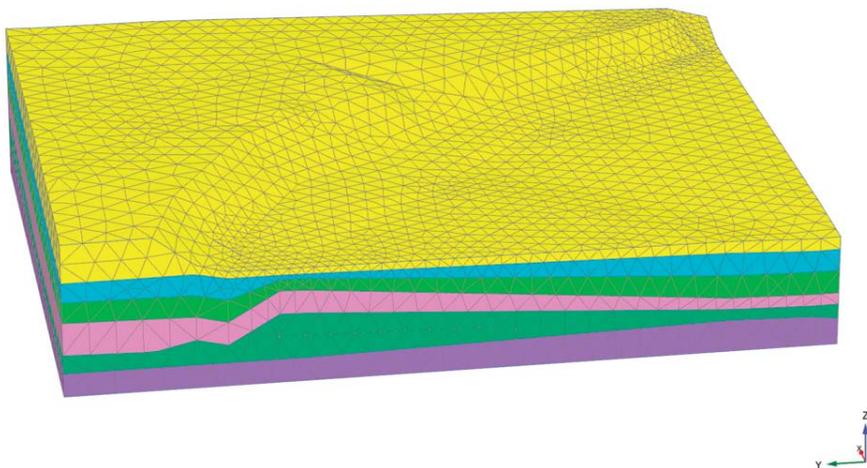


Рис. 7.12. Расчетная схема трехмерной геомеханической модели в плоскости XOZ

Для комплексной оценки НДС склона методами инженерной геодезии и механики грунтов был произведен ряд расчетов методом конечных элементов в ПК PLAXIS 3D. Целью данных расчетов был комплексный анализ деформирования склона с учетом результатов повторных геодезических наблюдений. Для этого был выполнен расчет геомеханической модели на основании инженерно-геологических изысканий. Данный расчет позволяет дать предварительную количественную оценку деформирования склона во времени. Стоит отметить, что его результаты носят предварительный характер и могут отличаться от реальных деформаций поверхности склона, что может быть объяснено рядом причин, к примеру:

- при выполнении инженерно-геологических изысканий и при последующих лабораторных испытаниях грунтов принимаются осредненные значения в рамках одного инженерно-геологического элемента и могут различаться в отдельных районах исследуемой площадки строительства;
- инженерно-геологическими изысканиями выявлены геологические процессы, протекающие на исследуемой площадке строительства;
- при расчете НДС методом конечных элементов не учитывается влияние плодородного слоя на устойчивость откосов и склонов — кустарники и корни деревьев могут ее увеличивать.

Предварительный расчет НДС был выполнен с учетом следующих этапов:

- 1) генерация начальных напряжений в грунте (процедура Gravity Loading);
- 2) расчет фильтрационной (первичной) консолидации грунта до минимального избыточного порового давления;
- 3) поэтапный расчет вторичной консолидации во времени в интервале проведенного геодезического мониторинга.

Ниже представлены результаты предварительного расчета НДС склона с учетом ползучести грунтов на основании инженерно-геологических изысканий. На рис. 7.13 показаны изополя деформаций поверхности склона на этапе вторичной консолидации.

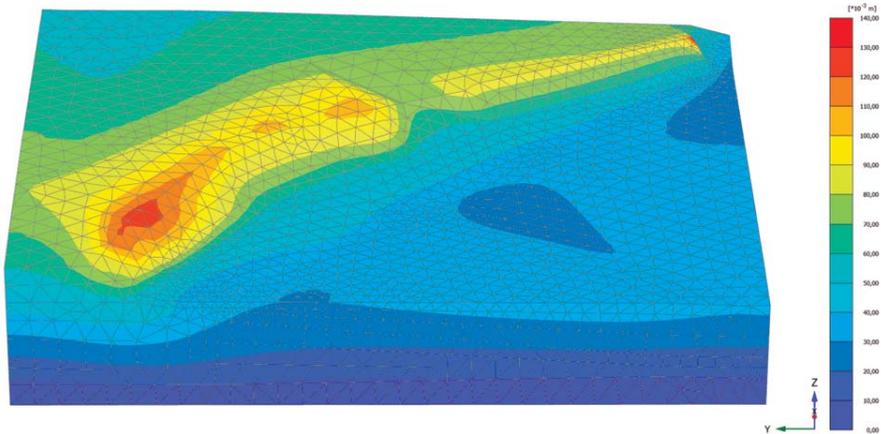


Рис. 7.13. Изополя деформаций склона на этапе вторичной консолидации по окончании геодезического мониторинга

Как видно из рис. 7.13, деформации склона носят неравномерный характер. Для более объективной оценки результаты расчета были обработаны методами статистической вероятности. В качестве точек измерений были приняты 46 точек, использованных в процессе геодезического мониторинга.

На рис. 7.14 показаны средние деформации склона с привязкой к этапам геодезического мониторинга и данные геодезического мониторинга.

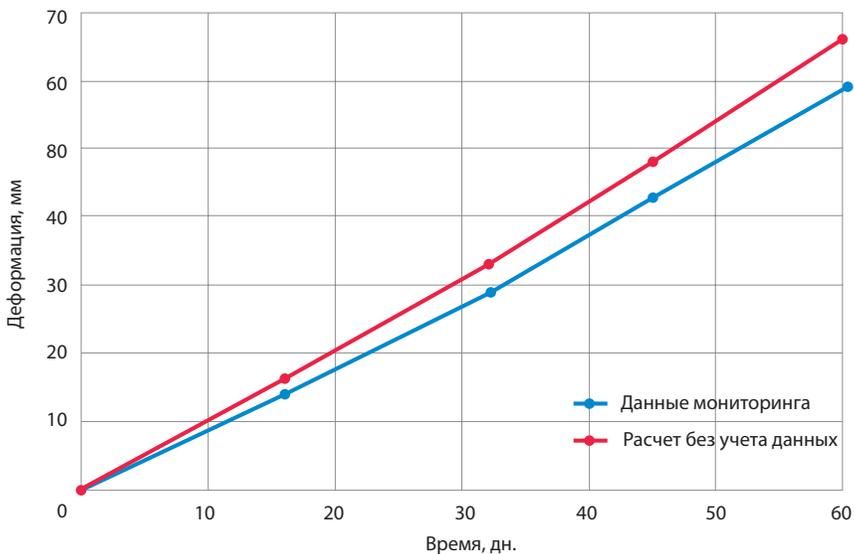


Рис. 7.14. Деформации поверхности склона

Таблица 7.15

**Сравнение результатов предварительного расчета
с результатами геодезического мониторинга**

Циклы	1	2	3	4
Результаты геодезического мониторинга, мм	14	29	43	59
Результаты первоначального расчета, мм	16,1	33,2	48,5	66,2

Из табл. 7.15 видно, что деформации по результатам расчета в среднем выше на 12,2 %, чем деформации поверхности склона по данным геодезического мониторинга. Вероятные причины такой погрешности описаны выше.

При проектировании зданий и сооружений вблизи откосов и склонов или на их поверхности одним из важных факторов является время окончания вторичной консолидации. Данный фактор позволяет учесть развитие деформаций зданий и сооружений и предусмотреть методы инженерной защиты с наименьшими финансовыми и трудовыми затратами. Развитие деформаций ползучести во времени в таком случае должно быть вычислено с максимально возможной точностью, поэтому в случае проектирования зданий и сооружений на откосах и склонах необходимо комплексное изучение условий площадки строительства методами инженерной геодезии и механики грунтов.

**7.5. ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАРАМЫШЕВСКОГО СКЛОНА
С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

В диссертационной работе [133] после выполнения предварительных расчетов НДС склона и сравнения результатов расчетов с данными геодезического мониторинга был выполнен повторный расчет, значения характеристик грунтов в котором были повышены на 12,2 %, т.е. на разницу между результатами предварительных расчетов и данными геодезического мониторинга. В табл. 7.16 приведены измененные параметры деформируемости грунтов с учетом совместного анализа результатов первоначального расчета и данных геодезического мониторинга.

Результаты такого расчета можно сравнить с результатами всех циклов геодезического мониторинга (табл. 7.17). При хорошей сходимости результатов расчета с данными геодезического мониторинга поверхности склона можно сказать, что предложенная в данной работе методика позволяет прогнозировать деформации поверхности откосов и склонов во времени. Точный прогноз деформаций поверхности склона во времени позволит проектировать здания и сооружения на его поверхности с наибольшей экономической выгодой.

Таблица 7.16

Корректировка параметров деформируемости грунтов

ИГЭ	Параметры	Начальные, д.е.	Поправочный коэффициент	Корректированные параметры, д.е.
Н1 и Н2	C_c	0,00015	1,122	0,00017
	C_s	0,00006		0,00007
	C_a	0,0002		0,0002
1	C_c	0,00009		0,00010
	C_s	0,000032		0,000036
	C_a	0,00015		0,00017
2	C_c	0,00025		0,00028
	C_s	0,00009		0,00010
	C_a	0,00035		0,00039

ИГЭ	Параметры	Начальные, д.е.	Поправочный коэффициент	Корректированные параметры, д.е.
3	C_c	0,00018	1,122	0,00020
	C_s	0,00005		0,00006
	C_a	0,00023		0,00026
4	C_c	0,00022		0,00025
	C_s	0,00008		0,00009
	C_a	0,00031		0,00035
5	C_c	0,00013		0,00015
	C_s	0,00005		0,00006
	C_a	0,00022		0,00025

Таблица 7.17

Сравнение результатов уточненного расчета с результатами геодезического мониторинга

Циклы	1	2	3	4	5	6	7
Данные геодезического мониторинга, мм	14	29	43	59	69	90	104
Результаты уточненного расчета, мм	13,2	28,1	40,6	55,2	65,4	87,1	103,2

Результаты расчета с уточненными характеристиками грунтов основания приведены ниже на рисунках. На рис. 7.15 показаны изополя деформаций поверхности склона. Как видно из рис. 7.15, деформации поверхности склона в среднем ниже на 10 %, что говорит о более близком к поведению реального склона поведению геомеханической модели. Для более объективной оценки результаты расчета были обработаны методами статистической вероятности. В качестве точек измерений были также приняты 46 точек, использованных в процессе геодезического мониторинга.

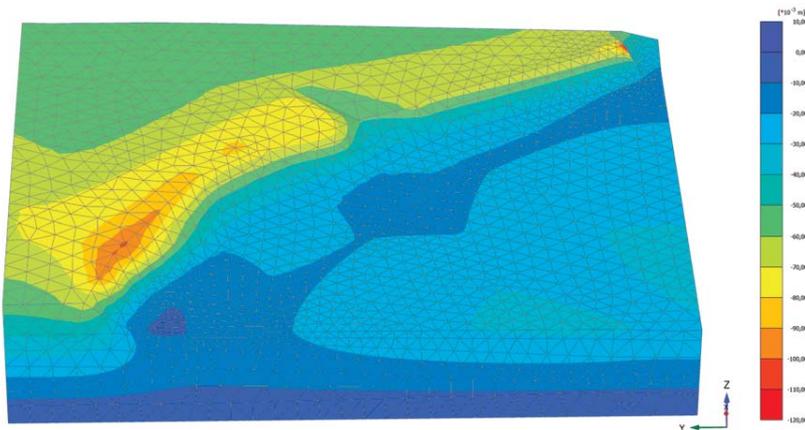


Рис. 7.15. Изополя деформаций склона с уточненными характеристиками грунтов основания по окончании геодезического мониторинга

На рис. 7.16 показаны средние деформации склона с привязкой к этапам геодезического мониторинга по расчету с уточненными характеристиками грунтов основания и данные геодезического мониторинга. Как видно из графика, геомеханическая модель с уточненными характеристиками грунтов наиболее близка к поведению реального склона по сравнению с первоначальной моделью.

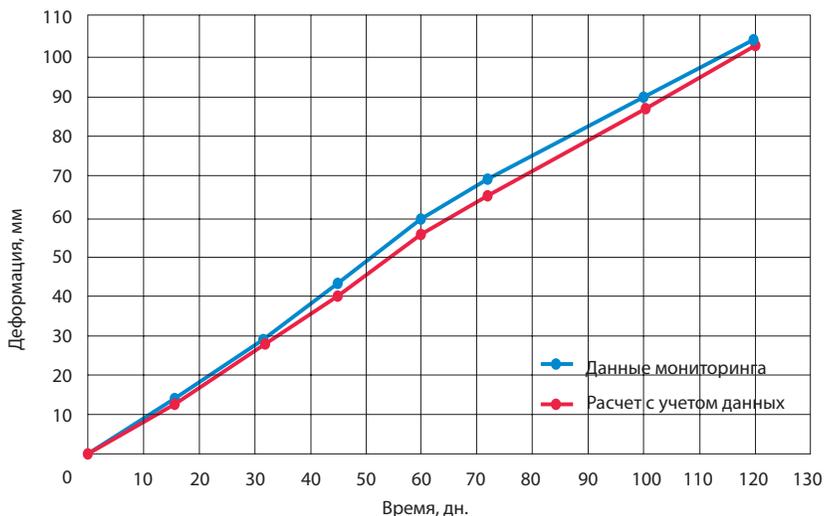


Рис. 7.16. Деформации поверхности склона по результатам расчета и по данным геодезического мониторинга

Приведенные выше методы комплексной оценки и расчета НДС откосов и склонов с учетом ползучести грунтов основания позволяют создать геомеханическую модель, наиболее близкую к природному склону. Стоит отметить, что такое приближение напрямую зависит от количества и долгосрочности геодезического мониторинга. В приведенных выше расчетах данных геодезического мониторинга достаточно, чтобы обеспечить сходимость результатов расчета с уточненными характеристиками грунтов с данными съемок до 2 %, что говорит об общей хорошей сходимости этой методики.

Полученная по результатам комплексного анализа данных геомеханическая модель склона позволяет оценить деформации склона в долгосрочной перспективе. Основными двумя параметрами при анализе склона являются значения деформаций и время окончания вторичной консолидации. Эти параметры позволяют оценить необходимость мер по инженерной защите откосов и склонов.

Для оценки деформации по окончании вторичной консолидации грунтов основания и времени ее окончания были выполнены расчеты деформации поверхности склона с учетом и без учета геодезического мониторинга.

Результаты таких расчетов представлены ниже. Для более объективной оценки результаты расчета были обработаны методами статистической вероятности. В качестве точек измерений были также приняты 46 точек, использованных в процессе геодезического мониторинга. На рис. 7.17 представлен график зависимости средней деформации поверхности склона от времени без учета и с учетом результатов геодезического мониторинга соответственно.

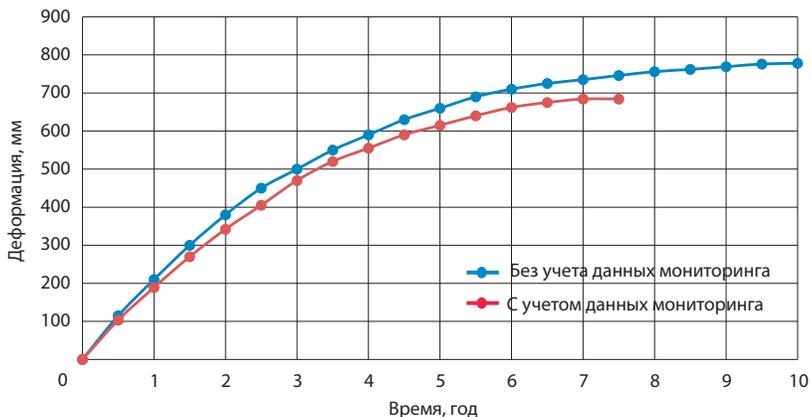


Рис. 7.17. График зависимости средней деформации поверхности склона от времени с учетом и без учета данных геодезического мониторинга

По результатам выполненных расчетов время завершения вторичной консолидации без учета данных геодезического мониторинга — 9,7 года, с учетом данных — 7,2 года, а средние деформации поверхности склона отличаются на 12 % — 778 и 684 мм соответственно. Расчет с предварительными характеристиками грунтов был произведен, чтобы показать, что использование данной методики необходимо при проектировании и строительстве зданий и сооружений на поверхности откосов и склонов, так как результаты уточненного расчета показывают как меньшие итоговые деформации склона, так и меньший срок окончания вторичной консолидации [125].

7.6. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СКЛОНА ДЛЯ ВЫБОРА ТИПА ПРОЕКТИРУЕМОГО ФУНДАМЕНТА СООРУЖЕНИЯ

Описанная геомеханическая модель позволяет прогнозировать как деформации поверхности склона, так и осадки фундаментов зданий и сооружений, возводимых на нем. Приведен пример проектирования фундамента 20-этажного здания на бровке склона на Карамышевской набережной.

Проектируемый объект представляет собой 20-этажный жилой дом с габаритами в плане 20×40 м в центральной части рассматриваемой территории. Глубина заложения фундамента составляет 2,15 м. При проектировании фундаментов зданий и сооружений необходимо произвести расчеты по первой и второй группам предельных состояний: по несущей способности и по деформациям соответственно. Для проектируемого здания в качестве фундамента была выбрана фундаментная плита толщиной 800 мм. Средняя нагрузка на фундамент составляет 262 кПа. Выбранный фундамент проходит проверки по первой и второй группам предельных состояний в соответствии с СП 24.13330.2021 [142]. Однако расчетные методы не учитывают деформации ползучести грунтов основания, поэтому в качестве проверки был произведен расчет осадок фундамента во времени на протяжении всего периода эксплуатации здания с учетом и без учета данных геодезического мониторинга. Данное здание относится к зданиям и сооружениям массового строительства, срок эксплуатации которых в соответствии с [31, табл. 1] составляет не менее 50 лет. Расчет осадок был произведен для сроков эксплуатации 5, 10, 25 и 50 лет. Расчетная геомеханическая модель системы «подземная часть здания — фундамент — основание» (далее — система) приведена на рис. 7.18.

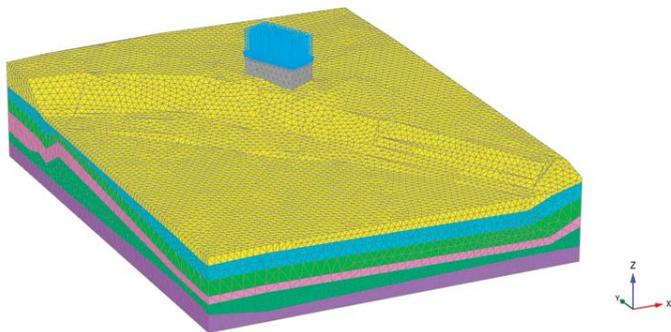


Рис. 7.18. Расчетная схема геомеханической модели системы

Расчеты НДС системы производились с учетом следующих этапов:

- 1) генерация начальных напряжений основания;
- 2) возведение здания на плитном фундаменте с учетом сроков строительства в соответствии с проектом (582 дня);
- 3) последовательный расчет осадок во времени через 5, 10, 25 и 50 лет.

На рисунках ниже приведены результаты расчета НДС системы с учетом свойств ползучести грунтов основания. Изополя на рис. 7.19 показывают окончательные вертикальные перемещения фундаментов здания через 50 лет с момента приложения полной нагрузки без учета данных инженерно-геодезических изысканий. А изополя на рис. 7.20 показывают окончательные вертикальные перемещения фундаментов здания через 50 лет с момента приложения полной нагрузки с учетом данных геодезического мониторинга и соответствующей им корректировки деформационных свойств грунтов основания. На рис. 7.21 показан график изменения осадок во времени с учетом и без учета данных геодезического мониторинга. Предельная средняя осадка фундамента в соответствии с [142] для данного типа зданий составляет 15 см. Как видно из рис. 7.19, осадка фундамента с учетом свойств ползучести грунтов превышает нормативную осадку. Как видно из рис. 7.20, при расчетах зданий и сооружений, проектируемых на откосах и склонах, необходим учет данных геодезического мониторинга, так как современная нормативная база не учитывает деформаций ползучести грунтов, и конечные осадки фундаментов могут превышать нормативные осадки до окончания срока эксплуатации.

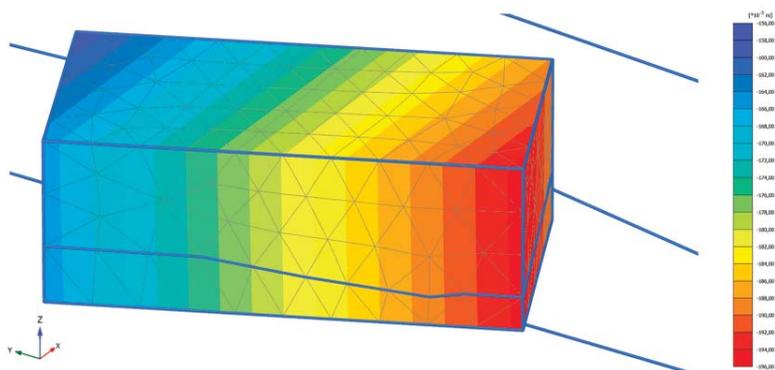


Рис. 7.19. Изополя вертикальных перемещений поверхности склона и фундаментов здания без учета данных геодезического мониторинга

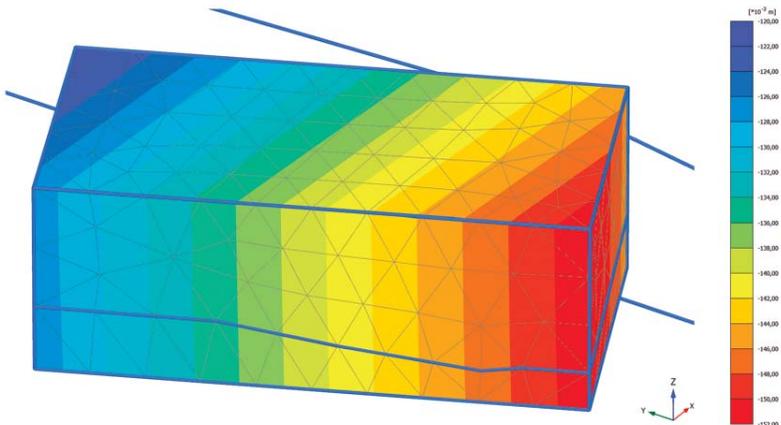


Рис. 7.20. Изополю вертикальных перемещений поверхности склона и фундаментов здания с учетом данных геодезического мониторинга

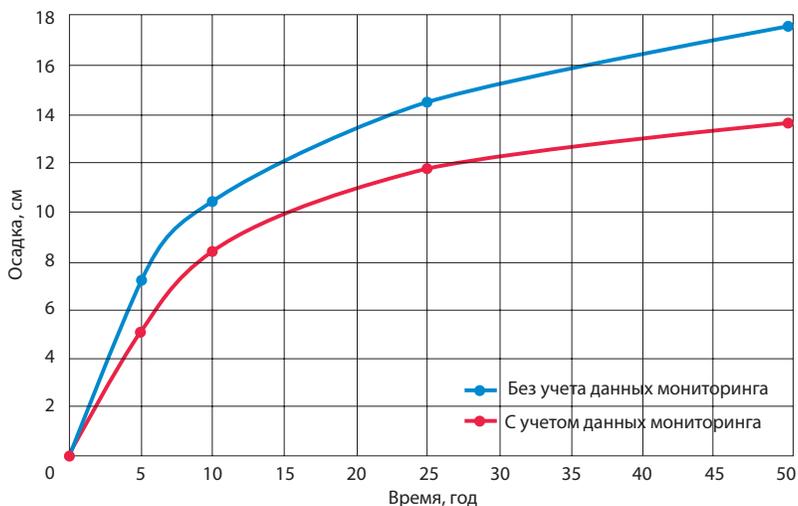


Рис. 7.21. График изменения осадок фундамента во времени с учетом и без учета данных геодезического мониторинга

Расчет осадок без учета данных геодезического мониторинга плитного фундамента во времени показал, что выбранный тип фундамента не соответствует требованиям нормативов. Следовательно, для данных инженерно-геологических условий необходимо проектирование свайного фундамента. Свайный фундамент при этом следует проектировать с учетом свойств ползучести основания. В данном случае был спроектирован фундамент из буронабивных свай диаметром 630 мм, шагом 3 м и длиной 25 м. Длина свай была выбрана с учетом глубины поверхности скольжения склона. На рис. 7.22 показаны изополю вертикальных перемещений фундаментов здания через 50 лет после приложения полной нагрузки от здания.

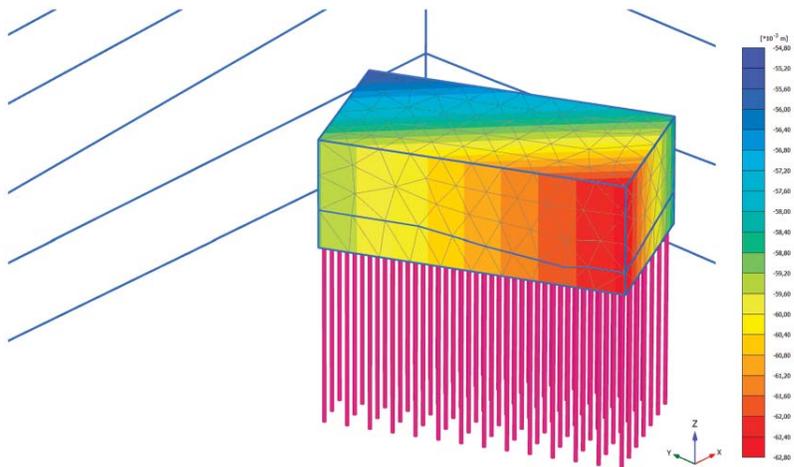


Рис. 7.22. Изополю вертикальных перемещений фундаментов здания

Как видно из рис. 7.22, осадки фундаментов не превышают нормативных, следовательно, при строительстве здания на бровке склона необходимо устраивать свайный фундамент. Однако учет данных инженерно-геодезических изысканий позволит выбрать в качестве фундамента здания железобетонную плиту толщиной 800 мм, что уменьшит стоимость работ и материалов при строительстве нулевого цикла.

Данные расчеты позволяют сделать следующие выводы. При строительстве зданий и сооружений на откосах и склонах сложенными грунтами с признаками ползучести необходимы:

- 1) создание геомеханической модели, наиболее приближенной к натурным наблюдениям;
- 2) расчет осадок фундаментов с учетом ползучести грунтов во времени;
- 3) учет данных геодезического мониторинга и соответствующей им корректировки расчетных характеристик грунтов основания;
- 4) расчет осадок зданий и сооружений с учетом сроков их эксплуатации с помощью геомеханической модели, что позволяет выбрать тип фундаментов с минимальными затратами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные подходы для исследования проблем геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем, комплексной оценки оползневых рисков и уровня безопасности склоновых систем на основе применения геодезических методов представляют собой достаточно эффективные механизмы для обеспечения оползневой безопасности склоновых систем и позволяют нам утверждать о достижении цели исследований — о разработке методологии геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем.

Помимо этого, методологию геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем можно использовать по следующим направлениям.

1. Муниципальная и предпринимательская хозяйственная деятельность на оползнеопасных территориях:

- уменьшение предпринимательского риска;
- геоэкологическая экспертиза муниципальных и коммерческих хозяйственных программ;
- геодезическая поддержка геологоразведочных работ;
- геодезический мониторинг жилищного и производственного фонда;
- оживление коммерческой деятельности;
- обновление государственного земельного кадастра.

2. Природопользование и жизнеобеспечение:

- мониторинг системы рационального природопользования (оценка качества земельных ресурсов, оползневой устойчивости СС, зон распространения оползней);
- информационная поддержка систем жизнеобеспечения, жилищно-бытовой сферы;
- оптимизация размещения новых строительных объектов.

3. Планирование и управление:

- разработка муниципальных программ развития склоновых территорий (районных, региональных);
- информационное обеспечение муниципальных органов управления при принятии решений в области строительства на склоновых территориях.

Перспективы развития темы монографии. Предложенная в настоящей монографии методология геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем открывает достаточно широкие перспективы для проведения научных исследований в области инженерной геодезии, инженерной геологии, строительстве. В частности, важной задачей является по результатам повторных геодезических наблюдений оценка устойчивости как самих склоновых систем по отношению к оползневым процессам, так и математических моделей, описывающих поведение данных систем. В этом направлении в первую очередь необходимо провести глубокий, всесторонний и детальный комплексный анализ оползневых процессов, протекающих в среде различных склоновых систем. Это позволит выявить периодичность оползневых процессов, оказывающих влияние на среду склоновых систем, столь необходимую для исследования динамики изменений состояний склоновых систем и составления кратко-, средне- и долгосрочных прогнозов по реализации опасных оползневых событий в данных системах. Кроме того, немаловажным фактором является оценка эффективности математических моделей, на основе которых проводится анализ оползневых процессов в среде склоновых систем и выполняется вероятностный прогноз развития оползневой ситуации в данных системах.

Библиографический список

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : учебное пособие : в 3 кн. Кн. 1 / [В.А. Котляревский, К.Е. Кочетков, А.А. Носач и др.] ; под ред. К.Е. Кочеткова, А.В. Забегаява. — Москва : АСВ, 1995. — 320 с. — ISBN 5-87829-030-8.
2. Аврунев Е.И. Основы земельного кадастра и мониторинга земель (Проектирование системы наземных наблюдений при мониторинге земель) : методические указания / Е.И. Аврунев, И.А. Гиниятов. — Новосибирск : СГГА, 2002. — 21 с.
3. Акимов В.А. МЧС России. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике : монография / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев. — Москва : Деловой экспресс, 2004. — 352 с. — ISBN 5-89644-065-0.
4. Аугусти Н. Вероятностные методы в строительном проектировании : монография / Н. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати. — Москва : Стройиздат, 1988. — 584 с.
5. Баборыкин М.Ю. Мониторинг оползней с использованием лазерного сканирования и геодезических наблюдений / М.Ю. Баборыкин, Е.В. Жидиляева // Инженерные изыскания : журнал. — 2014. — № 3. — С. 16–24. — EDN: SJCTSN.
6. Бацанин С.Ф. Напряжения в литосфере стабильных областей, обусловленных горизонтальными вариациями мощности земной коры / С.Ф. Бацанин // Известия АН СССР. Серия Физика Земли : журнал. — 1988. — № 7. — С. 22–28.
7. Бахурин И.М. Сдвигение горных пород под влиянием горных выработок : монография / И.М. Бахурин. — Москва : Гостоптехиздат, 1946. — 231 с.
8. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Региональные проблемы безопасности с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф : монография / [В.И. Осипов, Н.А. Махутов, А.Н. Проценко и др.]. — Москва : МГФ «Знание», 1999. — 368 с. — ISBN 5-87633-044-2.
9. Безуглова Е.В. Оползневая опасность и риск смещений оползней на склонах : дисс. на соиск. уч. ст. канд. геол.-минералог. наук : 25.00.08 Инженерная геология, мерзотоведение и грунтоведение / Безуглова Екатерина Вячеславовна. — Волгоград, 2005. — 209 с.
10. Беликов А.Б. Математическая обработка результатов геодезических измерений : учебное пособие / А.Б. Беликов, В.В. Симонян. — Москва : НИУ МГСУ, 2016. — 432 с. — ISBN 978-7264-1255-9.
11. Бобрович А.С. Математическое определение запаса устойчивости оползневых объектов : дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ / Бобрович Антон Сергеевич. — Ульяновск, 2008. — 147 с.
12. Бондарик Г.К. Инженерная геодинамика : учебник / Г.К. Бондарик, В.В. Пендин, Л.А. Ярг. — Москва : КДУ, 2009. — 440 с. — ISBN 978-5-98227-533-2.
13. Брайт П.И. Геодезические методы измерения смещений на оползнях : монография / П.И. Брайт. — Москва : Недра, 1965. — 116 с.
14. Буш В.В. Геодезические работы при строительстве сооружений башенного типа : монография / В.В. Буш, В.В. Калугин, А.И. Саар. — Москва : Недра, 1985. — 216 с.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей : монография / Е.С. Вентцель. — 5-е изд. — Москва : Высшая школа, 1998. — 576 с. — ISBN 5-06-003650-2.
16. Видуев Н.Г. Расчет необходимой точности наблюдений за осадками инженерных сооружений / Н.Г. Видуев, В.С. Староверов // Инженерная геодезия : журнал. — Киев : КИСИ, 1972. — Вып. 12. — С. 3–12.
17. Виноградов В.А. Аэрокосмический мониторинг экосистем : монография / В.А. Виноградов. — Москва : Наука, 1984. — 252 с.

18. Вишняков Я.Д. Общая теория рисков : учебное пособие / Я.Д. Вишняков, Н.Н. Радаев. — 2-е изд., испр. — Москва : ИЦ «Академия», 2008. — 368 с. — ISBN 978-5-7695-5396-7.
19. Волков В.И. Новый подход к математической обработке результатов повторных геодезических наблюдений, используемых в архитектурно-строительной практике / В.И. Волков, С.Д. Митягин, Т.Н. Волкова // Вестник гражданских инженеров : журнал. — 2015. — № 6 (53). — С. 216–221. — EDN: VKDUUP.
20. Вопросы математической теории надежности : монография / [Е.Ю. Барзилович, Ю.К. Беляев, В.А. Каштанов и др.]; под ред. Б.В. Гнеденко. — Москва : Радио и связь, 1983. — 376 с.
21. Катастрофы и общество : монография / [Ю.Л. Воробьев, В.И. Осипов, В.А. Владимиров и др.]. — Москва : Контакт-Культура, 2000. — 332 с. — ISBN 5-93882-002-2.
22. Галлагер Р. Метод конечных элементов : основы : монография / Р. Галлагер ; пер. с англ. В.М. Картелишвили ; под ред. Н.В. Баничука. — Москва : Мир, 1984. — 428 с.
23. Гамбурцев А.Г. Концепция мониторинга природно-технических систем / А.Г. Гамбурцев // Геоэкология : журнал. — 1994. — № 4. — С. 12–19.
24. Ганьшин В.Н. К вопросу о виде функций осадки сооружений / В.Н. Ганьшин, М.С. Нестеренок // Сборник статей по геодезии и аэрофототопографии. — Минск : БПИ, 1973. — Вып. 1. — С. 57–59.
25. Гинзбург Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции : монография / Л.К. Гинзбург. — Москва : Стройиздат, 1979. — 82 с.
26. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления / Укрспецстройпроект. — Москва : ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1986. — 124 с.
27. Гордеев В.А. Теория ошибок измерений и уравнивательные вычисления : учебное пособие / В.А. Гордеев. — 2-е изд. — Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2004. — 429 с. — ISBN 5-8019-0054-3.
28. ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний (с Изменением № 1) : межгосударственный стандарт : дата введения 2013-07-01 / разработ. НИИОСП им. Н.М. Герсеева, ОАО «НИЦ "Строительство"» при участии НОИЗ, МГРИ – РГГРУ. — Изд. официальное. — Москва : Стандартинформ, 2019. — 16 с.
29. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости (с Поправкой) : межгосударственный стандарт : дата введения 2012-01-01 / разработ. НИИОСП им. Н.М. Герсеева при участии ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», ОАО «Союздорнии», ОАО «Фундаментпроект», ИГЭ РАН, ООО «НПП "Геотек"», геологического факультета МГУ. — Изд. официальное. — Москва : Стандартинформ, 2012. — 78 с.
30. ГОСТ 30416-2020 Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения (с Поправкой) : межгосударственный стандарт : дата введения 2021-09-01 / разработ. НИИОСП им. Н.М. Герсеева, АО «НИЦ "Строительство"». — Изд. официальное. — Москва : РСТ, 2021. — 15 с.
31. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (с Изменением № 1) : межгосударственный стандарт : дата введения 2015-07-01 / разработ. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. — Изд. официальное. — Москва : Стандартинформ, 2019. — 16 с.
32. Градостроительство на склонах : монография / [В.Р. Крогиус, Д. Эббот, К. Поллит и др.] ; под ред. В.Р. Крогиуса. — Москва : Стройиздат, 1988. — 328 с. — ISBN 5-274-00721-X.
33. Григоренко А.Г. Измерение смещений оползней : монография / А.Г. Григоренко. — Москва : Недра, 1988. — 144 с. — ISBN 5-247-00218-0.
34. Гулакян К.А. Прогнозирование оползневых процессов : монография / К.А. Гулакян, В.В. Кюнтцель, Г.П. Постоев. — Москва : Недра, 1977. — 135 с.
35. Гуляев Ю.П. Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений : монография / Ю.П. Гуляев. — Новосибирск : СГГА, 2008. — 256 с. — ISBN 978-5-87693-290-7.

36. Гуляев Ю.П., Каленицкий А.И. Задачи экогеологического и деформационного мониторинга / Ю.П. Гуляев, А.И. Каленицкий // Геодезия и картография : журнал. — 1996. — № 3. — С. 49–51.
37. Гуляев Ю.В. Интеллектуальные системы мониторинга безопасности / Ю.В. Гуляев, Г.А. Кашенко, А.С. Багдасарян, Р.В. Семенов // Информация и безопасность : журнал. — 2008. — Т. 11, № 3. — С. 349–354.
38. Елохин А.Н. Анализ и управление риском: теория и практика : монография / А.Н. Елохин. — Москва : Страховая группа «Лукойл», 2000. — 185 с.
39. Емельянова Е.П. Сравнительный метод оценки устойчивости склонов и прогноза оползней : монография / Е.П. Емельянова. — Москва : Недра, 1971. — 103 с.
40. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов : монография / Е.П. Емельянова. — Москва : Недра, 1972. — 310 с.
41. Ерыш И.Ф. Оползни Крыма. Ч. 1: История отечественного оползневедения : монография / И.Ф. Ерыш, В.Н. Саломатин. — Симферополь : Апостроф, 1999. — 254 с.
42. Зайцев А.К. Проектирование полигонометрического хода заданной точности / А.К. Зайцев // Науки о Земле : междунар. науч.-техн. и производ. журнал. — 2011. — № 2. — С. 7–13.
43. Зайцев А.К. Трилатерация : монография / А.К. Зайцев. — Москва : Недра, 1989. — 216 с. — ISBN 5-247-01091-4.
44. Зайцев А.К. Научные труды : избранное / А.К. Зайцев. — Москва : [б.и.], 2018. — 376 с.
45. Земля. Хроники Жизни : официальный сайт. — URL: earth-chronicles.ru (дата обращения: 27.03.2024).
46. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике : монография / О. Зенкевич ; под ред. Б.Е. Победи ; пер. с англ. — Москва : Мир, 1975. — 541 с.
47. Зеркаль О.В. Оценка устойчивости склонов в условиях сейсмического воздействия / О.В. Зеркаль, И.К. Фоменко, К. Кан // Промышленное и гражданское строительство : журнал. — 2018. — № 4. — С. 32–35. — EDN: YVVSUGU.
48. Зеркаль О.В. Инженерно-геологическое и инженерно-сейсмологическое изучение эпицентральных зон сильных землетрясений / О.В. Зеркаль // ГеоРиск : журнал. — 2010. — № 1. — С. 62–65.
49. Формирование оползней, селей и лавин. Инженерная защита территорий : монография / [В.С. Федоренко, В.Ф. Перов, Т.Ю. Сидорова и др.] ; под ред. Г.С. Золотарева и др. — Москва : Изд-во МГУ, 1987. — 180 с.
50. Зыонг М.Х. Региональный прогноз оползневой опасности для района Ха Лонг-Кам Фа на северо-востоке Вьетнама / М.Х. Зыонг, И.К. Фоменко, В.В. Пендин // Инженерная геология : журнал. — 2013. — № 1. — С. 46–54.
51. Иванов И.П. Инженерная геодинамика : учебник / И.П. Иванов, Ю.Б. Тржцинский. — Санкт-Петербург : Наука, 2001. — 416 с. — ISBN 5-02-024941-6.
52. Изучение режима оползневых процессов : монография / [А.И. Шеко, Г.П. Постоев, В.В. Кюнтцель и др.]. — Москва : Недра, 1982. — 255 с.
53. Инженерная защита. Выпуск № 2 (май – июнь 2014 г.) // Инженерная защита : науч.-практ. журнал : официальный сайт. — URL: territoryengineering.ru (дата обращения: 27.03.2024).
54. Инженерно-геологический и геофизический мониторинг природных объектов и инженерных сооружений / под ред. А.В. Николаева. — Москва : ГНТП «Безопасность», 1998. — 102 с.
55. Казеев А.И. Механизм и закономерности развития глубоких оползневых подвижек в г. Москве в фазу катастрофической активизации оползневого процесса : дисс. на соиск. уч. ст. канд. геол.-минералог. наук : 25.00.08 Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение / Казеев Андрей Игоревич. — Москва, 2012. — 218 с.

56. Калинин Э.В. Инженерно-геологические расчеты и моделирование : монография / Э.В. Калинин. — Москва : Изд-во Московского университета, 2006. — 256 с. — ISBN 5-211-04961-6.
57. Кафтан В.И. Геодезические спутниковые измерения, обработка и деформационный анализ : учебное пособие / В.И. Кафтан, П.А. Докукин. — Москва : РУДН, 2017. — 272 с. — ISBN 978-5-209-07468-7.
58. Келль Н.Г. Геодезическое изучение движения оползней на Крымской оползневой станции // Монографическое описание методик стационарных наблюдений над оползнями Крымской АССР / [В.Ф. Пчелинцев и др.]. — Ростов-на-Дону : [б.и.], 1939. — С. 152–169.
59. Кемниц Ю.В. Теория ошибок измерений : монография / Ю.В. Кемниц. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Недра, 1967. — 176 с.
60. Краснов М.Л. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости : монография / М.Л. Краснов, А.И. Киселев, Г.И. Макаренко. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Наука, 1981. — 304 с.
61. Кузин А.А. Геодезическое обеспечение зонирования территорий по степени опасности проявлений оползневых процессов на основе применения ГИС-технологий : дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 25.00.32 Геодезия / Кузин Антон Александрович. — Санкт-Петербург, 2014. — 133 с.
62. Кузнецов А.И. Разработка метода определения поверхности скольжения оползня по данным геодезического мониторинга : дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 25.00.32 Геодезия / Кузнецов Александр Игоревич. — Москва, 2012. — 184 с.
63. Кюнтцель В.В. Закономерности оползневого процесса на Европейской территории СССР и его региональный прогноз : монография / В.В. Кюнтцель. — Москва : Недра, 1980. — 213 с.
64. Лазарев В.М. Геоэкологические проблемы оползнеопасных территорий и их решение с использованием геодезических методов : дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук : 25.00.32 Геодезия / Лазарев Владимир Михайлович. — Томск, 2007. — 407 с.
65. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика : монография / В.Д. Ломтадзе. — Ленинград : Недра, 1977. — 479 с.
66. Ляпишев К.М. Обзор современных исследований оползней по данным аэрофото- и спутниковых съемок / К.М. Ляпишев // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», 29 июня – 5 июля 2009 г., Пермь (Россия), Гент (Бельгия). — 2015. — Т. 21. — С. 348–352. — DOI: 10.24057/2414-9179-2015-1-21-348-352.
67. Мазуров Б.Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики : монография / Б.Т. Мазуров. — Новосибирск : Сиб-Принт, 2019. — 360 с. — ISBN 978-5-94301-746-9.
68. Маркеев А.П. Теоретическая механика : учебник / А.П. Маркеев. — 2-е изд., доп. — Москва : ЧеРо, 1999. — 572 с.
69. Маций С.И. Управление оползневом риском : монография / С.И. Маций, Е.В. Безуглова. — Краснодар : АлВи-Дизайн, 2010. — 240 с. — ISBN 978-5-91111-012-3.
70. МР 2-4-87-53-14 Методические рекомендации для органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации и территориальных подсистем РСЧС по обеспечению безопасности населения и территорий при угрозе возникновения оползневых процессов, их прохождению и уменьшению последствий от них : дата введения 2015-12-10 / утв. МЧС России. — URL: docs.cntd.ru (дата обращения: 27.03.2024).
71. ОДМ 218.2.030-2013 Методические рекомендации по оценке оползневой опасности на автомобильных дорогах : отраслевой дорожный методический документ / разработ. ООО «НТЦ "ГеоПроект"». — Москва : Информавтодор, 2014. — 89 с.
72. Михелев Д.Ш. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений : монография / Д.Ш. Михелев, И.В. Рунов, А.И. Голубцов. — Москва : Недра, 1977. — 152 с.

73. Мустафин М.Г. Оценка вертикальных смещений оснований зданий и сооружений на основе анализа элементов деформационной сети / М.Г. Мустафин, В.Х. Нгуен // Геодезия и картография : журнал. — 2019. — Т. 80, № 3. — С. 11–19. — DOI: 10.22389/0016-7126-2019-945-3-11-19.
74. Носач В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров : монография / В.В. Носач. — Москва : ООО СЗ «МИКАП», 1994. — 384 с.
75. Оползни. Исследование и укрепление / под ред. Р. Шустера, Р. Кризека ; пер. с англ. А.А. Варги, Р.Р. Тизделя. — Москва : Мир, 1981. — 368 с.
76. Оползни и сели : в 2-х т. / [редкол.: Е.А. Козловский (гл. ред.) и др.]. — Москва : Центр междунар. проектов ГКНТ, 1984. — Т. 1. — 352 с. ; Т. 2. — 249 с.
77. Осипов В.И. Природные катастрофы и устойчивое развитие экономики / В.И. Осипов // Горный информационно-аналитический бюллетень : журнал. — 1995. — № 1. — С. 5–6.
78. Осипов В.И. Природные катастрофы на рубеже XXI века / В.И. Осипов // Вестник Российской Академии наук : журнал. — 2001. — Т. 71, № 4. — С. 291–302.
79. Опасные экзогенные процессы : монография / [В.И. Осипов, В.М. Кутепов, В.П. Зверев и др.] ; под ред. В.И. Осипова. — Москва : ГЕОС, 1999. — 290 с. — ISBN 5-89118-081-2.
80. Осипов В.И. Эффективное использование оползнеопасной территории мегаполисов / В.И. Осипов, Г.П. Постоев // Труды междунар. конф. по геотехнике, 7–10 июня 2010 г., Москва (Россия). — Москва : Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 2010. — Т. 5. — С. 1741–1746.
81. Оценка и управление природными рисками = Natural risks assessment and management : материалы Общерос. конф. «Риск-2000» ; под ред. А.Л. Рагозина. — Москва : АНКИЛ, 2000. — 478 с. — ISBN 5-86476-160-5.
82. Павловская О.Г. Анализ и оценка по геодезическим данным динамики оползней в условиях проведения взрывных работ и разгрузки склонов : дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 25.00.32 Геодезия / Павловская Ольга Геннадьевна. — Новосибирск, 2012. — 146 с.
83. Панкрушин В.К. Применение методов математической статистики для исследования геодезических наблюдений за деформациями / В.К. Панкрушин, Л.Х. Кузнецова // Труды НИИГАиК : науч.-техн. сборник. — 1971. — Вып. 24. — С. 21–26.
84. Пендин В.В. Комплексный количественный анализ в инженерной геологии : учебное пособие / В.В. Пендин. — Москва : КДУ, 2009. — 350 с. — ISBN 978-5-98227-516-5.
85. Пендин В.В. Изоморфизм и изомерность инженерно-геологических условий / В.В. Пендин // Геоэкология. — 1994. — № 1. — С. 44–48.
86. Пендин В.В. Методология оценки и прогноза оползневой опасности : монография / В.В. Пендин, И.К. Фоменко. — Москва : ЛЕНАНД, 2015. — 320 с. — ISBN 9785971014973.
87. Дополнение к Пособию «Обследование и мониторинг при строительстве и реконструкции зданий и подземных сооружений к МГСН 2.07-01 Основания, фундаменты и подземные сооружения» : дата введения 2005-12-14 / разработ. НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, ГУП «Мосгоргеотрест». — Москва : [б.и.], 2005. — URL: Дополнение к Пособию...docs.cntd.ru (дата обращения: 07.05.2024).
88. Новейшие методы обработки изображений : монография / [А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов и др.] ; под ред. А.А. Потапова. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 496 с. — ISBN 978-5-9221-0841-6.
89. Потапов А.Д. Землетрясения. Причины, последствия и обеспечение безопасности : учебное пособие / А.Д. Потапов, И.Л. Ревелис, С.Н. Чернышев ; под ред. С.Н. Чернышева. — Москва : ИНФРА-М, 2018. — 343 с. — ISBN 978-5-16-011908-3.
90. Природные опасности России : монография в 6 т. Т. 1: Природные опасности и общество / [В.И. Осипов, С.К. Шойгу, В.А. Владимиров и др.] ; под ред. В.А. Владимирова и др. — 2002. — 245 с. — ISBN 5-900816-70-2

91. Природные опасности России : монография в 6 т. Т. 2: Сейсмические опасности / [Г.А. Соболев, Г.И. Аносов, Ф.Ф. Аптикаев и др.] ; под ред. Г.А. Соболева. — 2000. — 295 с. — ISBN 5-900816-53-2.
92. Пшеничкина В.А. Методы анализа риска в системе мониторинга технического состояния зданий и сооружений / В.А. Пшеничкина, В.Н. Соснов // Технологии гражданской безопасности : журнал. — 2006. — С. 88–92.
93. Рагозин А.Л. Введение в синергетику опасных природных процессов / А.Л. Рагозин // Анализ и оценка природных рисков в строительстве : матер. междунар. конф., 12–13 ноября 1997 г., Москва (Россия). — 1997. — С. 50–52.
94. Рагозин А.Л. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных природных и техноприродных процессов / А.Л. Рагозин // Промышленное и гражданское строительство : журнал. — 1993. — № 1. — С. 25–27.
95. Рагозин А.Л. Концепция допустимого риска и строительное освоение территорий развития опасных природных и техноприродных процессов / А.Л. Рагозин // Проект : журнал. — 1993. — № 5-6. — С. 20–26.
96. Рагозин А.Л. Основные подходы к организации мониторинга природно-технических систем с целью снижения ущерба от природных и техноприродных катастроф / А.Л. Рагозин // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях : журнал. — Москва : ВИНТИ, 1993. — С. 42–50.
97. Рагозин А.Л. Общие закономерности формирования и количественная оценка природных рисков на территории России / А.Л. Рагозин // Вопросы анализа риска : журнал. — 1999. — Т. 1, № 2–4. — С. 28–47.
98. Рагозин А.Л. Общие положения оценки и управления природным риском / А.Л. Рагозин // Геоэкология : журнал. — 1999. — № 5. — С. 417–429.
99. Рагозин А.Л. Теория и практика оценки геологических рисков : автореф. дисс. на соиск. уч. ст. д-ра геол.-минералог. наук : 04.00.07 Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение / Рагозин Алексей Леонидович. — Москва, 1997. — 60 с.
100. Радаев Н.Н. Вероятностная структура природного и природно-техногенного рисков / Н.Н. Радаев // Проблемы управления безопасностью сложных систем : сб. матер. IX междунар. конф., 19 декабря 2001 г., Москва (Россия). — Москва : Изд. центр РГГУ, 2001. — С. 287–290.
101. Радаев Н.Н. Элементы теории риска эксплуатации потенциально опасных объектов : монография / Н.Н. Радаев. — Москва : ВА РВСН, 1999. — 324 с.
102. Радаев Н.Н. Обоснование уровней рисков в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / Н.Н. Радаев // Известия РАН. Серия Географическая : журнал. — 2003. — № 5. — С. 74–79.
103. Радаев Н.Н. Эффективность принимаемых решений по защите от экстремальных природных явлений / Н.Н. Радаев // Автоматика и телемеханика : журнал. — 2002. — № 1. — С. 173–178.
104. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов : дата введения 1984-01-01 / разраб. ПНИИИС Госстроя СССР. — Москва : Стройиздат, 1984. — 80 с.
105. Москва. Геология и город / под ред. В.И. Осипова, О.П. Медведева. — Москва : Московские учебники и Картология, 1997. — 399 с. — ISBN 5-7853-0046-х.
106. МРР 3.2.10-06 Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы : московские региональные рекомендации : дата введения 2002-08-01 / разраб. ГУП «ЭкИнЦ», ИГЭ РАН, ГУП «Моспромпроект», ГУП «НИИПИ Генплана г. Москвы», ОАО «ЦНИИпромзданий», Москомархитектурой. — Москва : НИАЦ, 2002. — 65 с.
107. Розовский Л.Б. Введение в теорию геологического подобия и натурального моделирования : монография / Л.Б. Розовский. — Москва : Недра, 1969. — 128 с.

108. ГКНИП (ОНТА)-01-266-02 Руководство по выполнению наблюдений на пунктах ОГС Москвы спутниковыми геодезическими системами : геодезические и картографические инструкции, нормы и правила : дата введения 2002-09-23 / разраб. ГУП «Мосгоргеотрест». — Изд. официальное. — Москва : ГУП «Мосгоргеотрест», 2002. — 10 с.

109. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений / НИИОСП им. Герсеванова. — Москва : Стройиздат, 1975. — 156 с.

110. Руководство по определению кренов инженерных сооружений башенного типа геодезическими методами / ЦНИИОМТП. — Москва : Стройиздат, 1981. — 56 с.

111. Руководство по проектированию и устройству заглублённых инженерных сооружений : дата введения 1986-01-01 / ЦНИИСК Госстроя СССР. — Москва : Стройиздат, 1986. — 120 с.

112. Самарский А.А. Введение в численные методы : учебное пособие / А.А. Самарский. — Москва : Наука, 1982. — 272 с.

113. Симонян В.В. Обоснование точности и разработка методов математико-статистического анализа геодезических наблюдений за смещениями оползней : дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 25.00.32 Геодезия / Симонян Владимир Викторович. — Москва, 2008. — 182 с.

114. Симонян В.В. Анализ смещений оползней / В.В. Симонян // Геодезия и картография : журнал. — 2009. — № 3. — С. 33–35. — EDN: STTXWN.

115. Симонян В.В. Применение среднеквадратических эллипсов для создания математической модели смещений оползней / В.В. Симонян // Геопространственные технологии и сферы их применения : матер. V Междунар. науч.-практ. конф., 11–12 марта 2009 г. Москва (Россия). — Москва : Geoform, 2009. — С. 48–49.

116. Симонян В.В. Экспериментальные исследования по установлению уравнения регрессии, описывающего закономерности деформаций земной коры при землетрясениях / В.В. Симонян // Науки о Земле : междунар. науч.-техн. и производ. журнал. — 2013. — № 4. — С. 22–28. — EDN: SJZWFF.

117. Симонян В.В. Расчет точности наблюдений за деформациями высотных зданий и сооружений с использованием электронных тахеометров / В.В. Симонян, С.В. Шендяпина // Инженерные изыскания : журнал. — 2014. — № 8. — С. 54–57.

118. Симонян В.В. Изучение оползневых процессов геодезическими методами : монография / В.В. Симонян. — 2-е изд. — Москва : МГСУ, 2015. — 176 с. — ISBN 978-5-7264-1003-6.

119. Симонян В.В. О причинах смещений зданий и сооружений и необходимости их геодезического контроля / В.В. Симонян, Н.А. Шмелин // Инженерные изыскания : журнал. — 2015. — № 4. — С. 60–65.

120. Симонян В.В. К разработке модели оползневого процесса с целью оценки его последствий для зданий и сооружений / В.В. Симонян, А.Г. Тамразян, А.А. Кочиев // Промышленное и гражданское строительство : журнал. — 2015. — № 4. — С. 37–40.

121. Симонян В.В., Тамразян А.Г., Кочиев А.А. Теоретическое обоснование построения среднеквадратических эллипсоидов смещений оползней / В.В. Симонян, А.Г. Тамразян, А.А. Кочиев // Геодезия и картография : журнал. — 2015. — № 12. — С. 10–14.

122. Симонян В.В., Кочиев А.А. О методике расчета силы и ускорения оползней / В.В. Симонян, А.А. Кочиев // Науки о Земле : междунар. науч.-техн. и производ. журнал. — 2016. — № 1. — С. 49–55.

123. Симонян В.В. К оценке безопасности зданий и сооружений на оползнеопасных территориях с учетом силы смещения оползня, момента его сдвига и ускорения / В.В. Симонян, А.Г. Тамразян // Вестник Московского государственного строительного университета : журнал. — 2016. — № 7. — С. 101–113.

124. Симонян В.В. Геодезический мониторинг зданий и сооружений как основа контроля за безопасностью при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений : монография / В.В. Симонян, Н.А. Шмелин, А.К. Зайцев ; под общ. ред. канд. техн. наук, доц. В.В. Симоняна. — 2-е изд. — Москва : НИУ МГСУ, 2016. — 144 с. — ISBN 978-5-7264-1379-2.

125. Симонян В.В. Комплексный анализ устойчивости склона методами инженерной геодезии и механики грунтов / В.В. Симонян // Новые информационные технологии в науке : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., 28 ноября 2016 г., Уфа (Россия) : в 4-х частях. Ч. 2. — 2016. — С. 162–169.
126. Симонян В.В., Тамразян А.Г. Вероятностный анализ потенциальных возможностей оползневых смещений / В.В. Симонян, А.Г. Тамразян // Безопасность жизнедеятельности : журнал. — 2017. — № 2 (194). — С. 28–32. — EDN: YHFLHZ.
127. Симонян В.В. Обоснование периодичности наблюдений за смещениями оползней / В.В. Симонян // Научные основы современного прогресса : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., 3 июля 2017 г., Казань (Россия) : в 2-х частях. Ч. 2. — 2017. — С. 66–68.
128. Симонян В.В. Исследование оползневого процесса методом корреляционного анализа с использованием случайных функций / В.В. Симонян, Г.А. Николаева // Вестник Московского государственного строительного университета : журнал. — 2017. — Т. 12, вып. 8 (107). — С. 846–853.
129. Симонян В.В. Сравнительный анализ численных критериев результативности методов оценки опасных оползневых процессов / В.В. Симонян, Г.А. Николаева // Научное обозрение : журнал. — 2017. — № 20. — С. 150–160.
130. Симонян В.В. Математическая модель устойчивого равновесия оползня / В.В. Симонян, А.А. Кочиев // Вестник Московского государственного строительного университета : журнал. — 2019. — Т. 14, вып. 10. — С. 1292–1298. — EDN: GATRBA.
131. Симонян В.В. Оценка риска застроенных склоновых систем по данным геодезического мониторинга / В.В. Симонян, В.И. Волков // Геодезия и картография : журнал. — 2021. — Т. 82, № 10. — С. 42–51.
132. Симонян В.В. Роль геодезических методов в изучении динамики оползней / В.В. Симонян, В.И. Волков // Естественные и технические науки : журнал. — 2021. — № 4 (155). — С. 193–195. — EDN: DZQEET.
133. Симонян В.В. Методология геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем : дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук : 25.00.32 Геодезия / Симонян Владимир Викторович. — Москва, 2021. — 340 с.
134. Симонян В.В. Создание опорной геодезической сети на оползневых склонах в виде замкнутых полигонометрических четырехугольников / В.В. Симонян, В.И. Волков // Вестник Московского государственного строительного университета : журнал. — 2022. — Т. 17, вып. 1. — С. 72–82.
135. Симонян В.В. Комплексный подход к определению устойчивого равновесного состояния оползня / В.В. Симонян, А.А. Кочиев, В.И. Волков // Вестник Московского государственного строительного университета : журнал. — 2023. — Т. 18, вып. 6. — С. 880–888. — DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.880-888.
136. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера : монография / [А.Г. Тамразян, С.Н. Булгаков, И.А. Рахман, А.Ю. Степанов] ; под общ. ред. А.Г. Тамразяна. — Москва : Изд-во АСВ, 2012. — 304 с. — ISBN 978-5-93093-851-7.
137. СП 11-104-97 Инженерно-геодезические изыскания для строительства : свод правил : дата введения 1998-01-01 / разработ. ПНИИИС Госстроя России и др. — Изд. официальное. — Москва : ПНИИИС Госстроя России, 1997. — 72 с.
138. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. I. Общие правила производства работ : свод правил : дата введения 1998-03-01 / разработ. ПНИИИС Госстроя России и др. — Изд. официальное. — Москва : ПНИИИС Госстроя России, 1997. — 43 с.
139. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов : свод правил : дата введения 2001-01-01 / разработ. ПНИИИС Госстроя России и др. — Изд. официальное. — Москва : ПНИИИС Госстроя России, 2000. — 90 с.

140. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* (с Изменениями № 2, 3) : свод правил : дата введения 2018-11-25 / подготовл. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. — Изд. официальное. — Москва : Стандартинформ, 2018. — 116 с.

141. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями № 1–5) : свод правил : дата введения 2017-07-01 / подготовл. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. — Москва : Стандартинформ, 2017. — 204 с.

142. СП 24.13330.2021 СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты (с Изменением № 1) : свод правил : дата введения 2022-01-15 / подготовл. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. — Москва : РСТ, 2022. — 108 с.

143. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 (с Изменением № 1) : свод правил : дата введения 2017-07-01 / подготовл. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. — Москва : Стандартинформ, 2017. — 84 с.

144. СП 436.1325800.2018 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов. Правила проектирования (с Изменением № 1) : свод правил : дата введения 2019-06-06 / подготовл. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. — Москва : Стандартинформ, 2019. — 46 с.

145. Тамразян А.Г. Надежность и защита московских зданий массовых серий от прогрессирующего обрушения при ЧС природного и техногенного характера / А.Г. Тамразян // Безопасность жизнедеятельности : журнал. — 2002. — № 1. — С. 35–39.

146. Тамразян А.Г. Оценка рисков при техногенных воздействиях на объекты строительства / А.Г. Тамразян // Строительная безопасность : журнал. — 2006. — № 1. — С. 44–46.

147. Тамразян А.Г. Количественная оценка риска большепролетных сооружений методом анализа «дерева событий» и логико-вероятностного подхода / А.Г. Тамразян // Предотвращение аварий зданий и сооружений : сб. науч. трудов / под ред. К.И. Еремина. — Москва : РААСН, 2009. — Вып. 8. — С. 166–179.

148. Тамразян А.Г. Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений / А.Г. Тамразян // Вестник Московского государственного строительного университета : журнал. — 2011. — № 2-1. — С. 21–27.

149. Тамразян А.Г. К задачам мониторинга риска зданий и сооружений / А.Г. Тамразян // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века : журнал. — 2013. — № 3 (170). — С. 19–21. — EDN: SXLQWJ.

150. Тамразян А.Г. Научные основы оценки риска и обеспечения безопасности железобетонных конструкций, зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях / А.Г. Тамразян // Вестник НИЦ «Строительство» : журнал. — 2018. — № 1 (16). — С. 106–114. — EDN: YNSGEI.

151. Теоретические основы инженерной геологии. Геологические основы : монография / [Е.М. Сергеев, В.Т. Трофимов, П.И. Фадеев и др.] ; под ред. Е.М. Сергеева. — Москва : Недра, 1985. — 332 с.

152. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов : монография / З.Г. Тер-Мартirosян. — Москва : Изд-во АСВ, 2009. — 552 с. — ISBN 978-5-93093-376-6.

153. Тер-Степанян Г.И. Геодезические методы изучения динамики оползней : монография / Г.И. Тер-Степанян. — 2-е изд., перераб. — Москва : Недра, 1979. — 157 с.

154. Тер-Степанян Г.И. Многолучевой дифференциальный метод наблюдений вертикальных смещений оползневых точек / Г.И. Тер-Степанян // Проблемы геомеханики : журнал. — 1971. — № 5. — С. 147–156.

155. Тер-Степанян Г.И. Использование наблюдений за деформациями склона для анализа механизма оползня / Г.И. Тер-Степанян // Проблемы геомеханики : журнал. — 1967. — № 1. — С. 16–51.

156. Тер-Степанян Г.И. О механизме многоярусных оползней / Г.И. Тер-Степанян // Труды к VII Междунар. конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению : сб. ст. — Москва : Госстройиздат, 1969. — С. 190–199.
157. Тихвинский И.О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов : монография / И.О. Тихвинский ; отв. ред. Г.С. Золотарев. — Москва : Наука, 1988. — 142 с. — ISBN 5-02-003371-5.
158. Тихонов А.В. Принципы исследования глубоких оползней г. Москвы : дисс. на соиск. уч. ст. канд. геол.-минералог. наук : 25.00.08 Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение / Тихонов Андрей Владимирович. — Москва, 2010. — 177 с.
159. Указ Президента РФ от 01.04.1996 № 440 «О Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию» // Собрание законодательства Российской Федерации : журнал. — 1996. — № 15.
160. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике : монография / А.Б. Фадеев. — Москва : Недра, 1987. — 221 с.
161. Фадеев А.О. Математическое моделирование и методы оценки рисков в территориальных системах, подвергающихся воздействию геодинамических факторов : дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук : 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ / Фадеев Александр Олегович. — Москва, 2011. — 353 с.
162. Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности : дисс. на соиск. уч. ст. д-ра геол.-минералог. наук : 25.00.08 Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение / Фоменко Игорь Константинович. — Москва, 2014. — 320 с.
163. Хаин В.Е. Геодинамические процессы. Эволюция взглядов и современные представления // Геофизика океана : монография в 2 т. Т. 2: Геодинамика [А. Монин, О. Сорохтин, В.Е. Хаин и др.] ; под ред. О.Г. Сорохтина. — Москва : Наука, 1979. — С. 14–38.
164. Хван А.П. Возможная модель оползня / А.П. Хван // Строительство и техногенная безопасность : журнал. — 2006. — Вып. 15–16. — С. 55–56.
165. Хорошилов В.С. Деформационный мониторинг инженерных объектов как составная часть геодезического мониторинга / В.С. Хорошилов, Ж.А. Хорошилова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь : междунар. выставка и науч. конгресс. — Новосибирск : СГУГиТ, 2012. — Т. 1, № 1. — С. 77–80.
166. Шарый С.П. Курс вычислительных методов : монография / С.П. Шарый. — Новосибирск : [б.и.], 2012. — 315 с.
167. Швец В.Б. Усиление и реконструкция фундаментов : монография / В.Б. Швец, В.И. Феклин, Л.К. Гинзбург. — Москва : Стройиздат, 1985. — 204 с.
168. Шеко А.И. О цикличности проявления оползневых процессов на северо-западном побережье Черного моря / А.И. Шеко // Труды ВСЕГИНГЕО. Проблемы и методы инженерно-геологических исследований : сб. ст. — Москва, 1976. — Вып. 76. — С. 39–40.
169. Шеко А.И. Оценка опасности и риска экзогенных геологических процессов / А.И. Шеко, В.С. Круподеров // Геоэкология : журнал. — 1994. — № 1. — С. 11–20.
170. Шеховцов Г.А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений : монография / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова. — Нижний Новгород : ННГАСУ, 2014. — 256 с.
171. Природные опасности России : монография в 6 т. Т. 3: Экзогенные геологические опасности / [Н.Г. Анисимова, В.Г. Бурова, А.С. Викторов и др.]. — Москва : КРУК, 2002. — 345 с. — ISBN 5-900816-43-5.
172. Slope stability and stabilization methods / [L.W. Abramson, T.S. Lee, S. Sharma, G.M. Boyce]. — 2nd ed. — New York : John Wiley & Sons, 2002. — 736 p. — ISBN 978-0-471-38493-9.
173. Albataineh N. Slope stability analysis using 2D and 3D methods / N. Albataineh. — Ohio, United States : The University of Akron, 2006. — 126 p.

174. Alonso E.E. Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays / E.E. Alonso // *Geotechnique*. — 1976. — N 26. — P. 453–472. — <https://doi.org/10.1680/geot.1976.26.3.453>.
175. Castelli M. A key approach: the IMIRILAND project method / M. Castelli, M. Pirulli, C. Scavia // *Identification and mitigation of large landslide risks in Europe* / [C. Bonnard, F. Forlati, C. Scavia et al.]. — 2004. — Ch. 3. — P. 13–43. — ISBN 9780429082085.
176. Practice note guidelines for landslide risk management / Australian Geomechanics Society Landslide Taskforce, Landslide Practice Note Working Group // *Australian Geomechanics*. — 2007. — V. 42, N 1. — P. 63–114.
177. Barredo J.I. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin Gran Canaria Island, Spain / J.I. Barredo, A. Benavides, J. Hervás, C.J. van Westen // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. — 2000. — V. 1. — P. 9–23. — DOI: 10.1016/S0303-2434(00)85022-9.
178. Bromhead E.N. The stability of slopes / E.N. Bromhead. — 2nd ed. — London and New York : Taylor & Francis, 2005. — 424 p. — ISBN 9780429224799.
179. Cavouridis S. On the ratio of factors of safety in slope stability analyses / S. Cavouridis // *Geotechnique*. — 1987. — V. 37, N 2. — P. 207–210. — <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.2.207>.
180. Chowdhury R. Geotechnical slope analysis / R. Chowdhury, Ph. Flentje, G. Bhattacharya. — London : CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2010. — 721 p. — ISBN 9780203864203.
181. Chowdhury R. Role of slope reliability analysis in landslide risk management / R. Chowdhury, P. Flentje // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. — 2003. — V. 62. — P. 41–46. — <https://doi.org/10.1007/s10064-002-0166-1>.
182. Coggan J.S. Evaluation of techniques for quarry slope stability assessment / J.S. Coggan, D. Stead, J. Eyre // *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section B: Applied Earth Science*. — 1998. — P. 139–147.
183. Duncan M. Discussion of "Probabilistic slope stability analysis for practice" / M. Duncan, M. Navin, T. Wolff // *Canadian Geotechnical*. — 2003. — V. 40, N 4. — P. 848–850. — DOI: 10.1139/t03-030.
184. Einstein H.H. Risk assessment and uncertainties. Keynote lecture / H.H. Einstein, K.S. Karam // *Proceedings of the International Conference on Landslides: Causes, Impacts, and Countermeasures, 17–21 June 2001, Davos (Switzerland)*. — 2001. — P. 457–488.
185. El-Ramly H. Probabilistic slope stability analysis for practice / H. El-Ramly, N.R. Morgenstern, D.M. Cruden // *Canadian Geotechnical*. — 2002. — V. 39, N 3. — P. 665–683. — DOI: 10.1139/t02-034.
186. Šegina E. Monitoring surface displacement of a deep-seated landslide by a low-cost and near real-time GNSS system / E. Šegina, T. Peternel, T. Urbančič et al. // *Remote Sensing*. — 2020. — V. 12, N 20. — P. 3375. — DOI: 10.3390/rs12203375.
187. Faella C. Flowslide effects on constructions. Panel report / C. Faella // *Proceedings of the International Conference on "Fast Slope Movements — Prediction and Prevention for Risk Mitigation"*, 11–13 May 2003, Naples (Italy). — 2005. — V. 2. — P. 53–61.
188. Fell R. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning / R. Fell, J. Corominas, C. Bonnard et al. // *Engineering Geology*. — 2008. — V. 102, N 3–4. — P. 99–111. — <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014>.
189. Fenton G.A. Risk assessment in geotechnical engineering / G.A. Fenton, D.V. Griffiths. — New Jersey : John Wiley & Sons, 2008. — 480 p. — ISBN 9780470178201.
190. Fotopoulou S. Vulnerability assessment of RC buildings due to earthquake induced slow moving slides / S. Fotopoulou, K. Pitilakis, C. Anagnostopoulos // *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 10–13 January 2011, Santiago (Chile). — 2011. — Paper No. VARFO.
191. Glade T. The nature of landslide hazard and impact / T. Glade, M.J. Crozier // *Landslide hazard and risk* / eds.: T. Glade, M. Anderson, M.J. Crozier. — Chichester : John Wiley & Sons, 2005. — P. 43–74. — ISBN 0471486639.

192. Hasanuddin Z.A. Studying landslide displacements in megamendung (Indonesia) using GPS survey method / Z.A. Hasanuddin, H. Andreas, M. Gamal, S. Surono, M. Hendrasto // *ITB Journal of Engineering Science*. — 2004. — V. 36, N 2. — P. 109–123. — DOI: 10.5614/itbj.eng.sci.2004.36.2.2.
193. Keefer D.K. Landslides caused by earthquakes / D.K. Keefer // *Geological Society of America Bulletin*. — 1984. — V. 95, N 4. — P. 406–421.
194. Landslide risk management concepts and guidelines / Australian Geomechanics Society, Sub-Committee on Landslide Risk Management // *Australian Geomechanics*. — 2000. — V. 35, N 1. — P. 49–92.
195. Lee E.M. Landslide risk assessment / E.M. Lee, D.K.C. Jones. — London : Thomas Telford, 2004. — 454 p. — ISBN 9780727731715.
196. Lee J.F. Statistical approach to earthquake-induced landslide susceptibility / J.F. Lee, C.C. Huang, C.T. Lee at al. // *Engineering Geology*. — 2008. — V. 100, N 1–2. — P. 43–58. — DOI: 10.1016/j.eng-geo.2008.03.004.
197. Li Z. Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards / Z. Li, F. Nadim, H. Huang at al. // *Landslides*. — 2010. — V. 7. — P. 125–134. — <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0190-3>.
198. Malkawi A.H. An efficient search method for finding the critical circular slip surface using the Monte Carlo technique / A.H. Malkawi, W.F. Hassan, S.K. Sarma // *Canadian Geotechnical*. — 2001. — V. 38, N 5. — P. 1081–1089. — DOI: 10.1139/t02-083.
199. Zeybek M. Monitoring landslides with geophysical and geodetic observations / M. Zeybek, I. Şanlıoğlu, A. Özdemir // *Environmental Earth Sciences*. — 2015. — V. 74, N 7. — P. 6247–6263. — DOI: 10.1007/s12665-015-4650-x.
200. HAZUS-MH MR1. Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model. Advanced engineering building module : Technical and Users's manual / The National Institute of Building Sciences (NIBS). — Washington, D.C. : Federal Emergency Management Agency, 2003. — 119 p.
201. Peidou A.C. An overview of landslide detection and monitoring using geodetic satellite observations / A.C. Peidou, G. Fotopoulos // *International Conference “Science in Technology” (SCinTE) 2015*. Sub Session: Earth & Environmental Sciences (Part II). 5–7 November 2015, Athens (Greece). — 2015. — Report 289-A05-226.
202. 22 здания разрушены в Шеньчжэне из-за оползня // *Новости Китая каждый день : официальный сайт*. — URL: ekd.me/2015/12/shenzhen-landslide/ (дата обращения: 07.05.2024).
203. SafeLand. Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies. 7th Framework Programme Cooperation Theme 6 Environment (including climate change). D2.5: Physical vulnerability of elements at risk to landslides: Methodology for evaluation, fragility curves and damage states for buildings and lifelines. Work Package 2.2: Vulnerability to landslides. — 2011. — 195 p.
204. Shao-tang Liu. Choice of surveying methods for landslides monitoring / Shao-tang Liu, Zhi Wu Wang // *Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, 30 June – 4 July 2008, Xi'an (China). — 2008. — P. 1211–1216.
205. Simonyan V.V. On the method of calculating the force and acceleration landslide / V.V. Simonyan // *The VIII International Scientific and Practical Conference “Innovation in Agriculture”*, 20–22 April 2016, Moscow (Russia). — 2016. — P. 119–124. — EDN: YIKOAD.
206. Simonyan V.V. Methodology of comprehensive slope stability evaluation based on engineering geodesy and soil mechanics methods for the road engineering application / V.V. Simonyan // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*, 10–13 April 2017, Khabarovsk (Russia). — 2018. — V. 692. — P. 729–738. — DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_77.
207. Simonyan V.V. Evaluation criteria of landslide stability / V.V. Simonyan, A.V. Labuznov // *MATEC Web of Conferences. XXVII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP)*. (TFoCE 2018), 17–21 September 2018, Rostov-on-Don (Russia). — 2018. — V. 196. — P. 03003. — DOI: 10.1051/mateconf/201819603003.

208. Simonyan V.V. Calculating the accuracy of strain observations of high-rise buildings and structures using electronic total stations / V.V. Simonyan, S.V. Shendyapina // E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019), 20–22 November 2019, Moscow (Russia). — 2020. — V. 164. — P. 02022. — DOI: 10.1051/e3sconf/202016402022.

209. Slope stability and stabilization methods / [L.W. Abramson, T.S. Lee, S. Sharma, G.M. Boyce]. — 2nd ed. — New York : John Wiley & Sons, 2002. — 736 p. — ISBN 978-0-471-38493-9.

210. Stead D. Numerical modelling of rock slopes using a total slope failure approach / D. Stead, J.S. Coggan // Landslides from Massive Rock Slope Failure. — 2006. — V. 49. — P. 129–138. — DOI: 10.1007/978-1-4020-4037-5_7.

211. Uzielli M. A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides / M. Uzielli, F. Nadim, S. Lacasse, A.M. Kaynia // Engineering Geology. — 2008. — V. 102, N 3. — P. 251–256. — DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.03.0.

212. Van Westen C.J. Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments / C.J. van Westen // Proceedings of the IX International Symposium on Landslides. Landslides: Evaluation and Stabilization. ISL 04, 28 June – 2 July 2004, Rio de Janeiro (Brazil). — 2004. — P. 39–56.

213. Varnes D.J. Chapter 2: Slope movement types and processes / D.J. Varnes // Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. Washington, D.C. — 1978. — Special Report N 176. — P. 11–33.

214. Vavrowsky G. Risk management by the client in the life cycle of a project; focus on geotechnical risk management in the design and construction stage / G. Vavrowsky, R. Pottler // International conference on probabilistics in geotechnics: Technical and economic risk estimation, 15–19 September 2002, Graz (Austria). — 2002. — P. 167–177.

215. Virk A.S. Advanced MT-InSAR landslide monitoring: Methods and trends / A.S. Virk, A. Singh, S. Mittal // Journal of Remote Sensing & GIS. — 2018. — V. 7, N 1. — P. 225.

216. Volkov V. Program and goal-oriented approach to organization of monitoring Deformations of Buildings and Structures / V. Volkov, V. Smirnov // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — N 725–726. — P. 118–123. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.118.

217. Энциклопедия экономиста : официальный сайт. — URL: www.Grandars.ru (дата обращения: 23.04.2024).

218. Zhang M. Is air pollution causing landslides in China? / M. Zhang, M.J. McSaveney // Earth and Planetary Science Letters. — 2018. — V. 481. — P. 284–289.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Координаты точек, м, оползневой сети на Карамышевском оползневом склоне по данным геодезического мониторинга

Таблица А1

		Координаты, м							
Пункт	Коорд.	06.02.07	22.02.07	09.03.07	22.03.07	06.04.07	18.04.07	16.05.07	06.06.07
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	X	12281,032	12281,029	12281,044	12281,032	12281,039	12281,039	12281,026	12281,014
	Y	-2877,682	-2877,680	-2877,675	-2877,669	-2877,687	-2877,680	-2877,681	-2877,684
	H	128,521	128,524	128,525	128,522	128,522	128,523	128,523	128,522
2	X	12290,360	12290,354	12290,369	12290,364	12290,363	12290,363	12290,346	12290,342
	Y	-2871,379	-2871,380	-2871,373	-2871,366	-2871,386	-2871,380	-2871,376	-2871,380
	H	129,248	129,251	129,252	129,249	129,248	129,249	129,249	129,248
3	X	12295,563	12295,558	12295,575	12295,571	12295,567	12295,569	12295,549	12295,554
	Y	-2867,695	-2867,696	-2867,689	-2867,683	-2867,702	-2867,694	-2867,693	-2867,696
	H	133,117	133,119	133,119	133,115	133,113	133,114	133,113	133,112
4	X	12300,216	12300,208	12300,226	12300,220	12300,226	12300,218	12300,202	12300,205
	Y	-2864,536	-2864,538	-2864,532	-2864,517	-2864,546	-2864,537	-2864,537	-2864,554
	H	137,450	137,452	137,452	137,451	137,451	137,452	137,452	137,453
5	X	12304,900	12304,894	12304,904	12304,903	12304,904	12304,903	12304,884	12304,899
	Y	-2861,763	-2861,762	-2861,751	-2861,748	-2861,765	-2861,756	-2861,750	-2861,768
	H	141,010	141,010	141,011	141,010	141,011	141,012	141,012	141,012
6	X	12315,757	12315,754	12315,769	12315,774	12315,766	12315,767	12315,744	12315,772
	Y	-2856,298	-2856,308	-2856,297	-2856,297	-2856,303	-2856,298	-2856,291	-2856,322
	H	140,420	140,420	140,421	140,421	140,420	140,422	140,422	140,423
7	X	12211,896	12211,878	12211,891	12211,880	12211,858	12211,852	12211,819	12211,820
	Y	-2782,774	-2782,788	-2782,798	-2782,798	-2782,822	-2782,821	-2782,844	-2782,841
	H	128,846	128,849	128,853	128,849	128,849	128,850	128,850	128,849
8	X	12223,137	12223,118	12223,129	12223,116	12223,098	12223,093	12223,058	12223,074
	Y	-2775,687	-2775,700	-2775,707	-2775,711	-2775,731	-2775,733	-2775,758	-2775,763
	H	130,630	130,632	130,634	130,632	130,632	130,632	130,632	130,632
9	X	12234,163	12234,140	12234,155	12234,146	12234,133	12234,131	12234,105	12234,128
	Y	-2769,063	-2769,077	-2769,077	-2769,079	-2769,101	-2769,102	-2769,122	-2769,119
	H	132,675	132,672	132,669	132,663	132,660	132,658	132,653	132,650

Пункт	Коорд.	06.02.07	22.02.07	09.03.07	22.03.07	06.04.07	18.04.07	16.05.07	06.06.07
		1	2	3	4	5	6	7	8
10	X	12239,730	12239,714	12239,726	12239,720	12239,704	12239,706	12239,679	12239,687
	Y	-2766,020	-2766,026	-2766,033	-2766,031	-2766,053	-2766,054	-2766,070	-2766,067
	H	136,228	136,217	136,208	136,193	136,181	136,172	136,154	136,147
11	X	12245,432	12245,439	12245,432	12245,429	12245,413	12245,413	12245,403	12245,391
	Y	-2755,219	-2755,215	-2755,234	-2755,225	-2755,251	-2755,251	-2755,247	-2755,257
	H	142,553	142,547	142,535	142,519	142,489	142,489	142,456	142,447
12	X	12251,672	12251,670	12251,671	12251,668	12251,658	12251,669	12251,662	12251,660
	Y	-2759,443	-2759,428	-2759,444	-2759,430	-2759,452	-2759,441	-2759,432	-2759,431
	H	142,926	142,925	142,925	142,925	142,925	142,926	142,926	142,927
13	X	12174,669	12174,653	12174,665	12174,646	12174,615	12174,614	12174,584	12174,622
	Y	-2750,587	-2750,597	-2750,617	-2750,622	-2750,644	-2750,640	-2750,663	-2750,666
	H	127,040	127,043	127,045	127,043	127,044	127,045	127,046	127,047
14	X	12181,117	12181,095	12181,119	12181,094	12181,065	12181,056	12181,033	12181,030
	Y	-2745,205	-2745,213	-2745,239	-2745,239	-2745,257	-2745,251	-2745,279	-2745,276
	H	129,274	129,277	129,278	129,277	129,276	129,277	129,278	129,279
15	X	12201,105	12201,084	12201,088	12201,074	12201,052	12201,047	12201,013	12201,017
	Y	-2730,125	-2730,137	-2730,152	-2730,158	-2730,177	-2730,178	-2730,202	-2730,205
	H	131,377	131,380	131,381	131,380	131,380	131,380	131,381	131,382
16	X	12208,927	12208,913	12208,917	12208,902	12208,885	12208,882	12208,848	12208,852
	Y	-2723,839	-2723,852	-2723,862	-2723,870	-2723,887	-2723,888	-2723,914	-2723,911
	H	136,889	136,888	136,888	136,886	136,885	136,885	136,885	136,884
17	X	12215,257	12215,244	12215,248	12215,234	12215,221	12215,215	12215,190	12215,195
	Y	-2719,056	-2719,067	-2719,073	-2719,078	-2719,091	-2719,089	-2719,109	-2719,104
	H	141,218	141,203	141,191	141,174	141,157	141,148	141,126	141,117
18	X	12221,060	12221,047	12221,048	12221,029	12221,014	12221,015	12220,992	12220,981
	Y	-2714,419	-2714,409	-2714,432	-2714,428	-2714,449	-2714,443	-2714,455	-2714,454
	H	145,295	145,272	145,252	145,229	145,205	145,192	145,160	145,148
19	X	12216,521	12216,515	12216,514	12216,501	12216,483	12216,486	12216,462	12216,461
	Y	-2706,103	-2706,097	-2706,122	-2706,119	-2706,143	-2706,140	-2706,153	-2706,156
	H	146,154	146,130	146,110	146,086	146,058	146,045	146,012	145,998
20	X	12237,825	12237,819	12237,827	12237,823	12237,817	12237,825	12237,809	12237,816
	Y	-2701,998	-2701,983	-2701,998	-2701,992	-2701,996	-2701,991	-2701,994	-2701,992
	H	148,171	148,171	148,171	148,171	148,171	148,171	148,172	148,173

Пункт	Коорд.	06.02.07	22.02.07	09.03.07	22.03.07	06.04.07	18.04.07	16.05.07	06.06.07
		1	2	3	4	5	6	7	8
21	X	12264,106	12264,102	12264,112	12264,096	12264,097	12264,106	12264,089	12264,096
	Y	-2685,243	-2685,240	-2685,257	-2685,248	-2685,260	-2685,250	-2685,253	-2685,253
	H	147,379	147,379	147,379	147,379	147,379	147,380	147,380	147,381
22	X	12151,433	12151,417	12151,424	12151,402	12151,386	12151,375	12151,345	12151,341
	Y	-2729,191	-2729,190	-2729,192	-2729,206	-2729,236	-2729,260	-2729,232	-2729,246
	H	129,039	129,042	129,044	129,042	129,042	129,044	129,044	129,045
23	X	12177,998	12177,980	12177,980	12177,970	12177,945	12177,939	12177,908	12177,913
	Y	-2708,913	-2708,916	-2708,935	-2708,947	-2708,960	-2708,960	-2708,989	-2708,981
	H	131,838	131,841	131,842	131,840	131,839	131,839	131,840	131,840
24	X	12189,739	12189,729	12189,725	12189,712	12189,693	12189,682	12189,657	12189,656
	Y	-2700,565	-2700,569	-2700,587	-2700,598	-2700,611	-2700,606	-2700,639	-2700,631
	H	135,418	135,420	135,420	135,418	135,418	135,418	135,417	135,418
25	X	12197,793	12197,788	12197,785	12197,777	12197,763	12197,758	12197,736	12197,738
	Y	-2694,246	-2694,251	-2694,261	-2694,275	-2694,284	-2694,280	-2694,314	-2694,300
	H	140,533	140,517	140,503	140,483	140,464	140,453	140,428	140,418
26	X	12204,466	12204,453	12204,463	12204,444	12204,433	12204,423	12204,391	12204,408
	Y	-2689,956	-2689,963	-2689,975	-2689,988	-2690,001	-2689,998	-2690,005	-2690,008
	H	145,712	145,691	145,673	145,650	145,626	145,613	145,582	145,569
27	X	12207,893	12207,884	12207,882	12207,868	12207,853	12207,855	12207,831	12207,832
	Y	-2692,404	-2692,404	-2692,424	-2692,424	-2692,444	-2692,440	-2692,458	-2692,457
	H	146,557	146,534	146,514	146,490	146,464	146,450	146,418	146,404
28	X	12230,520	12230,517	12230,521	12230,518	12230,510	12230,522	12230,513	12230,514
	Y	-2672,523	-2672,523	-2672,537	-2672,535	-2672,539	-2672,527	-2672,529	-2672,528
	H	148,633	148,633	148,632	148,633	148,633	148,634	148,634	148,634
29	X	12248,694	12248,689	12248,703	12248,690	12248,690	12248,701	12248,685	12248,690
	Y	-2658,611	-2658,610	-2658,619	-2658,616	-2658,625	-2658,609	-2658,617	-2658,614
	H	148,242	148,242	148,242	148,242	148,242	148,243	148,243	148,244
30	X	12127,570	12127,566	12127,559	12127,554	12127,529	12127,523	12127,496	12127,491
	Y	-2693,087	-2693,084	-2693,108	-2693,108	-2693,127	-2693,128	-2693,141	-2693,141
	H	131,624	131,626	131,626	131,623	131,622	131,621	131,620	131,620
31	X	12142,240	12142,232	12142,227	12142,223	12142,199	12142,189	12142,169	12142,164
	Y	-2676,697	-2676,694	-2676,720	-2676,725	-2676,740	-2676,739	-2676,757	-2676,756
	H	133,251	133,255	133,258	133,251	133,248	133,248	133,248	133,248

Пункт	Коорд.	06.02.07	22.02.07	09.03.07	22.03.07	06.04.07	18.04.07	16.05.07	06.06.07
		1	2	3	4	5	6	7	8
32	X	12150,173	12150,167	12150,164	12150,164	12150,146	12150,134	12150,119	12150,119
	Y	-2667,317	-2667,312	-2667,332	-2667,334	-2667,346	-2667,343	-2667,357	-2667,354
	H	133,884	133,877	133,870	133,856	133,845	133,839	133,825	133,820
33	X	12163,161	12163,161	12163,153	12163,151	12163,130	12163,120	12163,110	12163,106
	Y	-2654,749	-2654,756	-2654,775	-2654,793	-2654,810	-2654,809	-2654,837	-2654,836
	H	142,088	142,078	142,069	142,056	142,043	142,036	142,021	142,014
34	X	12170,715	12170,716	12170,722	12170,718	12170,707	12170,713	12170,700	12170,703
	Y	-2646,787	-2646,796	-2646,791	-2646,791	-2646,801	-2646,792	-2646,803	-2646,791
	H	149,422	149,422	149,422	149,422	149,422	149,422	149,421	149,422
35	X	12187,186	12187,184	12187,193	12187,186	12187,182	12187,190	12187,183	12187,181
	Y	-2626,729	-2626,725	-2626,738	-2626,731	-2626,735	-2626,723	-2626,730	-2626,720
	H	149,384	149,384	149,384	149,384	149,385	149,385	149,385	149,386
36	X	12218,546	12218,542	12218,555	12218,547	12218,544	12218,552	12218,546	12218,549
	Y	-2597,852	-2597,859	-2597,861	-2597,861	-2597,858	-2597,847	-2597,854	-2597,849
	H	148,482	148,481	148,482	148,482	148,483	148,484	148,484	148,484
37	X	12074,032	12074,027	12074,027	12074,033	12074,004	12074,005	12073,991	12073,984
	Y	-2650,488	-2650,476	-2650,493	-2650,486	-2650,494	-2650,496	-2650,491	-2650,493
	H	129,701	129,705	129,704	129,699	129,699	129,699	129,699	129,698
38	X	12085,991	12085,990	12085,994	12086,004	12085,981	12085,979	12085,976	12085,973
	Y	-2634,883	-2634,876	-2634,886	-2634,878	-2634,885	-2634,886	-2634,875	-2634,875
	H	129,950	129,953	129,962	129,955	129,952	129,952	129,950	129,949
39	X	12089,586	12089,584	12089,587	12089,596	12089,574	12089,573	12089,568	12089,563
	Y	-2630,744	-2630,738	-2630,750	-2630,744	-2630,751	-2630,754	-2630,748	-2630,745
	H	130,697	130,697	130,695	130,688	130,682	130,680	130,675	130,673
40	X	12094,180	12094,183	12094,186	12094,194	12094,173	12094,174	12094,170	12094,162
	Y	-2624,477	-2624,471	-2624,481	-2624,478	-2624,485	-2624,487	-2624,480	-2624,486
	H	134,155	134,151	134,146	134,134	134,125	134,122	134,113	134,112
41	X	12106,614	12106,622	12106,622	12106,622	12106,608	12106,606	12106,607	12106,620
	Y	-2609,961	-2609,957	-2609,963	-2609,962	-2609,953	-2609,953	-2609,944	-2609,946
	H	149,438	149,437	149,437	149,437	149,438	149,438	149,437	149,439
42	X	12132,033	12132,040	12132,035	12132,035	12132,038	12132,033	12132,033	12132,040
	Y	-2565,670	-2565,670	-2565,672	-2565,674	-2565,670	-2565,667	-2565,667	-2565,663
	H	150,488	150,487	150,487	150,487	150,488	150,488	150,486	150,486

Пункт	Коорд.	06.02.07	22.02.07	09.03.07	22.03.07	06.04.07	18.04.07	16.05.07	06.06.07
		1	2	3	4	5	6	7	8
43	X	12235,352	12235,342	12235,340	12235,325	12235,307	12235,308	12235,289	12235,282
	Y	-2726,732	-2726,728	-2726,747	-2726,739	-2726,762	-2726,755	-2726,760	-2726,764
	H	141,356	141,337	141,322	141,303	141,283	141,283	141,245	141,235
44	X	12197,927	12197,928	12197,924	12197,911	12197,896	12197,899	12197,877	12197,871
	Y	-2676,506	-2676,507	-2676,525	-2676,521	-2676,544	-2676,535	-2676,549	-2676,540
	H	147,397	147,378	147,362	147,342	147,320	147,309	147,282	147,271
45	X	12184,417	12184,414	12184,413	12184,404	12184,379	12184,385	12184,358	12184,357
	Y	-2660,034	-2660,049	-2660,054	-2660,048	-2660,073	-2660,066	-2660,082	-2660,080
	H	147,607	147,590	147,576	147,558	147,537	147,527	147,502	147,492
46	X	12198,436	12198,440	12198,447	12198,440	12198,437	12198,441	-	-
	Y	-2666,105	-2666,107	-2666,112	-2666,105	-2666,117	-2666,106	-	-
	H	149,219	149,219	149,220	149,218	149,217	149,217	149,216	149,217

Планы смещений оползня с изолиниями в пространстве

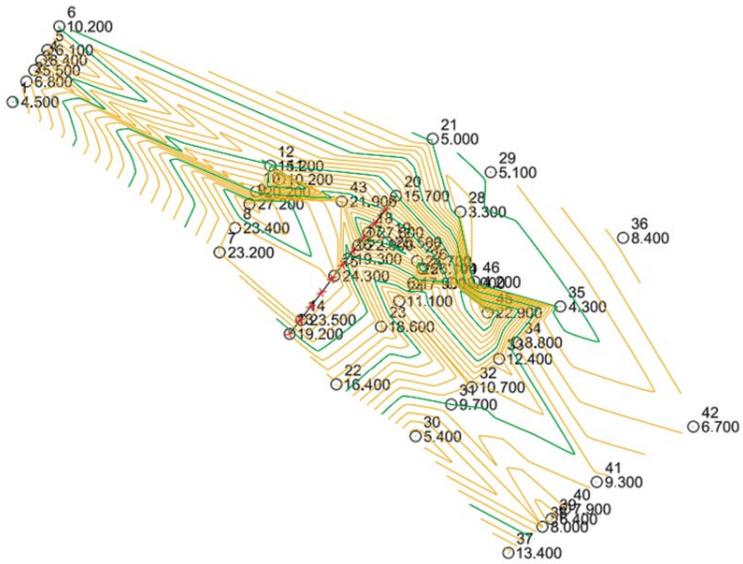


Рис. Б.1. План смещений оползня в 1-м цикле

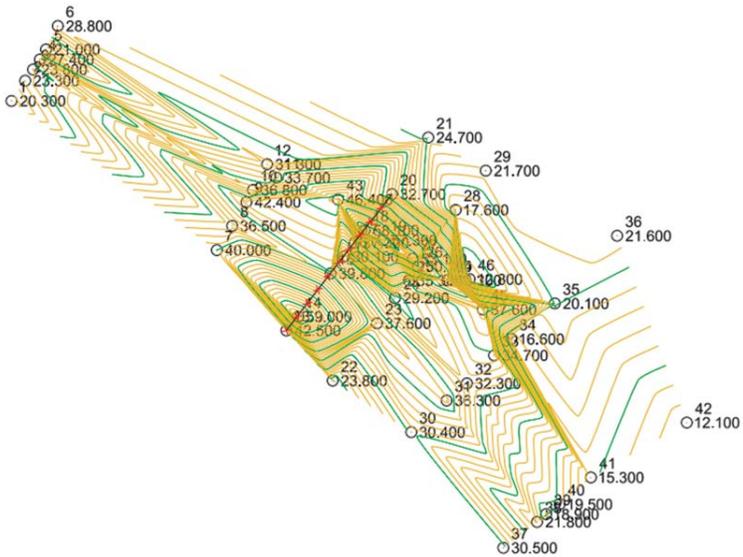


Рис. Б.2. План смещений оползня во 2-м цикле

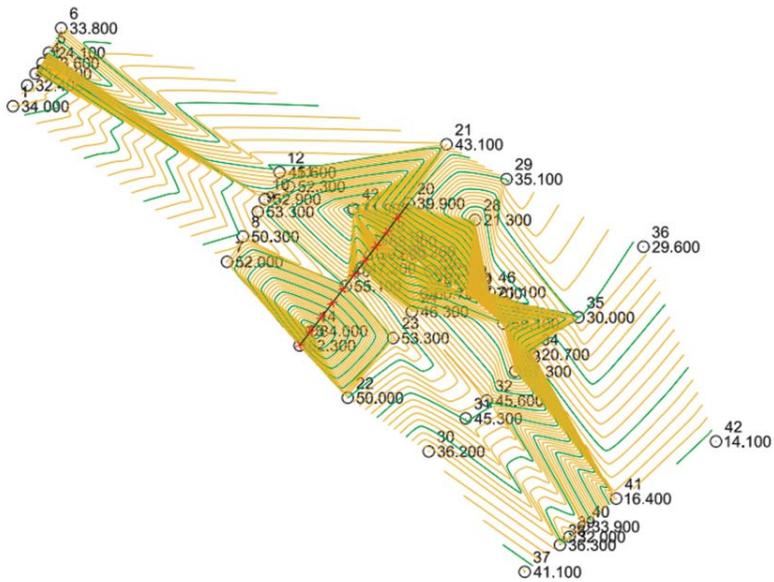


Рис. Б.3. План смещений оползня в 3-м цикле

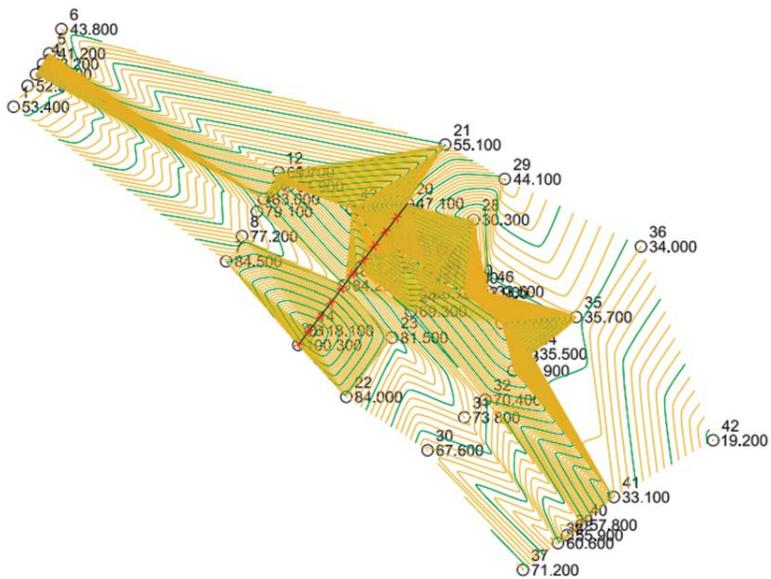


Рис. Б.4. План смещений оползня в 4-м цикле

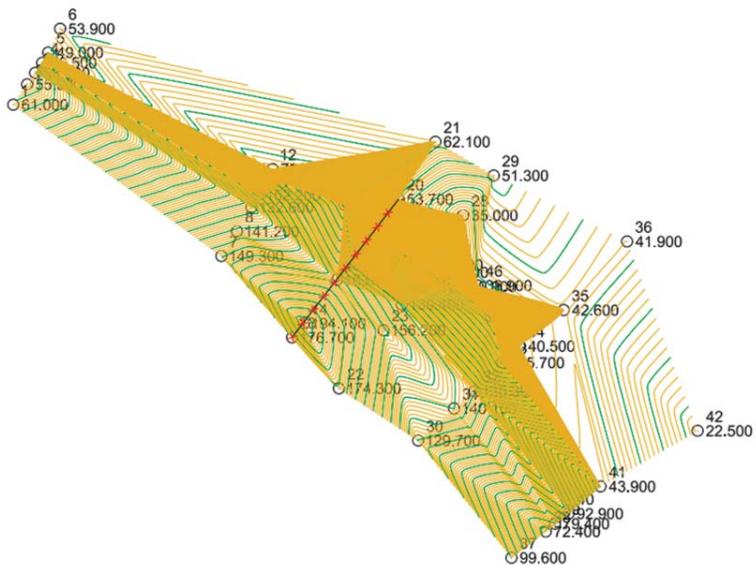


Рис. Б.5. План смещений оползня в 5-м цикле

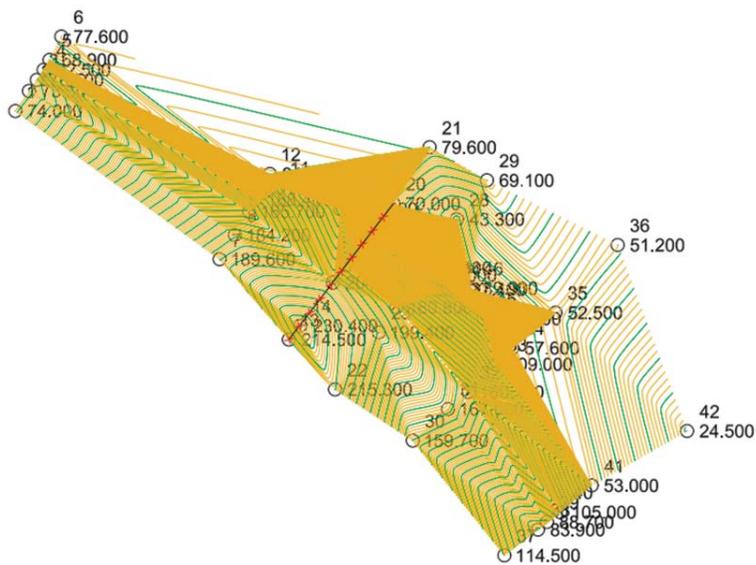
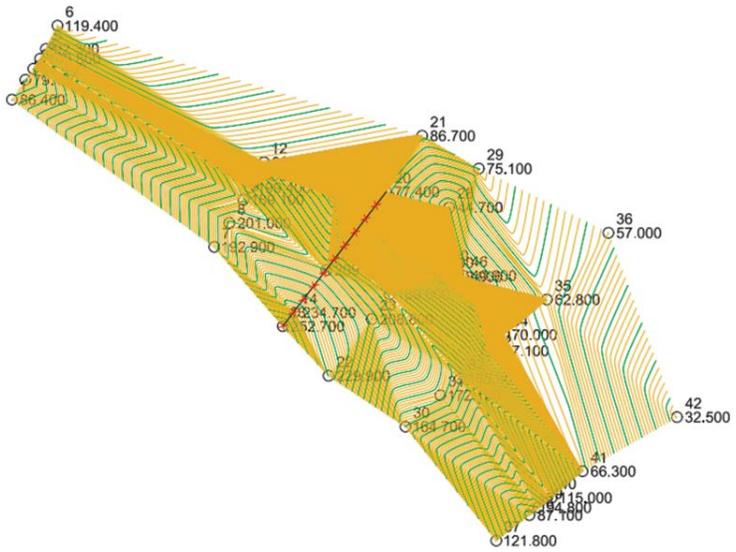


Рис. Б.6. План смещений оползня в 6-м цикле



Планы смещений оползня с изолиниями во времени

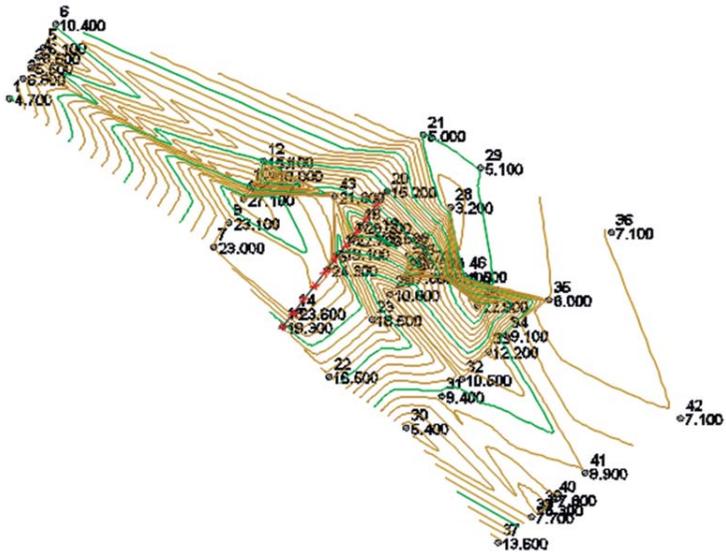


Рис. В.1. План смещений оползня в 1-м цикле

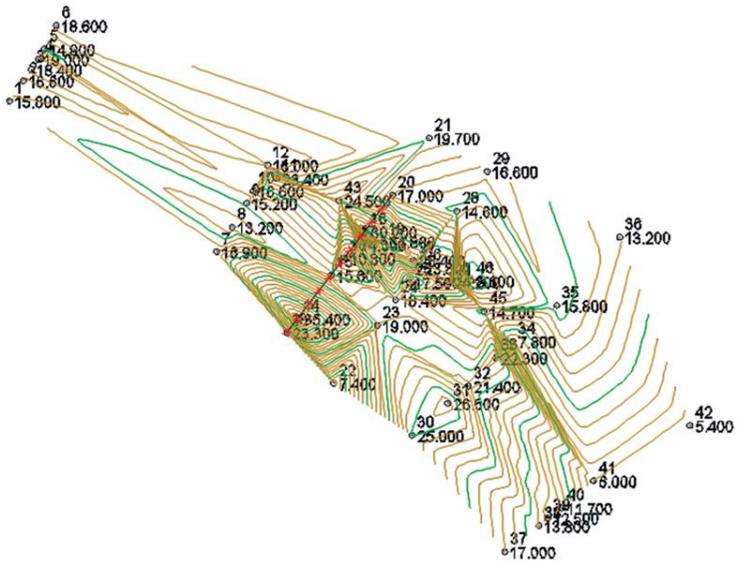


Рис. В.2. План смещений оползня во 2-м цикле

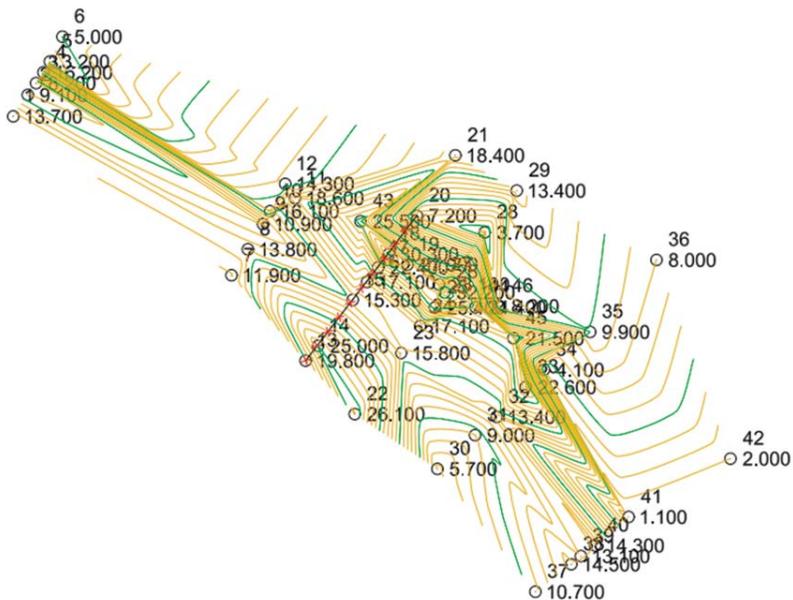


Рис. В.3. План смещений в 3-м цикле

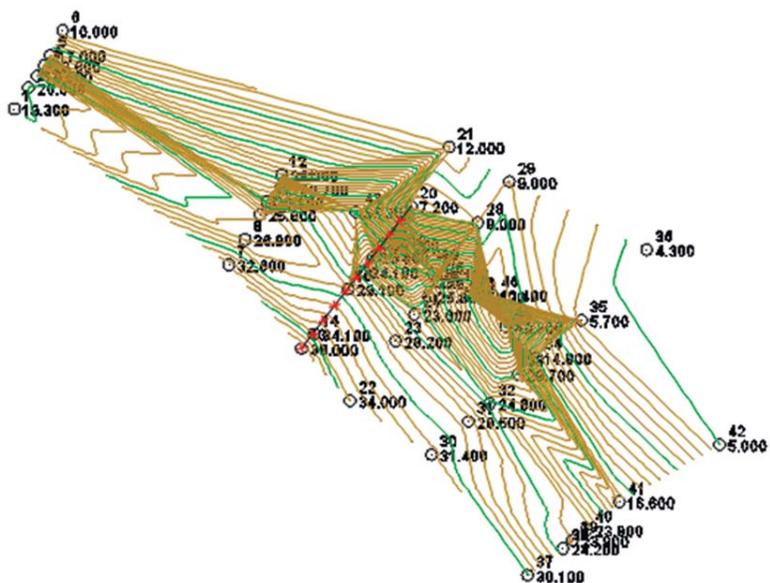


Рис. В.4. План смещений оползня в 4-м цикле

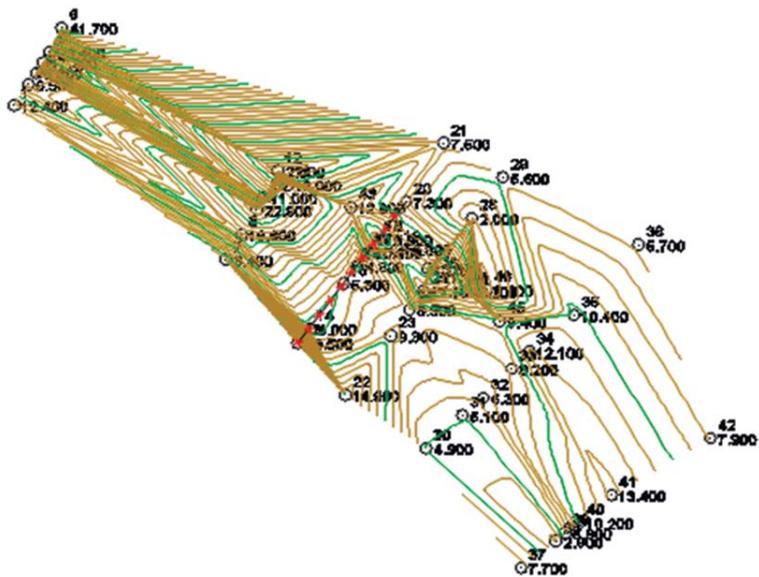
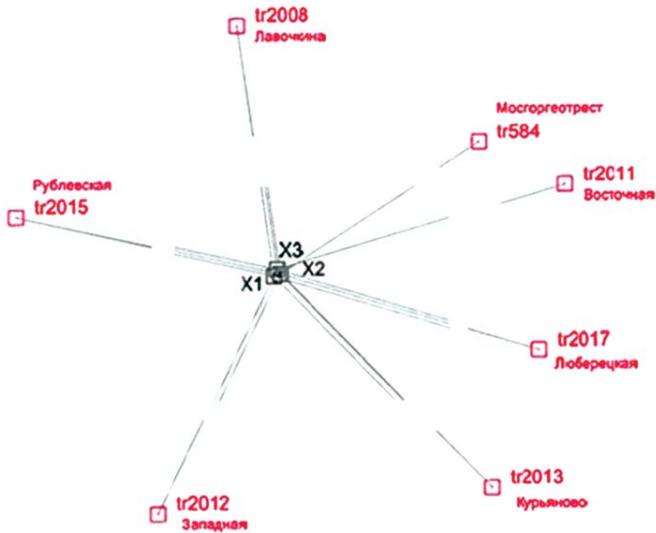


Рис. В.7. План смещений оползня в 7-м цикле

**Пример создания геодезической сети на склоне р. Москвы по адресу:
ул. Береговая, вл. 3**

Виды работ:

- закладка геодезических пунктов (реперов);
- определение координат спутниковыми и линейно-угловыми методами;
- определение нормальных высот пунктов геометрическим и тригонометрическим нивелированием;
- математическая обработка результатов измерений.



Условные обозначения:
□ исходный пункт КГС Москвы (базовые станции СГГО Москвы)
 определяемый пункт

					Должность: В/ММО.17			
					Звание: ООО "Мавейт"			
"ООО" "Мавейт" является зарегистрированной организацией, осуществляющей проектные и изыскательские работы в области геодезии, геоинформационных технологий, а также кадастровые работы, в том числе кадастровые инженерные работы на территории Российской Федерации, и имеет в собственности инженерно-технические средства.								
					По адресу: Западная административный округ города Москвы, Береговой пр., вл. 3			
Изм.	К.уч.	Лист	Число	Подп.	Дата	Страница	Лист	Листов
Разработ.	Исполнитель	М.П.				Создание ГРО		
Продуман	Контроль	И.П.				Схема спутниковых определений		ГБУ "Мосорггеотрест"
					Дата оформления: 09.07.2011			

Рис. Г.1. Схема спутниковых определений

Таблица Г.1

Среднеквадратическая погрешность урavnенных координат

Номер пункта	$M_x, \text{ м}$	$M_y, \text{ м}$
X1	0,0029	0,0025
X2	0,0027	0,0023
X3	0,0026	0,0023

СКП взаимного положения смежных пунктов геодезической сети не превысила 1 см.

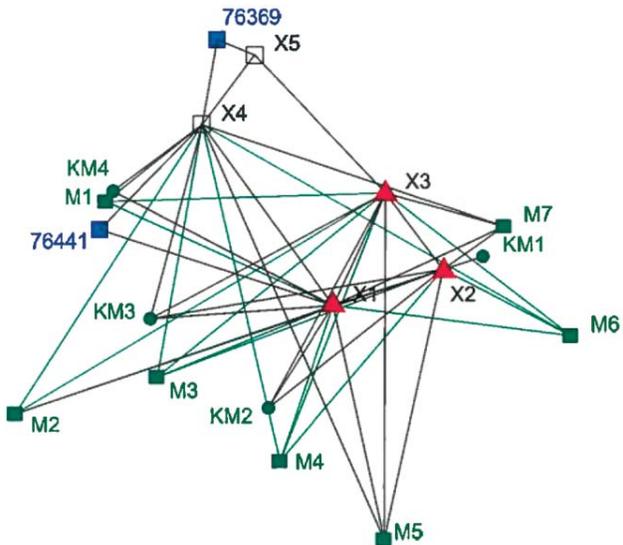


Рис. Г.2. Схема линейно-угловых измерений

Таблица Г.2

Среднеквадратическая погрешность уравненных координат

Номер пункта	M_x , м	M_y , м
76369	0,0047	0,0057
76441	0,0071	0,0022
M1	0,0069	0,0024
M2	0,0081	0,0045
M3	0,0058	0,0034
M4	0,0033	0,0052
M5	0,0020	0,0069
M6	0,0047	0,0028
M7	0,0033	0,0019

СКП взаимного положения смежных пунктов геодезической сети не превысила 3 см.

Вывод: создание геодезической сети на оползневых склонах по точности соответствует действующим сводам правил. Необходим новый подход к проектированию сети.

Научное издание

Симонян Владимир Викторович

**МЕТОДОЛОГИЯ
ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОНИТОРИНГА
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
СКЛОНОВЫХ СИСТЕМ**

Редактор *Л.В. Себова*
Корректор *В.К. Чупрова*
Верстка и дизайн обложки *Д.Л. Разумного*

Подписано в печать 11.07.2024. И-61.24. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 10,7. Тираж 100 экз. Заказ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет».
129337, Москва, Ярославское ш., 26.

Издательство МИСИ – МГСУ.
Тел.: (495) 287-49-14, вн. 14-23, (499) 183-91-90, (499) 183-97-95.
E-mail: ric@mgsu.ru, rio@mgsu.ru

Отпечатано в типографии Издательства МИСИ – МГСУ.
Тел.: (499) 183-91-90, (499) 183-67-92, (499) 183-91-44.