

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет»

На правах рукописи

Симонян Владимир Викторович



МЕТОДОЛОГИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
ЗАСТРОЕННЫХ СКЛОНОВЫХ СИСТЕМ

Специальность 25.00.32 – Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Волков Виктор Иванович

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ СКЛОНОВЫХ СИСТЕМ И ИХ БЕЗОПАСНОСТИ.....	20
1.1 Проблемные вопросы комплексной оценки оползневых рисков и обеспечения оползневой безопасности склоновых систем.....	20
1.1.1 Общие вопросы проблемы оценки рисков оползневого характера.....	20
1.1.2 Структурные особенности оценки рисков в сложных склоновых системах.....	24
1.1.3 Факторы оползнеобразования и спектр смещений на оползневых склонах	33
1.2 Состояние разработки проблемы геодезического обеспечения мониторинга и безопасности инженерных сооружений на оползнеопасных территориях.....	48
1.2.1 Анализ существующих геодезических методов оценки и обеспечения безопасности инженерных сооружений на оползнеопасных территориях.....	48
1.2.2 Современная концепция совершенствования геодезических методов контроля за состоянием объектов инженерной геодинамики на оползневых территориях...51	51
1.3 Выводы по Главе 1	56
ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВЫХ РИСКОВ В СКЛОНОВЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ФАКТОРОВ.....	58
2.1 Методы прогнозирования оползневых опасностей и оценки вызываемых ими рисков.....	58
2.2 Анализ существующих методов оценки оползневых опасностей	60
2.2.1 Качественный региональный прогноз оползневой опасности.....	61
2.2.2 Количественный региональный прогноз оползневой опасности.....	61
2.2.3 Количественный локальный прогноз оползневой опасности.....	67
2.3 Сравнительный анализ численных критериев эффективности различных	

методов оценки опасных оползневых процессов.....	69
2.4 Методика анализа оползневой устойчивости среды склоновых систем.....	79
2.5 Выводы по Главе 2.....	85
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОСТАНОВКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ.....	86
3.1 Особенности постановки геодезического мониторинга оползневых процессов.....	86
3.2 Современные геодезические средства и методы мониторинга оползней.....	89
3.3 Обоснование точности геодезических наблюдений деформаций оползней.....	92
3.4 Обоснование периодичности геодезических наблюдений деформаций оползней.....	96
3.5 Разработка методов создания опорной геодезической сети на склоновых территориях.....	99
3.5.1 Метод полигонометрии.....	100
3.5.2 Линейно-угловые сети.....	109
3.6 Уравнивание свободных полигонометрических сетей.....	122
3.7 Уравнивание результатов повторных циклов наблюдений.....	129
3.8 Обоснование точности наблюдений деформаций зданий и сооружений, возведенных на склоновых территориях.....	132
3.9 Корректировка расчетных характеристик грунтов по данным геодезического мониторинга.....	138
3.10 Выводы по Главе 3.....	142
ГЛАВА 4 ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБОБЩЕННОГО СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЭЛЛИПСОИДА СМЕЩЕНИЙ ОПОЛЗНЕЙ.....	144
4.1 Механико-математическая модель устойчивого равновесия оползня.....	144
4.2 Механико-математическая модель устойчивого равновесия оползня с цилиндрической поверхностью скольжения.....	147
4.3 Теоретическое обоснование построения обобщенных среднеквадратических эллипсоидов смещений оползней.....	153

4.4 Выводы по Главе 4.....	160
ГЛАВА 5 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТАНОВКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ И ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОИНГА НА ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНАХ.....	161
5.1 Методика расчёта силы и ускорения оползня. Критерий оценки устойчивости оползня.....	161
5.2 Вероятностный анализ потенциальных возможностей оползневых смещений.....	171
5.3 Учет влияния сейсмического воздействия на скорость смещения оползней..	177
5.4 Учет влияния атмосферных осадков на скорость смещения оползней.....	181
5.5 Выводы по Главе 5.....	183
ГЛАВА 6 МЕТОДОЛОГИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ РИСКОВ В СКЛОНОВЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОДНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ.....	184
6.1 Алгоритм комплексной оценки рисков в склоновых системах, подвергающихся воздействию оползневых факторов.....	184
6.2 Процедура оценки степени оползневого риска и уровня безопасности склоновых систем.....	187
6.2.1 Определение интегрального критерия уровня оползневой опасности.....	188
6.2.2 Определение интегрального критерия уровня оползневой уязвимости.....	199
6.2.3 Категории степени оползневого риска.....	208
6.3 Оценка степени оползневого риска районов и регионов (ранжирование оползневой безопасности).....	209
6.4 Прогноз скорости смещения оползней как основа для прогнозирования оползневых рисков.....	210
6.5 Определение допустимого уровня оползневого риска.....	214
6.6 Социально-экономические аспекты управления оползневым риском.....	217
6.7 Выводы по Главе 6.....	219
ГЛАВА 7 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СМЕЩЕНИЙ ОПОЛЗНЕЙ.....	220

7.1	Общая характеристика экспериментального оползневого склона.....	220
7.2	Построение обобщенных среднеквадратических эллипсоидов смещений оползней на примере Карамышевского оползня.....	231
7.3	Построение автокорреляционных функций и их анализ.....	229
7.4	Расчеты напряженно-деформированного состояния склонов с учетом ползучести грунтов основания на примере Карамышевского оползня.....	242
7.5	Геомеханическая модель Карамышевского склона с учетом результатов геодезического мониторинга.....	247
7.6	Применение геомеханической модели склона для выбора типа проектируемого фундамента сооружения.....	252
7.7	Выводы по Главе 7.....	257
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	259
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	263
	ПРИЛОЖЕНИЕ А Координаты точек оползневой сети по данным геодезического мониторинга.....	295
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б Планы смещений оползня с изолиниями в пространстве.....	300
	ПРИЛОЖЕНИЕ В Планы смещений оползня с изолиниями во времени.....	304
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г Пример создания геодезической сети на склоне р. Москва по адресу: ул. Береговая, вл. 3.....	308
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д Программа «Обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений оползней» на языке Delphi.....	311
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е Программа «Расчет величин смещений оползней (смещения, направления)» на языке Delphi.....	316
	ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Расчет повреждаемости здания на оползневом склоне...321	
	ПРИЛОЖЕНИЕ И Анализ уязвимости зданий и сооружений на оползнеопасных территориях.....	323
	ПРИЛОЖЕНИЕ К Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных.....	334
	ПРИЛОЖЕНИЕ Л Акты внедрения.....	337

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. 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» обновлять 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» [19]. При этом, весьма значимыми и актуальными встают вопросы, которые исходят от геологической составляющей окружающей среды (оползневые опасности или риски) [110], [254], [272]. Следовательно, гарантия безопасности сооружений на склоновых территориях и населения, их защищенность от оползневых процессов есть одно из неперемennых условий для устойчивого развития территорий.

Геодезические наблюдения на оползневых склонах – это один из важнейших методов инженерной геодинамики, основными задачами которых являются определение 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 [87]. 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 [107]. ЮНЕСКО в 2007 году объявила об активизации борьбы с оползнями.

Согласно [58] в мире за период с 2002 по 2013 годы от оползней погибло 89177 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 оползневого процесса. Очевидно, однако, что строительные работы и возведенные сооружения приводят к изменению НДС грунтов склона и к возможному развитию опасного оползневого процесса и, как, следствие, к возникновению чрезвычайной ситуации: к разрушению сооружений и к 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 Осипова В.И. суммарный ежегодный ущерб от оползней, селей и обвалов в стране составляет не менее 1 млрд долларов в год [108]. 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 этих задач и проблем. Но для этого необходимо проведение геодезического мониторинга. Основное требование, предъявляемое к ним, 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 создает 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 отдельно в зависимости от объекта наблюдений. Поэтому никогда и не ставилась задача по оценке риска и уровня безопасности склоновых территорий на основе применения геодезических методов. Т.е., 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 склоновой системы.

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. [238].

Исследования по изучению оползневых процессов соответствует 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, 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 № 623 от 16 декабря 2015 года (п. 21).

Вместе с тем, повышается необходимость совершенствования теоретических положений и методов, методик, алгоритмов и технологий изучения оползневых процессов на основе моделирования меняющихся во времени геодезических (смещения, закономерности движений, поля деформаций) параметров. 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 [87].

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.

Таким образом, разработка методологии геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем является своевременной и актуальной проблемой, решение которой повышает роль геодезического обеспечения безопасности зданий и сооружений в склоновых системах.

Диссертационная работа посвящена решению **актуальной научной проблемы** – разработке методологии геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем.

Научно-техническая гипотеза состоит в предположении, что геодезические методы изучения оползневых процессов являются основой для обеспечения безопасности сооружений в склоновых системах.

Объектом исследования являются склоновые системы, подвергающиеся воздействию опасных оползневых процессов.

Предмет исследования составляют оценки рисков по данным геодезического мониторинга.

Цель работы: разработать теоретические основы постановки геодезического мониторинга деформационных процессов склоновых систем, обеспечивающие получение обоснованной оценки риска и уровня оползневой безопасности.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ современного состояния проблемы геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем.

2. Обосновать теоретически и подтвердить экспериментально необходимость системного подхода к математической обработке разнородных результатов геодезических наблюдений.

3. Обосновать требования к точности геодезических наблюдений деформаций оползней в пространстве для получения точных величин смещений оползня в зависимости от его скорости, необходимых для последующего анализа динамики оползневых процессов.

4. Обосновать периодичность проведения циклов геодезического мониторинга на оползневых склонах для получения оптимального интервала времени по наблюдениям деформаций оползней.

5. Разработать новый подход к проектированию опорных геодезических сетей на оползневых склонах в виде полигонометрических ходов с заданной точностью при возможных различиях его геометрических параметров для проведения работ по геодезическому мониторингу.

6. Разработать новая методику построения обобщенного среднеквадратического эллипсоида смещений оползневого массива по результатам повторных геодезических наблюдений.

7. Разработать метод обработки результатов геодезического мониторинга деформационных процессов склоновых систем, включающий построение математических моделей, основанных на совокупности процедур системного анализа геодезической информации и обеспечивающих получение обоснованных комплексных оценок оползневых рисков и уровня оползневой безопасности.

8. Теоретически обосновать, разработать и исследовать на основе данных геодезического мониторинга математическую модель оценки оползневой безопасности склоновых систем и оценки оползневого риска, позволяющих осуществить ранжирование склоновых систем по степени оползневых рисков.

9. Определить эффективность применения теории случайных процессов для анализа динамики оползневого процесса методом корреляционного анализа по данным геодезического мониторинга.

10. Разработать численный критерий количественного анализа эффективности методов оценки опасных оползневых процессов.

11. Разработать методику корректировки расчетных физико-механических характеристик грунтов склоновых систем на основе величин смещений оползней, полученных по результатам повторных геодезических наблюдений, выполненных в составе мониторинга деформационных процессов.

Методология и методы исследований. При разработке методологии геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных

склоновых систем впервые применены методы системного анализа к изучению оползневых процессов геодезическими методами. Были использованы общенаучные методы исследования: статистические и теории погрешностей, теории вероятностей, теории математической обработки результатов геодезических наблюдений, метода конечных элементов, математического моделирования, формализации, современные вычислительные средства и программное обеспечение. Математическая обработка пространственно-временных рядов повторных геодезических наблюдений выполнялись по авторской программе в среде программирования Delphi и специализированных пакетов прикладных программ. Реализация построенных математических моделей осуществлялась на основе результатов натурных геодезических наблюдений.

Работа с базами данных осуществлялась в среде MS Excel. Все рисунки были созданы в программе AutoCAD Autodesk Civil 3D 2017 и MS Excel.

Степень разработанности темы исследований. Огромный вклад в решении задач изучения оползневых процессов геодезическими методами внесли отечественные и зарубежные ученые: Е.И. Аврунев, П.И. Брайт, М.Я. Брынь, В.И. Волков, А.Г. Григоренко, Ю.П. Гуляев, А.К. Зайцев, А.П. Карпик, В.И. Кафтан, Н.Г. Келль, Е.Б. Ключин, А.А. Кузин, А.И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, С.В. Марфенко, Д.Ш. Михелев, М.Г. Мустафин, В.К. Панкрушин, Г.П. Постоев, А.Л. Рагозин, В.А. Середович, Г.И. Тер-Степанян, А.В. Устинов, И.К. Фоменко, А.И. Шеко, Г.А. Шеховцев, Х.К. Ямбаев и др.

Научная новизна:

1. Разработаны теоретические основы постановки геодезического мониторинга оползневых процессов на склоновых территориях, включающие алгоритмы для определения параметров опорных геодезических сетей и периодичности повторных геодезических наблюдений с учетом требуемой точности определения кинематических характеристик деформационных процессов.

2. Разработана новая методика построения обобщенного среднеквадратического эллипсоида смещений оползневого массива по результатам повторных геодезических наблюдений.

3. Разработан метод обработки результатов геодезического мониторинга деформационных процессов склоновых систем, включающий построение математических моделей, основанных на совокупности процедур системного анализа геодезической информации и обеспечивающих получение обоснованных оценок оползневых рисков и уровня оползневой безопасности.

4. Разработана, теоретически обоснована и исследована на основе данных геодезического мониторинга математическая модель для оценки оползневой безопасности склоновых систем и оценки оползневого риска с позиций ранжирования склоновых систем по степени оползневых рисков.

5. Установлена эффективность применения теории случайных процессов для анализа динамики оползневого процесса методом корреляционного анализа по данным геодезического мониторинга, позволяющая надежно прогнозировать величины смещений и на основе этого вносить соответствующие коррективы в программу геодезических наблюдений (плотность, периодичность, точность и т.д.).

6. Разработан численный критерий для количественного анализа эффективности методов оценки опасных оползневых процессов.

7. Разработана методика корректировки расчетных физико-механических характеристик грунтов склоновых систем на основе величин смещений оползней, полученных по результатам повторных геодезических наблюдений, выполненных в составе мониторинга деформационных процессов.

Практическая значимость. Основные положения, выводы и рекомендации исследования ориентированы на использование изыскателями, а также проектными организациями, где используются сведения об устойчивости застраиваемых склоновых систем, поскольку позволяют им при разработке проектов освоения СС руководствоваться научно обоснованными методами оценки рисков и уровня оползневой безопасности. Использование обоснованных в работе методов управления рисками приведет к повышению эффективности обеспечения стратегии оползневой безопасности СС посредством модернизации постановки геодезического мониторинга и применения новых методов обработки его результатов. Это

обеспечит решение актуальной проблемы эффективного использования склоновых природно-технических систем под застройку.

Теоретическая значимость. Основные положения диссертации создают теоретическую базу дальнейшего исследований вопросов постановки геодезического мониторинга деформационных процессов, развитие методов математической обработки результатов повторных инженерно-динамических наблюдений, оценки рисков природно-технических динамических систем, а также вопросов их ранжирования.

Реализация основных результатов исследований. Результаты, полученные в ходе исследований по данному направлению, использовались при оценке и прогнозе геомеханического состояния породного массива в районе строительства перегонных тоннелей на участке «Петровско-Разумовская» - «Селигерская» и станционных комплексов «Окружная», «Верхние Лихоборы» и «Селигерская» по объекту «Люблинско-Дмитровская линия станция «Петровско-Разумовская» - «Селигерская» (ООО «КИПС-2», г. Москва, 2016-2017 гг.); при оценке риска оползневой опасности для разработки проекта многофункционального комплекса в Московской области, Сельское поселение Молоковское, д. Андреевское (2017 г.). Результаты исследования внедрены в практику учебного процесса на кафедре инженерных изысканий и геоэкологии в Московском государственном строительном университете (НИУ МГСУ) (курс «Геодезический мониторинг возведения объектов», 2016-2017 гг.), а также на кафедре геодезии и геоинформатики Государственного университета по землеустройству (ГУЗ) (курс «Инженерной геодезии», 2016-2017 гг.). Получены также два Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2017616941 «Обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений оползней» (20.06.2017 г.) [199], № 2020663549 «Расчет величин смещений оползней (длина, направление)» (28.10.2020 г.) [204] и Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620977 «Оценка оползневых рисков» (18.05.2021 г.) [206].

Акты о внедрении результатов работы из группы компаний КИПС ООО «КИПС-2», ООО «ЭнергоПоинт», ФГОУ Государственного университета по землеустройству, НИУ МГСУ (Московский государственный строительный университет), Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616941 «Обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений оползней», Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663549 «Расчет величин смещений оползней (длина, направление)» и Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620977 «Оценка оползневых рисков» прилагаются в Приложении.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные теоретические основы постановки геодезического мониторинга деформационных процессов склоновых систем обеспечивают определение в установленные сроки с научно-обоснованной точностью скоростей смещений оползней для последующего изучения механизмов оползневых процессов.

2. Методика математическо-статистического анализа результатов повторных геодезических наблюдений за смещениями оползней и математическая модель смещения оползней в виде обобщенного среднеквадратического эллипсоида смещений оползней позволяют оперативно выполнять математическую обработку и пространственно-временную интерпретацию результатов геодезических наблюдений, что существенно ведет к повышению точности параметров оползневых смещений.

3. Геодезическое обеспечение мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем должно быть реализовано в математических моделях оценки оползневого риска и уровня оползневой безопасности склоновых систем, позволяющих разрабатывать оптимальные стратегические направления повышения безопасности эксплуатации сооружений в пределах склоновых систем.

4. Системный анализ результатов повторных геодезических наблюдений на возможность реализации всех негативных воздействий на здания и сооружения со стороны оползневых процессов, обеспечивает получение обоснованных комплексных оценок интегрального критерия уровня оползневой опасности и оползневой уязвимости.

5. Корректировки расчетных физико-механических характеристик грунтов, слагающих склон, с учетом результатов повторных геодезических наблюдений, обеспечивают точный прогноз деформаций поверхности склона во времени при проявлении процессов вторичной консолидации в грунтах оснований, и позволяют получать достоверную информацию для проектирования зданий и сооружений.

Степень достоверности результатов исследования определяется обоснованностью применения методов исследования, подтверждением результатов теоретических исследований и интерпретации результатов геодезического мониторинга между собой, сопоставимостью полученных результатов теоретических исследований с результатами полевых геодезических работ на конкретном оползневом склоне, апробацией результатов исследований, внедрением результатов исследований.

Личный вклад автора заключается в формулировании и обосновании научной проблемы, постановке цели и конкретных задач настоящих исследований, проведении необходимых численных экспериментов, создания математических моделей, методов анализа и оценки оползневых рисков, формулировке и разработке всех основных положений, определяющих научную новизну работы и ее практическую значимость.

Апробация результатов исследования. Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы подтверждены апробацией на всероссийских и международных научно-практических конференциях:

- на научной конференции молодых ученых ГУЗ «Актуальные проблемы землепользования, землеустройства и кадастров» (Москва, 2006 г.);
- на научно-практической конференции «Совершенствование системы образования в области землеустройства и кадастров» (Москва, 2007 г.);
- на 5-ой Международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (Москва, 2009 г.);
- на научно-практической конференции «Проблемы землеустройства и кадастра недвижимости в реализации государственной земельной политики и охраны окружающей среды» (Москва, 2009 г.);

- на IV Всероссийской конференции «Перспективы развития инженерных изысканий для строительства в РФ» (Москва, 2009 г.);
- на VI Международной научно-практической конференции «Землеустройство, кадастр и геопространственные технологии» (Москва, 2010 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Землеустроительные, кадастровые и геодезические работы. Современные проблемы и инновационные методы их решения» (Москва, 2015 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Новые информационные технологии в науке» (Уфа, 2016 г.);
- на объединенном научно-техническом совете отделения № 2 НИУ МГСУ «Надежность строительных конструкций и оснований» 6 мая 2016 г.;
- на VIII Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых аспирантов и студентов «Инновационные процессы в сельском хозяйстве» (Москва, 2016 г.);
- на Международной конференции «Геоэкологические проблемы национальной безопасности России. Техногенез, инженерная геодинамика и мониторинг инженерных сооружений». VIII научные чтения Н.Я. Денисова (Москва, 2017 г.);
- на Международной конференции «Энергетический менеджмент объектов городского транспортного хозяйства и транспорта EMMFT 2017» (Владивосток, 2017 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Взаимодействие науки и общества: проблемы и перспективы» (Казань, 2017 г.);
- на научно-техническом совете ГСПИ «Росатом» (Москва, 2017 г.);
- на научно-техническом совете АО «Монолит» (Москва, 2017 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Современные проблемы инновационного развития науки» (Волгоград, 2017 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Концепции устойчивого развития науки в современных условиях» (Екатеринбург, 2017 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Научные основы современного прогресса» (Казань, 2017);

- на Международном научном семинаре «Опасные для строительства геологические процессы» (Москва, 2018);

- на XXVII R-S-P семинаре «Теоретические основы гражданского строительства» (Ростов-на-Дону, 2018);

- на Международной научно-практической конференции «Лобейтовские чтения-150». Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям (г. Москва, 30 ноября 2018 г.);

- на Международной научно-практической конференции (Пенза, 30 августа 2019 г.);

- на Первой Национальной конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования» (Москва, 30 сентября 2020 г.).

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 59 печатных работах, в том числе в 11 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 4 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 2 Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 Свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности: в соответствии с формулой специальности 25.00.32 – «Геодезия» в диссертации выполнены научно-технические исследования и разработки в области геодезического обеспечения безопасности сооружений от опасных оползневых процессов. Полученные в диссертационном исследовании результаты соответствуют пунктам 8 и 11 паспорта указанной научной специальности:

8. Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры и ее поверхности, зданий и сооружений, вызванного природными и техногенными факторами, с целью контроля их устойчивости, снижения риска и последствий природных и техногенных катастроф, в том числе землетрясений.

11. Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений и информационное обеспечение геодезических работ. Автоматизированные технологии создания цифровых трехмерных моделей технологических объектов, процессов и явлений по геодезическим данным.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и библиографического списка. Содержит 340 страниц машинописного текста, 136 рисунков, 66 таблиц, список литературы из 303 наименований, в том числе 54 на иностранных языках и 9 приложений на 45 страницах.

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 оползневого характера

Известно, что под оползневой опасностью понимают оползневой процесс в отношении вероятностной возможности его проявления [3], [4], [124].

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 оползневого процесса, но и его последствия, т.е. необходимо заранее учитывать тот материальный ущерб, который может быть причинен этим процессом [129], [133].

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 [131].

При этом под фактором риска понимают признак, который самостоятельно связан с вероятностью возникновения негативного события настолько, что может быть использован для его прогнозирования [11], [12], [25], [89], [132], [223], [238].

Оползневые риски можно классифицировать следующим образом (рисунок 1.1):

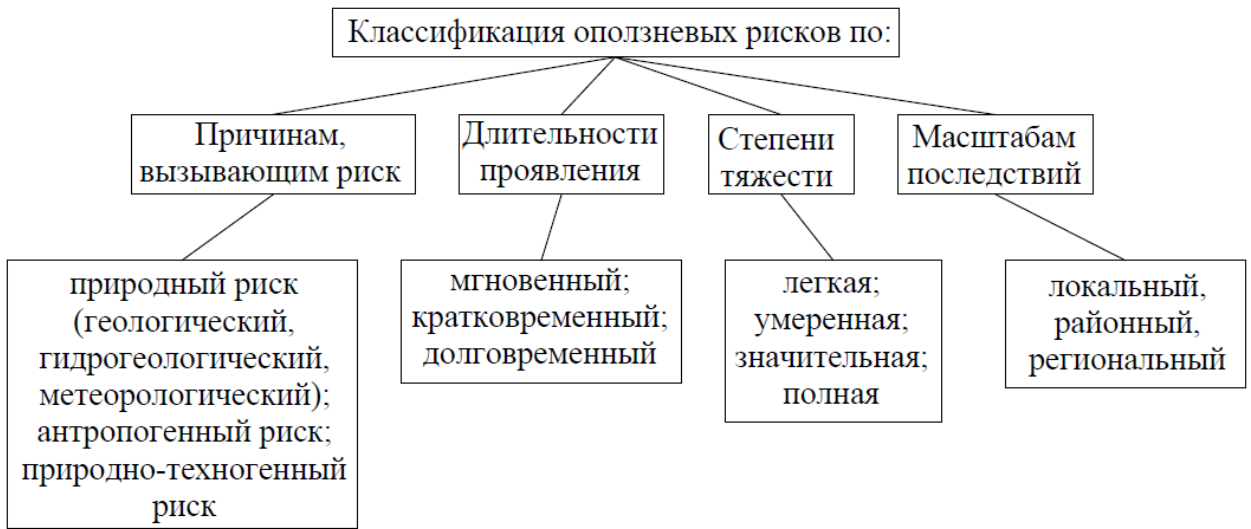


Рисунок 1.1 – Классификация оползневых рисков

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], [4], [7], [10], [18], [26], [29], [30], [31], [50], [74], [111], [124], [125], [253], [258], [259], [261], [275], [281], [298], [299].

В настоящее время не существует единой научно-обоснованной методологической базы, которая могла бы комплексно, используя данные геодезического мониторинга, оценивать опасные оползневые процессы. Существующие технологии инженерно-геологических изысканий не всегда дают возможность результативно оценивать и достоверно картировать влияние неоднородности геологической среды на оползневой процесс.

Склоновые системы относятся к сложным распределенным природно-техническим системам. Комплексная оценка оползневых рисков и обеспечение безопасности СС – это задачи стратегического характера. Решение этих 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:

- в обеспечении геодезического мониторинга деформационных процессов СС;
- выявлении факторов оползневого риска;
- количественной оценке оползневого риска;
- ранжировании склоновых территорий по степени оползневого риска;
- прогнозировании оползневых опасностей и исследования их динамики;
- разработке стратегии обеспечения оползневой безопасности и устойчивого развития СС [238].

Следовательно, чтобы решить обозначенные проблемы необходимо создать научно-методический аппарат, который учитывал бы основные факторы, которые могут влиять на безопасность землепользования и жизнедеятельности. Также необходима разработка методов и математических моделей, позволяющих выполнять соответствующие количественные оценки и прогнозы [96], [97].

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, 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 $P(U < u)$.

Надо 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 чтобы статистическая функция распределения была заменена 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], [4], [113].

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 [90].

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 [70], [118].

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], [4], [25], [31], [50], [94], [106], [124], [127], [128], [129], [131], [132], [134], [135], [136], [137], [219], [220], [221], [255], [256].

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 системном анализе данных геодезического мониторинга, выполняющие количественные оценки и прогнозы оползневых опасностей и вызываемого ими риска.

1.1.2 Структурные особенности оценки риска в сложных склоновых системах

Изучение оползневых процессов всегда было и остаётся 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 печальных, к сожалению, катастроф, произошедшие 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 милях (6,4 км) к востоку от небольшого населенного пункта Осо (Oso), штат Вашингтон, 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 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 (рисунок 1.2) [68].



Рисунок 1.2 - Оползень в Осо в 2014 г. (США)

– В воскресенье утром 21 декабря 2015 г. в городе Шэньчжэнь на юге Китая произошел сход оползня (Рисунок 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 числятся без вести пропавшими [285].



Рисунок 1.3 - Оползень в Шэньчжэне в 2015 г. (Китай)

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



Рисунок 1.4 - Оползень в Н.Новгороде в 2021 г. (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], [31], [111], [124], [136], [249].

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, 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 может осуществляться на основе различных уже существующих тематических карт (топографических, геологических, геотехнических, аэрофотоснимков, типология зданий и т.д.). Так же 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 [297]. 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 (рисунок 1.5) посвящены значительные усилия в [287]. В этой связи, в мелких (1:100000) и в средних (1:25000) масштабах, элементы риска определяются с точки зрения однородных зданий по совокупности. А в крупных (1:5000) и (1:2000) масштабах подверженные риску элементы считаются, как совпадающие с отдельными зданиями, которые фактически или потенциально взаимодействуют с массой тела оползня.

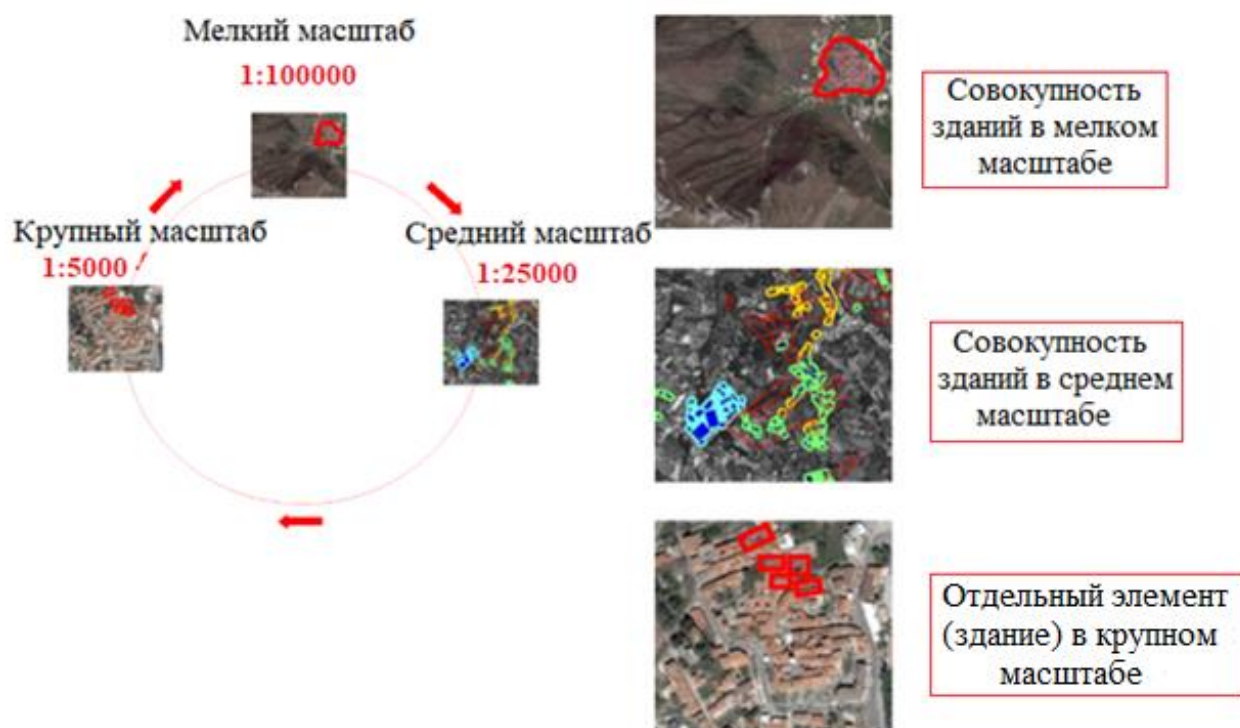


Рисунок 1.5 - Идентификация зданий, подверженных оползневому риску в различных масштабах

Получение всей этой информации о зданиях в мелком и среднем масштабах в целом является сложной и трудоемкой задачей. Для этого обычно применяется экспертное заключение. В этой связи, как уже отмечалось выше, в мелком (1:100000) и в среднем (1:25000) масштабах общепринято определять элементы, подверженных оползневому риску, с точки зрения строительных однородных совокупностей (рисунок 1.5).

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

Понятия «оползень» и «оползневая безопасность» это ключевые понятия, необходимые для описания взаимоотношений человека с окружающей его геологической средой [57], [66], [85], [226].

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 оползневого процесса во времени) в связи с взаимодействием с окружающей средой [241];
- 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 [238].

Под *оползневой опасностью* будем понимать негативную для нее вероятностную возможность реализации оползневых процессов, протекающих в природной, техногенной и антропогенной составляющих среды склоновой системы (рисунок 1.6) [238].

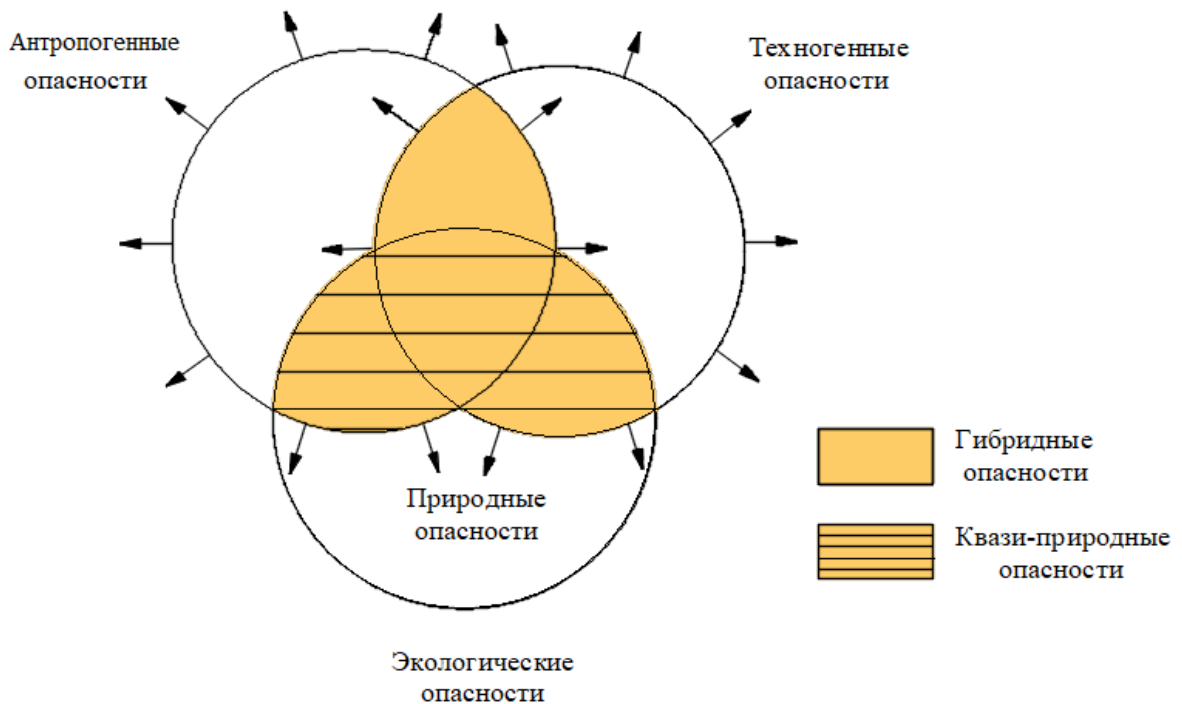


Рисунок 1.6 - Спектр опасности

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 [131].

В общем виде уязвимость приводит к простой обобщенной взаимосвязи: «Опасность × Уязвимость = 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 (оползневого смещения) могут привести к очень разным уровням повреждений в зависимости от того, что именно подвергается воздействию. Физическая уязвимость зданий и инфраструктуры является функцией интенсивности оползневого события и уровня сопротивления подверженных элементов, т.е., физическая уязвимость конструкций зависит не только от структурных свойств открытых элементов (например, типологии зданий, качества строительства, технического состояния и т.д.) [223], [224], [225], [280], [296], но и от меха-

низма 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 последствий этих воздействий.

Количественно оползневую безопасность будем определять через уровень оползневой безопасности $S_{оп}$, которая представляет собой вероятностную величину. Ее значения находятся в интервале $[0; 1]$ [238].

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.

Уровень оползневой безопасности и степень оползневого риска связаны между собой следующим соотношением $[0; 1]$ (1.1) [88], [89]:

$$S_{оп} = 1 - R_{оп}, \quad (1.1)$$

где $S_{оп}$ - уровень оползневой безопасности;

$R_{оп}$ - степень оползневого риска.

Под *анализом оползневого риска* для склоновой системы будем понимать комплекс процедур по выявлению 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 сооружений в СС.

Под *количественной оценкой* оползневого риска в склоновых системах будем понимать комплексное описание аномальных оползневых процессов в этой системе, которые основаны на математическом моделировании [238].

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 одновременно 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 [238].

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 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. [35], [42], [183], [246].

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 (рисунок 1.7, *а*). В связи с этим основание фундамента становится неоднородным. Появляются неравномерные осадки в здании и, как результат, начинают появляться вертикальные трещины;

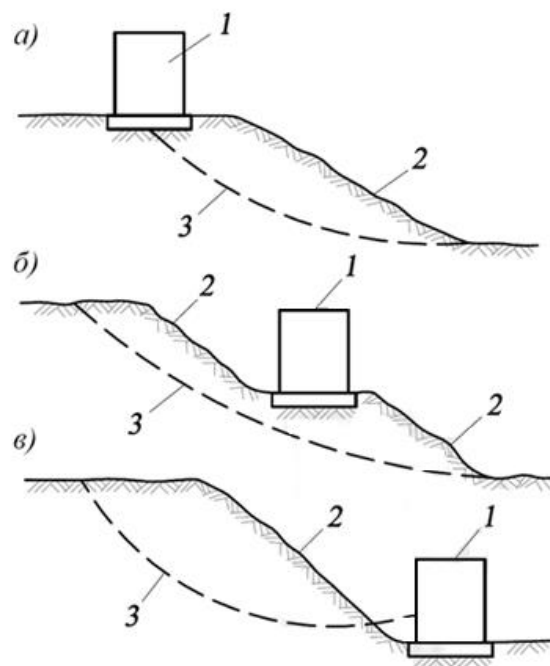


Рисунок 1.7 - Возможные виды нарушения устойчивости сооружений от оползневых смещений

а – разрыхления оснований под сооружением; *б* – смещения грунта под сооружением; *в* – давление сползающего грунта на сооружение; 1 – сооружение; 2 – склон; 3 – линия поверхности скольжения

– если сооружение располагается на оползне, то при активизации оползневых процессов происходит одновременно и смещение грунта под сооружением (рисунок 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 они испытывают только давление от смещающихся масс грунта (рисунок 1.7, в).

Вопросы геодезического мониторинга за перемещениями сооружений рассматриваются в ряде ранее изданных нормативных документах: СНиПах, руководствах, указаниях и технической литературе, которые в настоящее время постепенно переносятся в СП (Свод Правил) [185], [188]. В этих материалах изложена методика организации и проведения геодезического мониторинга за сооружениями проводимых лишь в том случае, если имеется соответствующее решение проектной организации (п. 3.71 [213]). 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 [185], [188].

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 [143].

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 [185], [188], [249], [268].

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 относительно исходного положения в течение определенного времени оказывают огромную помощь при дальнейшем анализе механизма оползневых процессов. В свете рассматриваемой проблемы оползневой безопасности, рассмотрим, что собой представляет оползень.

Оползни представляют собой связанное перемещение земляных (скальных) масс, которое совершается по некоторой поверхности скольжения и при этом не теряют контакт с ним. Образование оползней представляет собой весьма сложный и многофакторный процесс [44], [52], [62], [104], [108], [117], [138], [233], [234], [250].

В России оползневые процессы формируются в республиках Северного Кавказа, в Краснодарском и Ставропольском крае, на Среднерусской и Смоленско-Московской возвышенностях, в Поволжье [82], [105], [108]. 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 40% площади Российской Федерации и территории 725 из 1036 городов, т.е. более 70% городов Российской Федерации [107]. 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 [60], [61] потенциально несущих угрозу разрушительных воздействий на здания и сооружения.

Оползание склонов в большинстве случаев представляют собой длительный процесс. Выделяются два этапа [229]:

- 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 [15]. 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) [241].

Статистика оползней показывает, что 80% проявлений оползневых процессов связано с деятельностью человека, и только 20% с природными явлениями [302].

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 [116].

Становится ясно, в связи с чем дожди становятся 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 [108].

Таким образом, блок-схема факторов оползнеобразования выглядит следующим образом (рисунок 1.8.).

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);

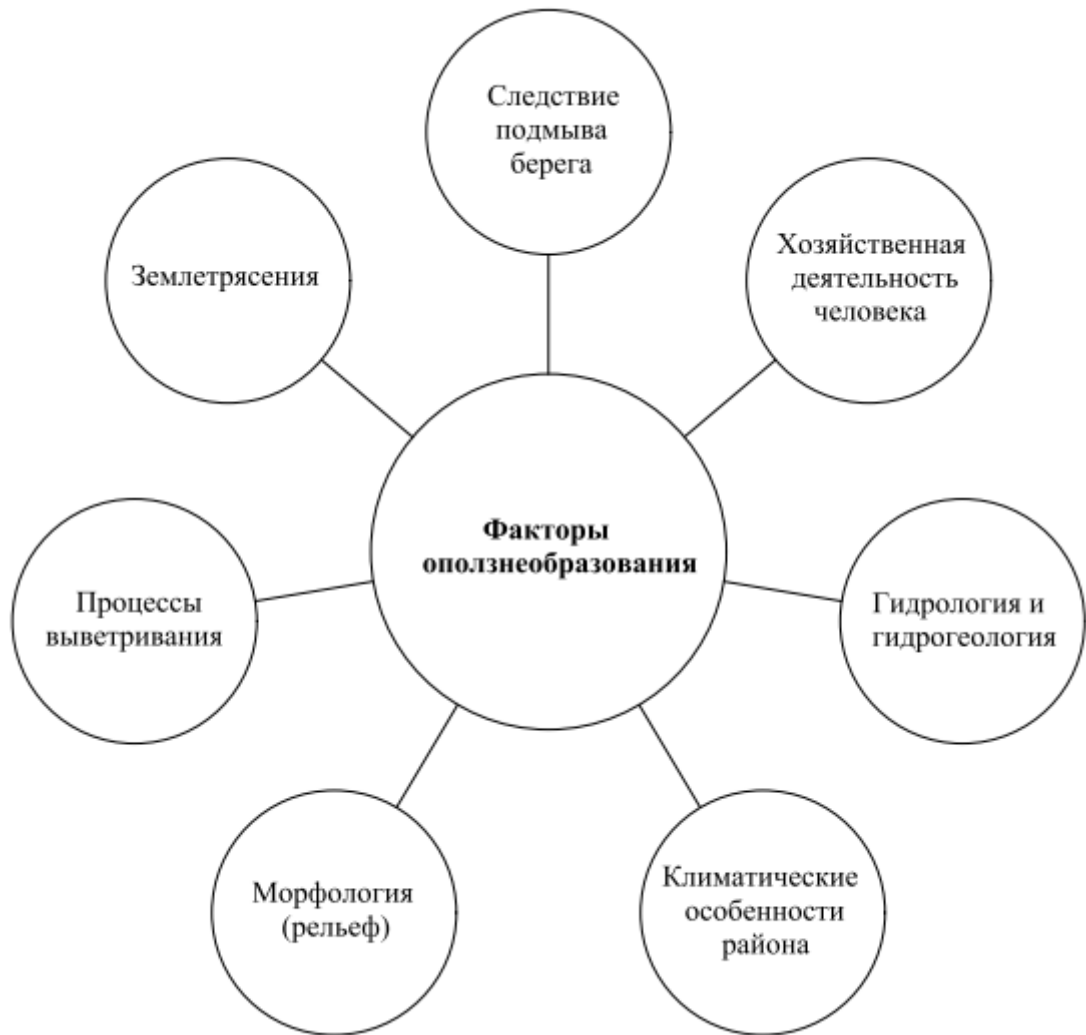


Рисунок 1.8 – Блок-схема факторов оползнеобразования

– оползни разжижения связаны с воздействием грунтовых вод. 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 [116].

Блок-схема механизма возникновения оползней показана на рисунке 1.9.

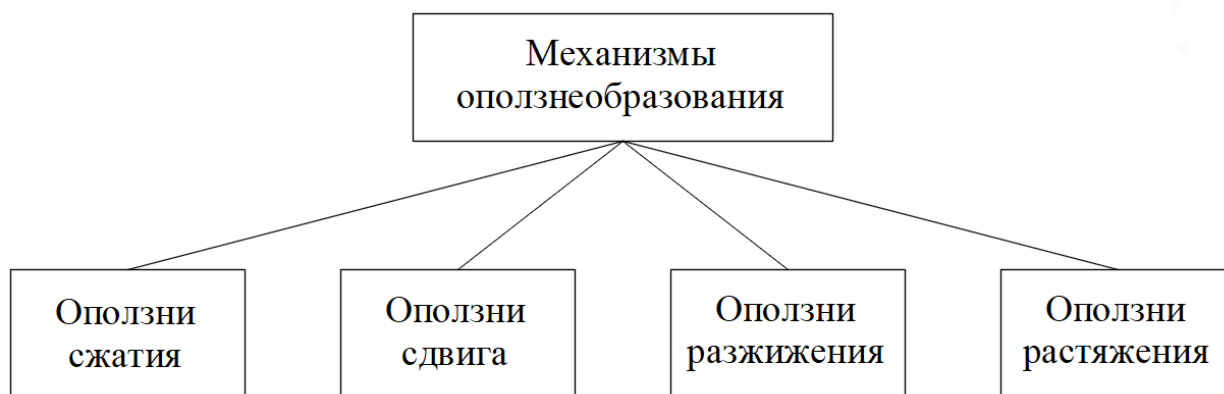


Рисунок 1.9 – Блок-схема механизма возникновения оползней

Исследованиями китайских ученых было установлено, что из-за кислотных дождей также происходят оползни [303]. Причина этому – выбросы ТЭЦ, работающих на сжигании угля. В результате в 2009 г. 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 оползнеобразование на склоновых территориях, по этому 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 [248]. Согласно этой 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. [162].

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 (таблица 1.1) [85]:

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 (поступательные оползни) (рисунок 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 5-и метров (оползни поверхностные или мелкие).

Вектора смещений точек оползневой сети, находящейся на поверхности оползня, практически параллельны краям оползня [170]. На прямолинейных участках перемещение оползня совершается с равномерной скоростью. А на криволинейных участках оползневой поток придвигается к вогнутой стороне.

В отличие от поступательных оползней, вращательные оползни в плане выглядят следующим образом (рисунок 1.11):

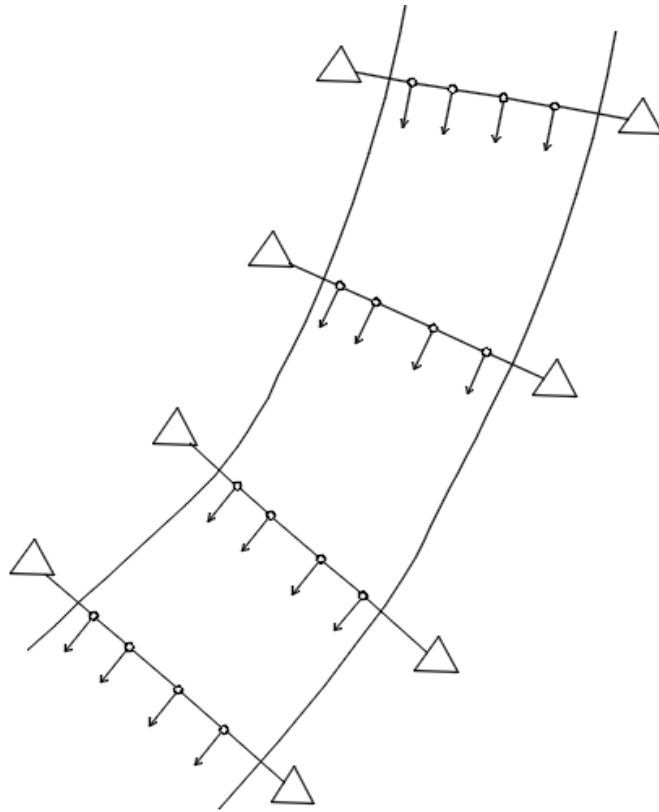


Рисунок 1.10 - Поступательный оползень (земляной поток)

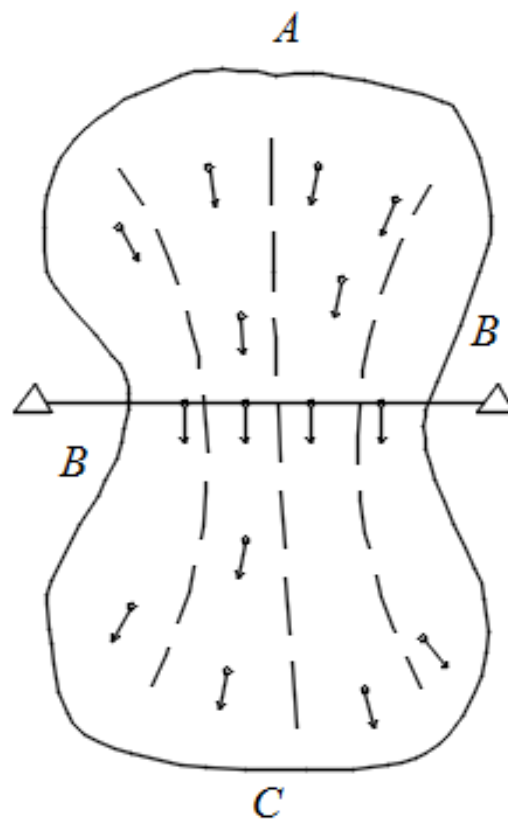


Рисунок 1.11 - Вращательный оползень

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 А до С: от линии отрыва в верхней части и смещением вниз по склону до сжатия в нижней части [228], [230]. Такие оползни бывают глубокими – до 20 метров и очень глубокими – больше 20 метров (таблица 1.2) [116]:

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 [231].

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 [112].

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

[209] 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 являются архиважными. 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 относительных смещений относительно опорной геодезической сети.

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

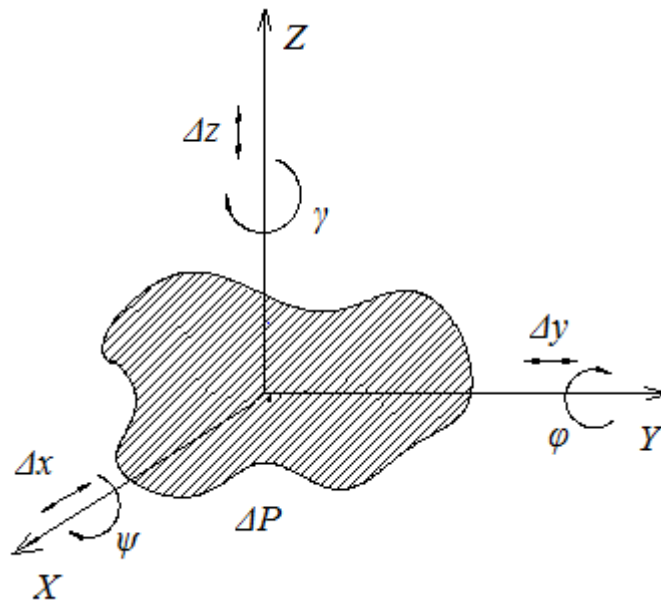


Рисунок 1.12 - Элементы движения на склоне

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 (1.2), 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 стало $S(t_2)$, причем $S(t_2) \neq S(t_1)$, то смещение будет равно (1.3)

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

Когда в процессе оползневых деформаций некоторые точки оползневого тела имеют относительные перемещения друг относительно друга, то 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 (рисунок 1.13).

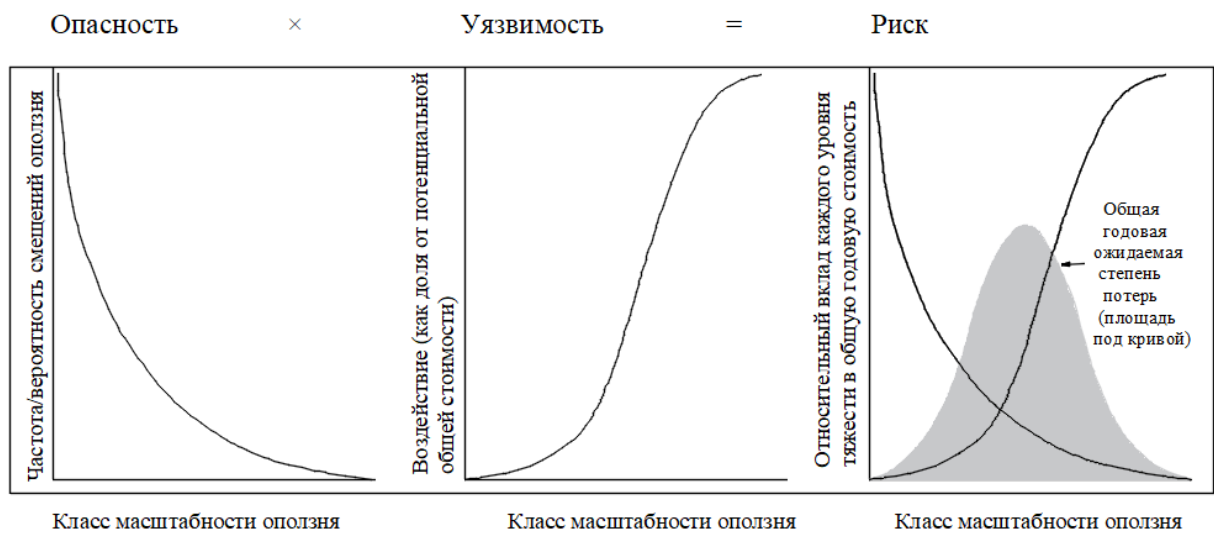


Рисунок 1.13 - Диаграммное представление риска: состояние опасности и уязвимости

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):

$$R_s = P(H_i) \times (E \times V \times E_x), \quad (1.4)$$

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, выраженная 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 (1.5)

$$R_s = P(H_i) \times \sum (E \times V \times E_x). \quad (1.5)$$

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 потенциально предполагается использовать под строительство жилых, промышленных и других народнохозяйственных объектов. По нашему мнению, МЧС РФ необходимо разработать соответствующую программу, предусматривающую организационно-методические и технические мероприятия по ее выполнению.

Специалистам в области безопасности надо 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 сети.

Из вышеперечисленных вопросов наиболее значимым является вопрос о необходимой точности геодезических наблюдений, который ранее затрагивался автором в ряде предшествующих публикаций [147], [150], [151], [155], [161], [162], [192].

Следует отметить, что как в научной литературе, так и в нормативных документах рекомендации по точности геодезических наблюдений противоречивы. Так в [16] точность геодезических наблюдений поставлена в зависимость от средств наблюдений, а в [67], [215] в зависимости от ожидаемых величин подвижек оползня. По мнению авторов последних работ, абсолютная точность измерения оползневой деформации должна быть не более 25% от 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 [9], [75], [142], 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 данной задачи содержится в работе [43], 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 (1.6)

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

где τ – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности P (таблица 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 (1.7)

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

Воспользовавшись принципом равного влияния источников погрешностей, т.е. $\sigma_X = \sigma_Y = \sigma_H = \sigma$, получим расчетную точность наблюдений подвижек оползня (1.8)

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

Так например, при $\Delta S_{\max}^{\min} = 10$ мм, то с вероятностью $P = 0,946$, $\tau = 1,96$ и $P = 0,997$, $\tau = 3,00$ (таблица 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 значения 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 [33], [130]. 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 [205].

Требуется 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 [72].

Прогнозирование является важнейшей составляющей мониторинговых исследований поведения и состояния ответственных инженерных сооружений [236],

[244], поскольку опережающая прогнозная информация дает возможность предпринимать своевременные меры по повышению их надежности, долговечности и безопасности эксплуатации [46], [47]. 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 [242].

Деформационные процессы, несомненно, относятся к категории экологических [48], в исследовании которых геодезический мониторинг тесно связан с экологической геологией и инженерной геологией [84]. 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, результаты различных видов исполнительных съемок могут служить основой для инженерного картографирования, которое позволит не только оперативно организовать 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 [47].

Объектом исследования являются, как уже отмечалось выше, склоновые системы. Это означает, что в пределах строго определенной склоновой территории безопасность инженерных сооружений зависит от взаимодействия этих сооружений с грунтовым 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 должна осуществляться с позиций системного анализа. 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 [87], 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 [27], [301] предложен новый программно-целевой подход к организации геодезического мониторинга деформаций зданий и сооружений, который в отличие от детерминированного 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. И в рамках программно-целевого подхода необходимо создание новой методологии геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных СС, включающий комплексный математический анализ результатов мониторинговых наблюдений с построением математических моделей, обеспечивающих получение обоснованных оценок оползневых рисков и уровня оползневой безопасности для проведения мероприятий по обеспечению инженерной защиты СС (рисунок 1.14).

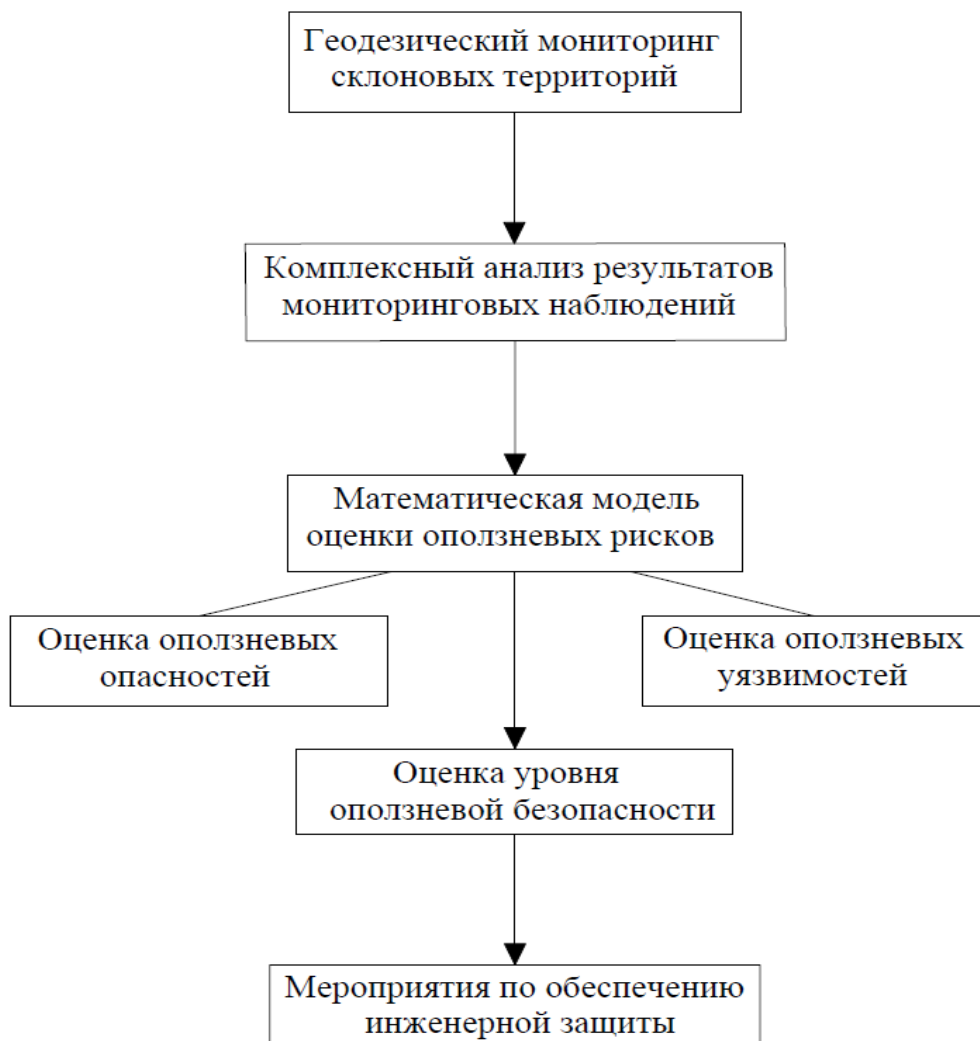


Рисунок 1.14 – Блок-схема исследования оползневой безопасности

1.3 Выводы по Главе 1

1. Решение проблемы геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов оползневых склонов и возведенных сооружений с позиций системного подхода целесообразно рассматривать на уровне склоновых систем.

2. Решение проблемы геодезического обеспечения мониторинга сооружений на оползнеопасных территориях может быть исключительно в рамках унифицированной методологии, которая позволит комплексно рассматривать задачи по оценке оползневых рисков, а также разрабатывать новые стратегии предупреждения указанного риска в склоновых системах.

3. Анализ нормативных документов показывает, что рекомендации по точности геодезических наблюдений за опорной сетью, деформационной сетью и за сооружениями противоречивы и не логичны. Противоречия наглядно свидетельствуют о необходимости научного обоснования данного вопроса.

4. Геодезическое обеспечение мониторинга деформационных процессов склоновых систем, включающее комплексный математический анализ результатов мониторинговых наблюдений с построением математических моделей, обеспечивающих получение обоснованных оценок оползневых рисков и уровня оползневой безопасности является неотъемлемой частью при исследовании оползневых процессов и их влияния на безопасность сооружений. Для обеспечения безопасности склоновых систем от опасных оползневых процессов и комплексной оценки связанного с ними риска с позиций системного подхода необходимо разработать новые методы изучения факторов, которые влияют на состояние среды СС в условиях возможной реализации оползневых опасностей.

5. Для решения сложной и многоаспектной проблемы геодезического обеспечения мониторинга склоновых систем и их безопасности от опасных оползневых процессов требуется разработка методов и математических моделей, позволяющих выполнять соответствующие количественные оценки и прогнозы оползневых опасностей и вызываемых ими риска. Разработка данных методов должна создаваться

на основании системного и аналитического анализа геодезической информации об интересующем объекте исследования.

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 оползневого риска является наиважнейшим 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], [4], [79], [180], [97], [119], [270], [278].

К полевым методам относятся [124], [125]:

- 1) геологические, гидрологические, гидрометеорологические, геофизические, экологические и другие;
- 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 осадок, роза ветров, глубина промерзания грунта; гидрологический режим рек и т.д. [108], [250];
- 2) методы получения топографических планов: наземные или фотограмметрические [24], [121], [122];
- 3) геоинформационные методы [79].

При изучении и оценке оползневых опасностей применяются те же методы, которые применяются при мониторинговых наблюдениях с последующим прогнозированием оползневых опасностей [49], [69], [77], [79]. 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 (рисунок 2.1) [124], включающая аналитические методы (экспериментальное и математическое моделирование и прогнозирование) [3], [4], [28], [83], [250].

Основным считается подход, который базируется на расчетах с привлечением вероятностных (детерминированных и статистических) методов [274]. Этот подход использовался для средне- и долгосрочных прогнозов. Другой же подход основывается на изучении имеющихся данных о предвестниках конкретных катастрофических явлений и анализе, получаемой от мониторинговых сетей, информации для краткосрочных и оперативных прогнозов [65], [85].



Рисунок 2.1 - Схема взаимоотношений отдельных групп методов исследований

Еще не так давно использовался первый подход. Прогноз давался на срок от двадцати лет 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. [130].

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

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 и интенсивности развития, и взаимодействия с сооружениями в пределах значительного района. При региональном прогнозировании невозможно определить конкретные типы и места проявления оползневых процессов. Выделение районов осуществляется по принципу относительной однородности условий и факторов развития оцениваемого опасного процесса [241].

Локальное прогнозирование относится к конкретным типам склоновых процессов (в отличие от регионального). Локальное прогнозирование 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 формализовать методы оценок оползневых процессов на математический язык [198].

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 [114].

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

- 1) интуитивно-логический анализ задачи;
- 2) решение и предоставление полуколичественных или качественных оценок;
- 3) обработка результатов решения [241].

Экспертные оценки делятся на:

- 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 оползневого процесса, носит субъективный характер и позволяет получать только приблизительные оценки [15], [286].

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:

- 1) детерминированные;
- 2) вероятностные [241].

К подклассу детерминированных методов относятся следующие группы:

- методы оценки проявления оползневых процессов;
- методы аналогий [241].

Методы оценки проявления оползневых процессов состоят из двух подгрупп:

- распространенность;
- временная изменчивость [15], [232].

Распространенность характеризуется следующими коэффициентами:

- коэффициент линейной пораженности, который рассчитывают по формуле

(2.6):

$$K_{л} = \frac{l}{L}, \quad (2.6)$$

где l – длина оползневого тела;

L – общая длина склона;

- коэффициент площадной пораженности, который рассчитывают по формуле

(2.7):

$$K_{п} = \frac{f}{F}, \quad (2.7)$$

где f – площадь оползня;

F – общая площадь участка;

- коэффициент частотной пораженности. Вычисляют по формуле (2.8):

$$K_{ч} = \frac{n}{F}, \quad (2.8)$$

где n – количество проявлений процессов на конкретном участке;

F – площадь конкретного участка [241].

Временная изменчивость характеризуется показателем активизации оползневого процесса (аналог ускорения) [241]. Рассчитывается такой показатель по следующей формуле (2.9):

$$a = \frac{V_2 - V_1}{t}, \quad (2.9)$$

где V_1 – скорость движения оползня за прошлый год;

V_2 – скорость движения оползня в текущем году;

t – промежуток времени между замерами скорости оползневого процесса;

a – активизация оползневого процесса.

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 [241].

При прогнозировании методами аналогий используется такая категория как изоморфизм инженерно-геологических условий [115]. Изоморфизмом определенных объемов литосферы называют равенство структур этих объемов и сходство свойств инженерно-геологических условий. Включает следующие типы методов:

- сравнительно-геологический [62],
- сравнительно-количественный [51],
- геологического подобию [141].

а) *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 [241].

Геодезические работы не предусмотрены.

б) *Сравнительно-количественный анализ* оценивает устойчивость исследуемого склона по соотношению показателей его характеристик с показателями характеристик тех склонов, у которых устойчивость известна. Для использования метода

надо изучить большое количество разновозрастных склонов и их устойчивость, установить связи между характеристиками [241]. По Е. П. Емельяновой количественные показатели, которые характеризуют основные параметры оползней, следующие:

1. Коэффициент удлиненности $I_{\text{удл}}$ (2.10):

$$I_{\text{удл}} = \frac{L}{b_{\text{max}}}, \quad (2.10)$$

где L – длина оползневого тела;

b_{max} – максимальная ширина оползневого тела.

2. Коэффициент глубины захвата $I_{\text{гл}}$ (2.11):

$$I_{\text{гл}} = \frac{h_{\text{max}}}{L}, \quad (2.11)$$

где h_{max} – максимальная мощность оползневого тела;

L – длина оползня.

3. Коэффициент уплощенности $I_{\text{упл}}$ (2.12):

$$I_{\text{упл}} = \frac{h_i}{b_i}, \quad (2.12)$$

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 $I_{\text{кр}}$ (2.13):

$$I_{\text{кр}} = \frac{H}{R}, \quad (2.13)$$

где H – значение высоты склона;

R – значение радиуса кривизны подошвы склона в плане [51].

Эти коэффициенты, также, вычисляются по данным геодезических определений. Они могут быть полезными, но не более того.

в) *Метод геологического подобия* позволяет корректно подходить к обоснованию подобия оползневых склонов с точки зрения инженерной геологии. В [141] 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 неограничено [116], [241].

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 [64], [279].

К методам прогнозирования оползневой опасности, основанные на статистическом подходе, относятся методы:

- геодинамического потенциала;
- регрессионного анализа;
- анализа ритмичности;
- статистический анализ факторов оползнеобразования;
- многомерная статистика [241].

Метод геодинамического потенциала предполагает расчет вероятности появления (активизации) оползневого процесса в пределах рассматриваемой площади [45].

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 среднемноголетних осадков;
- крутизна склонов (единственный геодезический параметр);
- влияние абразии или эрозии;
- антропогенное влияние.

Метод регрессионного анализа [138] включает в себя определение статистических зависимостей какого-то показателя от возможных количественных параметров влияния факторов оползнеобразования и, в конечном счете, получение регрессионного уравнений первой и второй степени.

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

Метод анализа ритмичности оползневого процесса заключается в корреляции периодичности активизаций оползневых смещений и ритмами солнечной активности, осадками и т.д. [14].

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

Полученные корреляционные функции дают возможность для изучаемого региона приближенно выполнять прогноз по количеству оползней на ближайшие годы с их площадью и одновременно прогнозировать время ожидаемой оползневой активизации [241], [247].

Методы статистического анализа оползневых факторов предполагают, что между зависимой переменной (нанесенная на карту распространение оползней) и независимыми переменными (несколько способствующих факторов) есть существенная статистическая корреляция, то независимые переменные могут использоваться для прогноза возможного расположения оползней в будущем [257]. Геодезические работы не предусмотрены.

Метод многомерной статистики, основан на том, что инвентаризация всех оползней непосредственно связана с землетрясениями [241]. Это дает возможность исключить долговременные и продолжительные наблюдения.

Достоинством метода считается то, что он учитывает периодичность сейсмического воздействия для активизации прогнозируемых типов оползней [175], [176], [179]. Проведенные проверки этой методики на ряде сейсмогенноопасных оползнях государства Тайвань [279] 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 [241].

Из написанного выше, можно заключить, что опасность оценивается коэффициентом линейной или площадной пораженности территории оползневым процессом, полученных по геодезическим данным [248]. 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 [138].

При локальном прогнозировании оползневых опасностей решают два вида задач:

- 1) расчет устойчивости склона;
- 2) оценка скорости смещения оползневых масс [241].

При изучении устойчивости склона используют следующие методы:

- 1) аналогий;

- 2) физического моделирования;
- 3) математического моделирования [71], [239], [240], [264], [266].

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 измененные 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 [241],.

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 оползневого процесса.

В основу расчетов по устойчивости склонов положено известное условие прочности грунтов Кулона-Мора (2.14):

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (2.14)$$

где τ – удельное сопротивление сдвигу;

σ – нормальное напряжение;

φ – угол внутреннего трения грунтов;

c – удельное сцепление грунтов [241].

В последнее время в связи с внедрением в практику расчетов устойчивости склонов специальных программных продуктов, в основе которых положены чис-

ленные 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 [71], [240]. Этот метод является основным численным методом решения задач механики сплошной среды [241]. Из зарубежных подходов к оценке оползневых процессов следует упомянуть работы [251], [252], [262], [294].

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 параграфа 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 [238], следующие весовые параметры P_i [193], [194]:

– 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, изменив формулу (2.7) на (2.15):

$$P_1 = \frac{S}{S_0}, \quad (2.15)$$

где S – площадь оползневого тела;

S_0 – общая площадь склоновой территории.

Надежность P_1 зависит от точности геодезической основы. 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 интерпретация, 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;

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

– $P_{3-5} = 1,0$ – используется 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 предлагается 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 (физическое или математическое) изучаемого процесса. Модель детерминированная или вероятностная.

– $P_{4-3} = 1,0$ – используется и 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 случайный вектор-строку $\|P_i\|$ и рассчитаем модуль вектора эффективности V_{eff} по следующей формуле (2.16):

$$|V_{eff}| = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_{i-j}^2}{\sum_{i=1}^n (\max P_{i-j})^2}}, \quad (2.16)$$

где $n = 6$ (количество параметров).

Так как для сравнительного анализа методов целесообразно рассчитывать относительную эффективность метода и при этом максимальное значение параметров $\max P_i = 1$, то тогда $|\max V_{eff}| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\max P_{i-j})^2} = \sqrt{n}$, т.е. максимальная абсолютная

эффективность метода составит $|\max V_{eff}| = \sqrt{n}$. Тогда формула (2.16) примет вид

(2.17):

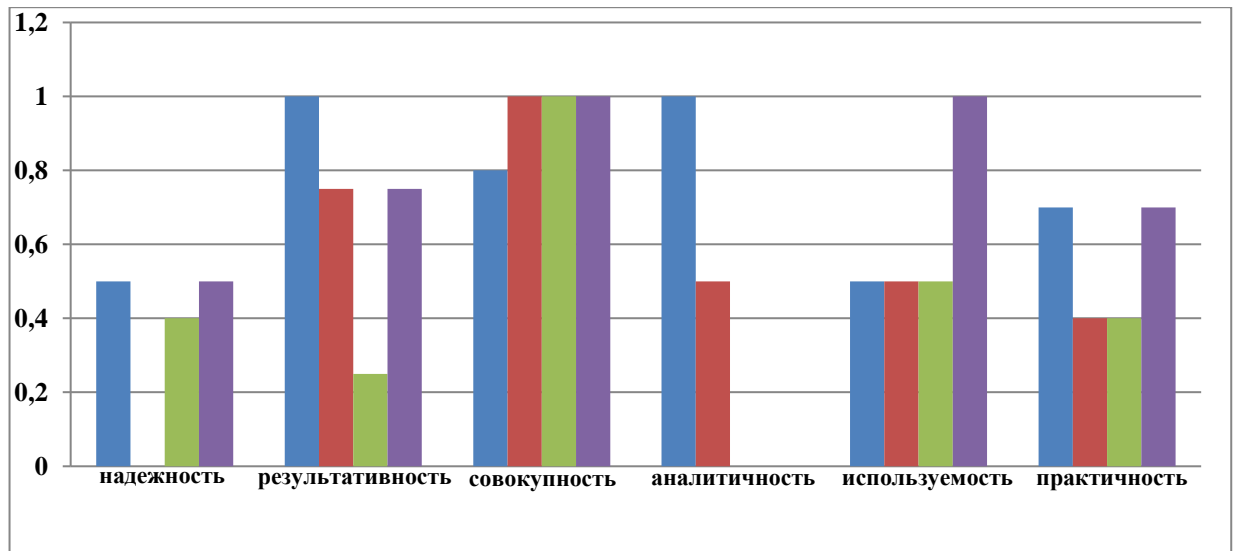
$$|V_{eff}| = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_{i-j}^2}{n}}. \quad (2.17)$$

На основании численного метода выполнен по формуле (2.17) собственно сам сравнительный анализ эффективности применения нескольких методов, которые были рассмотрены в параграфе 2.2, т.е. было выполнено тестирование разработанного численного метода [238] (таблица 2.1 и рисунки 2.2 – 2.12).

Таблица 2.1 – Численный критерий параметров сравнительного анализа эффективности существующих методов оценки оползневых опасностей

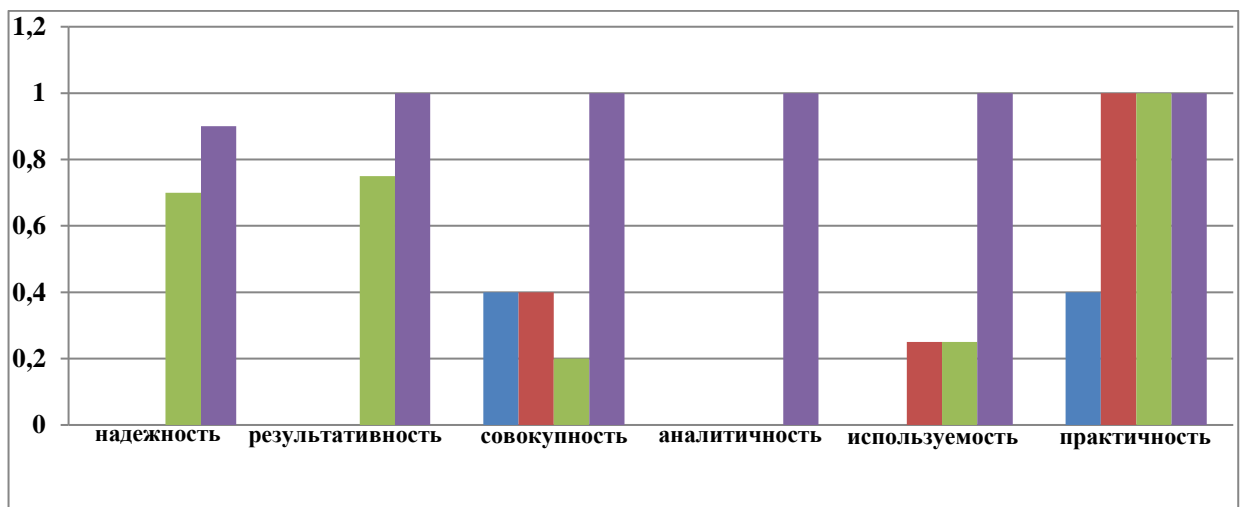
Оценочные параметры P_i	Обозначения параметров	Название метода							
		оценки проявления оползневых процессов	аналогий	геодинамического потенциала	регрессионного анализа	анализа ритмичности	статистического анализа оползневых факторов	многомерной статистики	математического моделирования
Надежность	$P_1 =$	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 таблице 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 [45], [51], [64], [83], [114], [116], [141], [240], [241].



■ – метод оценки проявления оползневых процессов; ■ – метод аналогий;
 ■ – метод геодинамического потенциала; ■ – метод регрессионного анализа

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



■ – метод анализа ритмичности; ■ – метод статистического анализа оползневых факторов; ■ – метод многомерной статистики; ■ – метод математического моделирования.

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

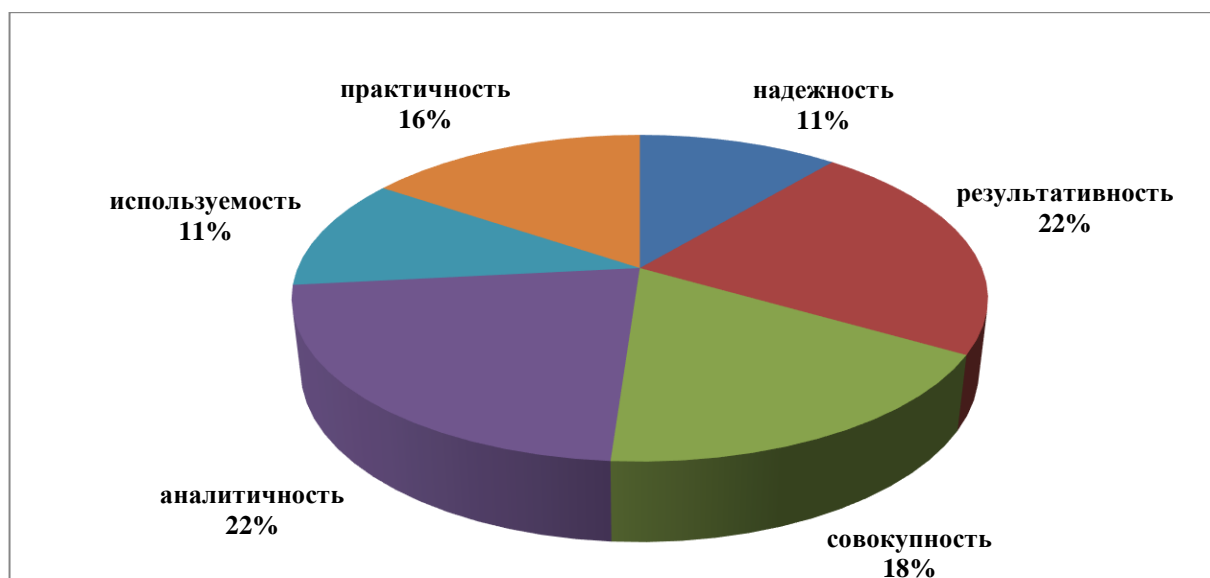


Рисунок 2.4 - Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода оценки проявления оползневых процессов

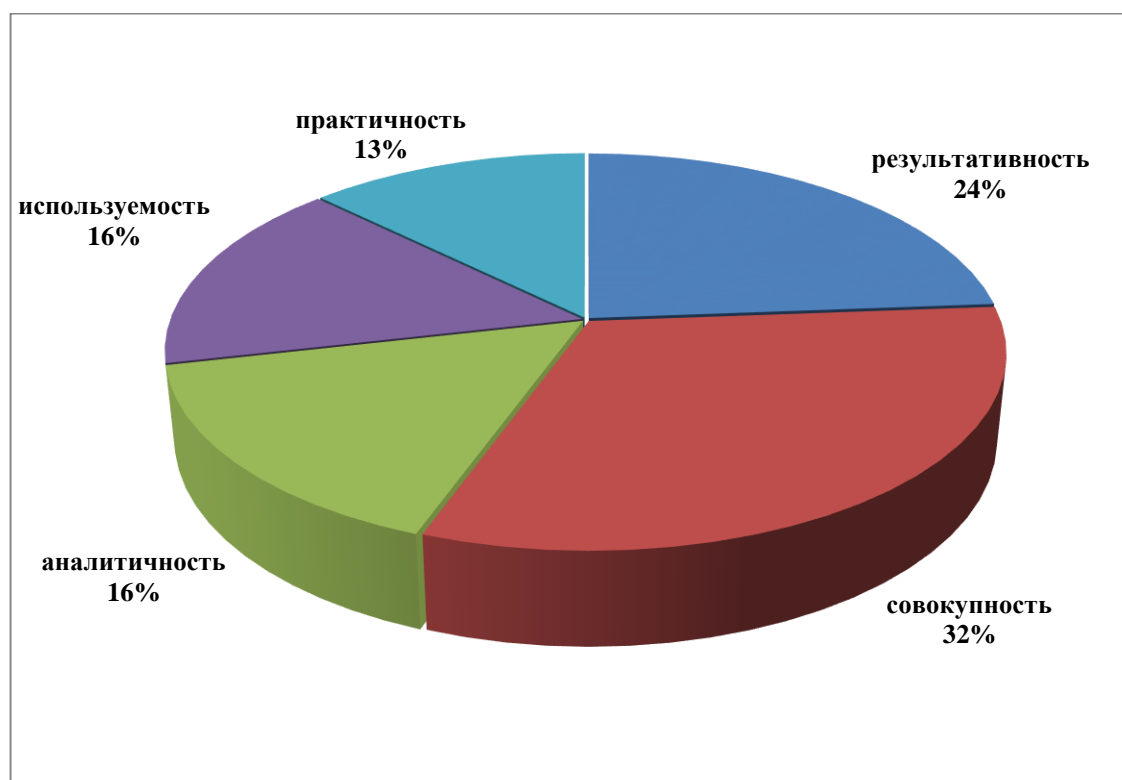


Рисунок 2.5 - Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода аналогий

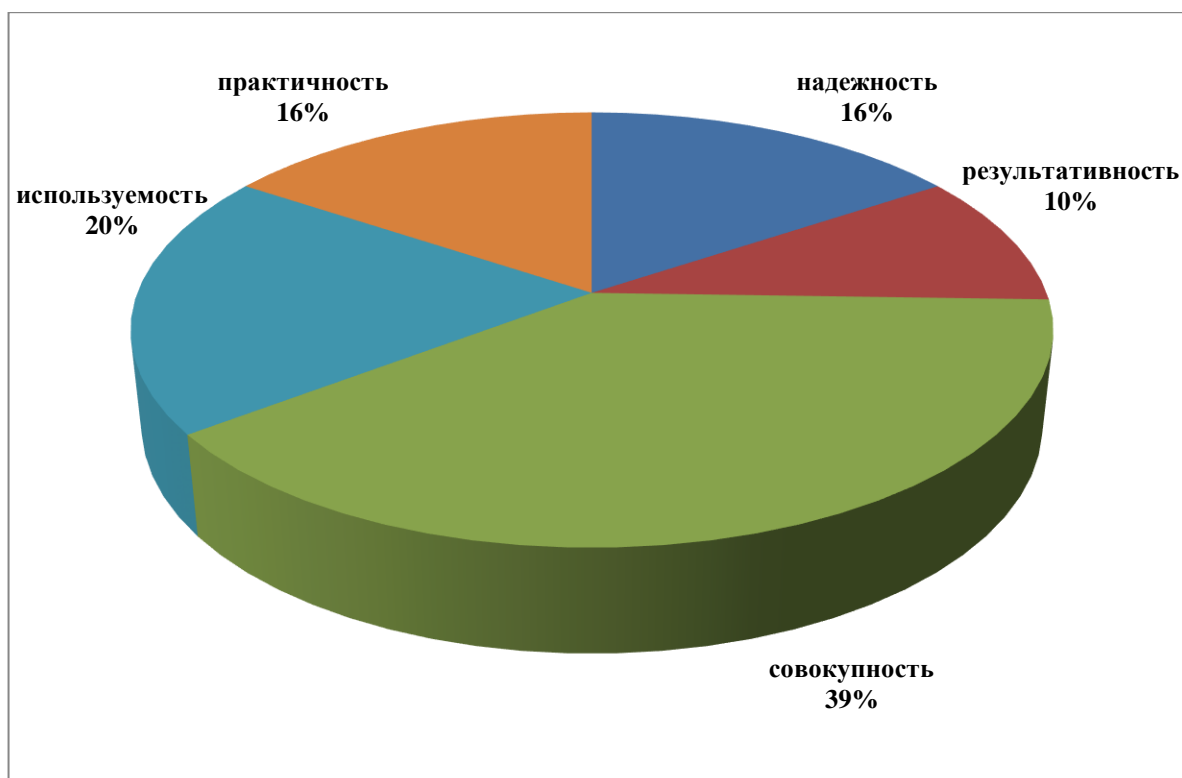


Рисунок 2.6 - Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода геодинамического потенциала

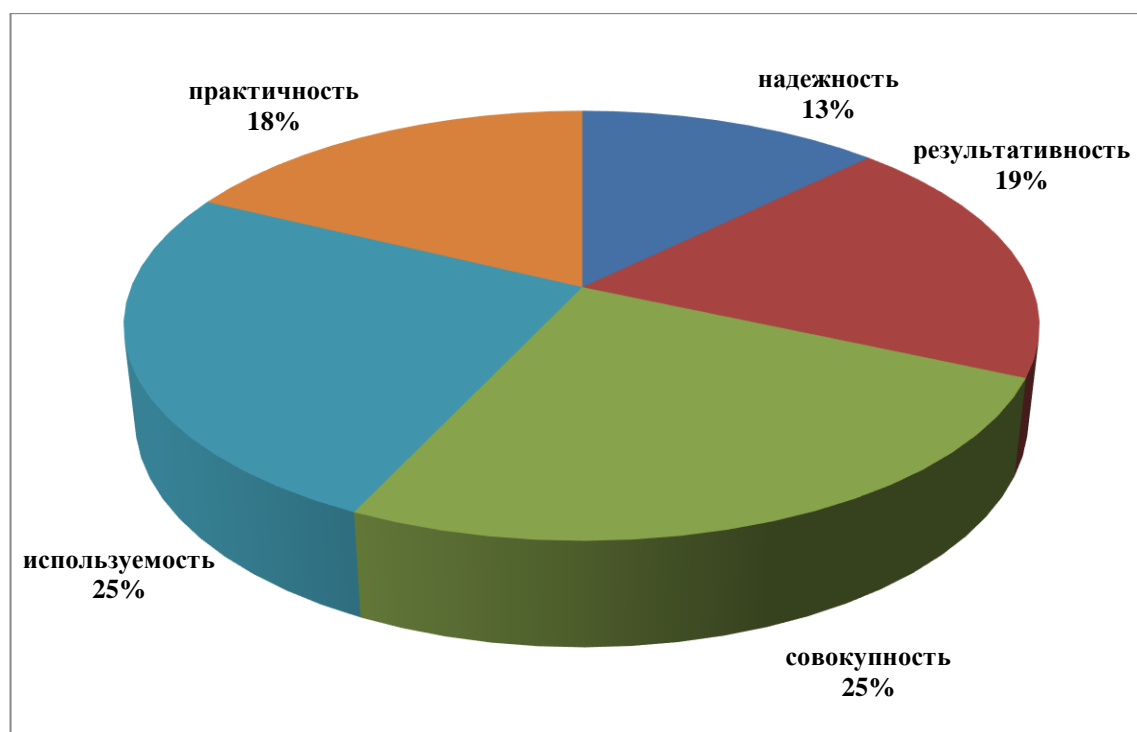


Рисунок 2.7 - Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода регрессионного анализа

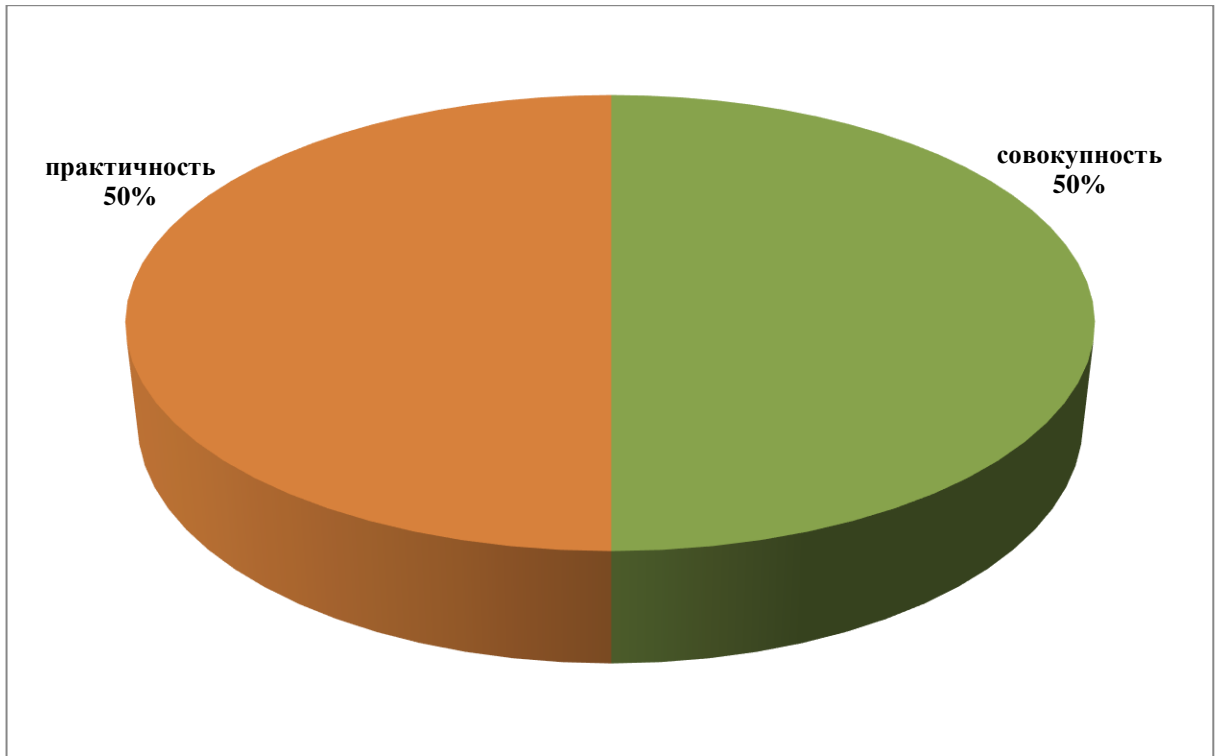


Рисунок 2.8 - Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода анализа ритмичности

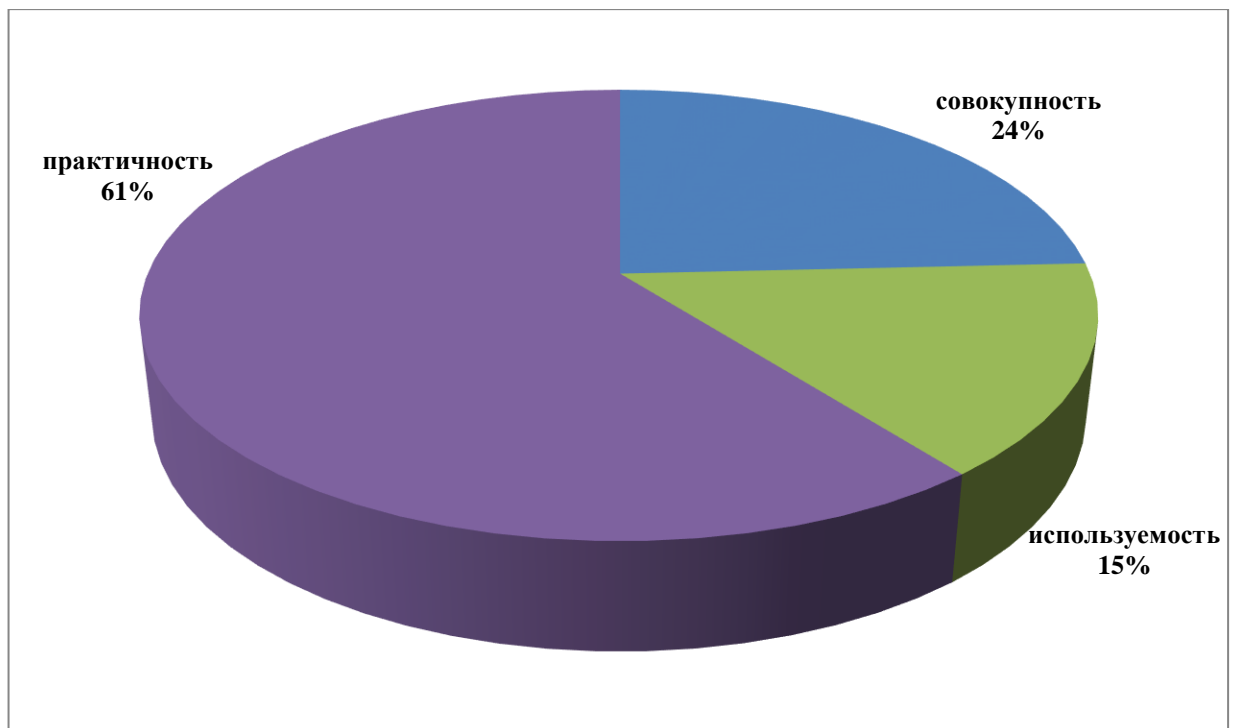


Рисунок 2.9 - Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода статистического анализа оползневых факторов

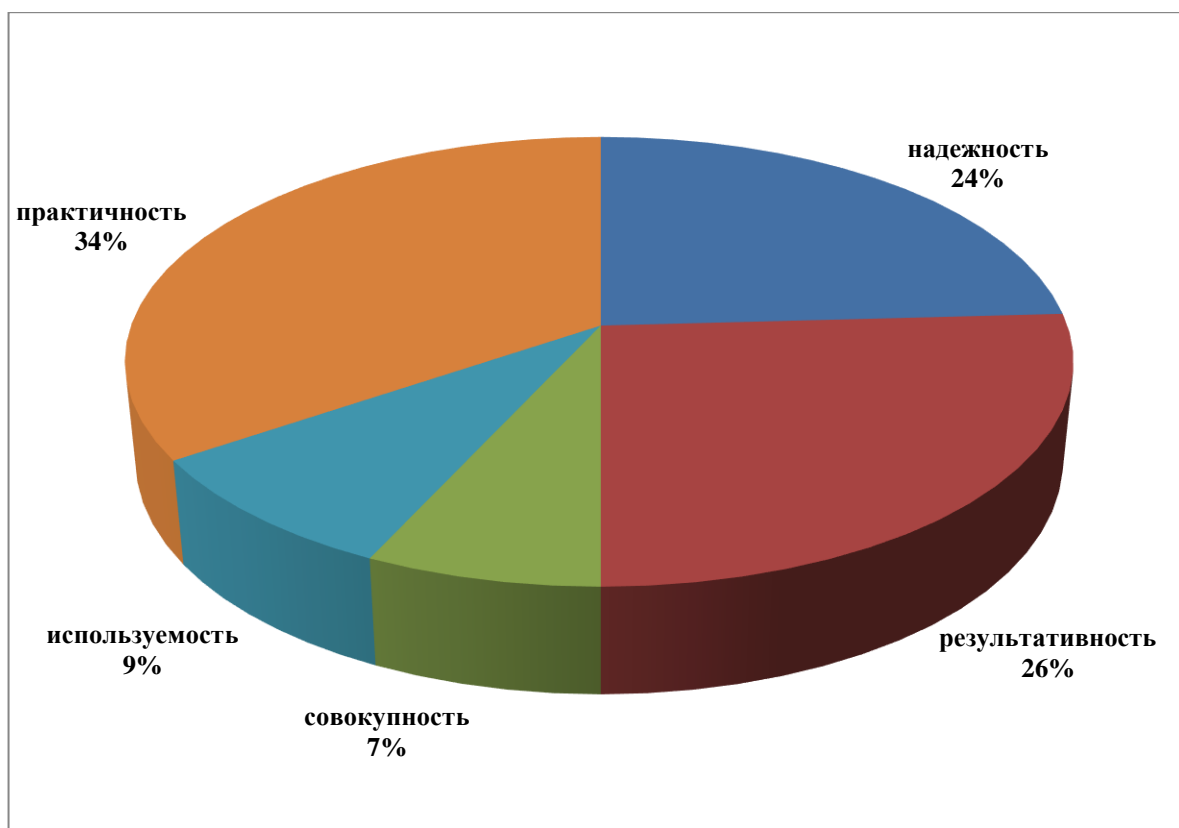


Рисунок 2.10 - Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода многомерной статистики

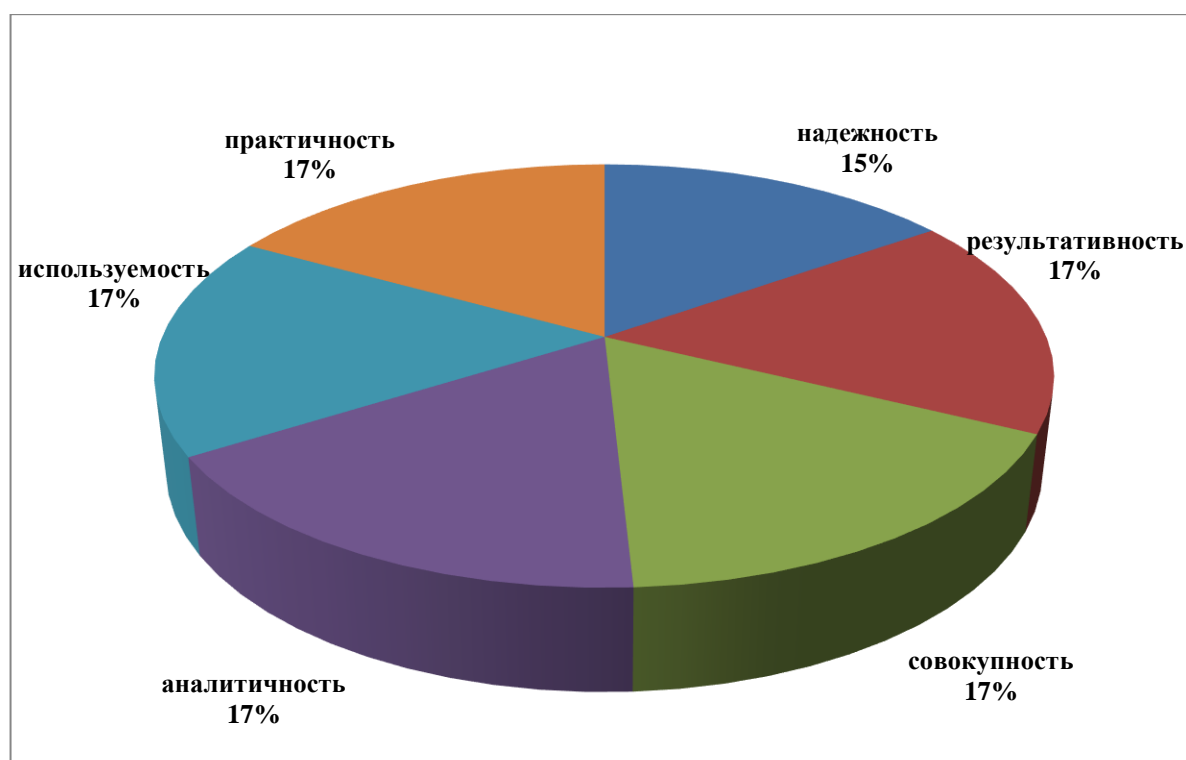


Рисунок 2.11 - Диаграмма структурного распределения параметров, характеризующих эффективность метода математического моделирования

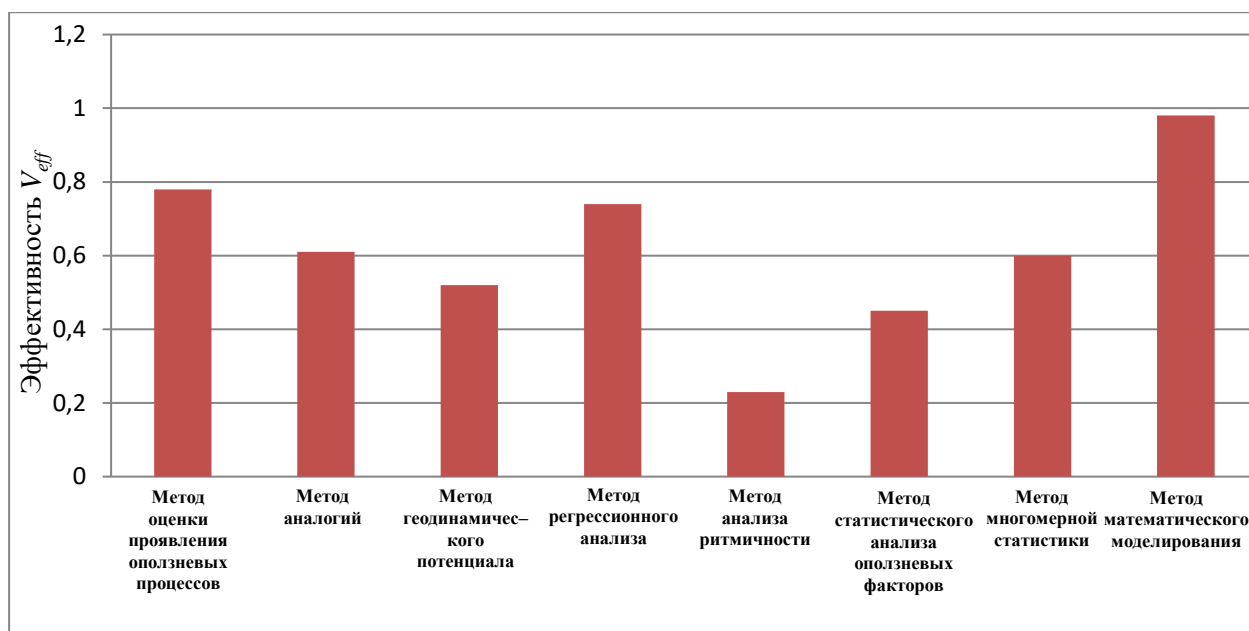


Рисунок 2.12 - Сравнительная эффективность методов оценки и прогноза оползневых процессов

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 [238]. 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 (рисунок 2.13).

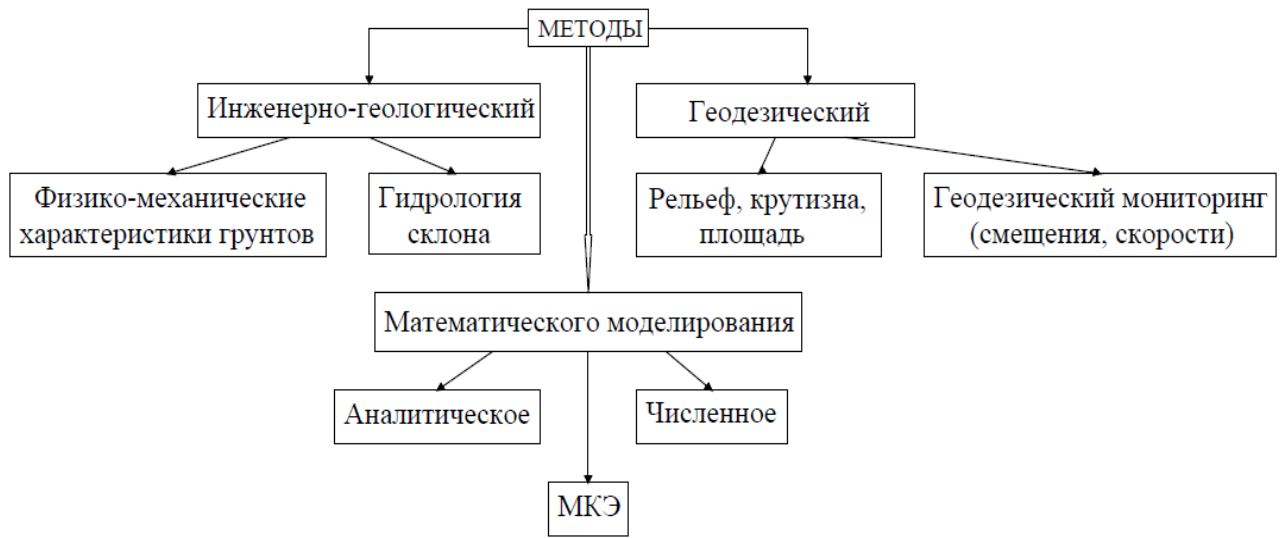


Рисунок 2.13 - Методы комплексного подхода к анализу оползневой устойчивости склоновых территорий

Краткая характеристика каждого блока этой 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, которая направлена 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 [238].

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» [78], [245]; «теории интегральных преобразований Лапласа, Ганкеля, Меллина, Фурье-Бесселя, синус (косинус)-преобразования и др.» [8], [145]; «теории спектрального Фурье-анализа» [103]; «на методе конечных элементов (МКЭ)» [32], [59], [237].

Как видно, в литературе достаточно много внимания уделено математическим методам моделирования. Наиболее широкое распространение в геомеханике получил МКЭ. МКЭ в сочетании с мощными ЭВМ допускает использование моделей материалов практически любой степени сложности [237], [295] 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, вы-

сокой 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 является прогнозирование деформаций склоновой территории, а также общая устойчивость геотехнической системы [260]. Правильный выбор модели позволит наиболее адекватно учесть, как первичную, так и вторичную консолидацию грунта, а также их переуплотненное состояние, и моделировать их поведение во времени.

Построенную на основании метода конечных элементов математическую модель оползневой устойчивости склона следует наполнить исходными данными. Подготовка исходных данных осуществляется на третьем этапе.

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

На четвертом этапе выполняется расчет компонент тензора геодинамических напряжений (нормальные и касательные) 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 «Обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений оползней» (Приложение 4).

На последнем 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 (параметры, которые позволяют оценить необходимость мер по инженерной защите склонов). Вариации этих показателей накладываются на статическую модель устойчивости склона и выполняется аппроксимация модели к выбранному сценарию развития оползневой ситуации.

Рассмотренные выше этапы для наглядности представим в виде блок-схемы (рисунок 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.

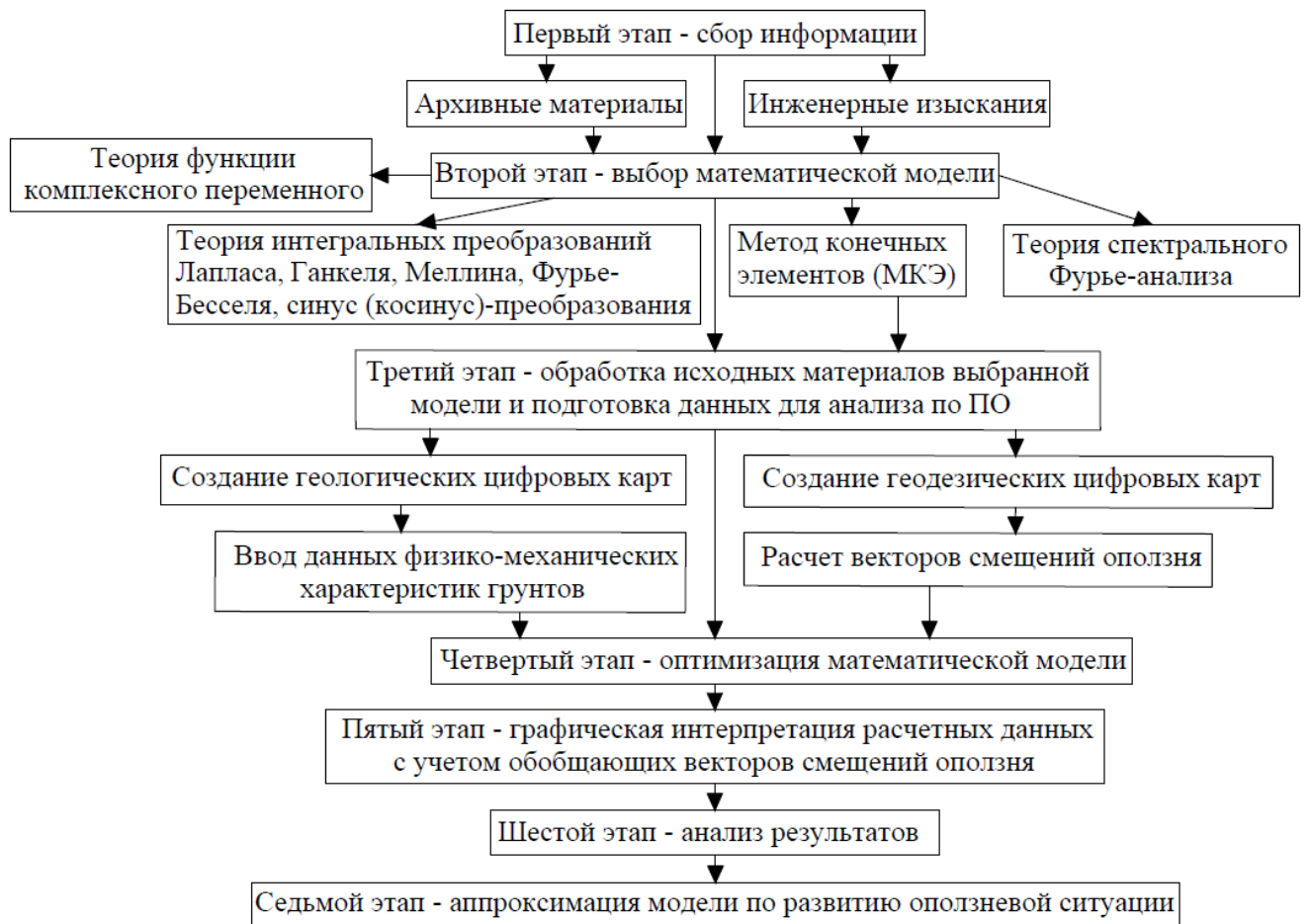


Рисунок 2.14 - Блок-схема комплексного подхода по определению степени устойчивости склона

С позиций комплексного подхода могут быть решены следующие задачи:

- 1) комплексная оценка состояния среды СС;
- 2) исследование оползневой ситуации и оценка уровня оползневого 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 оползневого риска в СС. Пример использования этой методики дан в главе 7.

2.5 Выводы по Главе 2

1. На сегодняшний день применяется достаточно большое количество геологических методов для решения задач по прогнозированию опасных природных процессов и оценки вызываемых ими рисков. Однако особенности функционирования различных склоновых систем требуют построения универсальной методологии математического моделирования и оценки оползневых рисков.

2. Для выбора оптимального метода оценки опасных оползневых процессов качественного сравнения существующих методов оценки и прогнозирования опасных оползневых процессов недостаточно. Необходимо разработать сравнительный метод численных критериев эффективности количественного анализа этих методов.

3. Предлагаемый нами сравнительный метод численных критериев эффективности количественного анализа различных геологических методов оценки оползневых опасностей позволяет достаточно обоснованно выполнять оценку их эффективности. Проведенное тестирование показало, что метод математического моделирования является наиболее предпочтительным.

4. Предлагаемая методика комплексного подхода для анализа оползневой устойчивости среды СС, включающая геодезический метод, инженерно-геологический метод и метод математического моделирования дает возможность наиболее адекватно и эффективно решать проблемы обеспечения безопасности сооружений и комплексной оценки оползневого риска в СС.

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], [43], [162], [228]. При этом следует учитывать, что условия выполнения измерений на оползневых склонах вносят свои отличительные особенности по сравнению с установившейся 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 редуций больше влияют на результаты измерений;
- из-за значительных наклонов визирных лучей увеличивается влияние погрешностей приборов;
- природные условия, залесенность 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 легкодоступные, с хорошей видимостью, расположенные на устойчивых участках – на бровках и на межоползневых гребнях. Это возможно в верхних отделах оползня, в области его цирка, так как в этих 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 косогоров 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 указывает инженер-геолог.

Конструкции знаков плановых опорных сетей обязательно должны быть такими, чтобы обеспечить принудительную центрировку 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, объемах смещающихся масс и 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, горизонтальных сдвигах, кренах и раскрытием трещин. Эта весьма важная информация, по которой будет определяться интегральный уровень оползневой уязвимости.

Точность определения координат пунктов опорной сети должна быть выше точности определения координат точек деформационной оползневой сети. О необходимой и достаточной точности и периодичности наблюдений в зависимости от скорости смещения оползней написано в этой главе.

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 [33], [130]. 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 дистанционно-угловые), полигонометрия, спутниковые ГНСС определения, координатный метод, лазерное сканирование, стереофотограмметрия, геометрическое и тригонометрическое нивелирование [6], [267], [273], [282], [284], [288], [300]. 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 (рисунок 3.1). Для обработки результатов наблюдений используются разнообразные программные продукты, например, AutoCAD, Microstation, Credo и др.

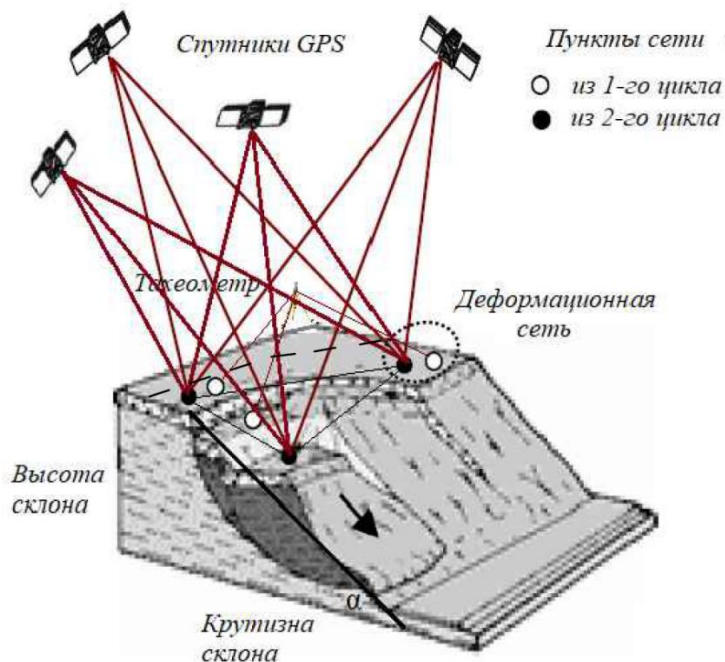


Рисунок 3.1 - Принципиальная схема сочетания методов ГНСС и наземной съемки для изучения оползней

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 [6], [267], [273], [282], [284], [288], [300].

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 $1\text{ мм} + 1\text{ ppm}$ до 3500 м (Leica Geosystems). Тахеометры позволяют измерять координаты оползневых точек в течение, довольно, короткого периода времени. В координатном методе планово-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 [43].

Данные дистанционного зондирования Земли в исследованиях оползней активно используются с 90-х гг. XX в. Эти данные применяются как для идентификации и картографирования оползней, так и для мониторинга и анализа динамики оползневых процессов. Для указанных целей привлекают съёмки в видимой, ближней инфракрасной, тепловой инфракрасной, радиоволновой и ультрафиолетовой зонах спектра. В последнее время исследования оползней средствами космической съёмки расширились за счет съёмок в радиодиапазоне, поскольку радарная интерферометрия позволяет обнаруживать деформации и смещения земной поверхности

в доли см [86]. 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 другие.

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 и ГИС-технологии для построения цифровых моделей рельефа местности [79].

Еще одним из современных методов по наблюдениям за сетью оползневых точек являются GPS (Global Positioning System) технологии. GPS состоит из 24-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. Задача приемников уловить и записать данные, принимаемые от спутниковых передатчиков. Координаты X , Y и H приемника, установленного над оползневой точкой, определяются методом обратных засечек от передатчиков спутников в количестве минимум четырех с оценкой точности [17], [73].

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 (3.1) [20], [98], [99], [174], [180]:

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

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 предложением в работе [43] о связи точности наблюдений за оползнем с его скоростью. Тогда вместо (3.1) будем иметь (3.2):

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

где V равно (3.3)

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

S – величина смещения оползня;

j – номер цикла наблюдений;

Δt – интервал времени между циклами наблюдений.

В работе [99] показано, что в зависимости от доверительной вероятности $P = 0,946 \div 0,997$ предельное отношение $\frac{1}{\tau}$ следует принимать (по правилам 2σ), равными $\frac{1}{4} \div \frac{1}{6}$.

По правилам теории погрешностей [13] определим среднеквадратическую погрешность (СКП) m_V функции (3.3), приняв наблюдения в циклах равноточными. Получим (3.4)

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

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) будем иметь (3.5)

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

Окончательно получим (3.6)

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

В таблице 3.1 приведены значения СКО определения 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 ранее опубликованных работах автора [146], [148], [149], [153], [154], [156], [158], [171], [177], [181], [289] при наблюдениях деформаций использовались теодолиты, светодальномеры и различные устройства. 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 (3.7):

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

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 (3.8)

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

где m_D – СКП наклонного расстояния;

m_z – СКП зенитного расстояния;

m_α – СКП дирекционного угла;

ρ – число секунд в одном радиане, равное 206265".

СКП пространственного положения координат оползневой точки будет (3.9)

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

Подставим (3.8) в (3.9) и приведем подобные члены. Получим (3.10)

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

Так как СКП m_α и m_z характеризуется СКП m_β измерения углов электронным тахеометром, то формула (3.10) примет вид (3.11)

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

Поскольку смещения оползневых точек определяют по разностям их координат, полученных в разных циклах наблюдений, то формула для вычисления СКП перемещения будет (3.12)

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

Так, например, при $D = 100$ м, $z = 30^\circ$, $m_D = 2$ мм, $m_\beta = 2''$ получим $m_{S_i} = 3,2$ мм, т.е., погрешность перемещения точки составит 3,2 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 [108] приведена классификация скорости смещения оползней с оценкой их движения (таблица 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/сутки	Быстрое
3	1,5 м/месяц	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.) [210], [211], которая игнорирует необходимость учитывать влияние сезонных изменений климатических воздействий [47].

Нам представляется более логичным, если частота наблюдений будет находиться в зависимости от скорости смещения оползня [196]. 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 течении интервала времени Δt между циклами измерений и определяются как (3.13)

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

Поставим условие, чтобы смещения S , вычисляемые по формуле (3.13), были бы меньше критического смещения $S_{\text{крит}}$, т.е. (3.14)

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

Тогда интервал времени Δt между циклами наблюдений можно вычислить по формуле (3.15)

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

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 [108]. Тогда (3.16)

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

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 таблице 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.

Алгоритм обоснования периодичности наблюдений за смещениями оползней показан на рисунке 3.2:



Рисунок 3.2 - Алгоритм периодичности наблюдений

Пример. Если $V = 30$ мм/мес, то СКО определения смещения $\sigma_s = 6$ мм (таблица 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:

$$m_{s_i} = \sqrt{2} \sqrt{(3 \text{ мм})^2 + 2 \cdot \left(100000 \text{ мм} \frac{5''}{206265''} \right)^2} \cdot 1,030 = 5 \text{ мм}.$$

Эта погрешность соответствует скорости смещения оползневой точки. Следующий цикл наблюдений надо выполнять через 2,2 месяца (таблица 3.3).

Если $V = 15$ мм/мес, то $\sigma_s = 3$ мм. Тогда при $D = 100$ м надо 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 минимальном числе пунктов сети и минимальном 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 необходима максимально-возможная точность наблюдений деформационных оползневых точек на теле оползня и еще более высокую точность при контроле стабильности пунктов опорной сети, размещенными за границами тела оползневого склона, являющейся основой для геодезического мониторинга оползней.

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 на 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: полигонометрии и линейно-угловых построений.

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 (рисунок 3.3), опирающегося на два исходных пункта *A*, *B* и направления.

Интересная идея по проектированию полигонометрического хода заданной точности опубликована в [54]. Разовьем эту идею для создания опорной сети для наблюдений за деформациями сооружений, возведенных на склоновых территориях.

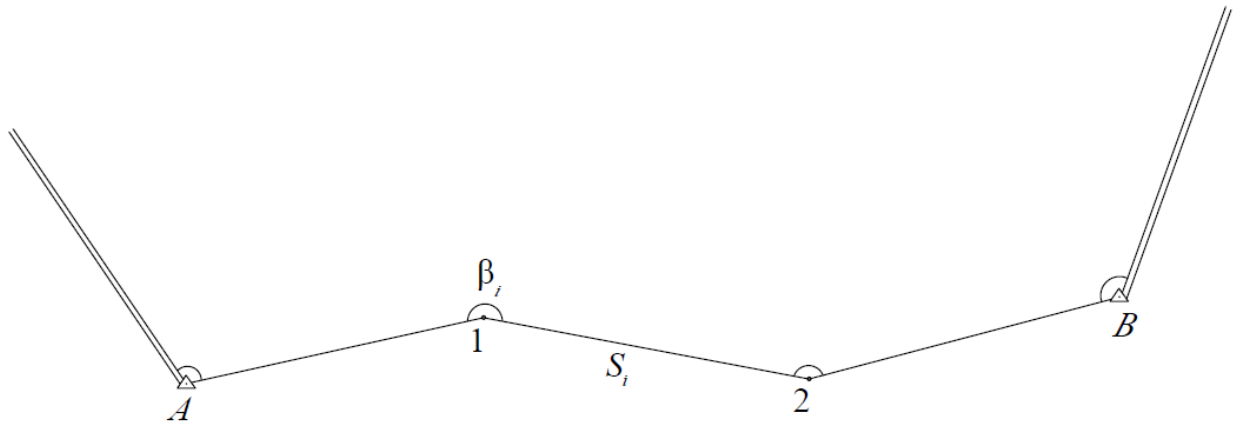


Рисунок 3.3 - Вытянутый ход полигонометрии

В последнее время довольно часто требование к точности хода задается в виде выражения (3.17)

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

где T – коэффициент «понижения точности измерений» (для нашей задачи логично иметь $1 < T < 4$);

m – точность измерений.

В переводе на профессиональный геодезический язык формулу (3.17) следует понимать, как (3.18)

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

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 (3.19)

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

Формула (3.18) решает «прямую задачу оценки точности сети», а вытекающая из неё формула (3.20)

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

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 [185]. 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 приближённым формулам.

Но в ситуации, представленной формулой (3.17), все три элемента формул (3.18) и (3.19) известны априори, т.е. ещё до разработки плана геометрической схемы сети обратный вес P^{-1} функции уже задан. Следовательно, в этом случае необходимо определить геометрические параметры предполагаемой к созданию на объекте работ полигонометрического хода, удовлетворяющей всем трём заданным значениям элементов формул (3.18) и (3.20) [185], [188].

Соответствующий анализ выполним на примере вытянутого равностороннего и уравненного по углам полигонометрического хода. СКП взаимного положения конечных точек такого хода (СКП функции) определяется формулой (3.21):

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

где m_s – СКП измерения сторон, мм;

m_β – СКП измерения углов, сек.;

L – длина хода, мм;

n – число сторон хода;

$\rho = 206265''$.

Выразив длину L хода в километрах и нормировав соответственно $\rho = 0,206265''$ (размерности m_s и m_β при этом остаются прежними), преобразуем выражение (3.21) к виду (3.22):

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

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} рассматриваемого полигонометрического хода (3.23):

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

Отношение квадратов СКП во втором слагаемом формулы (3.23) есть обратный вес Q_β измеренных углов (3.24):

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

С учётом этого и ранее принятого значения $\rho = 0,206265''$, формула (3.23) примет вид (3.25):

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

Обозначим (3.26)

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

где K - «геометрический коэффициент хода».

С учётом (3.26) преобразуем формулу (3.25) к следующему виду (3.27):

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

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 [185], [188].

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 (3.28):

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

2. Обратный вес P^{-1} хода не может быть меньше числа сторон в нём, 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 , $L_{км}$ 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 $Q_S = 1$, формула (3.22)), где q_1 – коэффициент пропорциональности обратных весов угловых и линейных измерений.

Задаваясь различными значениями длины хода $L_{км}$ 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)), вычисляем допустимую длину хода (3.29) [185]:

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

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, $q_1 = 0,25; 1; 2,25$.

Рассчитаем по формуле (3.29) допустимую длину полигонометрического хода для различных значений T , n и q_1 . Результаты вычислений приведены в таблице 3.4 [185], [188].

Таблица 3.4 - Допустимая длина хода $L_{км}$ для различных значений $q_1 = Q_\beta$, n и $T = \sqrt{P^{-1}}$

$T = 3$				$T = 2$			
n	$q_1 = 0,25$	$q_1 = 1$	$q_1 = 2,25$	n	$q_1 = 0,25$	$q_1 = 1$	$q_1 = 2,25$
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	-	-	-	-

Продолжение таблицы 3.4

6	0,82	0,41	0,27	-	-	-	-
7	0,63	0,32	0,21	-	-	-	-

Таблица 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 (3.30)

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

При фиксированном значении m_β вычисляем коэффициент q_1 и для него по формуле (3.29) определяем допустимую длину хода L .

При любом наборе из таблицы 3.5 геометрических параметров хода при заданном значении T погрешность M в формуле (3.17) останется постоянной. Надо выбрать наиболее приемлемый для реальных условий вариант и составить проект хода, выдерживая его расчётные геометрические параметры. При этом следует соблюдать примерно равные длины сторон (3.31) [185], [188]:

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

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 известными в теории ошибок принципами «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 [185], [188].

При $q_2 = 1$ влияние обратных весов угловых и линейных измерений одинаково. Из (3.27) получим (3.32):

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

При $q_2 = 0,25$ влияние обратного веса угловых измерений не существенно. При этом (3.33):

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

При $q_2 = 2,25$ не существенно влияние обратного веса линейных измерений. Здесь имеем (3.34):

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

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). Будем иметь (3.35):

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

3. По принятому значению из Q_β из формулы (3.26) определяем для расчётного в пункте 2 значения K допустимую длину $L_{\text{км}}$ проектируемого хода (3.36):

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

Если для конкретных условий объекта длина хода $L_{\text{км}}$ фиксирована, то из формулы (3.26) при полученном в пункте 2 значению K определяем допустимое значение Q_β (3.37):

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

4. Из формулы (3.36) по ранее полученным допустимым значениям $L_{\text{км}}$ и n (пункты 3 и 2) 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 таблицы 3.5.

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

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

б) Из формулы (3.24) при ранее определённых значениях Q_{β} и m_S вычисляем допустимое значение m_{β} (3.38):

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

Приведём пример расчётов 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) найдём обратный вес хода:

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

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

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

3. Примем $Q_\beta = 1$ 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

$$M = Tm_S = 2 \cdot 2 = 4 \text{ мм} \quad \text{и} \quad \frac{M}{L} = \frac{0,004}{450} = \frac{1}{112500}.$$

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 ещё 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 трёх 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 ($Q_\beta = 1$) (значения этих трёх величин получены в соответствии со здравым смыслом – логике и реальной ситуации). В итоге проектируемый ход должен иметь следующие геометрические параметры: $L = 0,45$ км [185], [188]; $n = 2$; $S = 225$ 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, ещё до нанесения его на план объекта. Это ни в коем случае не исключает классическую оценку хода, нанесённого на план по расчётным 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 [185], [188].

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 пятисот метров являются замкнутые полигонометрические четырехугольники. 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:

- 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 уравнять 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) (рисунок 3.4).

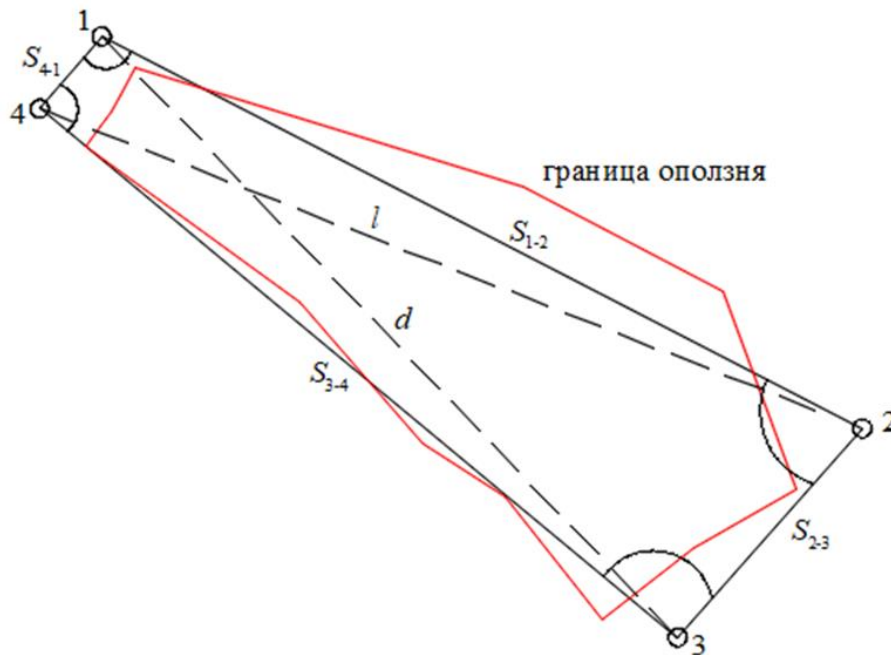


Рисунок 3.4 - Опорная сеть с не измеряемыми диагоналями l и d на оползневом склоне Карамышевской набережной ($1\circ$, $2\circ$, $3\circ$, $4\circ$ - пункты опорной сети)

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 неуравненных 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 рисунка 3.3.

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 (3.39):

$$\begin{aligned} \sum_1^4 v_\beta + W_\beta &= 0, \\ v_{l_1} - v_{l_2} &= 0, \\ v_{d_1} - v_{d_2} &= 0. \end{aligned} \quad (3.39)$$

С учетом фундаментального уравнения трилатерации [55], [56] (3.40)

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

в которой коэффициенты A_β , B_β , C_β соответственно равны (3.41):

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

где h_a – высота треугольника, проведенная из вершины угла β на противоположную сторону a , линейные условные уравнения примут вид (3.42):

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho A_1} v_1 + \frac{B_1}{A_1} v_{S_4} + \frac{C_1}{A_1} v_{S_1} - \frac{1}{\rho A_3} v_3 - \frac{B_3}{A_3} v_{S_3} - \frac{C_3}{A_3} v_{S_2} + W_{2-4} &= 0, \\ \frac{1}{\rho A_2} v_2 + \frac{B_2}{A_2} v_{S_1} + \frac{C_2}{A_2} v_{S_2} - \frac{1}{\rho A_4} v_4 - \frac{B_4}{A_4} v_{S_3} - \frac{C_4}{A_4} v_{S_4} + W_{1-3} &= 0. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Угловая невязка вычисляется по формуле (3.43)

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

а допустимое значение угловой невязки (3.44)

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

Линейные (диагональные) невязки равны (3.45)

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

а допустимое значение линейной невязки (3.46)

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

где l_1, l_2, d_1, d_2 – длины диагоналей, вычисленные из соответствующих противолежащих 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 измерении.

Составим таблицу коэффициентов условных уравнений (таблица 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 (3.47):

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

По теореме косинусов дважды вычислим диагонали l и d (рисунок 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 (3.48)

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

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 (3.49)

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

Получим (рисунок 3.4):

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

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

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

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

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

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) будет:

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

Искомый вектор поправок выглядит следующим образом (3.50):

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

Система условных уравнений поправок будет (3.51)

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

в которой вектор невязок W_{31} равен (3.52)

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

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:

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

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

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

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

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

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 (3.53)

$$N_{33}k_{31} + W_{31} = 0, \quad (3.53)$$

где N_{33} – матрица коэффициентов для нормальных уравнений, равная (3.54)

$$N_{33} = R_{38}R_{83}^T, \quad (3.54)$$

k – коррелата (неопределенный множитель Лагранжа), равная (3.55)

$$k_{31} = -N_{33}^{-1}W_{31}, \quad (3.55)$$

N_{33}^{-1} – обратная матрица коэффициентов нормальных уравнений, т.е. матрица, отвечающая условию (контроль матрицы N_{33}^{-1}) (3.56)

$$N_{33}^{-1}N_{33} = E. \quad (3.56)$$

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 (3.57):

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

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 [13].

Поскольку за «единицу веса» приняли равноточно измеренные стороны ($P_S = 1$), то веса измеренных углов β_i , вычисляемые по формуле (3.58)

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

будут равны $P_{\beta} = 1$ мм/сек. Тогда, соответственно, обратные веса $Q_S = \frac{1}{P_S}$ и

$$Q_{\beta} = \frac{1}{P_{\beta} (\text{мм/сек})}.$$

Подставив (3.57) в (3.51), получим систему нормальных уравнений коррелат (3.59)

$$R_{38} R_{83}^T + W_{31} = 0, \quad (3.59)$$

или с учетом (3.54) будет (3.60)

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

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.

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

Вычислим уравненные значения измеренных величин и их функций. Уравненные значения измеренных величин рассчитаем по формуле (3.61) [13]

$$\bar{\lambda}_i = \lambda_i + V_i. \quad (3.61)$$

Получим:

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

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

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

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

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

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

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

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

Перейдем к апостериорной оценке точности и вычислим СКП единицы веса μ и ее надежность m_μ по формулам (3.62):

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

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 таблице 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 (3.63)

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

где μ – СКП единицы веса;

Q_F – обратный вес функции.

Обратный вес функции вычислим по формуле (3.64)

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

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 (3.65)

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

Линеаризуем функции (3.65) с учетом (3.61) разложением их в ряд Тейлора, ограничиваясь при этом первыми членами разложения. Получим матрицу коэффициентов весовых функций (3.66)

- линейный вид

$$f_{28} = \begin{pmatrix} 0 & \sin \beta_2 \frac{S_{2-3}}{\rho} & 0 & 0 & \cos \alpha_{1-2} & \cos(\alpha_{1-2} + 180^\circ - \beta_2) & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_2 \frac{S_{2-3}}{\rho} & 0 & 0 & \sin \alpha_{1-2} & \sin(\alpha_{1-2} + 180^\circ - \beta_2) & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (3.66)$$

- числовой вид

$$f_{28} = \begin{pmatrix} 0 & -0,577 & 0 & 0 & -0,456 & -0,752 & 0 & 0 \\ 0 & -0,145 & 0 & 0 & +0,890 & -0,659 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

В методе коррелят матрица Q_{yp} обратных весов уравненных измерений вычисляется по формуле (3.67)

$$Q_{yp} = Q_l - Q_v, \quad (3.67)$$

где Q_v – полная матрица обратных весов поправок результатов измерений, равная (3.68)

$$Q_v = Q_l R_{38}^T N^{-1} R_{38} Q_l, \quad (3.68)$$

Q_l – диагональная матрица результатов измерений;

R_{38} – матрица коэффициентов условных уравнений.

Весовая матрица результатов измерений (измерения равноточные) равна

$$Q_l = E = \begin{pmatrix} \frac{m_\beta^2}{\mu^2} & & & & & & & & \\ & \frac{m_\beta^2}{\mu^2} & & & & & & & \\ & & \frac{m_\beta^2}{\mu^2} & & & & & & \\ & & & \frac{m_\beta^2}{\mu^2} & & & & & \\ & & & & 1 & & & & \\ & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 & & & & & & & & \\ & 4 & & & & & & & \\ & & 4 & & & & & & \\ & & & 4 & & & & & \\ & & & & 1 & & & & \\ & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & 1 \end{pmatrix}.$$

Тогда для выражения (3.67) необходимо иметь:

– матрицу нормальных уравнений N_{33} ;

– обратную матрицу нормальных уравнений N_{33}^{-1} ;

– матрицу обратных весов поправок результатов измерений

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

– матрицу обратных весов уравненных результатов измерений (3.67)

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

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 $Q_Y = 0,384$). Не диагональные элементы - корреляционные отношения координат пункта 3.

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

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

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

Точечная оценка положения пункта 3 будет

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

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.

3.6 Уравнивание свободных полигонометрических сетей

Еще одним из способов создания опорной сети при ширине оползневого тела до 500 м является свободный замкнутый полигон, опирающийся на один исходный пункт 1 и направление 1-2 (рисунок 3.5).

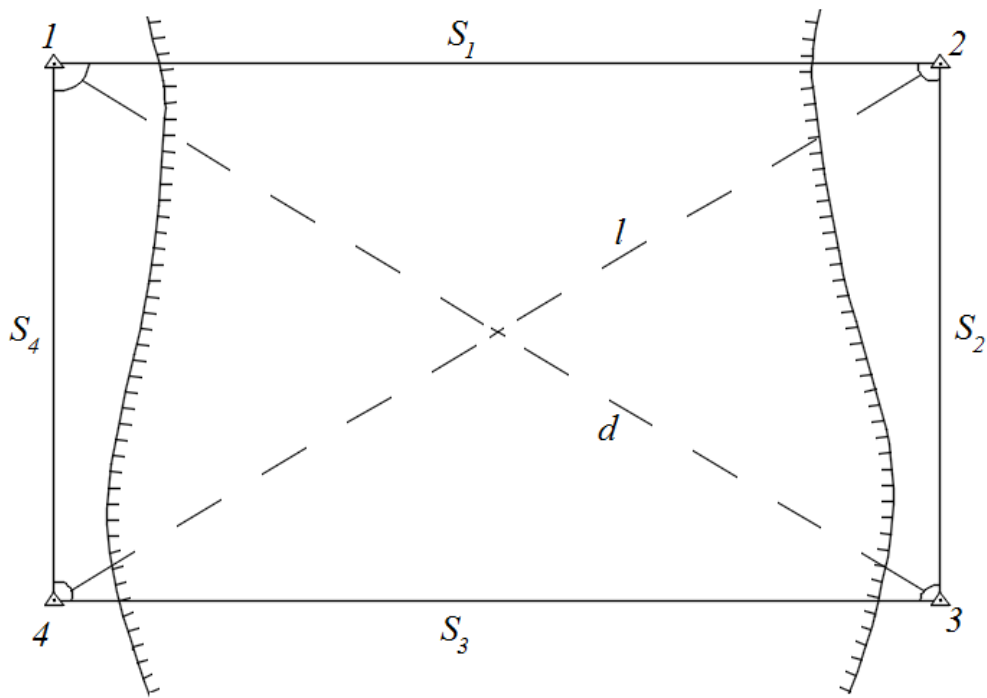


Рисунок 3.5 - Замкнутый ход полигонометрии из четырех сторон

В замкнутом ходе полигонометрии возникают три невязки, одна из которых угловая (3.69)

$$W_\beta = \sum_{i=1}^n \beta_i - 180^\circ (n-2), \quad (3.69)$$

и две координатных (3.70) и (3.71)

$$W_X = \sum_{i=1}^n \Delta X_i = \sum_{i=1}^n S_i \cos \alpha_i, \quad (3.70)$$

$$W_Y = \sum_{i=1}^n \Delta Y_i = \sum_{i=1}^n S_i \sin \alpha_i. \quad (3.71)$$

Проф. Зайцев А.К. [55] предложил заменить координатные условные уравнения линейными – условными уравнениями не измеряемых (вычисляемых) диагоналей l и d (рисунок 3.5).

Диагонали l и d вычисляются по теореме косинусов дважды: сначала диагональ l вычисляют из треугольника 4-1-2, а затем из треугольника 2-3-4. Аналогично, диагональ d вычисляют из треугольника 3-4-1 и из треугольника 1-2-3.

Вычисленная невязка в угловой форме дает возможность использовать известное фундаментальное уравнение трилатерации (формула 3.43) (рисунок 3.6).

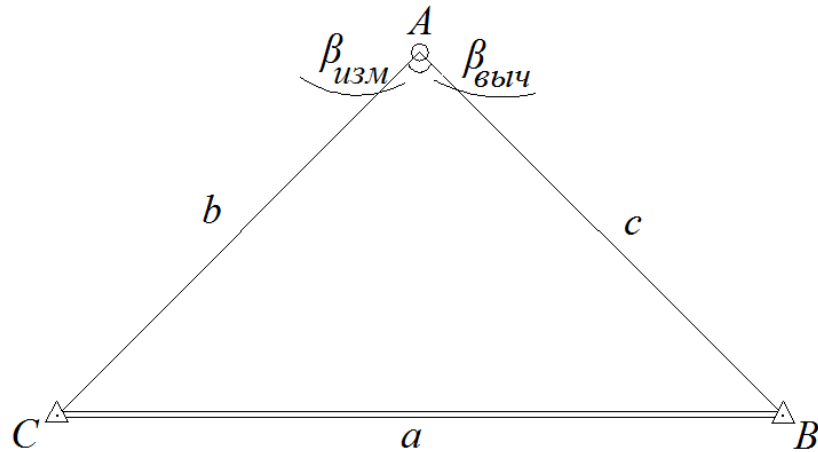


Рисунок 3.6 - Линейно-угловой треугольник

Оно связывает поправку v_β в вычисленный угол β_{vych} с поправками v_a, v_b, v_c (мм) в измеренные стороны a, b, c треугольника рисунка 3.6, где коэффициенты $A_\beta, B_\beta, C_\beta$ соответственно вычисляются по формулам (3.41).

Вычисленные по формулам (3.41) коэффициенты уравнения (3.40) проконтролируем по следующей формуле (3.72):

$$A_\beta a - B_\beta b - C_\beta c = 0. \quad (3.72)$$

В несвободной сети сторона a не измеряется (вычисляется по координатам точек B и C). Следовательно, поправка $v_a = 0$ и выражение (3.40) примет вид (3.73)

$$\frac{v_{\beta_{выч}}}{\rho} = -B_{\beta}v_b - C_{\beta}v_c. \quad (3.73)$$

Контрольная формула (3.72) при этом остается справедливой.

В прямоугольных и остроугольных треугольниках для всех остроугольных углов коэффициенты уравнения (3.40) всегда положительные. Аналогично и для тупого угла в тупоугольных треугольниках. Для острых углов β в прямоугольных треугольниках один из коэффициентов B_{β} или C_{β} будет равен 0, поскольку высотой h_a является сторона b или c (формула (3.41)). В тупоугольных треугольниках для острых углов β один из коэффициентов B_{β} или C_{β} будет отрицательным. А именно: если к тупому углу прилежит сторона b , то отрицательный B_{β} , если же к тупому углу прилежит сторона c , то отрицательный C_{β} . В указанных случаях вычисленному по формуле (3.41) коэффициенту B_{β} или C_{β} надо приписать отрицательный знак «−». В последующих вычислениях его необходимо учитывать.

Вычисленные значения угла β по формуле (3.40) и коэффициенты A_{β} , B_{β} , C_{β} по формуле (3.41), а также во всех последующих формулах значения сторон a , b , c , выраженные в миллиметрах, желательно нормировать таким образом, чтобы в целой части числа оставалась всего одна значащая цифра. Например, для длин сторон S , которые лежат в пределах от 100 до 1000 метров, коэффициент нормирования равен 10^{-5} . Так, если измеренная сторона $S = 304,542$ м, то при вычислениях ее надо принять равной 3,04542 мм. Тогда коэффициенты A_{β} , B_{β} , C_{β} станут близки к единице. Это очень удобно, и главное, надёжно. В этом случае надо значение $\rho = 206265''$ так же умножить на тот же нормированный коэффициент, т.е. принять $\rho = 2,06265''$. Тогда размерность поправок, указанная в формуле (3.40), не изменится: угловая будет выражена в секундах, а линейная в миллиметрах [185], [188].

Такое построение довольно часто встречается в геодезической производственной практике и носит название «обратная линейно-угловая засечка». Это самая оперативная схема построения сети – минимальный объем измерений в ней сочетается с их надежным полевым контролем.

Наши исследования показывают, что невязку W , которая возникает в этой сети, удобнее всего вычислять в угловой форме, а не в линейной, как это принято в

классическом решении. Она равна разности между непосредственно измеренным углом ($\beta_{\text{изм}}$) и вычисленным углом ($\beta_{\text{выч}}$) по измеренным сторонам треугольника (формула (3.40)).

Рассмотрим далее подробно процедуру уравнивания обратной линейно-угловой засечки, если его невязка вычислена в угловой форме.

Итак, для треугольника (рисунок 3.6), угловая невязка W равна (3.74):

$$W'' = \beta_{\text{изм}} - \beta_{\text{выч}}. \quad (3.74)$$

Для вычисления угла β по измеренным сторонам целесообразно воспользоваться теоремой косинусов (3.75):

$$\cos\beta = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} = \frac{(b+c)^2 - a^2}{2bc} - 1. \quad (3.75)$$

Если

$b^2 + c^2 - a^2 > 0$, угол β – острый;

$b^2 + c^2 - a^2 = 0$, угол β – прямой (теорема косинусов становится теоремой Пифагора);

$b^2 + c^2 - a^2 < 0$, угол β – тупой.

Известно, что угол β , который находится в пределах $80^\circ < \beta < 100^\circ$, более надёжно можно вычислить через функцию тангенса половинного угла (3.76) [55]

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) = \sqrt{\frac{bc}{p(p-a)}} - 1 = \sqrt{\frac{4bc}{(b+c)^2 - a^2}} - 1. \quad (3.76)$$

СКП m_W угловой невязки W в соответствии с формулой (3.74) для треугольника (рисунок 3.6) равна (3.77):

$$m_W'' = \sqrt{m_{\beta_{\text{изм}}}^2 + m_{\beta_{\text{выч}}}^2}. \quad (3.77)$$

Если измеренные стороны треугольника равноточные (веса $P_S = 1$), то СКП $m_{\beta_{\text{выч}}}$ вычисленного угла $\beta_{\text{выч}}$ на основании формул (3.40) и (3.41) равна:

- для свободного треугольника (3.78)

$$m_{\beta_{\text{выч}}}'' = m_S \rho'' \sqrt{\frac{3}{h_a^2} - \frac{1}{b^2} - \frac{1}{c^2}}; \quad (3.78)$$

- для несвободного треугольника (3.79)

$$m_{\beta_{\text{выч}}}'' = m_s \rho'' \sqrt{\frac{2}{h_a^2} - \frac{1}{b^2} - \frac{1}{c^2}}, \quad (3.79)$$

(высота и стороны – нормированы!).

Математическую обработку результатов измерений выполним с вычисления угла $\beta_{\text{выч}}$ по формулам (3.75), а его СКП $m_{\beta_{\text{выч}}}$ по формуле (3.79).

Потом вычислим невязку W по формуле (3.74), а по формуле (3.77) вычислим СКП m_W и сравним фактическую невязку W с её допустимым значением $W_{\text{доп}}$, которую вычисляют по формуле (3.80) [185], [188]:

$$W_{\text{доп}}'' = 2m_W. \quad (3.80)$$

Затем, используя *нормированное* значение $\rho'' = 2,06265''$, вычислим коэффициент K (мм²) (3.81):

$$K = \rho'' W'' P_W, \quad (3.81)$$

где $P_W = \left(\frac{m_s(\text{мм})}{m_W(\text{сек})} \right)^2$ – вес невязки W .

Коэффициенты A_β , B_β , C_β вычислим по формулам (3.41) и проконтролируем по формуле (3.72). Затем вычислим поправки (3.82):

$$v_\beta'' = -W'' \frac{m_{\beta_{\text{изм}}}^2}{m_W^2}; \quad v_b(\text{мм}) = -B_\beta K; \quad v_c(\text{мм}) = -C_\beta K. \quad (3.82)$$

Полученные поправки подставим для контроля в условное уравнение (3.83):

$$\frac{v_{\beta_{\text{изм}}}''}{\rho''} + B_\beta v_b(\text{мм}) + C_\beta v_c(\text{мм}) + \frac{W''}{\rho''} = 0. \quad (3.83)$$

Если контроль сошелся, то вычисленные поправки введем в результаты измерений. Получим уравненные значения измеренных угла и сторон. Также надежным контролем является проверка (3.84) равенства уравненного угла $\beta_{\text{ур}}$ его же значению $\beta_{\text{ур}}^*$, вычисленному по уравненным сторонам (формулы (3.75), (3.76)):

$$\beta_{\text{ур}} - \beta_{\text{ур}}^* = 0. \quad (3.84)$$

В конечном итоге приступают к завершающему этапу уравнивания – оценке точности. Поскольку имеется всего одно избыточное измерение ($r = 1$), то эта оценка будет не совсем надежной, но мы всё же укажем ее.

По стандартной формуле (3.85):

$$\mu = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{r}} \quad (3.85)$$

вычислим СКП единицы веса μ – уравнированного результата измерений, вес которого $P = 1$. Так как за «единицу веса» приняли равноточно измеренные стороны ($P_S = 1$), то вес измеренного угла β вычислим по формуле (3.58).

Оценка точности положения точки A относительно исходных B и C заключается в вычислении весов определения положения вершины A по двум полярным засечкам - по сторонам b и c . Определим их без учёта ошибок исходных пунктов B и C (3.86) [188]:

$$P_{A(b)} = \left(\frac{b^2 P_{\beta_{\text{выч}}}^{-1}}{m_{\beta_{\text{изм}}}^2} + 1 \right)^{-1}; \quad P_{A(c)} = \left(\frac{c^2 P_{\beta_{\text{выч}}}^{-1}}{m_{\beta_{\text{изм}}}^2} + 1 \right)^{-1}, \quad (3.86)$$

где обратный вес вычисленного угла $P_{\beta_{\text{выч}}}^{-1} = \left(\frac{m_{\beta_{\text{выч}}}(\text{сек})}{m_S(\text{мм})} \right)^2$ (стороны b и c нормированы).

Далее вычислим общий вес (3.87)

$$P_A = P_{A(b)} + P_{A(c)}. \quad (3.87)$$

Зная вес P_A , найдем обратный вес P_A^{-1} и, в итоге, вычислим СКП положения определяемой точки A (3.88):

$$M_A = \mu \sqrt{P_A^{-1}}. \quad (3.88)$$

В таблице 3.7 приведён численный пример математической обработки по изложенной выше методике при следующих исходных данных: $P_S = 1$; $m_S = 3$ мм; $m_\beta = 2''$; $P_{\beta_{\text{изм}}} = 2,25$ мм²/сек²; коэффициент нормирования 10^{-5} .

Таблица 3.7 - Математическая обработка типовой фигуры линейно-угловой сети

1. $\beta_{\text{изм}} = 49^\circ 03' 35''$ норм. $a = 2,27830 \text{ мм}$ норм. $b = 2,78285 \text{ мм}$ норм. $c = 2,70202 \text{ мм}$ норм. $h_a = 2,49309 \text{ мм}$	4. (3.81) $K = +10,9898 \text{ мм}^2$ (3.41) $A_\beta = 0,4011 \text{ мм}^{-1}$ $B_\beta = 0,1782 \text{ мм}^{-1}$ $C_\beta = 0,1547 \text{ мм}^{-1}$ (3.72) контроль: 0	5. (3.82) $v_\beta = -2,4''$ $v_b = -2,0 \text{ мм}$ $v_c = -1,7 \text{ мм}$	6. $\beta_{\text{ур}} = 49^\circ 03' 32,6''$ $b_{\text{ур}} = 278,2830 \text{ м}$ $c_{\text{ур}} = 270,2003 \text{ м}$
2. норм. $\rho = 2,06265''$ (3.75) $\beta_{\text{выч}} =$ $49^\circ 03' 31,3''$ контроль: (3.76) $49^\circ 03' 31,3''$ (3.79) $m_{\beta_{\text{выч}}} = 1,5''$	3. (3.74) $W = +3,7''$ (3.77) $m_W = 2,5''$ (3.80) $W_{\text{доп}} = 5,0''$	7. $X_B = 270,201 \text{ м}; Y_B = 0 \text{ м}$ $X_C = 182,353 \text{ м}; Y_C = 210,212 \text{ м}$ 7. $X_A = 0,001 \text{ м}; Y_A = 0,001 \text{ м}$ 8. $X_A = 0,001 \text{ м}; Y_A = 0 \text{ м}$ контроль: $\Delta a = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} = 0,001 \text{ м}$	
8. (3.85) $\mu = 3,5 \text{ мм};$ (3.88) $M_A = 1,7 \text{ мм}$			

Таблица состоит из восьми блоков. В каждом блоке в скобках стоят номера формул и рядом обозначения соответствующих элементов треугольника. В первый блок записываем результаты измерений угла и сторон треугольника и вычисленную высоту h_a , причём длины линий выражены в миллиметрах, но нормированы коэффициентом 10^{-5} . Во втором блоке вычисляем угол, а в третьем вычисляем невязки. В четвёртом вычисляем коэффициент K и коэффициенты фундаментального уравнения трилатерации. В пятом вычисляем поправки в результаты измерений. В шестом вычисляем уравненные значения измерений. В седьмом вычисляем условные координаты вершин треугольника. В восьмом выполняем оценку точности: вычисляем СКП единицы веса и координаты вершины A треугольника относительно вершин B и C .

Подчеркнем немаловажное с практической точки зрения обстоятельство: полностью процесс вычислений по изложенной методике уравнивания типовой фигуры линейно-угловой сети в виде треугольника (рисунок 3.6) сопровождается простым и надежным контролем. В том числе, и на таком важном этапе как четвёртый

блок. А в классическом варианте принято более сложная структура расчётных формул и вычисляются они совершенно бесконтрольно.

По измеренным значениям β , b , c и их точностях (таблица 3.8), для рисунка 3.6 по формуле (3.79) получим $m_{\beta_{\text{выч}}}'' = 1,5''$ (блок 2). Соответственно этой погрешности по формулам (3.77) будем иметь: $m_W = 2,5''$ (блок 3), по формуле (3.81) вычисляем $K = +10,9898 \text{ мм}^2$ (блок 4), по формуле (3.82) получаем три поправки $v_\beta = -2,4''$, $v_b = -2,0 \text{ мм}$, $v_c = -1,7 \text{ мм}$ (блок 5), по формулам (3.58), (3.85) находим $\mu = 3,5 \text{ мм}$ и по формулам (3.86), (3.87), (3.88) $M_A = 1,7 \text{ мм}$ (блок 8) [185], [188].

Таким образом, обратную линейно-угловую засечку очень удобно применять для определения координат точек оползневой сети, используя опорную сеть замкнутого полигонометрического четырехугольника. Она также может быть использована для наблюдений за смещениями и осадками зданий и сооружений на оползневых склонах.

3.7 Уравнивание результатов повторных циклов наблюдений

Геодезический мониторинг предполагает многократные наблюдения не только деформационных марок, закрепленных на объекте наблюдений, но и опорной геодезической сети [189]. При этом наблюдения организуются таким образом, что веса P_l результатов измерений l в каждом i -ом цикле наблюдений остаются постоянными.

Уравнение j -го (первого) цикла наблюдений выполняют по обычной схеме параметрического или коррелятного способов уравнивания по методу наименьших квадратов. В процессе уравнивания j -го цикла наблюдений составляют условные уравнения (в способе коррелят) или уравнения погрешностей (в параметрическом способе) R и соответствующие им нормальные уравнения N . Коэффициенты матриц R и N остаются постоянными и для всех последующих циклов наблюдений, если деформации самих пунктов опорной геодезической сети незначительны [55].

Если матрицы P_l и R остаются постоянными и для i -го цикла наблюдения сети ($i > j$), то вычисления поправок v_i к результатам измерений l_j (т.е. уравнивание i -го цикла наблюдения сети) целесообразно выполнять по формулам (3.89), (3.90), (3.91)

$$\Delta l = l_i - l_j, \quad (3.89)$$

$$\Delta v = -Z\Delta l, \quad (3.90)$$

$$v_i = v_j + \Delta v, \quad (3.91)$$

где v_j – поправки, полученные при уравнивании результатов измерений j -го (первого) цикла наблюдения сети.

В формуле (3.89) перед вектором Δl разностей результатов измерений двух циклов ставят плюс при уравнивании сети по способу коррелат и минус – при уравнивании сети параметрическим способом.

Матрица Z преобразования вектора разностей Δl в вектор приращения поправок Δv при постоянных P_l и R также постоянна для всех циклов наблюдений сети. Она вычисляется попутно с уравниванием j -го цикла наблюдений (практически целесообразно принять $j = 1$). Если уравнивание первого цикла выполняется параметрическим способом, то (3.92)

$$Z = N^{-1}R^T P_l, \quad (3.92)$$

если коррелатным, то (3.93)

$$Z = P_l^{-1}R^T N^{-1}R, \quad (3.93)$$

где R и R^T – соответственно прямая и транспонированная матрицы параметрических и условных уравнений;

P_l^{-1} – обратные веса измерений.

Матрицу Z целесообразно рассчитывать на ЭВМ. Однако при уравнивании небольших сетей вычисление матрицы Z с помощью современных мобильных вычислительных средств не вызывает особых затруднений.

При наличии матрицы Z уравнивание каждого последующего цикла наблюдений по формулам (3.89) – (3.91) сводится к элементарным вычислениям, которые

могут быть сделаны непосредственно в поле сразу же после окончания данного цикла наблюдений. В случае реализации этих формул на ЭВМ не требуется никаких предварительных вычислений по подготовке исходных данных для уравнивания, так как таковыми являются результаты непосредственных измерений в первом и i -ых циклах наблюдений.

Формулы (3.89) – (3.93) вытекают из следующих соображений. В соответствии с разложением Больца имеем (для коррелятного метода) (3.94)

$$v_j = -Bw_j; \quad B = P_l^{-1}R^T N^{-1}; \quad N = RP_l^{-1}R^T. \quad (3.94)$$

При выполнении i -го цикла наблюдений вектор свободных членов w_i – будет отличаться от вектора w_j из-за различных результатов измерений l_i и l_j . Приращение вектора свободных членов (3.95)

$$\Delta w_{ji} = (Rl_j - Rl_i) = R\Delta l_{ji}. \quad (3.95)$$

Следовательно, по формуле (3.94) имеем (3.96)

$$\Delta v_j = -B\Delta w_{ji} = -BR\Delta l_{ji} = -Z\Delta l_{ji}. \quad (3.96)$$

Аналогичные соображения справедливы и для параметрического способа, в котором (3.97)

$$\Delta w_{ji} = \Delta l_{ji}. \quad (3.97)$$

Независимо от способа уравнивания вектор свободных членов w_i – исходных уравнений для i -го цикла наблюдений при необходимости рассчитывается по формуле (3.98)

$$w_i = w_j + \Delta w_{ji}. \quad (3.98)$$

Отметим еще раз, что изложенные выше соображения справедливы лишь в случае постоянства матриц весов измерений и коэффициентов условных уравнений при наблюдениях в каждом цикле.

3.8 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 одним 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 (осадки, горизонтальные сдвиги, крены) в характерных местах здания, как правило, на уровне цокольного этажа монтируют стенные репера и определяют их координаты [143], [169], [173]. В последующих циклах наблюдений определяют изменения их планового и высотного положения за выбранный промежуток времени [22], [23], [100], [185], [188], [263].

Для определения абсолютных высотных деформаций S периодически определяют их высотные отметки H относительно исходных (неподвижных) пунктов. Осадка определяется по формуле (3.99):

$$S = H_{\text{тек}} - H_{\text{нач}}, \quad (3.99)$$

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 $(X_{\text{нач}}, Y_{\text{нач}})$ (3.100):

$$\begin{aligned} q_x &= X_{\text{тек}} - X_{\text{нач}} \\ q_y &= Y_{\text{тек}} - Y_{\text{нач}} \end{aligned} \quad (3.100)$$

По результатам наблюдений деформаций зданий и сооружений составляют техническое заключение о его состоянии и прогнозе развития выявленных деформаций, вырабатывают рекомендации по проведению соответствующих мероприятий, предупреждающих негативные последствия критических деформаций [182].

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 и его отдельных элементов и пр. [178], [293]. 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 [167], [168], [178], [185], [293]. 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) вычисляют по следующим формулам (3.101):

$$\begin{aligned} m_{q_x} &= 1,4m_x, \\ m_{q_y} &= 1,4m_y, \end{aligned} \quad (3.101)$$

где m_x и m_y – погрешность определения координат X_i и Y_i .

Следовательно, (3.102)

$$\begin{aligned} m_x &= \frac{m_{q_x}}{1,4}, \\ m_y &= \frac{m_{q_y}}{1,4}. \end{aligned} \quad (3.102)$$

Так как для второго класса точности точность определения горизонтальных смещений равна 5 мм [120], 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 (3.103):

$$\begin{aligned} X_i &= X_P + \Delta X_{P-i} = X_P + D_{P-i} \sin z_{P-i} \cos \alpha_{P-i}; \\ Y_i &= Y_P + \Delta Y_{P-i} = Y_P + D_{P-i} \sin z_{P-i} \sin \alpha_{P-i}, \end{aligned} \quad (3.103)$$

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 будет (3.104):

$$\begin{aligned} m_{X_i} &= \sqrt{m_{X_P}^2 + \sin^2 z_{P-i} \cos^2 \alpha_{P-i} m_{D_{P-i}}^2 + D_{P-i}^2 \cos^2 z_{P-i} \cos^2 \alpha_{P-i} \frac{m_{z_{P-i}}^2}{\rho^2} +} \\ &\quad \sqrt{+ D_{P-i}^2 \sin^2 z_{P-i} \sin^2 \alpha_{P-i} \frac{m_{\alpha_{P-i}}^2}{\rho^2}}; \\ m_{Y_i} &= \sqrt{m_{Y_P}^2 + \sin^2 z_{P-i} \sin^2 \alpha_{P-i} m_{D_{P-i}}^2 + D_{P-i}^2 \cos^2 z_{P-i} \sin^2 \alpha_{P-i} \frac{m_{z_{P-i}}^2}{\rho^2} +} \\ &\quad \sqrt{+ D_{P-i}^2 \sin^2 z_{P-i} \cos^2 \alpha_{P-i} \frac{m_{\alpha_{P-i}}^2}{\rho^2}}, \end{aligned} \quad (3.104)$$

где m_{X_P}, 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 206265".

Для СКП определения положения станции m_3 , полученной обратной линейно-угловой засечкой (рисунок 3.7), воспользуемся численным примером математической обработки по изложенной методике, рассмотренной в параграфе 3.5:

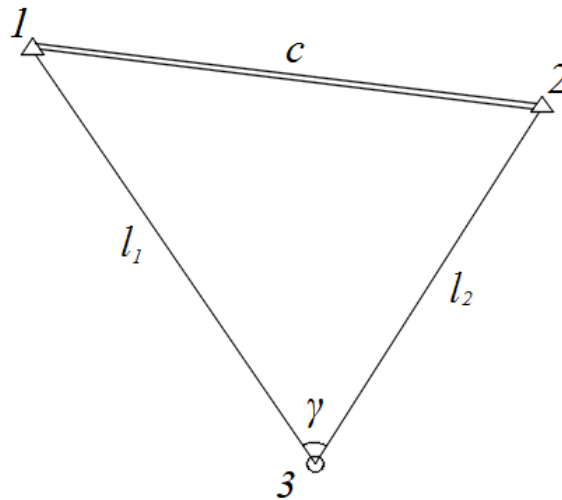


Рисунок 3.7 - Схема обратной линейно-угловой засечки

Было получено:

$$m_3 = 1,7 \text{ мм.}$$

Так как (3.105)

$$m_3 = \sqrt{m_{X_p}^2 + m_{Y_p}^2}, \quad (3.105)$$

то

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

Рассчитаем точность определения координат по формуле (3.104) при следующих данных: $m_p = 2''$; $D = 50 \text{ м}$; $m_D = 3 \text{ мм}$; $z = 60^\circ$; $\alpha = 45^\circ$.

Получим

$$m_{X_i} = \sqrt{(1,2 \text{ мм})^2 + \sin^2 60^\circ \cos^2 45^\circ \cdot (3 \text{ мм})^2 + (50 \text{ м})^2 \cos^2 60^\circ \cos^2 45^\circ \left(\frac{2''}{206265''}\right)^2} = 2,2 \text{ мм};$$

$$+ (50 \text{ м})^2 \sin^2 60^\circ \sin^2 45^\circ \left(\frac{2}{206265}\right)^2$$

$$m_{Y_i} = \sqrt{(1,2 \text{ мм})^2 + \sin^2 60^\circ \sin^2 45^\circ \cdot (3 \text{ мм})^2 + (50 \text{ м})^2 \cos^2 60^\circ \sin^2 45^\circ \left(\frac{2''}{206265''}\right)^2} = 2,2 \text{ мм.}$$

$$+ (50 \text{ м})^2 \sin^2 60^\circ \cos^2 45^\circ \left(\frac{2}{206265}\right)^2$$

Вычисленные значения среднеквадратических погрешностей горизонтальных смещений хорошо согласуются с таблицей 2 пособия для второго класса точности [120] (таблица 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 (3.106) [37]:

$$m_3 = m_\beta \sqrt{\frac{\rho^2 c^2 + (P_{l_1} + P_{l_2}) l_1^2 l_2^2}{\rho^2 [P_{l_1} (l_2 - l_1 \cos \gamma)^2 + P_{l_2} (l_1 - l_2 \cos \gamma)^2] + P_{l_1} P_{l_2} l_1^2 l_2^2 \sin^2 \gamma}}, \quad (3.106)$$

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 m_3 получилась равной 2,7 мм, что больше на 1 мм.

Высоту i -й деформационной точки вычисляют по формуле (3.107) [34]:

$$H_i = H_P + h_{P-i} = H_P + D_{P-i} \cos Z_{P-i}, \quad (3.107)$$

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 (3.108):

$$m_{H_i} = \sqrt{m_{H_P}^2 + \cos^2 z_{P-i} m_{D_{P-i}}^2 + D_{P-i}^2 \sin^2 z_{P-i} \frac{m_{z_{P-i}}^2}{\rho^2}}, \quad (3.108)$$

где m_D – СКП измерения наклонных расстояний;

m_z – СКП измерения зенитных расстояний.

Высота станции H_P определяется обратной высотной засечкой и вычисляется по формуле (3.109)

$$H_P = H_{исх} + D \cos z, \quad (3.109)$$

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

Пренебрегая погрешностью исходных пунктов, СКП определения высоты станции, полученную обратной высотной засечкой, вычисляют по формуле (3.110)

$$m_{H_P} = \sqrt{\cos^2 z \cdot m_D^2 + D^2 \sin^2 z \frac{m_z^2}{\rho^2}}. \quad (3.110)$$

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

$$m_{H_P} = \sqrt{\cos^2 60^\circ \cdot (2 \text{ мм})^2 + (100 \text{ м})^2 \sin^2 60^\circ \left(\frac{2''}{206265''} \right)^2} = 1,6 \text{ мм}.$$

По формуле (3.108) вычислим погрешность определения высоты деформационной точки:

$$m_{H_i} = \sqrt{(1,6 \text{ мм})^2 + \cos^2 60^\circ \cdot (2 \text{ мм})^2 + (50 \text{ м})^2 \sin^2 60^\circ \left(\frac{2''}{206265''} \right)^2} = 1,7 \text{ мм}.$$

Погрешность определения осадки вычисляют по формуле 3.111

$$m_S = m_H \sqrt{2}. \quad (3.111)$$

Тогда для нашего примера будем иметь

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

Погрешность осадки, вычисленная по формуле (3.111) оказалась больше допустимой (таблица 3.8). Тогда для повышения точности обратную высотную засечку надо выполнять с двух исходных пунктов. В этом случае погрешность уменьшится и составит

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

3.9 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, сложенными 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 деформируемости 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 группе предельных состояний.

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 [195]. Ниже приведены основные положения расчетов НДС откосов и склонов, изменяющегося во времени.

Для комплексной оценки НДС склона был разработан следующий алгоритм расчетов [190], [200], [291]:

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, включающих 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 [215] в пункте 5.5.1.2 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 использования 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. Данный 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 таком случае следует корректировать деформационные характеристики грунтов основания на меньшую глубину и методом последовательных итераций добиться сходимости результатов мониторинга и расчета МКЭ.

На рисунке 3.8 показана блок-схема этого метода.

Пример реализации предлагаемого метода корректировки показан в седьмой главе.

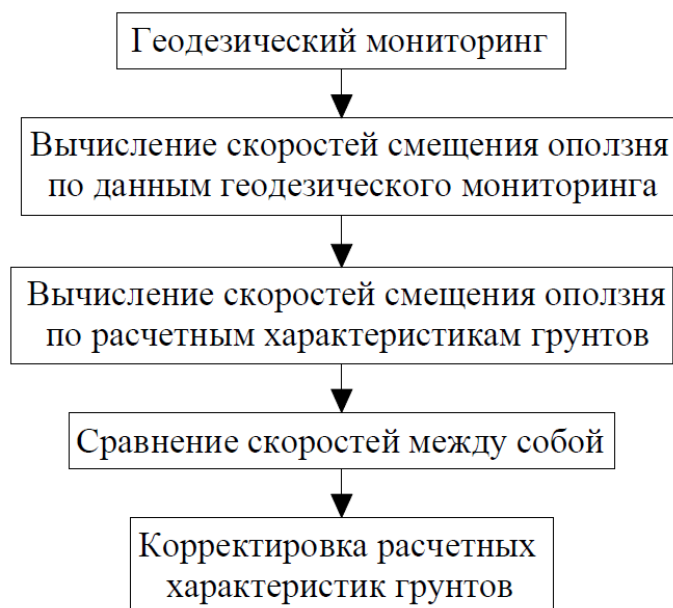


Рисунок 3.8 – Блок-схема по корректировке расчетных характеристик грунтов

3.10 Выводы по Главе 3

В данной главе нами разработаны методы постановки геодезического мониторинга оползневых смещений на склоновых территориях. Решены следующие конкретные задачи:

1. Разработана методика расчета точности геодезических наблюдений за смещением оползней. Выведена формула (3.3) вычисления среднеквадратического отклонения смещения оползня в пространстве в зависимости от скорости смещения оползня. Получены соответствующие значения среднеквадратических погрешностей для различных скоростей смещения оползня и составлена соответствующая таблица.

2. Разработан алгоритм обоснования периодичности (временной интервал Δt) между циклами наблюдений смещений оползней в зависимости от скорости.

3. Изложен принципиально новый подход к построению опорной геодезической сети методом полигонометрии. Предложена методика построения вытянутого полигонометрического хода с заданной точностью при возможных различиях его

геометрических параметров. Замкнутый полигонометрический ход рекомендовано создавать в виде четырехугольника, для которого предложен более простой способ составления возникающих в нем условных уравнений: сложные координатные условные уравнения заменяются более простыми линейными уравнениями диагоналей.

4. Разработана упрощенная методика уравнивания повторных циклов наблюдений опорной геодезической сети: получен матричный оператор связи Z между изменениями поправок Δv предыдущего цикла наблюдений и разностями Δl и $\Delta \beta$ измерений между соответствующими элементами сети в смежных циклах.

5. Показана целесообразность наблюдений деформационных марок на оползневом склоне по схеме обратной линейно-угловой засечки. Данное построение отличается мобильностью создания с одновременной надежностью контроля полевых измерений – весьма важные факторы для объектов чрезвычайных ситуаций.

6. Выполнен анализ точности наблюдений деформаций зданий и сооружений, расположенных на склоновых территориях с применением современных геодезических средств измерений.

7. Предлагается методика корректировки расчетных физико-механических характеристик грунтов СС на основе величин смещений оползней по результатам повторных геодезических наблюдений.

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 [116], [174], [228], [241]. Рассмотрим математическую модель оползня, тело которого является массой произвольной плотности, а форма его ложа - произвольная поверхность. Эта модель позволяет выявить момент начала оползневого процесса и определить основные проблемы в задаче его прогнозирования, как с точки зрения оползневого процесса, так и его последствий для зданий и сооружений [202]. 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 (рисунок 4.1).

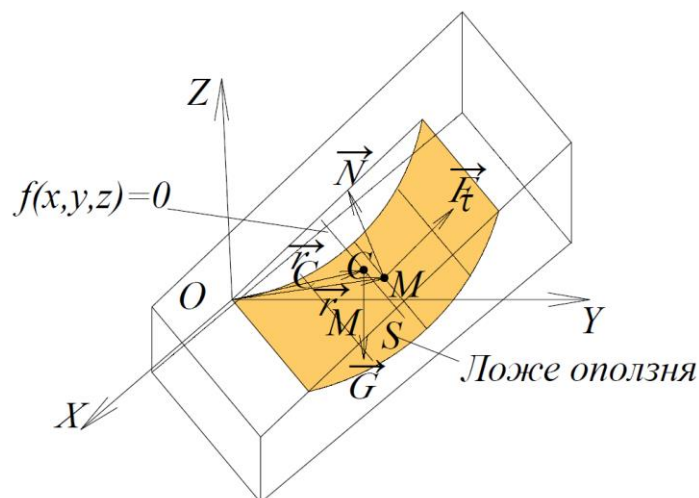


Рисунок 4.1 - Схема образования формы ложа оползня

Тогда уравнение поверхности в самом общем случае имеет вид (4.1):

$$f(x, y, z) = 0, \quad (4.1)$$

где $f(x, y, z)$ – произвольная непрерывная и дифференцируемая функция. На рисунке 4.1 дано начальное положение оползня (до начала процесса оползания):

M – произвольная точка оползня;

$\vec{r} = \overrightarrow{OM}$ – радиус-вектор точки M ;

$\vec{F}_\tau(x, y, z)$ – вектор силы сцепления (трения) в расчёте на единицу площади ложа оползня, направленный по касательной к поверхности ложа;

$\vec{N}(x, y, z)$ – вектор нормальной силы трения в расчёте на единицу площади ложа, направленный по нормали к поверхности ложа. Силы \vec{F}_τ и \vec{N} приложены в точке M ;

$C(x_0, y_0, z_0)$ – центр тяжести тела оползня;

\vec{G} – вес тела оползня.

Вектор нормальной силы трения \vec{N} направлен по градиенту к поверхности ложа оползня и на основании формулы (1) имеет вид (4.2):

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

Или в проекциях на оси координат ($Oxyz$) (4.3)

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

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 ложе плоскости неопределенны и могут быть произвольными. В проекциях на оси координат он будет (4.4)

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

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

Уравнения равновесия тела оползня в самом общем случае имеют вид (4.5):

$$\begin{cases} \vec{R} = 0, \\ \vec{M}_0 = 0. \end{cases} \quad (4.5)$$

где \vec{R} - главный вектор внешних сил, вычисляемый по формуле (4.6)

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

или в координатах (4.7)

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

\vec{M}_0 - главный момент внешних сил относительно начала координат, вычисляемый по формуле (4.8)

$$\vec{M}_0 = \iint_S \left[\vec{r}_m \times (\vec{F}_\tau + \vec{N}) + \vec{r}_o \times \vec{G} \right] dS \quad (4.8)$$

или в координатах (4.9)

$$\vec{M}_0 = \vec{M}_{0x} \vec{i} + \vec{M}_{0y} \vec{j} + \vec{M}_{0z} \vec{k}. \quad (4.9)$$

Здесь (4.10)

$$\begin{cases} \vec{M}_{0x} = \begin{vmatrix} y & z \\ \vec{F}_{\tau y} + \vec{N}_y & \vec{F}_{\tau z} + \vec{N}_z \end{vmatrix} + y_0 G, \\ \vec{M}_{0y} = \begin{vmatrix} z & x \\ \vec{F}_{\tau z} + \vec{N}_z & \vec{F}_{\tau x} + \vec{N}_x \end{vmatrix} - x_0 G, \\ \vec{M}_{0z} = \begin{vmatrix} x & y \\ \vec{F}_{\tau x} + \vec{N}_x & \vec{F}_{\tau y} + \vec{N}_y \end{vmatrix}. \end{cases} \quad (4.10)$$

В формулах (4.6) и (4.8) интегрирование идет по общей поверхности S тела оползня и ложа.

Уравнения равновесия (4.5) в координатах будут (4.11):

$$\begin{cases} R_x = 0, \\ R_y = 0, \\ R_z = 0, \\ \vec{M}_{0x} = 0, \\ \vec{M}_{0y} = 0, \\ \vec{M}_{0z} = 0. \end{cases} \quad (4.11)$$

Уравнения (4.11) в частном случае описывают модели, рассмотренных в работе [183].

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 S .

Первоочередная задача в проблеме разработки прогностического метода заключается в установлении их реальных значений. 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 не являются простыми задачами.

Таким образом получено условие устойчивости оползня, имеющего наиболее общую форму. На основе рассмотренной механико-математической модели оползня определён круг некоторых важных проблем, решение которых может позволить разработать теоретический и практический методы прогноза оползневых процессов и его влияния на безопасность зданий и сооружений, расположенных на оползнеопасных территориях.

4.2 Механико-математическая модель устойчивого равновесия оползня с цилиндрической поверхностью скольжения

В работе [243] предпринята попытка описания механико-математической модели оползня, тело которого является однородной массой, а форма его ложа в вертикальном продольном разрезе представляет собою *параболическую кривую*. По

мнению автора, эта модель позволяет выявить принципиальные вопросы оползневых процессов и определить основные проблемы в задаче его прогнозирования.

Рассмотрим механико-математическую модель оползня, тело которого является однородной массой (частный случай), но форма его ложа – цилиндрическая поверхность в вертикальном продольном разрезе, представляющая собой кривую произвольного вида. Выбор такой модели ложа оползня вызван двумя причинами. Во-первых, результаты натурных наблюдений [53] 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 (рисунок 4.2). Уравнение кривой имеет вид (4.12):

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

где $f(x)$ – произвольная функция переменной x и $f(0) = 0$. На рисунке 4.2 показано начальное положение оползня (до начала процесса оползания):

M – произвольная точка оползня;

$\vec{r} = \overrightarrow{OM}$ – радиус-вектор;

γ – угол наклона \vec{r} к оси Ox ;

$\vec{\tau}$ – вектор силы сцепления (трения) в расчёте 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.

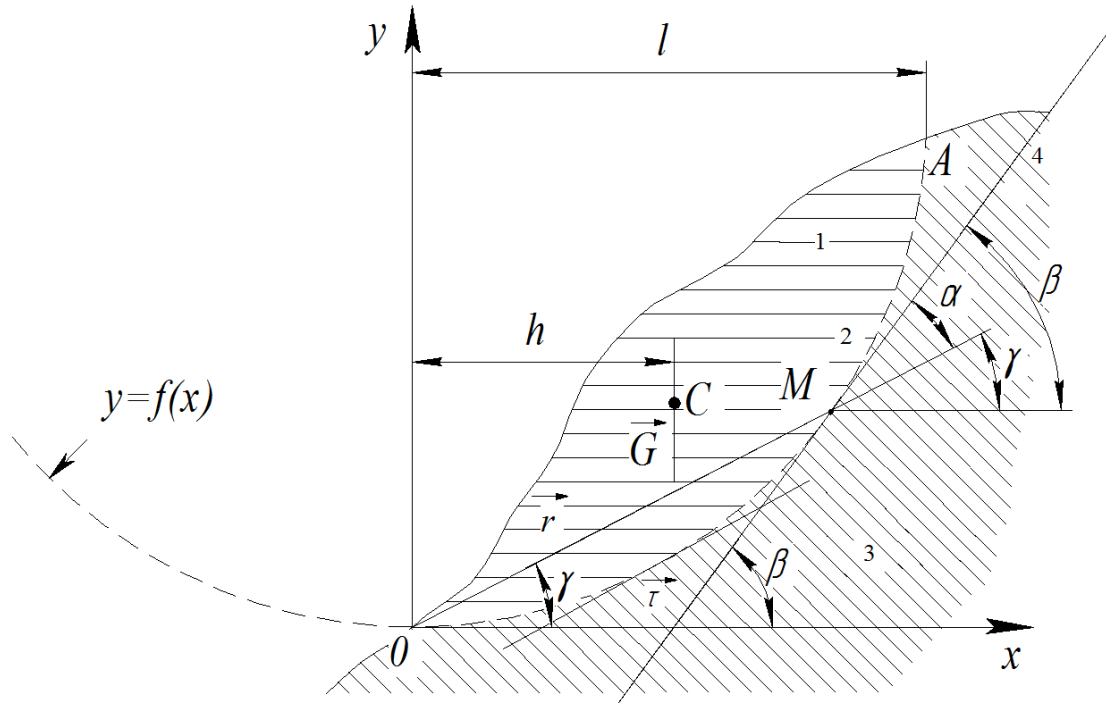


Рисунок 4.2 – Продольный разрез оползня

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

Сдвигающая сила \vec{G} создаёт момент относительно точки 0 (4.13)

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

Сила сцепления (сопротивление скольжению), действующая вдоль элементарной дуги dS кривой, создаёт момент сопротивления относительно той же точки 0, равный (4.14)

$$m_0(\vec{\tau}ds) = \left[\left[\vec{r} \times \vec{\tau}dS \right] \right] = r\tau \sin dS. \quad (4.14)$$

Отсюда суммарный момент сил M_0^C сопротивления вдоль линии ложа будет равен (4.15)

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

Проекция R^C на ось y суммы всех сил сопротивления R^C вдоль линии ложа будет равна (4.16)

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

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

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\beta &= \frac{df(x)}{dx} = f'_x, \\ \sin\beta &= \frac{f'_x}{\sqrt{1+(f'_x)^2}}, \\ \sin\alpha = \sin(\beta - \gamma) &= \frac{x\sin\beta - y\cos\beta}{r} = \frac{xf'_x - f(x)}{r\sqrt{1+(f'_x)^2}}, \\ dS &= \sqrt{1+(f'_x)^2} dx. \end{aligned}$$

Используя эти соотношения, и условия постоянства силы сцепления τ вдоль всей дуги OA , криволинейные интегралы (4.15) и (4.16) будут (4.17) и (4.18):

$$M_0^C = \tau \int_0^l (xf'_x - f(x)) dx, \quad (4.17)$$

$$R^C = \tau \int_0^l f'_x dx = \tau f(l). \quad (4.18)$$

Предельное состояние равновесия определяется уравнениями статики, которые с учётом (4.13), (4.17) и (4.18) для рассматриваемого вида оползня в самом общем случае имеют следующую структуру (4.19):

$$\begin{cases} \sum m_0 = m_0(\vec{G}) - M_0^C = 0, \\ \sum R_i^C = -G + R^C = 0, \end{cases} \quad (4.19)$$

или (4.20)

$$\begin{cases} Gh - \tau \int_0^l (xf'_x - f(x)) dx, \\ \tau f(l) - G = 0. \end{cases} \quad (4.20)$$

Тело оползня будет находиться в состоянии устойчивого равновесия, если
(4.21)

$$\begin{cases} Gh > \tau \int_0^l (xf'_x - f(x)) dx, \\ G < \tau f(l), \end{cases} \quad (4.21)$$

в противном случае никакого равновесия не будет, т.е. оползень начнёт движение.

Система (4.21) примет вид (4.22):

$$\frac{\tau \int_0^l (xf'_x - f(x)) dx}{h} < G < \tau f(l) \quad (4.22)$$

или (4.23)

$$\tau \int_0^l (xf'_x - f(x)) dx < hG < h\tau f(l). \quad (4.23)$$

Проинтегрируем левую часть неравенства (4.23). При $y = ax$ получим (4.24):

$$\tau \int_0^l (ax - ax) dx = 0 \quad (4.24)$$

и (4.25)

$$G \leq \tau al. \quad (4.25)$$

В этом случае тело оползня будет находиться в состоянии устойчивого равновесия. Если же (4.26)

$$G > \tau al, \quad (4.26)$$

то равновесия не будет и оползень начнёт движение.

При $y = ax^2$ имеем (4.27):

$$\tau \int_0^l (2ax^2 - ax^2) dx = \tau \int_0^l ax^2 dx = \tau a \frac{x^3}{3} \Big|_0^l = \frac{1}{3} \tau al^3. \quad (4.27)$$

Тогда, если (4.28)

$$Gh - \frac{1}{3} \tau al^3 > 0, \quad (4.28)$$

то тело оползня будет находиться в состоянии устойчивого равновесия. В противном случае, если (4.29)

$$Gh - \frac{1}{3}\tau al^3 < 0, \quad (4.29)$$

то равновесия не будет, т.е. оползень начнёт движение.

Заметим, что неравенства (4.28) и (4.29) получены также и в работе [243].

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, его слоистость), его обводнённость, 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 наиболее близкую к цилиндрической форме ложе. На основе рассмотренной механико-математической модели оползня определён круг наиболее важных проблем (аналогично общему случаю), решение которых, также, может позволить разработать теоретический и практический методы прогноза оползневого процесса и его влияния на безопасность зданий и инженерных сооружений, расположенных на оползневых склонах.

4.3 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 [228].

При изучении динамики оползней, одной из основных задач является организация циклов повторных геодезических наблюдений за сетью оползневых точек. По полученным координатам точек вычисляют вектора и скорости смещений оползней.

В связи с неравномерными смещениями в разных частях тела оползня, оползневая сеть также будет деформироваться неравномерно. Поэтому важной задачей является определение направления движения оползня и величина его смещения.

Существующая методика по вычислению на плоскости векторов смещений оползневых точек основана на градиентном подходе [228]. Но этот метод дает представление только о смещениях отдельных точек. Информация о результирующем векторе смещения отсутствует.

В работах автора [153], [157], [159], [162], [163], [165], [166] приводится методика вычисления результирующего вектора и его направления, которая наиболее точно [164] характеризует поведение оползня в плане (на плоскости). Автор назвал ее обобщенным среднеквадратическим эллипсом смещений оползня.

Поскольку оползень движется по наклонной поверхности, нам представляется, что характер поведения оползня надо рассматривать в пространстве. Это позволит полнее подойти к механико-математической модели оползневого процесса, которая необходима для оценки его последствий для зданий и сооружений [183], что в свою очередь, должна привести к снижению рисков в строительстве [207] и, соответственно, к увеличению безопасности [102].

Для этого необходимо вывести поверхность эллипсоида, с произвольно ориентированными в пространстве главными осями [184].

Как известно, общее выражение для плотности нормального закона распределения в пространстве любого числа измерений $n(x_1, x_2, \dots, x_n)$ имеет вид (4.30):

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\sqrt{|C|}}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} (x_i - m_{x_i})(x_j - m_{x_j})}, \quad (4.30)$$

где $|C|$ – определитель матрицы C ;

$C = \|c_{ij}\|$ – матрица, обратная корреляционной матрице K , т.е. если корреляционная матрица (4.31)

$$K = \|K_{ij}\|, \quad (4.31)$$

то элементы этой матрицы (4.32)

$$c_{ij} = (-1)^{i+j} \frac{M_{ij}}{|K|}, \quad (4.32)$$

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 (4.33)

$$|C| = \frac{1}{|K|}. \quad (4.33)$$

Из общего соотношения (4.30) можно получить все формы нормального закона для любого числа измерений и для любых видов зависимости между случайными величинами [21]. В частности, в [21] подробно рассмотрены случаи $n = 1; 2$.

Здесь мы рассмотрим случай, когда $n = 3$.

Для этого случая формула (4.30) примет вид (4.34):

$$f(x_1, x_2, x_3) = \frac{\sqrt{|C|}}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{ij} (x_i - m_{x_i})(x_j - m_{x_j})}. \quad (4.34)$$

Корреляционная матрица K будет равна (4.35):

$$K = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{vmatrix}. \quad (4.35)$$

Используя коэффициенты корреляции r_{ij} , которые связаны с элементами корреляционной матрицы $\|K_{ij}\|$ формулами (4.36)

$$K_{ij} = r_{ij}\sigma_i\sigma_j, \quad (4.36)$$

где (4.37) [21]

$$\sigma_i\sqrt{D_i}, \quad \sigma_j\sqrt{D_j}, \quad r_{ij}=1, \quad (4.37)$$

D_i – дисперсия;

σ_i – среднеквадратическое отклонение соответствующей случайной величины, формула (4.35) примет вид (4.38):

$$K = \begin{vmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1\sigma_2r_{12} & \sigma_1\sigma_3r_{13} \\ \sigma_1\sigma_2r_{12} & \sigma_2^2 & \sigma_2\sigma_3r_{23} \\ \sigma_1\sigma_3r_{13} & \sigma_2\sigma_3r_{23} & \sigma_3^2 \end{vmatrix}. \quad (4.38)$$

Определитель $|K|$ корреляционной матрицы (4.38) 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 (4.39):

$$|K| = \sigma_1^2\sigma_2^2\sigma_3^2(1 - r_{12}^2 - r_{23}^2 - r_{13}^2 + 2r_{12}r_{23}r_{13}). \quad (4.39)$$

Отсюда, используя формулу (4.33), определим определитель $|C|$, имеющий вид (4.40):

$$|C| = \frac{1}{|\sigma_1^2\sigma_2^2\sigma_3^2(1 - r_{12}^2 - r_{23}^2 - r_{13}^2 + 2r_{12}r_{23}r_{13})|}. \quad (4.40)$$

Элементы матрицы $\|c_{ij}\|$, $i, j = 1, 2, 3$ равны (4.41):

$$C = \begin{vmatrix} \frac{\sigma_2^2 \sigma_3^2 (1 - r_{23}^2)}{|K|} & \frac{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3^2 (r_{13} r_{23} - r_{12})}{|K|} & \frac{\sigma_1 \sigma_3 \sigma_2^2 (r_{12} r_{23} - r_{13})}{|K|} \\ \frac{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3^2 (r_{13} r_{23} - r_{12})}{|K|} & \frac{\sigma_1^2 \sigma_3^2 (1 - r_{13}^2)}{|K|} & \frac{\sigma_1^2 \sigma_2 \sigma_3 (r_{13} r_{12} - r_{23})}{|K|} \\ \frac{\sigma_1 \sigma_3 \sigma_2^2 (r_{12} r_{23} - r_{13})}{|K|} & \frac{\sigma_1^2 \sigma_2 \sigma_3 (r_{13} r_{12} - r_{23})}{|K|} & \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2 (1 - r_{12}^2)}{|K|} \end{vmatrix}. \quad (4.41)$$

Рассмотрим теперь поверхность плотности нормального распределения функцией трех переменных (x_1, x_2, x_3) , представленной формулой (4.34).

Записав уравнение этой поверхности в переменных (x, y, z) , получим (4.42):

$$f(x, y, z) = \frac{\sqrt{|C|}}{(2\pi)^2} e^{-\frac{1}{2} \left[c_{11}(x-m_x)^2 + 2c_{12}(x-m_x)(y-m_y) + 2c_{13}(x-m_x)(z-m_z) + c_{22}(y-m_y)^2 + 2c_{23}(z-m_z)(y-m_y) + c_{33}(z-m_z)^2 \right]}, \quad (4.42)$$

где c_{ij} даются матрицей, которая определяется формулой (4.30) и имеют вид (4.43):

$$C = \begin{vmatrix} \frac{\sigma_y^2 \sigma_z^2 (1 - r_{yz}^2)}{|K|} & \frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 (r_{xz} r_{yz} - r_{xy})}{|K|} & \frac{\sigma_x \sigma_z \sigma_y^2 (r_{xy} r_{yz} - r_{xz})}{|K|} \\ \frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 (r_{xz} r_{yz} - r_{xy})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_z^2 (1 - r_{xz}^2)}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y \sigma_z (r_{xz} r_{xy} - r_{yz})}{|K|} \\ \frac{\sigma_x \sigma_z \sigma_y^2 (r_{xy} r_{yz} - r_{xz})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y \sigma_z (r_{xz} r_{xy} - r_{yz})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 - r_{xy}^2)}{|K|} \end{vmatrix}. \quad (4.43)$$

В сечении поверхности распределения (4.42) плоскостями, перпендикулярными оси $f(x, y, z)$, будем иметь уравнение (4.44):

$$c_{11}(x-m_x)^2 + 2c_{12}(x-m_x)(y-m_y) + 2c_{13}(x-m_x)(z-m_z) + c_{22}(y-m_y)^2 + 2c_{23}(z-m_z)(y-m_y) + c_{33}(z-m_z)^2 = \lambda^2, \quad (4.44)$$

где λ произвольная константа.

Поскольку $r_{ij} < 1$ значения коэффициентов $c_{ij} > 0$. Отсюда заключаем, что поверхность (4.44) 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 (4.44) на основании равенства (4.43) являются корнями следующего уравнения третьей степени относительно переменной λ (4.45):

$$\begin{vmatrix} \frac{\sigma_y^2 \sigma_z^2 (1 - r_{yz}^2)}{|K|} - \lambda & \frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 (r_{xz} r_{yz} - r_{xy})}{|K|} & \frac{\sigma_x \sigma_z \sigma_y^2 (r_{xy} r_{yz} - r_{xz})}{|K|} \\ \frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 (r_{xz} r_{yz} - r_{xy})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_z^2 (1 - r_{xz}^2)}{|K|} - \lambda & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y \sigma_z (r_{xz} r_{xy} - r_{yz})}{|K|} \\ \frac{\sigma_x \sigma_z \sigma_y^2 (r_{xy} r_{yz} - r_{xz})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y \sigma_z (r_{xz} r_{xy} - r_{yz})}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 - r_{xy}^2)}{|K|} - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (4.45)$$

Решив уравнение (4.45) относительно λ , которое всегда имеет три действительных корня, найдем их в порядке возрастания $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$. Главные оси $C < B < A$ также в порядке возрастания будут (4.46):

$$C = \sqrt{\frac{1}{\lambda_1}}, \quad B = \sqrt{\frac{1}{\lambda_2}}, \quad A = \sqrt{\frac{1}{\lambda_3}}. \quad (4.46)$$

Формулы (4.46) полностью решают задачу нахождения главных осей эллипсоида (4.44).

Смещение оползневого тела равно (4.47):

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} = \sqrt{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3}}. \quad (4.47)$$

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 и Z и Y и 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 (4.48):

$$\begin{cases} r_{xy} \neq 0, r_{xz} = 0, r_{yz} = 0, \\ K = \sigma_x^2 \sigma_y^2 \sigma_z^2 (1 - r_{xy}^2) \end{cases}. \quad (4.48)$$

Определим в этом случае главные оси эллипсоида смещения оползня.

Учитывая условия (4.48), уравнение (4.45) для определения главных осей будет иметь вид (4.49):

$$\begin{vmatrix} \frac{\sigma_y^2 \sigma_z^2}{|K|} - \lambda & -\frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 r_{xy}}{|K|} & 0 \\ -\frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 r_{xy}}{|K|} & \frac{\sigma_x^2 \sigma_z^2}{|K|} - \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 - r_{xy}^2)}{|K|} - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (4.49)$$

Соотношение (4.49), 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 (4.50):

$$\left(\frac{\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1 - r_{xy}^2)}{|K|} - \lambda \right) \left(\left(\frac{\sigma_x^2 \sigma_z^2}{|K|} - \lambda \right) \left(\frac{\sigma_y^2 \sigma_z^2}{|K|} - \lambda \right) - \left(-\frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z^2 r_{xy}}{|K|} \right)^2 \right) = 0. \quad (4.50)$$

Учитывая формулу (4.48), и введя обозначения (4.51),

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{\sigma_y^2 (1 - r_{xy}^2)}, & a_2 = \frac{1}{\sigma_x^2 (1 - r_{xy}^2)}, \\ a_3 = \left(\frac{r_{xy}}{\sigma_x \sigma_y (1 - r_{xy}^2)} \right)^2 \end{cases} \quad (4.51)$$

уравнение (4.50) 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 (4.52):

$$\left(\frac{1}{\sigma_z^2} - \lambda \right) \left[\lambda^2 - (a_1 + a_2)\lambda + a_1 a_2 - a_3 \right] = 0. \quad (4.52)$$

Решая квадратное уравнение (4.52), 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 (4.46), оси эллипсоида будут (4.53):

$$\begin{cases} C = \sigma_z, \\ B = \sqrt{\frac{2}{a_1 + a_2 + \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + 4a_3}}}, \\ A = \sqrt{\frac{2}{a_1 + a_2 - \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + 4a_3}}}. \end{cases} \quad (4.53)$$

Смещение R будет (4.54):

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}. \quad (4.54)$$

Угол между осью абсцисс и большой полуосью эллипсоида вычислим по следующей формуле (4.55):

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{2a_1 a_2}{a_1 - a_2} \right). \quad (4.55)$$

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; полного смещения оползня. В случае, когда σ_z неслучайная величина, все выводы совпадают с выводами, полученными в [174].

4.4 Выводы по Главе 4

1. Рассмотрена механико-математическая модель оползня, тело которого является массой произвольной плотности, а форма его ложа – произвольная поверхность. Эта модель позволяет выявить момент начала оползневого процесса и определить основные проблемы в задаче его прогнозирования, как с точки зрения оползневого процесса, так и его последствий для зданий и сооружений. На основе анализа механико-математической модели оползня, решение которых позволит разработать теоретический и практический методы прогноза оползневого процесса, получено уравнение устойчивости оползня в общем виде.

2. Рассмотрена механико-математическая модель оползня, тело которого является однородной массой (частный случай), но форма его ложа – цилиндрическая поверхность в вертикальном продольном разрезе, представляющая собой кривую произвольного вида. Получено условие устойчивости оползня, имеющего наиболее близкую к цилиндрической форме ложе. На основе рассмотренной механико-математической модели оползня определён круг наиболее важных проблем, решение которых, также, может позволить разработать теоретический и практический методы прогноза оползневого процесса и его влияния на безопасность зданий и сооружений, расположенных на оползнеопасных территориях.

3. Разработана новая методика и вероятностно-статистический аппарат, основанный на получении обобщенных среднеквадратических эллипсоидов смещений оползней, обеспечивающие математическую обработку и интерпретацию результатов геодезического мониторинга оползневых процессов. Созданы авторские компьютерные программы в Delphi «Обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений оползней» и «Расчет величин смещений оползней (длина, направление)» (Приложение К).

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 [187].

На рисунке 5.1 представлена упрощенная схема движения массива грунта по наклонной поверхности скольжения и силы, действующие на массу горных пород.

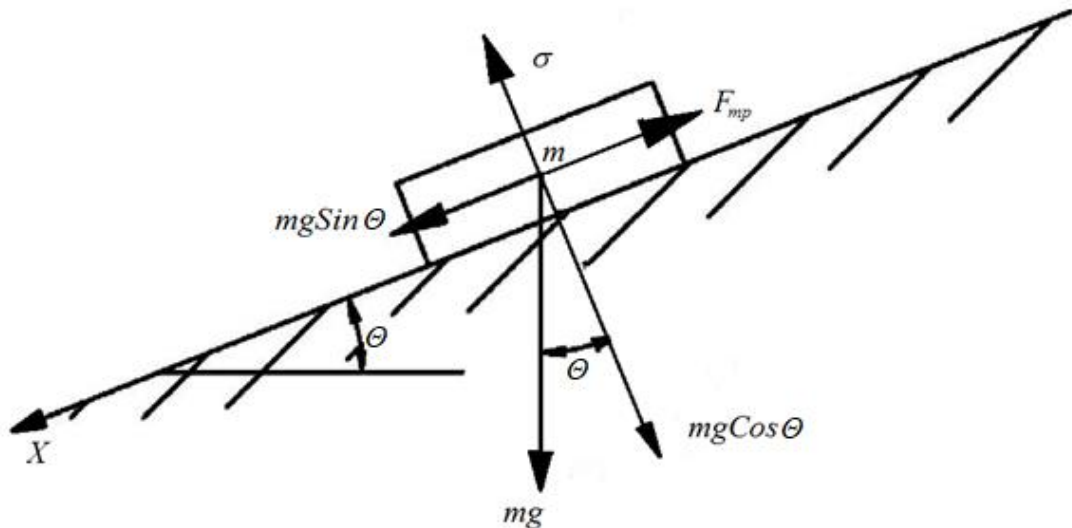


Рисунок 5.1 - Схема движения массива грунта по наклонной поверхности скольжения и силы, действующие на массу горных пород

Смещающая сила $mg \sin \theta - F_{\text{тр}}$ определяется через величину веса mg , действующего на грунт, крутизны склона θ и силы трения $F_{\text{тр}}$.

Для определения силы трения необходимо знать прочность грунтов. Условие прочности грунта выражается условием прочности Кулона-Мора (2.9) [39], [227], [294].

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 [197].

Здесь с большим запасом надежности следует достаточное условие начала оползания, которое исходя из рисунка 5.1, имеет вид (5.1) [186], [290]:

$$mg \sin \theta > F_{\text{тр}}. \quad (5.1)$$

Известно, что (5.2)

$$\begin{aligned} mg \sin \theta - F_{\text{тр}} &= ma, \\ mg \cos \theta &= \sigma S, \end{aligned} \quad (5.2)$$

где a – ускорение оползневой массы;

S – площадь оползня.

Сила трения сцепления оползневого тела с учетом (2.9) равна (5.3):

$$F_{\text{тр}} = \tau S = mg \cos \theta \operatorname{tg} \varphi + cS. \quad (5.3)$$

Подставим уравнение (5.3) в уравнение (5.2). Получим (5.4):

$$mg \sin \theta - mg \cos \theta \operatorname{tg} \varphi - cS = ma. \quad (5.4)$$

Так как правая часть формулы (5.4) представляет собой силу, то окончательно получим формулу силы смещения оползня (5.5):

$$F = mg \sin \theta - mg \cos \theta \operatorname{tg} \varphi - cS. \quad (5.5)$$

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 (5.6)

$$g \sin \theta - g \cos \theta \operatorname{tg} \varphi - \frac{cS}{m} = a. \quad (5.6)$$

Вполне очевидно, что при движении оползня, ускорение a должно быть положительным. Т.е., выражение (5.7)

$$\sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \varphi - \frac{cS}{mg} > 0 \quad (5.7)$$

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): (5.8)

$$V = t \left(g \sin \theta - g \cos \theta \operatorname{tg} \varphi - \frac{cS}{m} \right). \quad (5.8)$$

Рассмотрим случаи, когда на поверхности скольжения параметры φ и c являются переменными, зависящими от x (начала линии отрыва). Тогда надо выполнить анализ формулы (5.7) при различных c и φ по всей длине L линии скольжения [292].

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 (5.9)

$$mg \left(\sin \theta - \cos \theta \sum_{i=1}^{i=k} \operatorname{tg} \varphi_i \right) - S \sum_{j=1}^{j=n} c_j > 0. \quad (5.9)$$

Выберем в качестве разбиения M рассматриваемого отрезка L объединение разбиений K и N . Тогда неравенство можно записать как (5.10)

$$mg \left(\sin \theta - \cos \theta \sum_{i=1}^{i=m} \operatorname{tg} \varphi_i \right) - S \sum_{i=1}^{i=m} c_i > 0. \quad (5.10)$$

Случай, когда для каждого c_j выполнено условие

$$mg \left(\sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \varphi_i \right) - S c_i > 0$$

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 (5.11)

$$mg(\sin \theta - \cos \theta \sum_{i=1}^{i=m} \operatorname{tg} \varphi_i) - S \sum_{i=1}^{i=m} c_i > S \sum_{i_t} c_{i_t}, \quad (5.11)$$

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 (5.12), (5.13) и (5.14)

$$mg(\sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \varphi_h) - S c_h < 0, \quad (5.12)$$

$$-mg(\sin \theta - \cos \theta \sum_{i_h} \operatorname{tg} \varphi_h) + S \sum_{i_h} c_h > 0, \quad (5.13)$$

$$[mg(\sin \theta - \cos \theta \sum_{i=1}^{i=m} \operatorname{tg} \varphi_i) - S \sum_{i=1}^{i=m} c_i] > -mg(\sin \theta - \cos \theta \sum_{i_h} \operatorname{tg} \varphi_h) + S \sum_{i_h} c_h, \quad (5.14)$$

или, что, то же самое (5.15),

$$[mg(\sin \theta - \cos \theta \sum_{i=1}^{i=m} \operatorname{tg} \varphi_i)] - S \sum_{i=1}^{i=m} c_i + mg(\sin \theta - \cos \theta \sum_{i_h} \operatorname{tg} \varphi_{i_h}) > 0, \quad (5.15)$$

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 перпендикулярно v_0 , а угол наклона γ_ω перпендикулярно v_ω . Разобьем дугу на k равных отрезков таким образом, чтобы внутри каждого отрезка φ и c были постоянными, и заменим малые дуги хордами (рисунок 5.2):

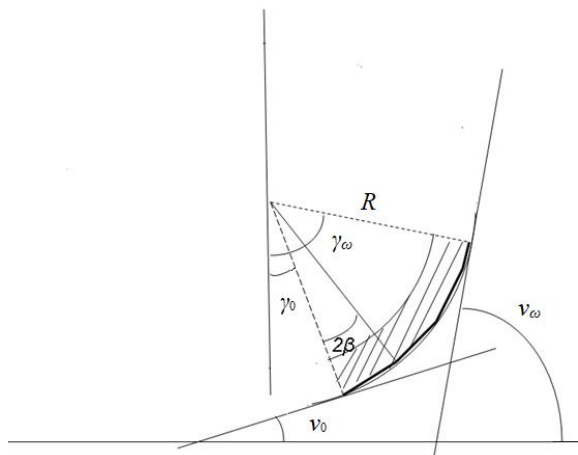


Рисунок 5.2 - Разбиение дуги на k равных отрезков

Тогда неравенство запишется в виде (5.16)

$$\sum_{i=1}^{i=k} m_i g (\sin \theta_i - \cos \theta_i \operatorname{tg} \varphi_i) - \sum_{i=1}^{i=k} S_i c_i > 0, \quad (5.16)$$

где $S_i = 2Ra \sin \beta$;

a – ширина оползня;

R – радиус кривой, по которой происходит скольжение;

$$\beta = \frac{(\gamma_\omega - \gamma_0)}{2k}.$$

Тогда (5.17) и (5.18)

$$\sum_{i=1}^{i=k} m_i g (\sin \theta_i - \cos \theta_i \operatorname{tg} \varphi_i) - \sum_{i=1}^{i=k} 2Ra \sin \beta c_i > 0, \quad (5.17)$$

$$g \sum_{i=1}^{i=k} m_i (\sin \theta_i - \cos \theta_i \operatorname{tg} \varphi_i) - 2Ra \sin \beta \sum_{i=1}^{i=k} c_i > 0. \quad (5.18)$$

Поскольку $m_i = \rho h' S_i$, где h' – постоянна, если постоянна глубина расположения поверхности скольжения оползня, а ρ – плотность грунта. Тогда (5.19):

$$h' S g \sum_{i=1}^{i=k} \rho_i \sin \theta_i - \sum_{i=1}^{i=k} \rho_i \cos \theta_i \operatorname{tg} \varphi_i - 2Ra \sin \beta \sum_{i=1}^{i=k} c_i > 0. \quad (5.19)$$

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 проведение геодезического мониторинга. 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 (5.20)

$$a = \frac{V_1 - V_0}{t}. \quad (5.20)$$

В качестве примера рассмотрим «быстрое» ($V = 1,5$ м/сутки) и «умеренное» ($V = 1,5$ м/месяц) скорости 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 таблицу 5.1.

Таблица 5.1 - Ускорения оползней

Оценка движения	Скорость движения	Ускорения
Исключительно быстрое	3 м/с	3,0 м/сек ²
Очень быстрое	0,3 м/мин	0,3 м/мин ²
Быстрое	1,5 м/сутки	1,45 м/сутки ²
Умеренное	1,5 м/месяц	1,4 м/месяц ²
Очень медленное	1,5 м/год	1,44 м/год ²
Исключительно медленное	0,06 м/год	1,44 м/год ²

Массы оползневых тел в зависимости от их объемов вычислим по формуле (5.21):

$$m = V\rho, \quad (5.21)$$

где V – объем оползня;

ρ – плотность глины, равная 1,91 т/м³.

Массы оползневых тел в зависимости от объемов приведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 - Массы оползневых тел в зависимости от объемов

Объемы смещающихся масс, м ³	Масса m , 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 100000	1910 – 191000
От 100000 до 1000000	191000 – 1910000
От 1000000 до 10000000	1910000 – 19100000
От 10000000 и более	от 19100000 и более

Рассчитаем силу смещения оползней для разных по классу оползневых тел в зависимости от их массы и ускорения. Результаты запишем в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 - Сила смещения оползневого тела

Классы масштабности оползней	Масса m , т	Ускорение a	Сила F
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/сек ²	57,3 т·м/сек 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 т·м/сут ²
		0,3 м/мин ²	57 т·м/мин ²
		3,0 м/сек ²	573 т·м/сек ²

Продолжение таблицы 5.3

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/сек ²	5730 т·м/сек ²
Большие	до 191000	1,44 м/год ²	27500 т·м/год ²
		1,4 м/мес ²	26700 т·м/мес ²
		1,45 м/сут ²	27700 м/сут ²
		0,3 м/мин ²	5700 т·м/мин ²
		3,0 м/сек ²	57300 т·м/сек ²
Очень большие	до 1910000	1,44 м/год ²	275000 т·м/год ²
		1,4 м/мес ²	267000 т·м/мес ²
		1,45 м/сут ²	277000 м/сут ²
		0,3 м/мин ²	57000 т·м/мин ²
		3,0 м/сек ²	573000 т·м/сек ²
Огромные	до 19100000	1,44 м/год ²	2750000 т·м/год ²
		1,4 м/мес ²	2670000 т·м/мес ²
		1,45 м/сут ²	2770000 м/сут ²
		0,3 м/мин ²	570000 т·м/мин ²
		3,0 м/сек ²	5730000 т·м/сек ²

Продолжение таблицы 5.3

Грандиозные	более 19100000 (напр. 50000000)	1,44 м/год ²	27500000 т·м/год ²
		1,4 м/мес ²	26700000 т·м/мес ²
		1,45 м/сут ²	27700000 м/сут ²
		0,3 м/мин ²	5700000 т·м/мин ²
		3,0 м/сек ²	57300000 т·м/сек ²

Анализ таблицы 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 объектах деформаций и напряжений вплоть до разрушения.

Для массы $m = 100000$ т и 150000 т на площади $S = 2$ га рассчитаем по формуле (5.7) возможность сдвига оползней при крутизне склона $\theta = 20^\circ$, 40° и 60° , нормативных значений удельного сцепления c и углов внутреннего трения φ для пылевато-глинистых грунтов четвертичных отложений. Результаты сведем в таблицу 5.4:

Таблица 5.4 - Возможность сдвига оползней при различной крутизне склона

Грунт	Показатель текучести I_L , масса $m = 100000$ т, площадь $S = 2$ га	Характеристика c (кПа) 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
			–	–1,4	–1,0	–0,7	–0,6	–0,4	–0,3
			–	–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
	$\theta = 40^\circ$		–	–	–1,1	–1,0	–0,8	–0,6	–0,5
			–	–	–0,8	–0,6	–0,5	–0,3	–0,2
		–	–	–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	

Продолжение таблицы 5.4

	$\theta = 20^\circ$		–	–	–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	$0 < I_L \leq 0,25$	c	–	81	68	54	47	41	36
	$m=150000 \text{ т}$	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 таблицы 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 (таблица 5.4) знаки у смещений при тех же параметрах θ° , c (кПа) и φ° повторяются.

Выше по предложенной методике приведены примеры расчетов смещений оползней для нормативных значений их масс m и геотехнических характеристик θ° , c (кПа) и φ° . Для реальных оползней требуется проведение натурных изысканий оползня, важнейшими из которых является геодезический мониторинг. Геодезические наблюдения позволяют не только определять абсолютные значения численных характеристик оползня, но и их точность и, следовательно, 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 [116], [124]. 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) определяются эмпирически, т.е. из измерений [191]:

- крутизна склона θ ;
- угол внутреннего трения φ ;
- удельное сцепление грунта c ;
- площадь оползня S ;
- масса оползня m .

Следовательно, эти параметры носят вероятностный характер, накладывающую некоторую неопределенность на результат расчета по формуле (5.7). Этот результат будет отягощен погрешностью M_0 , зависящий от погрешностей указанных выше эмпирических параметров (m_θ , m_φ , m_c , m_S , m_m) [38]. 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 [13], [76] измерений. Согласно положений этой теории формула для оценки точности неравенства (5.7) примет вид (5.22):

$$\begin{aligned}
M_0^2 = & \cos^2 \theta \frac{m_\theta^2}{\rho^2} + \sin^2 \theta \operatorname{tg}^2 \varphi \frac{m_\theta^2}{\rho^2} + \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} \right)^2 \cos^2 \theta \frac{m_\varphi^2}{\rho^2} + \left(\frac{S}{mg} \right)^2 m_c^2 + \\
& + \left(\frac{c}{mg} \right)^2 m_s^2 + \left(\frac{cS}{m^2 g} \right)^2 m_m^2,
\end{aligned} \tag{5.22}$$

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 оползневого тела необходимо знать поверхность скольжения оползня (ПСО). Возможные методы определения ПСО оползня и предъявляемые к ним точностные требования проанализированы в работе [80]. Установлено, что требования к точности определения ПСО, указанное в нормативном документе [144], 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 её 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 ([209], прил. Г). Такая высокая частота разведочных скважин не является характерной даже при ответственном строительстве, где детальные инженерно-геологические изыскания, согласно документу ([210],

таблица 7), нормируются с частотой 25-60 м. В рамках существующих измерительных технологий практически достигаемая точность высот ПСО при инженерно-геологических изысканиях достигает 1 м.

В работе [80], взамен дорогостоящего и трудоемкого метода скважинной инклинометрии, предложен метод определения ПСО по данным геодезического мониторинга на дневной поверхности оползневого склона. Метод предусматривает построение специальной геодезической сети (оползневая сеть) (рисунок 5.3), которая представляет собой регулярную сеть прямоугольников и квадратов, вершины которых выбираются с учетом границ и рельефа оползневого склона.

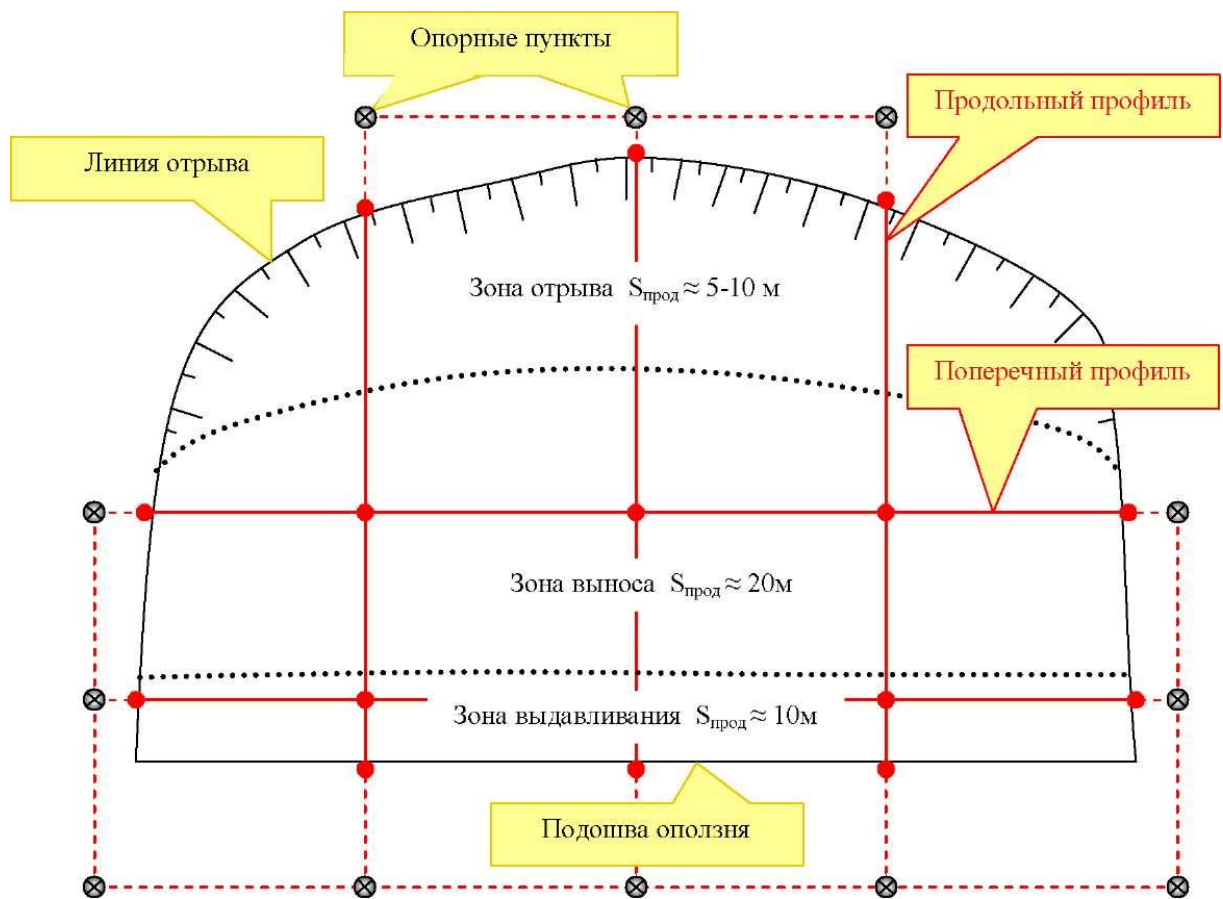


Рисунок 5.3 - Проект оползневой сети

В соответствии с геометрией указанной выше сети общий объем оползневого тела будет равен сумме частных объемов прямоугольных фигур сети (5.23).

$$V_{\text{оп}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n, \quad (5.23)$$

где $V_{\text{оп}}$ – объем оползневого тела;

V_i – объем отдельных фигур оползневой сети, равный (5.24)

$$V_i = abH_{\text{cp}} = ab \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4}, \quad (5.24)$$

где a и b – стороны квадрата (прямоугольника);

H_i – высоты ПСО.

В соответствии с формулой (5.24) и положений «Теории ошибок измерений» [76], получим формулу для определения точности объема отдельных фигур оползня (5.25):

$$m_{V_i}^2 = \left[\frac{1}{4} b (H_1 + H_2 + H_3 + H_4) \right]^2 m_a^2 + \left[\frac{1}{4} a (H_1 + H_2 + H_3 + H_4) \right]^2 m_b^2 + 4 \left(\frac{1}{4} ab \right)^2 m_H^2. \quad (5.25)$$

Приведем подобные члены (5.26):

$$m_{V_i}^2 = \left[\frac{1}{4} (H_1 + H_2 + H_3 + H_4) \right]^2 (a^2 + b^2) m_s^2 + \frac{1}{4} a^2 b^2 m_H^2. \quad (5.26)$$

Так как точность определения высот ПСО в сто раз меньше точности определения сторон, то используя известный в теории принцип «ничтожного влияния», будем иметь (5.27):

$$m_{V_i} = \frac{1}{2} ab m_H. \quad (5.27)$$

Тогда точность вычисления объема всего оползневого тела (5.23) будет (5.28)

$$m_{V_{\text{оп}}}^2 = m_{V_1}^2 + m_{V_2}^2 + \dots + m_{V_n}^2 = n m_{V_i}^2. \quad (5.28)$$

Применив к формуле (5.28) принцип равноточного влияния, получим (5.29):

$$m_{V_{\text{оп}}} = m_{V_i} \sqrt{n}. \quad (5.29)$$

Для примера рассчитаем по формулам (5.23), (5.24) объем $V_{\text{оп}}$ и по формуле (5.29) погрешность $m_{V_{\text{оп}}}$ для оползневого склона размерами 100×200 м при $a = b = 20$ м, $H_{\text{cp}} = 10$ м, $n = 50$ и приняв следующие значения СКП измерений: $m_a = m_b = m_s = 0,01$ м, а $m_{H_1} = m_{H_2} = m_{H_3} = m_{H_4} = m_H = 1$ м:

$$V_{\text{оп}} = 200000 \text{ м}^3, \quad m_{V_{\text{оп}}} = 2828 \text{ м}^3, \quad \frac{m_{V_{\text{оп}}}}{V_{\text{оп}}} = \frac{1}{70}.$$

Используя формулу (5.21), получим выражение для расчета точности M определения массы оползня m (5.30):

$$M = \sqrt{\rho^2 m_{V_{\text{оп}}}^2 + V_{\text{оп}}^2 m_p^2}. \quad (5.30)$$

Для глинистых грунтов находим следующие значения: $\rho = 1,91 \text{ т/м}^3$, $m_p = 0,01 \text{ т/м}^3$ [40].

По формулам (5.21) и (5.30) рассчитаем массу оползневого тела и ее точность:

$$m = 2000 \text{ м}^3 \cdot 1,91 \text{ т/м}^3 = 38200 \text{ т};$$

$$M = \sqrt{(1,91 \text{ т/м}^3)^2 \cdot (2828 \text{ м}^3)^2 + (200000 \text{ м}^3)^2 \cdot (0,01 \text{ т/м}^3)^2} = 5760 \text{ т};$$

Вычислим относительную погрешность массы оползневого тела m :

$$\frac{M}{m} = \frac{5760 \text{ т}}{382000 \text{ т}} = \frac{1}{66}.$$

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 $\varphi = 10^\circ$, $c = 33 \text{ кПа}$, крутизну склона $\theta = 19^\circ$, площади $S = 20000 \text{ м}^2$ с погрешностью $m_S = 2,2 \text{ м}^2$, а значения погрешностей $m_\varphi = m_\theta = 1^\circ$, $m_c = 1 \text{ кПа}$ [38]. Получим:

$$\sin 19^\circ - \cos 19^\circ \cdot \text{tg} 10^\circ - \frac{33(\text{т/м} \cdot \text{с}^2) \cdot 20000 \text{ м}^2}{382000 \text{ т} \cdot 9,8(\text{м/с}^2)} = -0,02;$$

$$M_0 = \sqrt{\cos^2 19^\circ \left(\frac{1^\circ}{57,3^\circ}\right)^2 + \sin^2 19^\circ \text{tg}^2 10^\circ \left(\frac{1^\circ}{57,3^\circ}\right)^2 \cos^2 19^\circ \left(\frac{1^\circ}{57,3^\circ}\right)^2 + \left(\frac{20000 \text{ м}^2}{382000 \text{ т} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2}\right)^2 (1 \text{ т/м} \cdot \text{с}^2) + \left(\frac{33(\text{т/м} \cdot \text{с}^2)}{382000 \text{ т} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2}\right)^2 (2,2 \text{ м}^2)^2 + \left(\frac{33(\text{т/м} \cdot \text{с}^2) \cdot 20000 \text{ м}^2}{(382000 \text{ т})^2 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2}\right)^2 (5760 \text{ т})^2} = 0,02$$

Предельное значение погрешности неравенства будет:

$$\Delta_{\text{пред}} = \tau M_0 = 2 \cdot 0,02 = 0,04,$$

где τ – коэффициент, равный 2 при заданной вероятности $P = 0,95$.

Тогда, доверительный интервал находится в пределах:

[-0,06; +0,02].

Отсюда следует, что, 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 ее надо 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 (5.31):

$$\sigma_v^2 = \left(\frac{\partial V}{\partial \theta} \sigma_\theta \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \varphi} \sigma_\varphi \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial c} \sigma_c \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial S} \sigma_S \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial m} \sigma_m \right)^2. \quad (5.31)$$

Взяв частные производные этой функции по каждому из параметров, получим коэффициенты при всех пяти аргументах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial \theta} &= t \cdot g (\cos \theta + \sin \theta \cdot \operatorname{tg} \varphi); & \frac{\partial V}{\partial \varphi} &= t \cdot g \cdot \cos \theta \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} \right); \\ \frac{\partial V}{\partial c} &= t \frac{S}{m}; & \frac{\partial V}{\partial S} &= t \frac{c}{m}; & \frac{\partial V}{\partial m} &= -t \frac{cS}{m^2}. \end{aligned}$$

Переходя к среднеквадратическим погрешностям будем иметь (5.32):

$$m_v^2 = t^2 \left(\begin{aligned} &g^2 \cos^2 \theta \frac{m_\theta^2}{\rho^2} + g^2 \sin^2 \theta \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \frac{m_\theta^2}{\rho^2} + g^2 \cos^2 \theta \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} \right)^2 \frac{m_\varphi^2}{\rho^2} + \frac{S^2}{m^2} m_c^2 + \\ &+ \frac{c^2}{m^2} m_S^2 + \frac{c^2 S^2}{(m^2)^2} m_m^2 \end{aligned} \right). \quad (5.32)$$

Рассмотрим следующий пример. Пусть даны: $\theta = 25^\circ$; $\varphi = 14^\circ$; $c = 37$ кПа; $S = 10$ га; $h = 10$ м; $\rho = 1,91$ т/м³. Будем иметь:

$$V = \left(9,8 \frac{\text{М}}{\text{сек}^2} \sin 25^\circ - 9,8 \frac{\text{М}}{\text{сек}^2} \cos 25^\circ \operatorname{tg} 14^\circ - \frac{37 \frac{\text{Т}}{\text{М} \cdot \text{сек}^2} 100000 \text{М}^2}{1910000 \text{Т}} \right) \text{сек} = -0,01 \frac{\text{М}}{\text{сек}}.$$

Выполним анализ полученного результата. Знак «-» 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): (5.33)

$$m_v^2 = t^2 (0,023m_\theta^2 + 0,026m_\phi^2 + 0,0027m_c^2 + 3,8 \cdot 10^{-10} m_s^2 + 1,0 \cdot 10^{-12} m_m^2). \quad (5.33)$$

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 [60]. 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 [271]. Также была небольшая работа, по количественной оценке, физической уязвимости от оползней, вызванных землетрясениями. Методология оценки уязвимости от многих опасностей, приведенная в [283] 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 [276] разработана важная типовая модель опасности, которая определила взаимосвязь между сейсмической активностью и оползнем. Модель явилась результатом детального изучения 40 исторических крупных землетрясений (магнитуда $M = 5,2 \div 9,5$) 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, составляют 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 500000 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 [123], 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 [217].

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 [212], [217], либо определяют требования к изучению, оценке и прогнозу склоновых процессов, но без учета сейсмических воздействий на их развитие [215], [216].

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 (5.34):

$$j_{\text{расч}} = j_0 + m, \quad (5.34)$$

где j_0 – расчетная сейсмичность для данного района;

m – сейсмическая характеристика, учитывающая увеличение сейсмичности в баллах в зависимости от грунтов, слагающих склон [208].

Рассмотрим ситуацию, когда землетрясение спровоцирует активизацию оползневых процессов.

Учет сейсмического воздействия включает два метода:

- метод фиктивного откоса;
- метод фиктивного сейсмического угла.

Суть метода 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 таблице 5.18 [64], [71].

Таблица 5.18 - Увеличение крутизны склона в зависимости от интенсивности землетрясений

Показатели	Сейсмическая бальность 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 (5.35)

$$V = t \left[g \sin(\theta + \Delta\theta) - g \cos(\theta + \Delta\theta) \operatorname{tg} \varphi - \frac{cS}{m} \right]. \quad (5.35)$$

При тех же данных и $\varepsilon = 0,2$ и $\Delta v = 12^\circ$ получим скорость $V = 2$ м/сек.

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 (5.36):

$$F_{ps} = \operatorname{tg}(\varphi - \delta) + \frac{c}{P_s}, \quad (5.36)$$

где F_{ps} – коэффициент сопротивляемости 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 [208].

Величина сейсмического угла в зависимости от величины сейсмического ускорения приведена в таблице 5.19.

Таблица 5.19 - Величины расчетных значений сейсмического ускорения и сейсмического угла

Показатели	Сейсмическая бальность 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 будет вычисляться по формуле (5.37)

$$V = t[g \sin \theta - g \cos \theta \operatorname{tg}(\varphi - \delta) - \frac{cS}{m(1 + \varepsilon)}]. \quad (5.37)$$

При тех же данных и $\varepsilon = 0,2$, $\delta = 12^\circ$ получим скорость $V = 2$ м/сек.

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 [36]. 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. При этом вода, за счет возникновения порового давления, изменяет величину напряжений, действующих на скелет грунта, снижая нормальные напряжения в плоскости сдвига [36].

Как известно, влияние порового давления на сопротивление сдвигу описывается уравнением (5.38):

$$\tau = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (5.38)$$

где u – поровое давление [241].

Рассмотрим ситуацию, когда поровое давление максимально, т.е. $u = \sigma$. Тогда скорость движения оползня можно вычислить по следующей формуле (5.39):

$$V = t \left(g \sin \theta - \frac{cS}{m} \right). \quad (5.39)$$

При тех же исходных данных получим скорость $V = 2$ м/сек.

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.

5.5 Выводы по Главе 5

1. Дано механико-математическое обоснование условий и выведены формулы, при которых возникает потенциальная возможность момента движения оползня.

2. Выполнен анализ механико-математического обоснования условия движения оползня для неоднородной поверхности линии скольжения и дан критерий оценки устойчивости оползня для различных значений удельного сцепления грунта c и угла внутреннего трения φ по всей длине L линии скольжения.

3. Выполнена оценка точности целевой функции, которая показывает доверительный интервал для потенциальной возможности момента движения оползня, а на скорость движения оползня V влияют, в основном, крутизна склона θ , угол внутреннего трения грунтов φ и в меньшей степени удельное сцепление грунтов c .

4. Выведены формулы для расчета скорости смещения оползня в методе фиктивного угла (увеличение крутизны склона в зависимости от интенсивности землетрясений) и в методе сейсмического угла (величины сейсмического угла в зависимости от величины сейсмического ускорения землетрясений).

5. Выведена формула для расчета скорости смещения оползня с учетом влияния порового давления на сопротивление сдвигу при повышении уровня грунтовых вод.

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.

1. 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, является оценка степени оползневых рисков.

Если на территории района имеется несколько оползнеопасных склонов, то можно перейти к следующему уровню ранжирования – районному. А, далее, если

регион состоит из нескольких районов, то следующий уровень ранжирования – региональный.

2. Второй этап - этап оценки оползневой безопасности с учетом результатов повторных геодезических наблюдений.

Оползневые процессы оцениваются целым комплексом различных параметров. Какая-то часть из них является на какой-то определенный момент времени известными, а другая часть – неизвестными. В связи с этим задача должна решаться по двум направлениям. Первое направление – сбор исходной информации. По данным этой информации составляется «портрет» процесса в его первом приближении (ретроспективный образ). Второе направление – это подготовка данных для определения параметров оползневого процесса. Эти данные дают возможность строить перспективный образ оползневого процесса. Подготовка этих данных должна быть получена на основании очень качественного геодезического мониторинга. Существенным шагом при создании перспективного образа оползневого процесса является построение его математической модели. Она затем оптимизируется набором исходных данных. За построенной математической моделью, а также при анализе результатов проведенного моделирования необходим постоянный контроль за процессом моделирования. Он заключается в сопоставлении математической модели с ретроспективным образом изучаемого процесса [96]. 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.

3. Третий этап – этап выработки рекомендаций, созданных на основании принятой стратегии обеспечения безопасности сооружений в СС.

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 сооружениям (рисунок 6.1).

Такие методы управления позволяют оптимизировать разработанную ранее стратегию обеспечения безопасности СС. Затем выполняется 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 (рисунок 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.

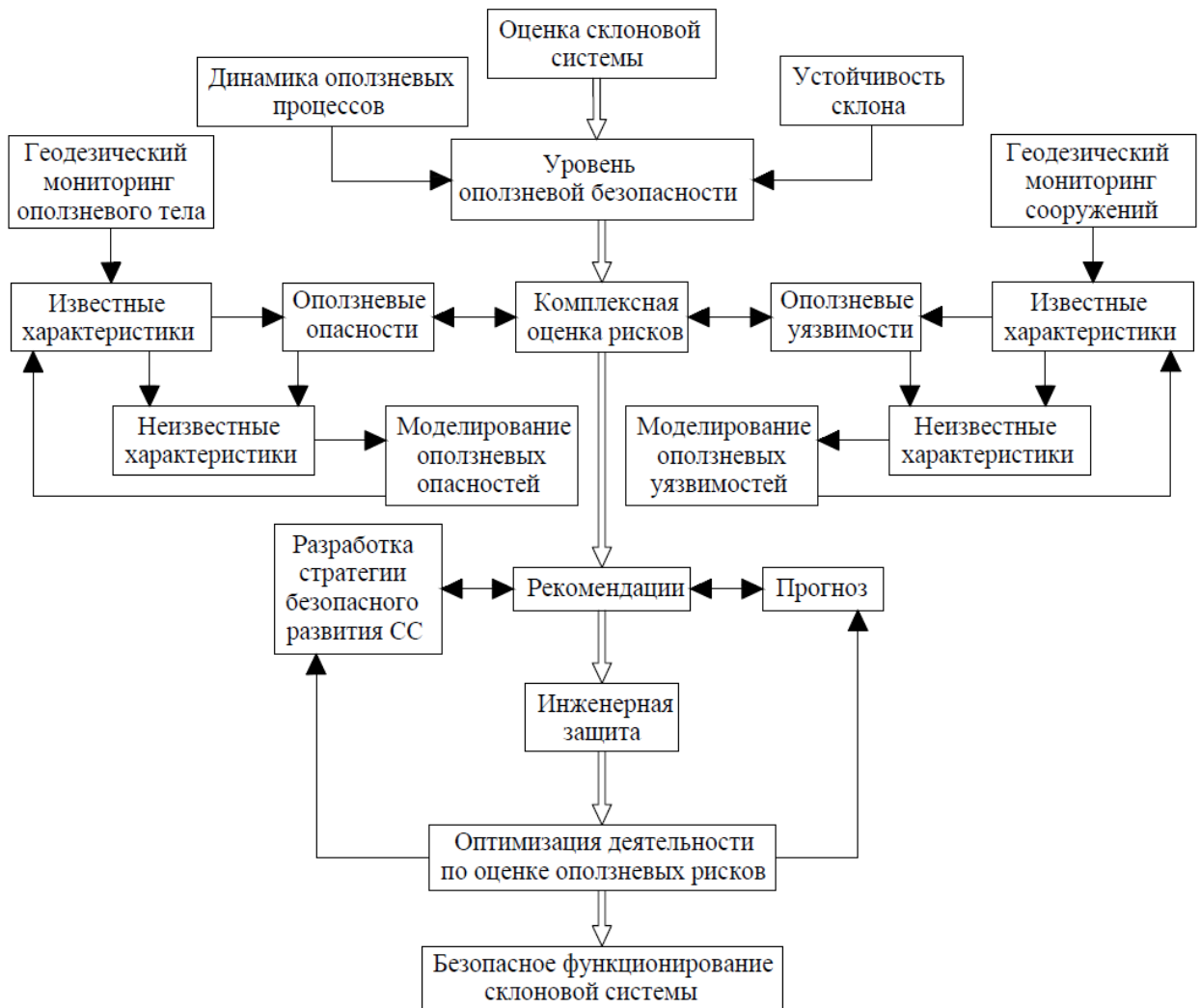


Рисунок 6.1 – Алгоритм комплексной оценки оползневых рисков в СС

6.2 Процедура оценки степени оползневой опасности и уровня оползневой безопасности склоновых систем

Важной составной частью алгоритма комплексной оценки оползневых рисков в СС является процедура оценки степени оползневой опасности и уровня оползневой безопасности этих систем. Исходя из теоретической модели представления среды СС, предложим структуру процедуры оценки степени оползневой опасности и, соответственно, уровня оползневой безопасности СС (рисунок 6.2):

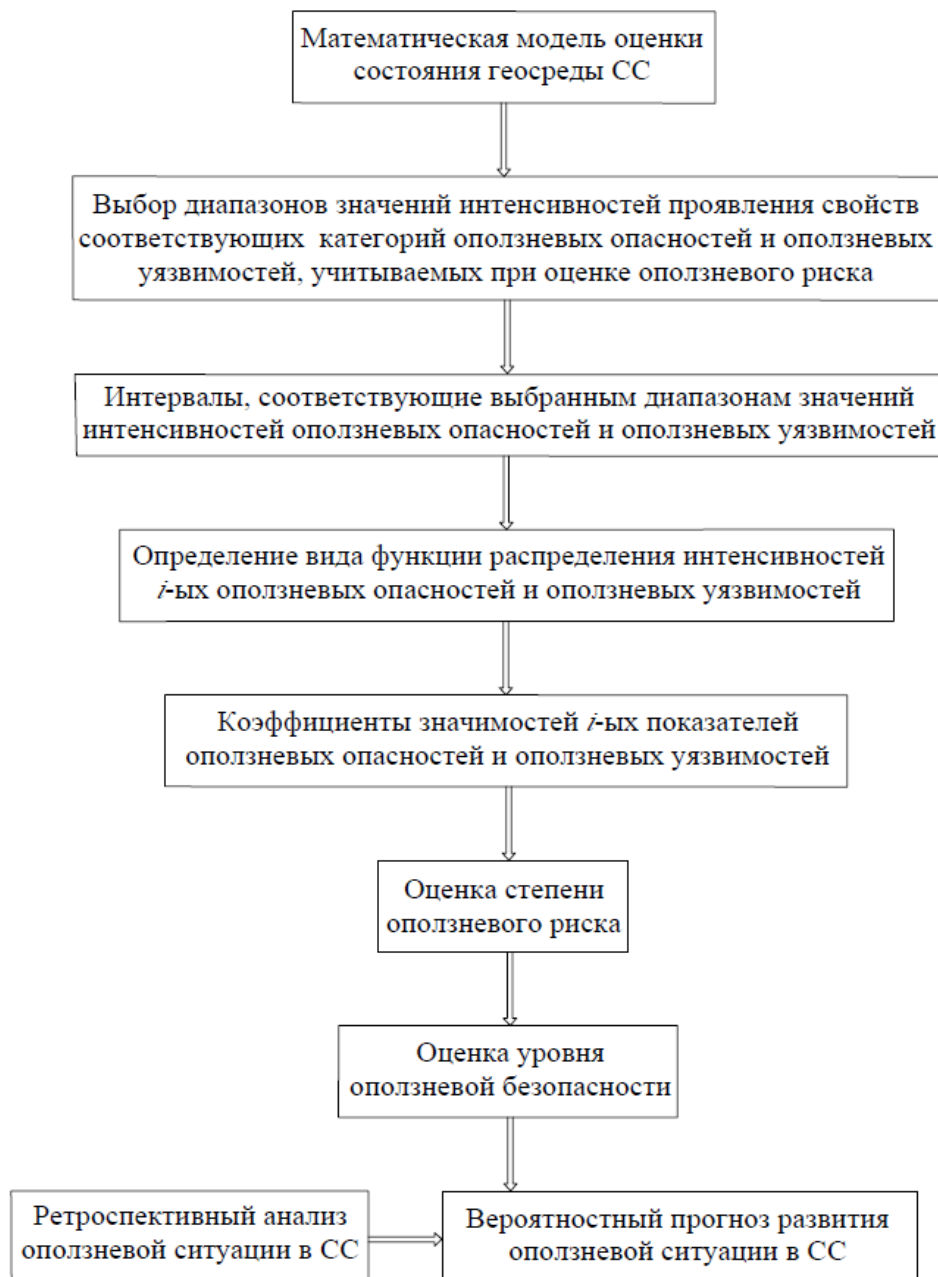


Рисунок 6.2 – Процедура оценки степени оползневых рисков и уровня оползневой безопасности в СС

Для удобства анализа этого вопроса рассмотрим данную процедуру в обратном порядке.

1. Уровень оползневой безопасности $S_{\text{оп}}$ (изменяется в пределах от 0 до 1), будем рассчитывать по формуле (6.1):

$$S_{\text{оп}} = 1 - R_{\text{оп}}, \quad (6.1)$$

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 [203].

2. Степень оползневого риска в СС будем определять по формуле (6.2):

$$R_{\text{оп}} = P(H) \cdot V_m(H), \quad (6.2)$$

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 (6.3):

$$P(H) = k_{\text{норм}} \sum_{i=1}^n \delta_i W_i, \quad (6.3)$$

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 оползневой 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 соответствующего 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 (6.4) [238]:

$$\delta_i = \int_a^b f(B_i) dB_i, \quad (6.4)$$

где B_i – интенсивность проявления свойств оползневой опасности в зависимости от их потенциальной разрушительной силы, соответствующего 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, используя 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 [133] (таблица 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 определений:

- а) крутизна θ склона;
- б) высота H склона;
- в) объем V смещающихся оползня;
- г) скорость v смещения оползня.

Для крутизны склонов применена следующая градация:

- умеренно опасные: $4^{\circ} - 8^{\circ}$;
- опасные: $8^{\circ} - 20^{\circ}$;
- весьма опасные: $20^{\circ} - 35^{\circ}$;
- чрезвычайно опасные: $> 35^{\circ}$.

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 рисунках 6.3 – 6.6:

a) крутизна склона

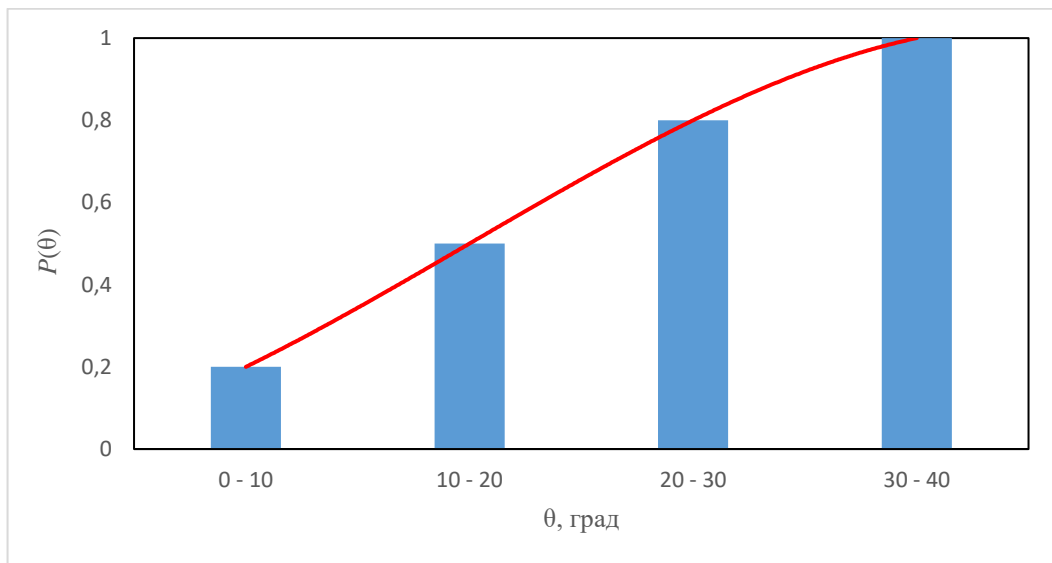


Рисунок 6.3 – Функция распределения вероятностей проявления интенсивности крутизны $P(\theta)$ склона

б) ВЫСОТА СКЛОНА

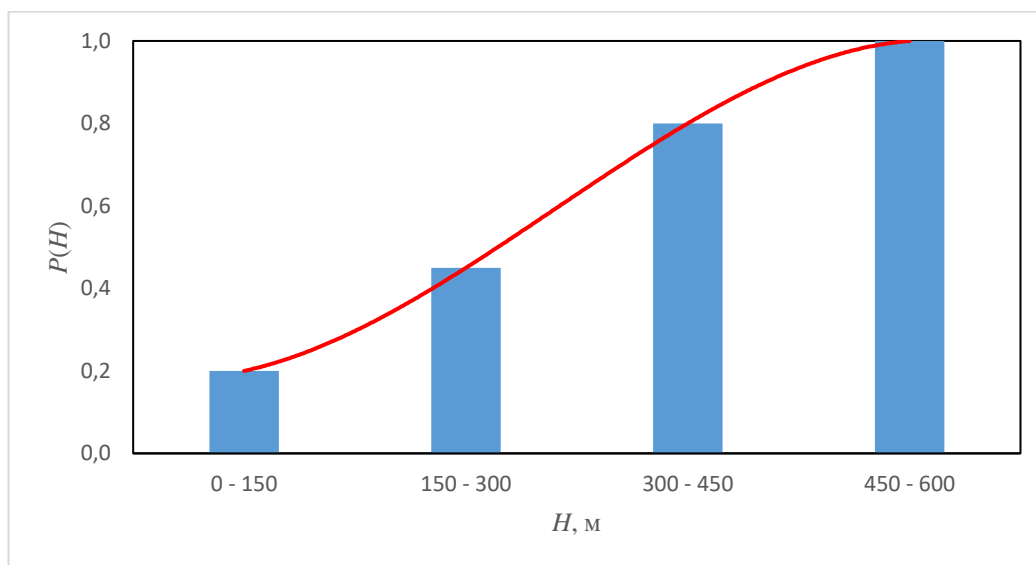


Рисунок 6.4 – Функция распределения вероятностей проявления интенсивности высоты $P(H)$ склона

в) объем смещающихся пород

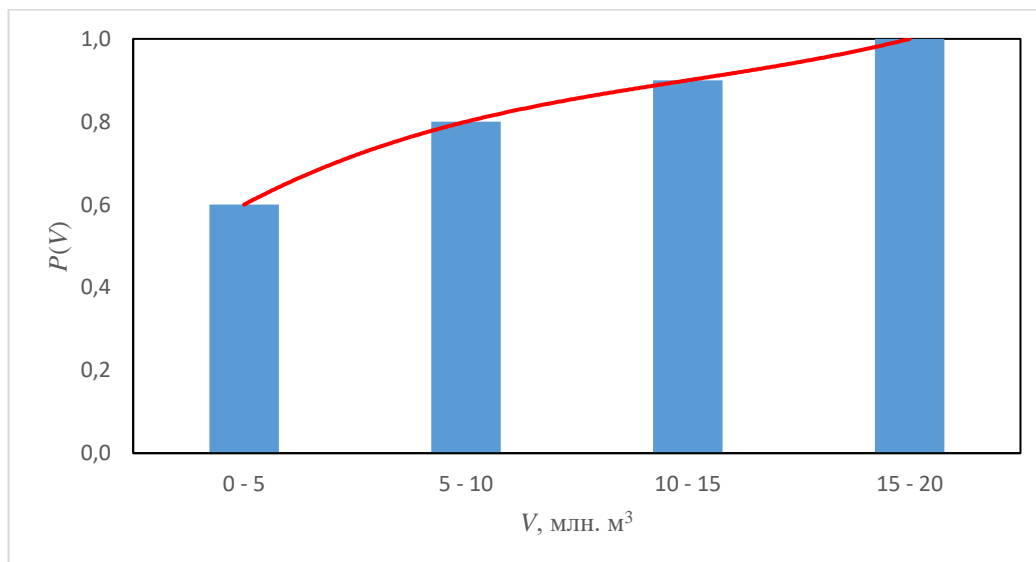


Рисунок 6.5 – Функция распределения вероятностей проявления интенсивности объемов смещающихся пород $P(V)$

з) скорость смещения оползня

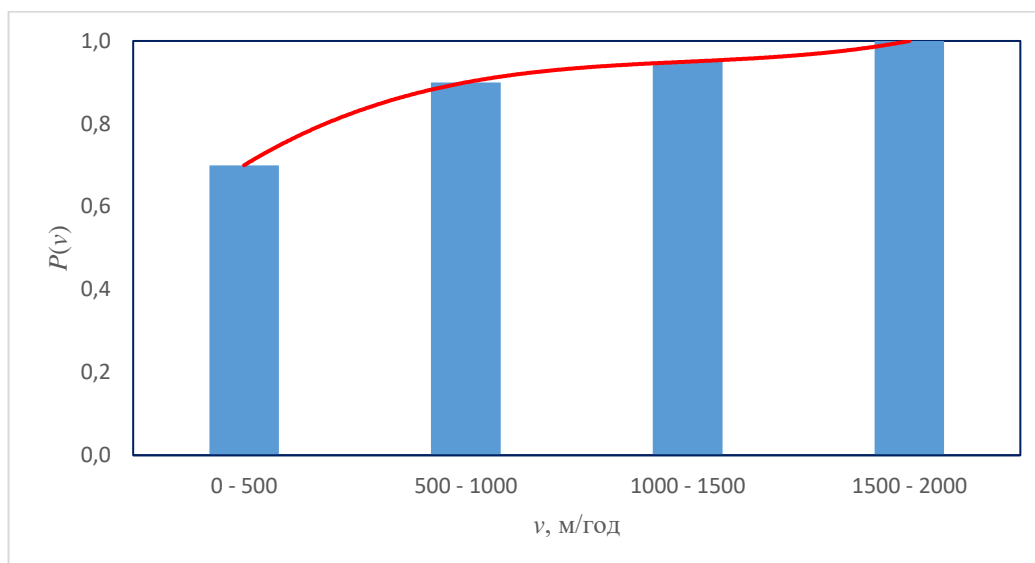


Рисунок 6.6 – Функция распределения вероятностей проявления интенсивности скорости смещения $P(v)$ оползня

Получим следующие соотношения полиномиальных зависимостей для законов распределения:

- крутизны склона (6.5)

$$f(\theta) = -0,0167\theta^3 + 0,1\theta^2 + 0,1167\theta - 1 \cdot 10^{-12}; \quad (6.5)$$

- высоты склона (6.6)

$$f(H) = -0,0417H^3 + 0,3H^2 - 0,358H + 0,3; \quad (6.6)$$

- объемов смещающихся пород (6.7)

$$f(V) = 0,0167V^3 - 0,15V^2 + 0,5333V + 0,2; \quad (6.7)$$

- скорости смещения оползня (6.8)

$$f(V) = 0,025V^3 - 0,225V^2 + 0,7V + 0,2. \quad (6.8)$$

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 опасностей, воспользуемся табл. 6.1. При расчете

необходимо учитывать такой показатель, как подверженность территории оползневому процессу (таблица 6.2).

Таблица 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 (6.9):

$$W_i = \frac{Z_i}{\sum_{i=1}^n Z_i}, \quad (6.9)$$

где Z_i – значимость весового коэффициента i -й категории оползневой опасности.

Сами величины Z_i определим на основании соотношения (6.10):

$$Z_i = \frac{S_i}{S}, \quad (6.10)$$

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 таблице 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

Продолжение таблицы 6.3

Чрезвычайно опасные	0,40	0,60
$\Sigma =$	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 (таблица 6.4):

Таблица 6.4 – Количественные оценки оползневой опасности

Показатели оползневой опасности	Категории опасности	Код	Весовой коэф-ент W_i	Коэф-ент 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	

Продолжение таблицы 6.4

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 четырехмерного вектора ранжировок.

Результат этой методики представлен в виде таблицы 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
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

Продолжение таблицы 6.5

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

Продолжение таблицы 6.5

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
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 (6.11):

$$R_{\text{эк}} = k_{\text{норм}} \sum_1^n \delta_i W_i. \quad (6.11)$$

6.2.2 Определение интегрального критерия уровня оползневой уязвимости

Интегральный критерий уровня оползневой уязвимости вычислим по формуле (6.12):

$$V_m(H) = k_{\text{норм}} \sum_1^n \delta_i W_i, \quad (6.12)$$

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 соответствующего 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, соответствующего 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 [131] определенной интенсивности и длительности воздействия, то определим ее следующими показателями, которые получают по результатам повторных геодезических наблюдений:

- трещины сооружений;
- осадки сооружений;
- горизонтальные перемещения сооружений;
- крены сооружений.

Степень уязвимости по всем четырем показателям устанавливаем по одному из 4-х категорий уязвимости, принимая во внимание известные значения параметров отличительных признаков (таблица 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 рисунках 6.7 – 6.10:

а) трещины

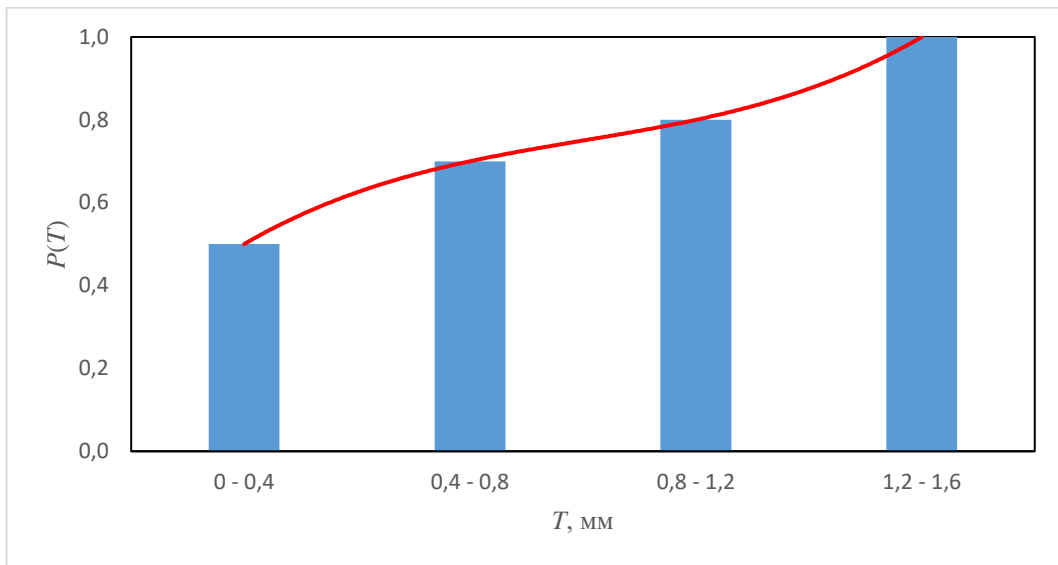


Рисунок 6.7 – Функция распределения вероятностей проявления интенсивности трещин $P(T)$ сооружений

б) осадки

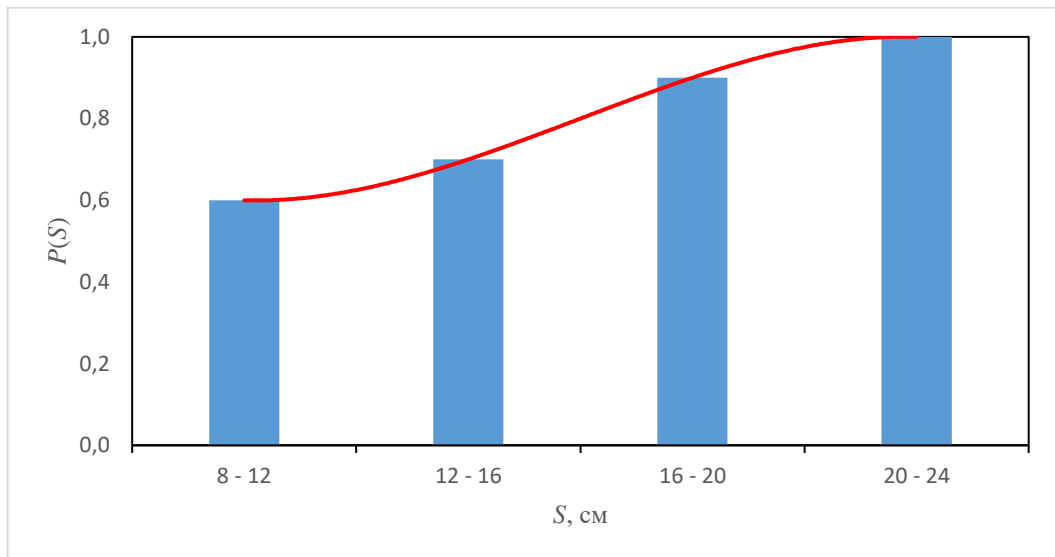


Рисунок 6.8 – Функция распределения вероятностей проявления интенсивности осадки $P(S)$ сооружений

в) горизонтальные перемещения сооружений

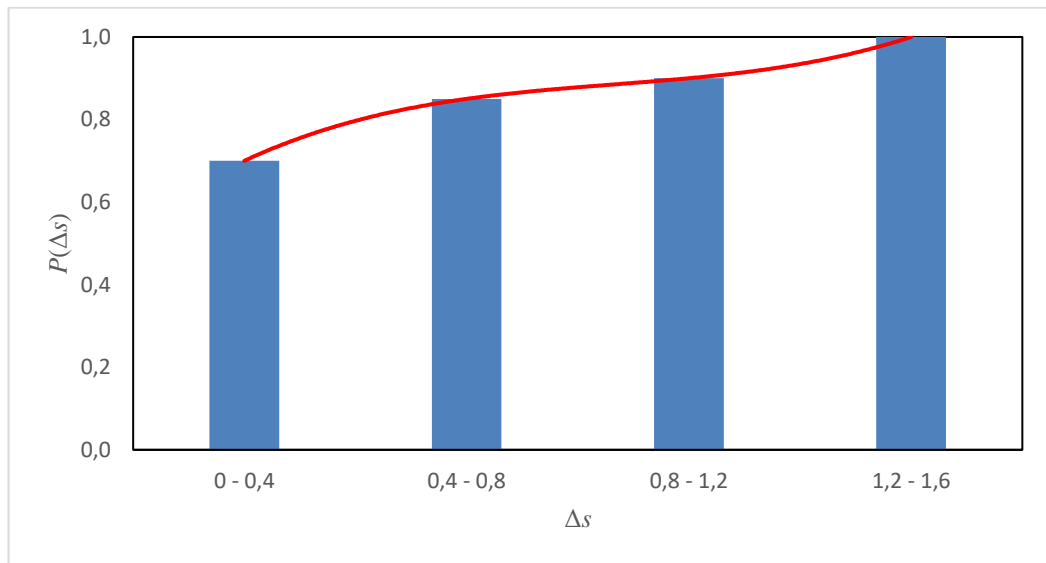


Рисунок 6.9 – Функция распределения вероятностей проявления интенсивности горизонтальных перемещения $P(\Delta s)$ сооружений

г) крен сооружений

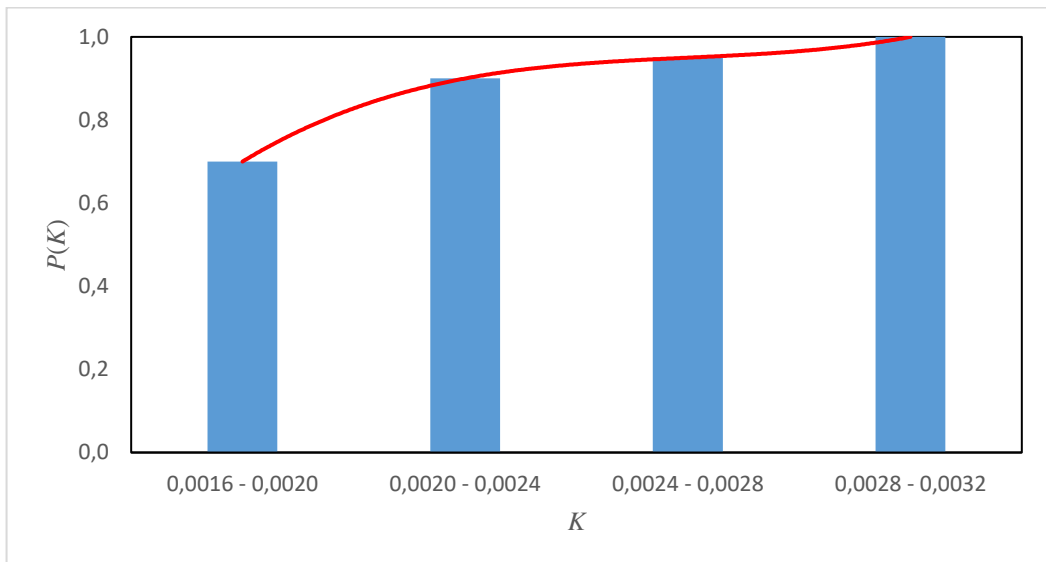


Рисунок 6.10 Функция распределения вероятностей проявления интенсивности крена $P(K)$ сооружений

Определим соотношения полиномиальных зависимостей для следующих функций распределения вероятностей интенсивности проявления оползневой уязвимости сооружений:

- трещин (6.13)

$$f(T) = 0,0333T^3 - 0,25T^2 + 0,716T - 1 \cdot 10^{-12}; \quad (6.13)$$

- осадок (6.14)

$$f(S) = -0,0333S^3 + 0,25S^2 - 0,4167S + 0,8; \quad (6.14)$$

- горизонтальных перемещений (6.15)

$$f(\Delta S) = 0,025\Delta S^3 - 0,2\Delta S^2 + 0,57\Delta S + 0,3; \quad (6.15)$$

- крена (6.16)

$$f(K) = 0,025K^3 - 0,225K^2 + 0,7K + 0,2. \quad (6.16)$$

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 таблицей 6.1. Для расчета необходимо рассмотреть такие показатели как подверженность территории оползневым процессам и повторяемость.

После перемножения соответственно по категориям этих показателей между собой и может быть получена структура комплексной уязвимости склоновой территории от оползневых процессов с учетом повторяемости (таблица 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 таблице 6.8.

Таблица 6.8 - Значения величин W_i и Z_i

Категории опасности оползневых процессов	Значимость Z_i	Весовой коэффициент оползневой опасности 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
$\Sigma =$	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 (таблица 6.9):

Таблица 6.9 – Количественные оценки оползневой уязвимости

Показатели оползневой уязвимости	Категории уязвимости	Код	Весовой коэф-ент W_i	Коэф-ент 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 также зависит от четырехмерного вектора ранжировок.

Результат этой методики представлен в виде таблицы 6.10.

Таблица 6.10 – Оценка критерия уровня оползневой уязвимости $V_m(H)$ ($k_{\text{норм}} = 1,1111$)

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

Продолжение таблицы 6.10

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

Продолжение таблицы 6.10

0131	0,6800	1131	0,7800	2131	0,8189	3131	0,8411
0132	0,7344	1132	0,8344	2132	0,8733	3132	0,8955
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

Продолжение таблицы 6.10

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 оползневого риска

Описание категорий по степени оползневого риска можно рекомендовать следующим образом (таблица 6.11):

Таблица 6.11 - Описание категорий по степени оползневого риска

Обозначение категории	Степень оползневого риска	Описание категории оползневого 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

Продолжение таблицы 6.11

$0,3 \leq R < 0,5$	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 гибели людей

6.3 Оценка степени оползневой риска районов и регионов (ранжирование оползневой безопасности)

Если на территории определённого района находится несколько склоновых территорий по которым проведены исследования по степени опасности и уязвимости, то степень риска поражения оползневыми процессами определится по формуле (6.17):

$$R_{\text{р-на}} = \frac{\sum_{i=1}^k P(H)_i V_m(H)_i S_i}{\sum_{i=1}^k S_i} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^k S_i}, \quad (6.17)$$

где k – количество склоновых территорий в районе, подверженных оползневым процессам;

S_i – площади склоновых территорий для которых оценены степени риска поражения оползневым процессом.

Аналогично, можно рассчитать степень риска поражения оползневыми процессами целого региона (6.18).

$$R_{\text{рег}} = \frac{\sum_{i=1}^k R_{\text{р-на},i} \cdot S_{\text{р-на},i}}{\sum_{i=1}^k S_{\text{р-на},i}}, \quad (6.18)$$

где k – количество районов в регионе, подверженных оползневому процессам;

S_i – площади районов для которых оценены степени риска поражения оползневым процессам.

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 анализа геодезической информации. Следовательно, 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 надо 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. Экстраполируя на определенный период времени получим возможные скорости смещения оползня в будущем [201].

Рассмотрим следующий пример. Смоделируем возрастание скорости смещения оползня в течении нескольких лет. Результаты скоростей, полученных по данным геодезического мониторинга, показаны в таблице 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, являющихся исходными для анализа изучаемого процесса на данном склоне, возникает вопрос об их аппроксимации, т.е. в отыскании оптимальной функциональной закономерности рядов скоростей.

При методе аналитического подбора функции используем метод наименьших квадратов. Сущность 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.

Для каждого из этих видов зависимостей найдем уравнения регрессии и построим графики, используя программное обеспечение «Excel 2016».

Степенная аппроксимация и уравнение регрессии выглядит следующим образом (рисунок 6.11):

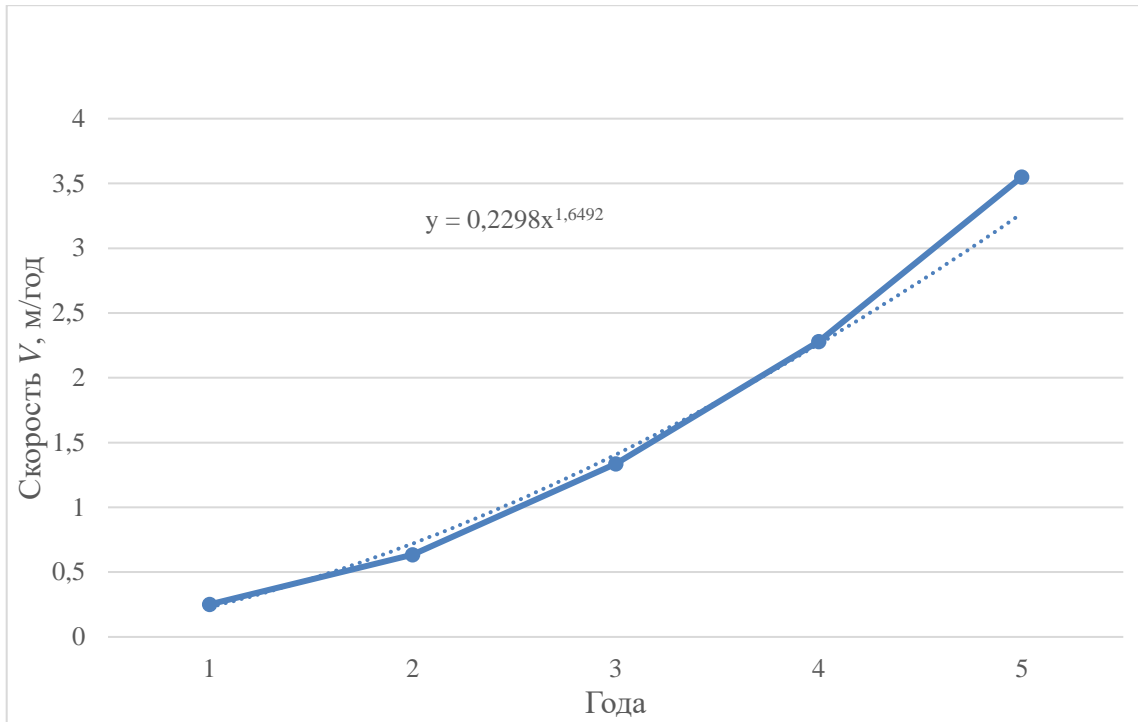


Рисунок 6.11 - Степенная аппроксимация

Полиномиальная аппроксимация второй степени и уравнение регрессии выглядит следующим образом (рисунок 6.12):

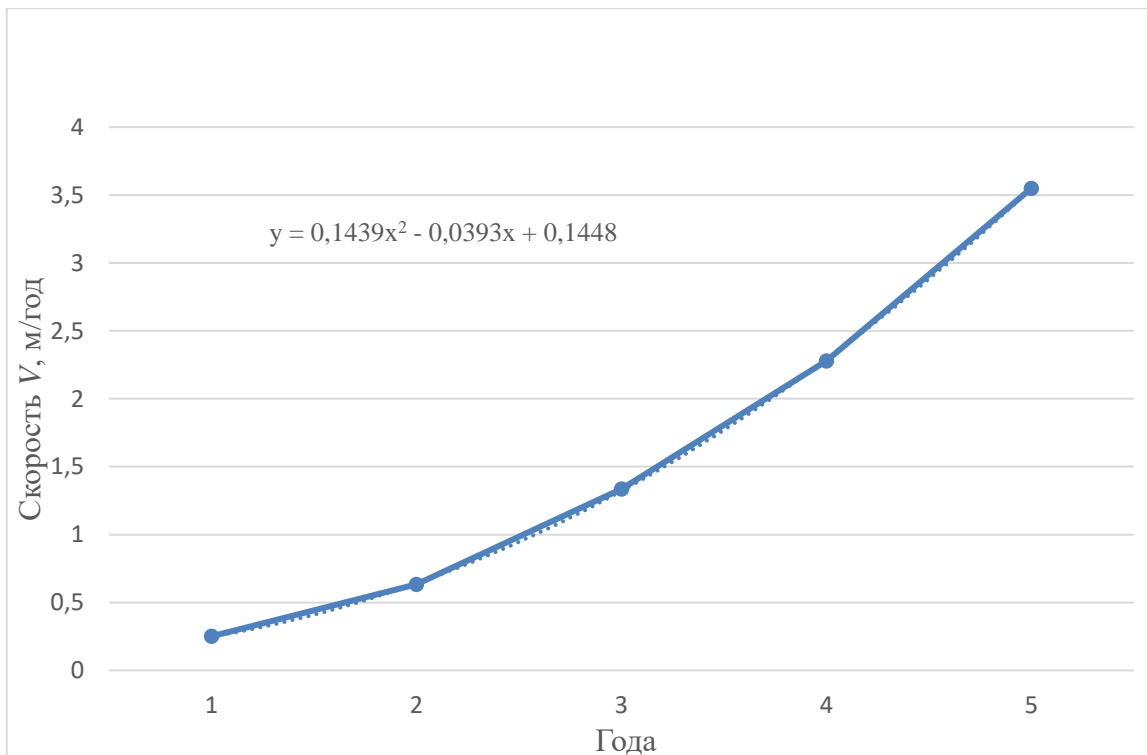


Рисунок 6.12 - Полиномиальная аппроксимация

Выполним оценку точности аппроксимации этих уравнений. Подставим данные скоростей V из таблицы 6.12 в полученные уравнения, вычислим разности Δ

между вычисленным значением $y_{\text{выч}}$ и исходным, а затем Δ^2 , которые дают следующие значения (таблицы 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 будет:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,093464}{5-1}} = 0,153 \text{ м}.$$

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 будет:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,000430}{5-1}} = 0,010 \text{ м}.$$

Таким образом, получается, что наиболее достоверной является функция, полученная по полиномиальной зависимости (6.19):

$$y = 0,1439x^2 - 0,0393x + 0,1448. \quad (6.19)$$

Используя формулу (6.19), выполним экстраполяцию на период через шесть лет. Получим возможную скорость смещения оползня, равную 17,124 м/год (рисунок 6.15):

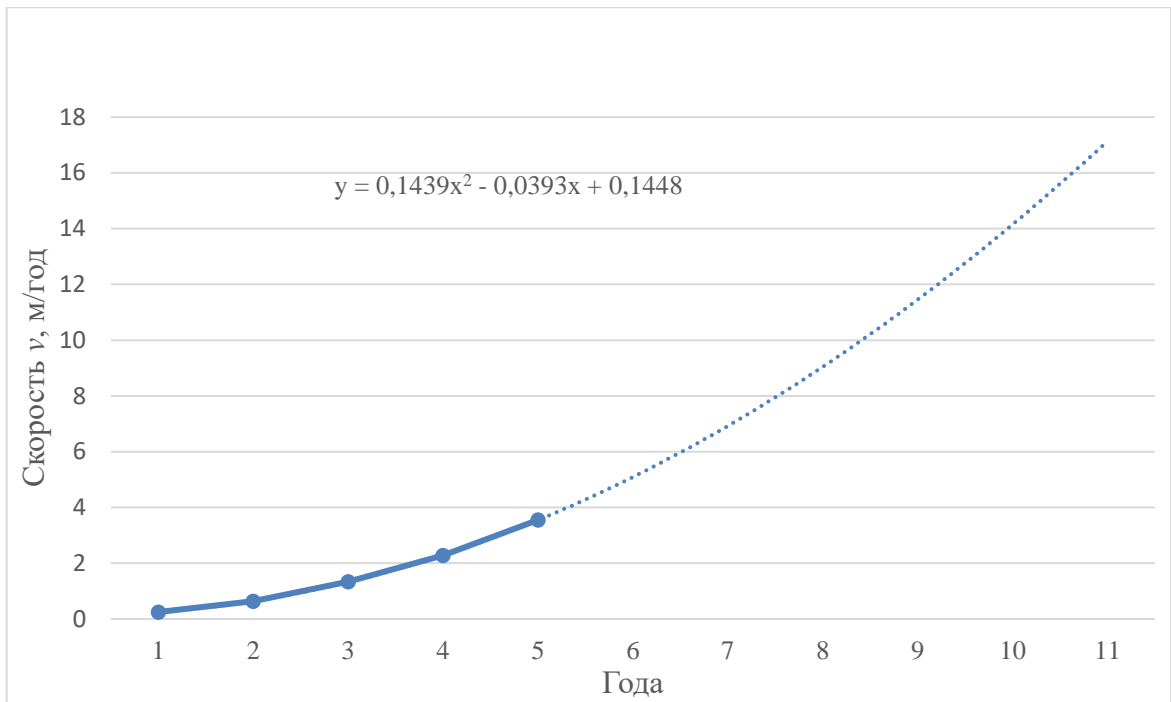


Рисунок 6.15 - Экстраполяция полиномиальной аппроксимации

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 (6.20): [111], [131], [133]:

$$P = \frac{N_H}{N_{зд}}. \quad (6.20)$$

Эту вероятность называют степенью уязвимости зданий при воздействии оползневой опасности или просто уязвимость, и обозначают $V_m(H)$.

Поскольку на оползневом склоне могут быть здания разных типов и разной этажности, то оценку экономического риска производят отдельно. Для этого используют формулу [111], [129], [131], [133], [140], [265], [277], чтобы уточнить оценку экономического риска разрушения либо повреждения однотипных объектов оползневой опасностью H (6.21):

$$R_e(H) = P^*(H)V_m(H)V_e(H)D_e, \quad (6.21)$$

где $P^*(H)$ – повторяемость во времени оползневой опасности H , численно равная ее статистической вероятности;

$V_m(H)$ – степень уязвимости зданий при воздействии оползневой опасности H ;

$V_e(H)$ – степень уязвимости зданий при оползневой опасности H ; вычисляется по формуле (2.12);

D_e – общая стоимость зданий.

Заменим значение $P^*(H)$ на значение $P(H)$, которую получим по формуле (6.3), а $V_m(H)$ - по формуле (6.11). Тогда будем иметь (6.22):

$$R_e(H) = P(H)V_m(H)V_e(H)D_e, \quad (6.22)$$

Или (6.23)

$$R_e(H) = R_{оп}V_e(H)D_e. \quad (6.23)$$

Допустимое значение оценки экономического риска равно 20% от стоимости зданий. Тогда оценку экономического риска можно получить по формуле (6.24):

$$R_e(H)_{\text{доп}} = R_{\text{оп}} V_e(H) \cdot 0,2 D_e^{-1}. \quad (6.24)$$

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 (6.25):

$$V_s^t(H) = \frac{t_d \cdot t_y}{24 \cdot 365}, \quad (6.25)$$

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 (6.26):

$$R_s(H) = P^*(H) V_m(H) V_e(H) V_s^t(H) V_s^S D_p, \quad (6.26)$$

где $V_s^S = P_1 P^{-1}$ – величина уязвимости людей в границах зданий с установленной степенью разрушенности;

P_1 – число погибших людей в этих зданиях;

P – общее количество людей, находившиеся в этих зданиях;

D_p – общая численность населения в определенной зоне поражения [133].

С учетом формулы (6.2) формулу (6.26) перепишем в виде (6.27):

$$R_s(H) = R_{\text{оп}} V_e(H) V_s^t(H) V_s^S D_p. \quad (6.27)$$

6.6 Социально-экономические аспекты управления оползневыйм риском

Обеспечение безопасности зданий и 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 [5], [92], [93].

В действительности указанная аварийность существенно выше в зонах развития опасных оползневых процессов, где даже небольшие по интенсивности оползневые воздействия практически мгновенно выявляют все упущения инженерных изысканий, проектных решений и дефекты строительства [126], [235]. Вспомним Чечено-Ингушетию, где 10 марта 1989 года произошли обширные оползни, от которых пострадало 82 населенных пункта. Оползнями было повреждено 2518 домов и 104 объекта народного хозяйства. Материальный ущерб от этих оползней составил \$390 млн [106]; 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 и 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 оползневого риска [207], [218], [219], [222].

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 среднемноголетнее значение индивидуального риска гибели населения от опасных геологических природных процессов составляет в настоящее время $1 \cdot 10^{-6}$ чел/год [207]. 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 (6.28):

$$R_s(H) = R_{\text{оп}} V_e(H) \cdot 10^{-6}. \quad (6.28)$$

Управление оползневым 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) [91]. Другим направлением решения данной задачи может быть недопущение воздействия оползня на людей и инженерные сооружения – планирование землепользования [95], [269].

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 может 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.

6.7 Выводы по Главе 6

1. Алгоритм комплексной оценки оползневых рисков в СС представляет собой совокупность процедур системного анализа геодезической информации на предмет выявления, оценки и прогноза оползневых опасностей и оползневых уязвимостей, основанных на методах математического моделирования по данным геодезических определений, построения стратегии оползневой безопасности СС. Предлагаемый алгоритм комплексной оценки риска позволяет решить такие проблемы, как неполнота информации о динамике опасных оползневых процессов.

2. Раскрываемая в настоящей главе методология математического моделирования и оценки рисков СС в условиях воздействия оползневых факторов, математической моделью среды СС, алгоритмом комплексной оценки оползневых рисков, позволяет в полной мере раскрыть вторую и частично первую неопределенности, возникающие при решении проблем обеспечения безопасности сооружений и комплексной оценки рисков в сложных распределенных склоновых системах.

3. Разработана методика прогноза скорости смещения оползней по результатам повторных геодезических наблюдений, являющихся исходными для анализа изучаемого процесса на оползневом склоне путем аппроксимации рядов скоростей, используя метод наименьших квадратов.

4. Для оценки последствий от воздействия опасных оползневых процессов проведен анализ экономических и социальных негативных эффектов.

5. Уточнены формулы оценки экономического риска разрушения либо повреждения сооружений и определения допустимого значения оценки экономического риска; социального риска гибели населения от оползневой опасности.

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 метров. Почти 3% территории Москвы занимают оползневые и оползнеопасные зоны, в основном на берегах р. Москва и её притоков [109].

Наблюдения за оползневыми процессами в г. Москве начали проводить с 1954 г. Наблюдательная сеть на 01.01.2005 г. представляла собой 423 геодезических реперов и марок, 100 простейших грунтовых марок, 536 гидрологических створов, 3030 пунктов геофизических наблюдений, 35 режимных скважин. Частота наблюдений – преимущественно 1 раз в год [139].

По материалам инженерно-геологических изысканий были выполнены лабораторные испытания грунтов с целью последующего их учета в ПК PLAXIS.

В таблице 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	$\gamma, \text{кН/м}^3$	$e, \text{д.е.}$	$C_c, \text{д.е.}$	$C_s, \text{д.е.}$	$C_\alpha, \text{д.е.}$	$c, \text{кПа}$	$\varphi, ^\circ$
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

Продолжение таблицы 7.1

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 оползневой сети на Карамышевском оползневом склоне, находящейся на левом берегу реки Москвы на участке Карамышевской набережной в районе коттеджного посёлка «Годуново» (г. Москва), в 2007 г. создали оползневую сеть, состоящую из 46 точек. Площадь оползня около 1,5 га. В 2006 году здесь произошла активизация оползневой сети, сопровождающаяся образованием нового оползневой 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 приложении 1. 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 г. 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 таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Плановые и высотные смещения точек оползневой сети

Пункты	Оси	Смещения, мм						
		22.02.	09.03.	22.03.	06.04.	18.04.	16.05.	06.06.
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

Продолжение таблицы 7.2

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
12	X	-2	1	-3	-10	11	-7	-2
	Y	15	-16	14	-22	11	9	1
	H	0	0	0	0	1	0	0
13	X	-16	12	-19	-31	-1	-30	38
	Y	-10	-20	-5	-22	4	-23	-3
	H	4	1	-2	1	1	1	1
14	X	-22	24	-25	-29	-9	-23	-3
	Y	-8	-26	0	-18	6	-28	3
	H	3	1	-1	0	1	0	1
15	X	-21	4	-14	-22	-5	-34	4
	Y	-12	-15	-6	-19	-1	-24	-3
	H	2	1	-1	0	1	1	1
16	X	-14	4	-15	-17	-3	-34	4
	Y	-13	-10	-8	-17	-1	-26	3
	H	0	0	-2	-1	0	0	0
17	X	-13	4	-14	-13	-6	-25	5
	Y	-11	-6	-5	-13	2	-20	5
	H	-15	-12	-17	-17	-9	-22	-8
18	X	-13	1	-19	-15	1	-23	-12
	Y	10	-23	4	-21	6	-12	1
	H	-23	-20	-23	-24	-13	-32	-12
19	X	-6	-1	-13	-18	3	-24	-1
	Y	6	-25	3	-24	3	-13	-3
	H	-24	-20	-24	-27	-13	-33	-13
20	X	-6	8	-4	-6	8	-16	7
	Y	14	-15	6	-4	5	-3	2
	H	0	0	0	0	1	1	1
21	X	-4	10	-16	1	9	-17	7
	Y	3	-17	9	-12	11	-4	0
	H	0	0	0	0	1	1	1
22	X	-16	7	-22	-16	-11	-30	-4
	Y	1	-2	-14	-30	-24	28	-14
	H	4	1	-2	0	1	1	0
23	X	-18	0	-10	-25	-6	-31	5
	Y	-3	-19	-12	-13	1	-30	8
	H	3	0	-2	0	0	0	0
24	X	-10	-4	-13	-19	-11	-25	-1
	Y	-4	-18	-11	-13	5	-33	8
	H	1	0	-2	0	0	0	0
25	X	-5	-3	-8	-14	-5	-22	1
	Y	-5	-10	-14	-9	4	-34	14
	H	-16	-14	-20	-20	-11	-24	-10

Продолжение таблицы 7.2

26	X	-13	10	-19	-11	-10	-32	16
	Y	-7	-12	-13	-13	3	-7	-3
	H	-22	-18	-22	-24	-13	-31	-13
27	X	-9	-2	-14	-15	2	-24	1
	Y	0	-20	0	-20	5	-18	1
	H	-23	-20	-24	-26	-13	-33	-14
28	X	-3	4	-3	-8	12	-8	1
	Y	0	-14	2	-4	12	-2	1
	H	1	-1	1	-1	1	0	0
29	X	-5	14	-13	0	11	-16	5
	Y	1	-9	3	-9	16	-8	3
	H	0	0	1	0	1	0	1
30	X	-4	-7	-5	-25	-6	-27	-5
	Y	3	-24	0	-19	-1	-13	0
	H	2	0	-3	-1	0	-1	-1
31	X	-8	-5	-4	-24	-10	-20	-5
	Y	3	-26	-5	-15	1	-18	1
	H	4	2	-6	-3	0	1	-1
32	X	-6	-3	0	-18	-12	-15	0
	Y	5	-20	-2	-12	3	-14	3
	H	-7	-7	-13	-12	-6	-13	-6
33	X	0	-8	-2	-21	-10	-10	-5
	Y	-7	-19	-18	-17	1	-28	1
	H	-10	-9	-13	-12	-7	-15	-7
34	X	1	6	-4	-11	6	-13	3
	Y	-9	5	0	-10	9	-11	12
	H	-1	0	-1	0	0	-1	0
35	X	-2	9	-7	-4	8	-7	-2
	Y	4	-13	7	-4	12	-7	10
	H	-4	0	0	1	0	0	2
36	X	-7	13	-8	-3	8	-6	3
	Y	0	-2	0	3	11	-7	5
	H	-1	1	0	1	1	0	0
37	X	-5	0	6	-29	1	-14	-7
	Y	12	-17	7	-8	-2	5	-2
	H	4	-1	-5	0	0	0	-1
38	X	-1	4	10	-23	-2	-3	-3
	Y	7	-10	8	-7	-1	11	0
	H	3	9	-7	-3	0	-2	-1
39	X	-2	3	9	-22	-1	-5	-5
	Y	6	-12	6	-7	-3	6	3
	H	0	-2	-7	-6	-1	-5	-2
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

Продолжить таблицу 7.2

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, изображенной на рисунке 7.1.

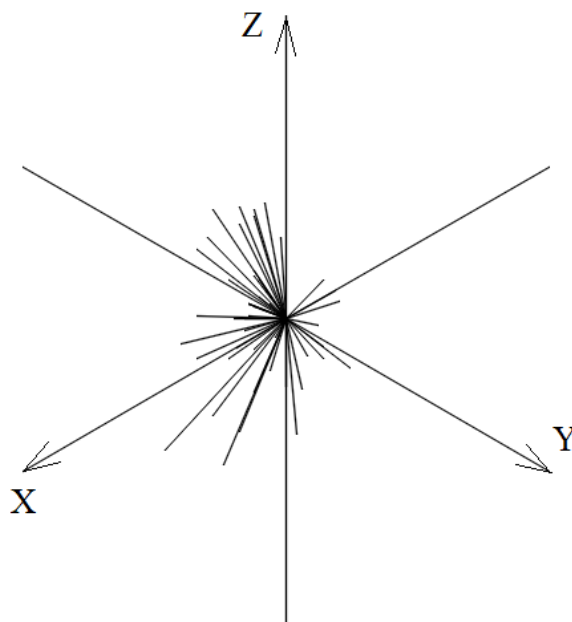


Рисунок 7.1 - Нормальное поле распределения векторов смещений в пространстве

На рисунке 7.1 показаны 46 векторов смещений оползневых точек.

Рассмотрим рассеивание случайной векторной величины, представляющей собой результирующий вектор смещения оползня в пространстве. Для этого возьмем в обработку 46 векторов первого цикла наблюдений (таблица 7.2 столбец 22.02). Все расчеты по определению смещения оползневого тела как единого целого в пространстве в каждом цикле были выполнены по авторской компьютерной программе в Delphi (Приложение 4).

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 рисунке 7.2.

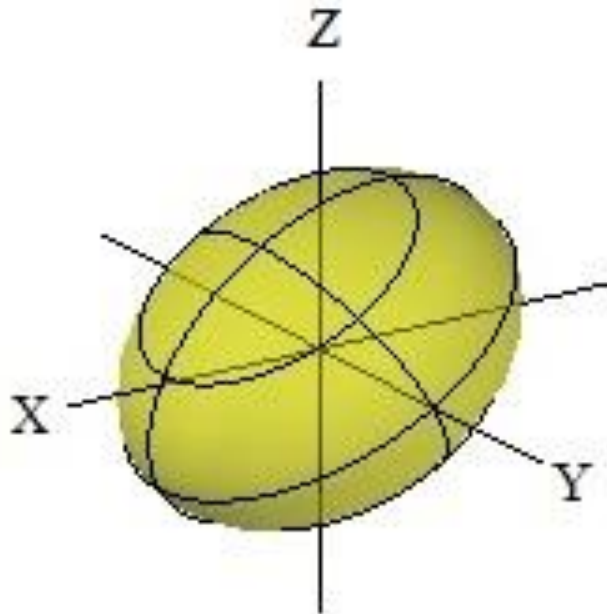


Рисунок 7.2 - Среднеквадратический эллипсоид смещения оползня в 1-ом цикле

Знак угла положительный, следовательно, вычисленный угол откладывается от оси абсцисс в 1-ой четверти.

Последующий контроль геодезических наблюдений за динамикой оползня сводится к производству повторных циклов, вычислению вектора смещения оползня и сравнения его с эллипсоидом смещения предыдущего цикла (таблица 7.2 столбец 09.03).

Значения полуосей эллипсоида смещений во втором цикле будут:

$$A = 11,4 \text{ мм}, \quad B = 7,3 \text{ мм}, \quad C = 5,9 \text{ мм}.$$

Величина смещения $R = 15 \text{ мм}$.

Угол между осью абсцисс и большой полуосью эллипсоида составляет

$$\varphi = +38^\circ.$$

Эллипсоид смещения оползня во 2-ом цикле показан на рисунке 7.3.

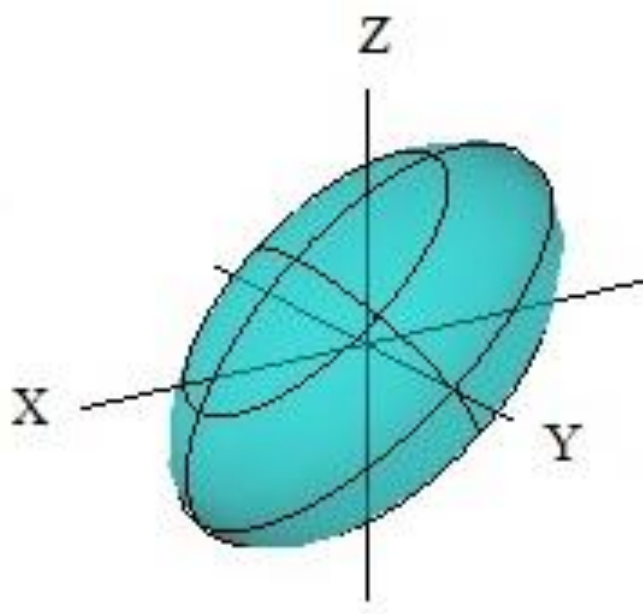


Рисунок 7.3 - Среднеквадратический эллипсоид смещения оползня во 2-ом цикле

Наложим среднеквадратический эллипсоид смещения оползня, полученный во 2-м цикле на среднеквадратический эллипсоид, полученный в 1-ом цикле и, сравним между собой (рисунок 7.4).

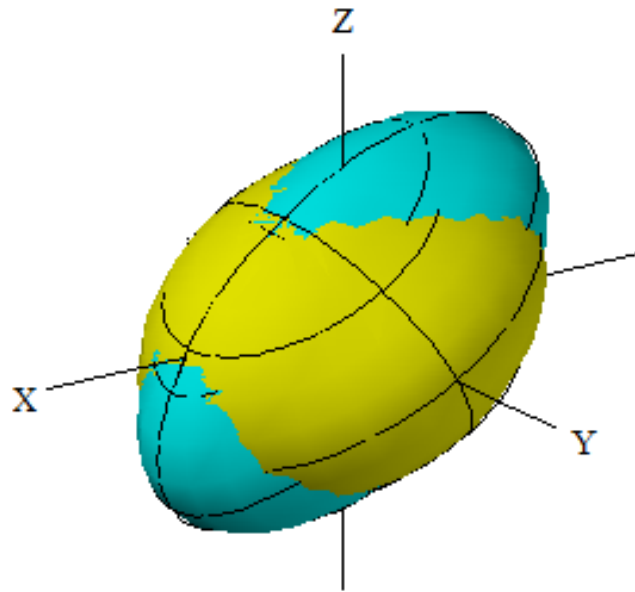


Рисунок 7.4 - Наложение эллипсоида 2-го цикла на 1-ый

По рисунку 7.4 видно, что эллипсоид смещений оползня во 2-ом цикле больше эллипсоида смещений оползня 1-го цикла, что указывает на изменение скорости смещения оползня в сторону увеличения, хоть и незначительное и смещение происходит в одном направлении.

Так как было проведено 7 циклов наблюдений за смещениями оползня, то и вычислено было 7 среднеквадратических эллипсоидов смещений оползня, наложение которых друг на друга позволяют получить в наглядной форме математическую модель смещения оползня, а также значения величин смещений оползня (таблица 7.3).

Таблица 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 (рисунок 7.5) показана зависимость смещений оползня от циклов наблюдений, полученных по среднеквадратическим эллипсоидам смещений оползня:

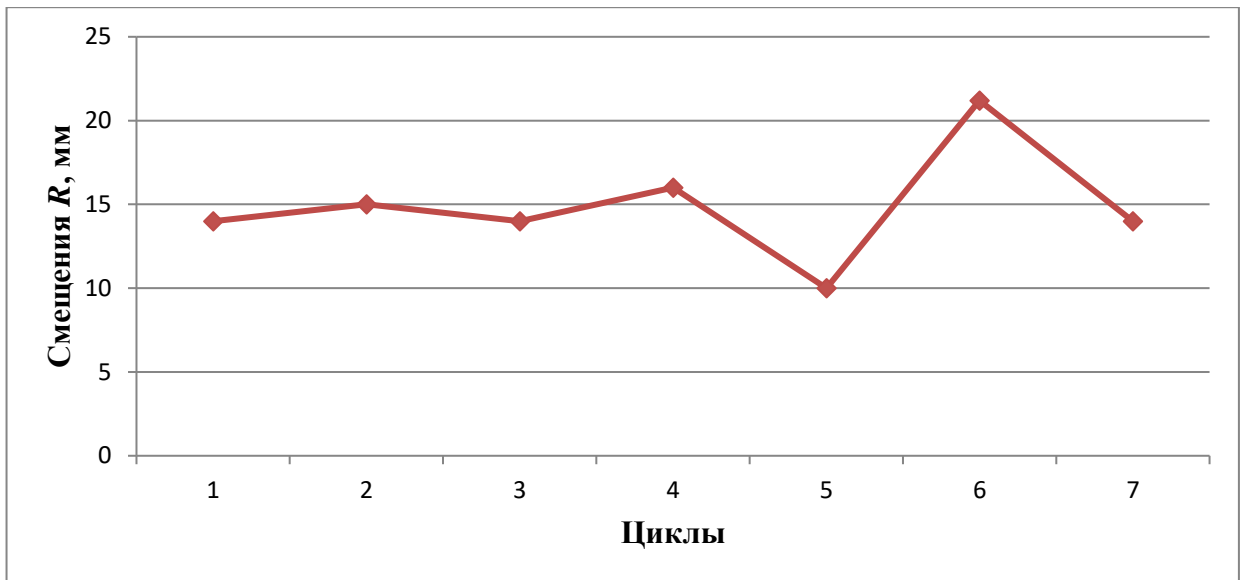


Рисунок 7.5 - График смещений оползня

По графику видно, что оползень двигается в среднем по 15 мм за один цикл, т.е. скорость смещения $V = 30$ мм/мес. Тогда следующий цикл наблюдений, согласно таблицы 3.2 надо проводить через 2,2 месяца.

7.3 Построение автокорреляционных функций и их анализ

Ниже приводится методика корреляционного анализа по данным наблюдений за смещением Карамышевского оползня [81], [101], [152], [160], [172], [197]. Экспериментальные данные сведены в таблицу 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

Продолжение таблицы 7.4

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
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

Продолжение таблицы 7.4

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 Приложении Б даны семь планов с изолиниями (рисунки 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 таблице 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 таблице 7.6 показаны оценки математического ожидания для случайных величин $X(1), X(2), \dots, X(10)$, вычисленных по формуле (7.1):

$$M_x(Z) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (7.1)$$

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 рисунке 7.6 показаны все 10 реализаций, которые представляют собой случайную функцию.

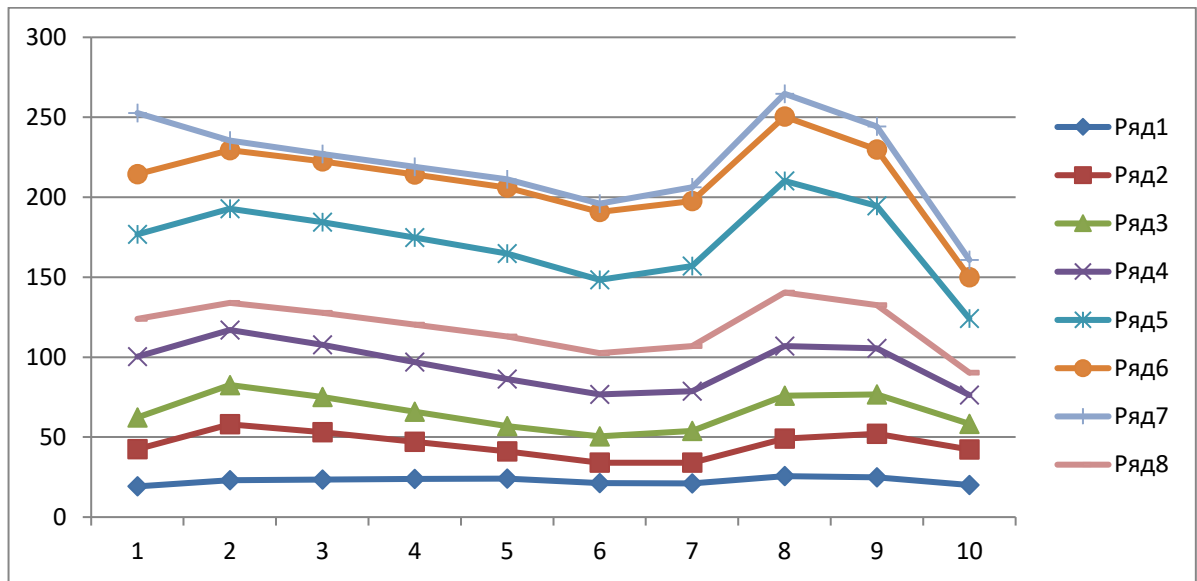


Рисунок 7.6 - Графики случайной функции

Функция, построенная по математическим ожиданиям, показана на рисунке коричневым цветом (ряд 8).

В таблице 7.7 приведены оценки для элементов корреляционной матрицы: дисперсий и корреляционных моментов, вычисленных по формуле (7.2):

$$D_x(Z) = \frac{[(X - m_x)^2]}{n-1}. \quad (7.2)$$

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

Продолжение таблицы 7.7

-	-	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 таблице 7.7 по главной диагонали стоят оценки дисперсий, которые представлены в таблице 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 таблице 7.9 представлены оценки среднеквадратических отклонений по каждому циклу, вычисленные по формуле (7.3)

$$\sigma_x(Z) = \sqrt{D_x(Z)}. \quad (7.3)$$

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 таблицы 7.8 на произведения соответствующих среднеквадратических отклонений из таблицы 7.7, получим таблицу значений нормированной корреляционной функции [21] (таблица 7.10).

Таблица 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

Продолжение таблицы 7.10

-	-	-	-	-	-	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 (таблицы 7.7 и 7.9), формулы (7.4) и (7.5):

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^n M_x(Z)}{n} = \frac{1191,63}{10} = 119,163 \text{ мм}; \quad (7.4)$$

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_x(Z)}{n} = \frac{68000,751}{10} = 6800,08 \text{ мм}^2. \quad (7.5)$$

По таблице 5 приложения [21] для $n - 1 = 9$ и $\beta = 0,99$ находим, что $t_\beta = 3,25$. Тогда (7.6)

$$\varepsilon_\beta = t_\beta \sqrt{\frac{\bar{D}}{n}} = 3,25 \sqrt{\frac{6800,08}{10}} = 84,75 \text{ мм}. \quad (7.6)$$

Доверительный интервал будет (7.7):

$$I_\beta = (\bar{M} - \varepsilon_\beta < \bar{M} < \bar{M} + \varepsilon_\beta) = 34,41 \text{ мм} < 119,16 \text{ мм} < 203,91 \text{ мм}. \quad (7.7)$$

Возвращаясь к таблице 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 Кочрена, имеющего вид (7.8):

$$G = \frac{\sigma_{\text{max}}^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_i^2}. \quad (7.8)$$

Данные из таблицы 7.9 подставляем в формулу. Вычисление критерия G дает 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 указывает на однородность 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. (7.9)

$$\begin{aligned} \bar{m}_x(Z) &= \frac{m_x(1) + m_x(2) + \dots + m_x(10)}{10} = 119,163 \approx 119 \text{ мм}; \\ \bar{D}_x(Z) &= \frac{D_x(1) + D_x(2) + \dots + D_x(10)}{10} = 6800,08 \approx 6800 \text{ мм}^2; \\ \bar{\sigma}_x(Z) &= \sqrt{\bar{D}_x(Z)} = 82,46 \approx 82 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (7.9)$$

Выполним оценку значимости полученных величин $\bar{m}_x(Z)$ и $\bar{\sigma}_x(Z)$ (7.10).

$$\begin{aligned} m_{\bar{m}_x(Z)} &= \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}} = \sqrt{\frac{2251,218}{10}} = 15,004 \approx 15 \text{ мм}; \\ m_{m_{\bar{m}_x(Z)}} &= \frac{\bar{m}_x(z)}{\sqrt{2n}} = \frac{15,004}{\sqrt{20}} = 3,4 \text{ мм}; \\ \sigma_{\bar{\sigma}_x(Z)} &= \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}} = \sqrt{\frac{1247,999}{10}} = 11,171 \approx 11 \text{ мм}; \\ \sigma_{\sigma_{\bar{\sigma}_x(Z)}} &= \frac{\sigma_{\bar{\sigma}_x(Z)}}{\sqrt{2n}} = \frac{11,171}{\sqrt{20}} = 2,5 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (7.10)$$

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 таблице 7.10 постоянному τ соответствует 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 $\rho_x(\tau)$ [21] (таблица 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 рисунке 7.7 представлен график этой функции.

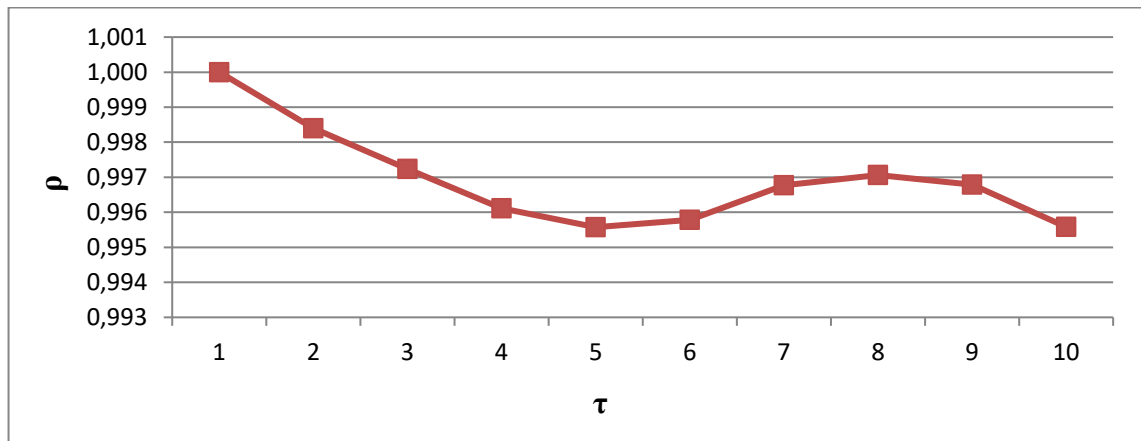


Рисунок 7.7 - График нормированной корреляционной функции

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 $\rho_{эмп}$ 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 равно (7.11):

$$\rho = 0,9986e^{-3E-04x}. \quad (7.11)$$

График аппроксимирующей функции представлен на рисунке 7.8.

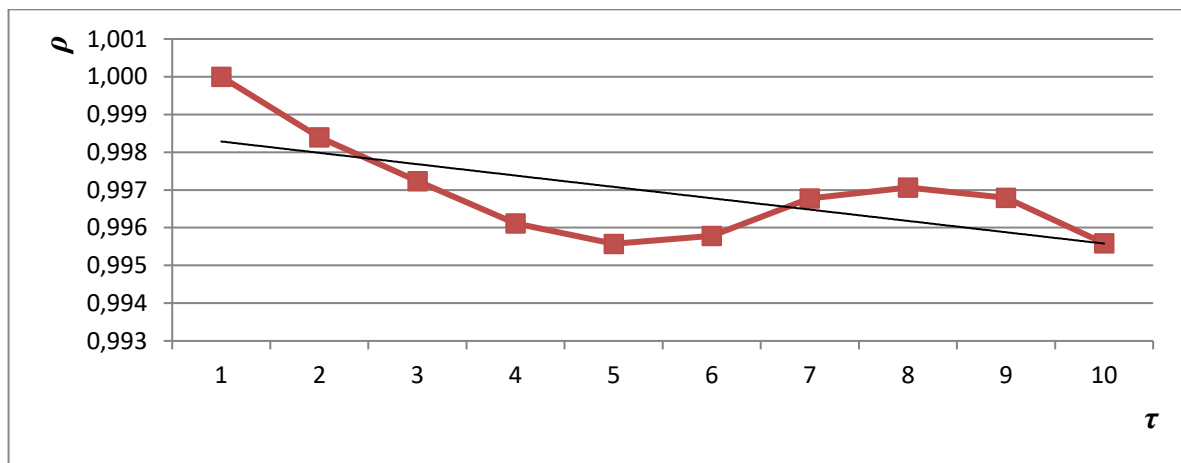


Рисунок 7.8 - График аппроксимирующей функции

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 необходимо предусмотреть мероприятия по инженерной защите [63];

– 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 $\rho = 0,9986e^{-3E-04x}$ позволяют 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 таблице 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

Продолжение таблицы 7.12

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
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

Продолжение таблицы 7.12

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 Приложении В приведены семь планов, построенных в программе Autodesk AutoCAD Civil 3D 2016 (рисунки 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 (таблица 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 таблице 7.14 показаны оценки математического ожидания для случайных величин $X(1), X(2), \dots, X(7)$.

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 рисунке 7.9.

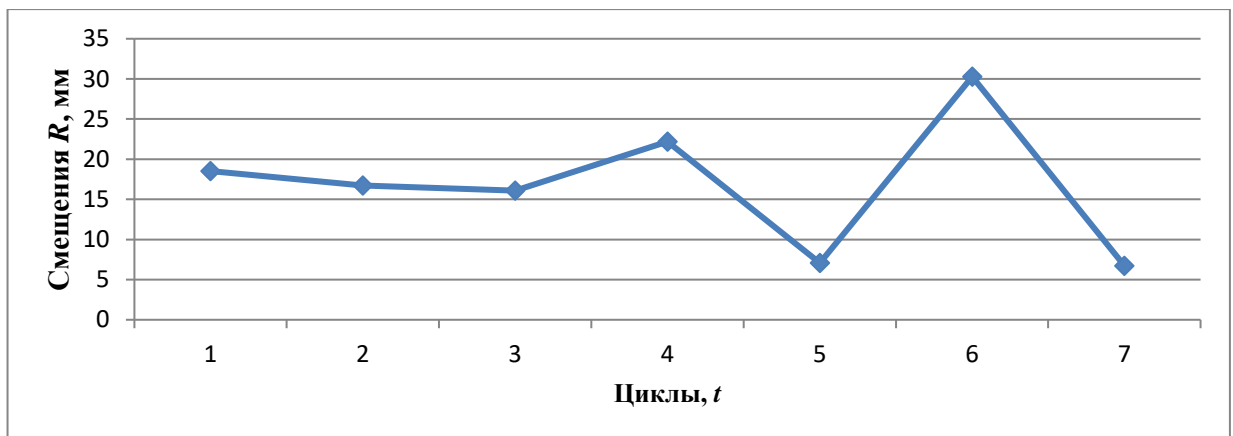


Рисунок 7.9 - График, построенный по математическим ожиданиям случайной последовательности смещений

Совместим два графика: график, построенный по математическим ожиданиям случайных величин смещений и график, полученный по обобщенным среднеквадратическим эллипсоидам смещений (рисунок. 7.5) и проанализируем.

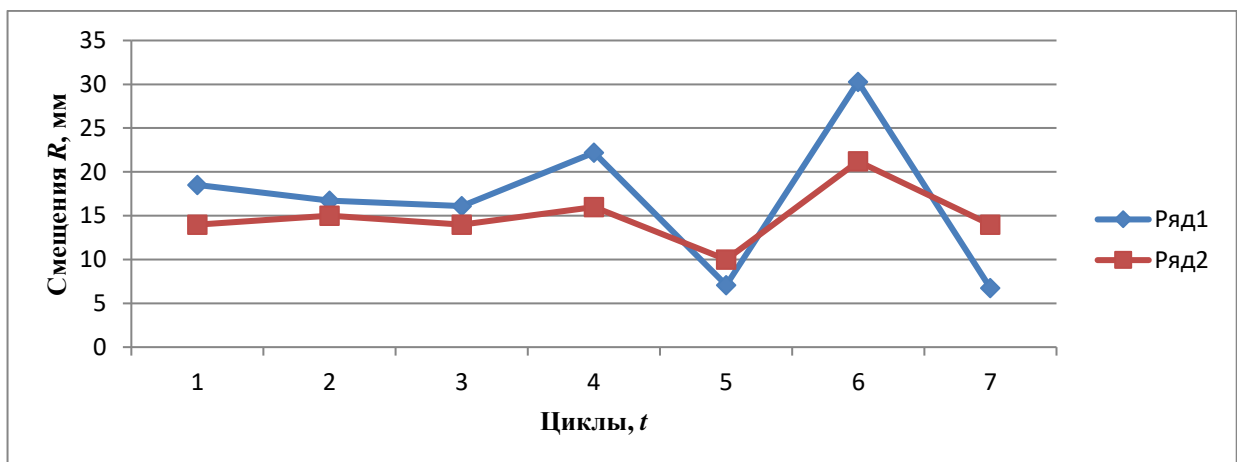


Рисунок 7.10 - Совмещение графиков: ряд 1 - график, построенный по математическим ожиданиям; ряд 2 - график, построенный по обобщенным среднеквадратическим эллипсоидам смещений оползня

Можно сделать следующие выводы:

- график случайной функции и график, построенный по обобщенным средне-квадратическим эллипсоидам смещений, совпали. Это означает, что построенные независимо друг от друга графики подтверждают достоверность данных о смещениях оползня;
- оползень продолжает смещаться. Циклы наблюдений надо 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 известно:

- крутизна склона составляет $20,6^\circ$ (весьма опасные);
- высота склона равна 30 м (умеренно опасные);
- объем смещающегося грунта составляет примерно 0,18 млн м³ (опасные);
- скорость смещения оползня около 20 см/год (умеренно опасные).

По таблице 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 таблицей 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 [195]. 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 реки 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 55269 конечных элементов. Расчетная схема модели в различных плоскостях показана на рисунке 7.11 и рисунке 7.12.

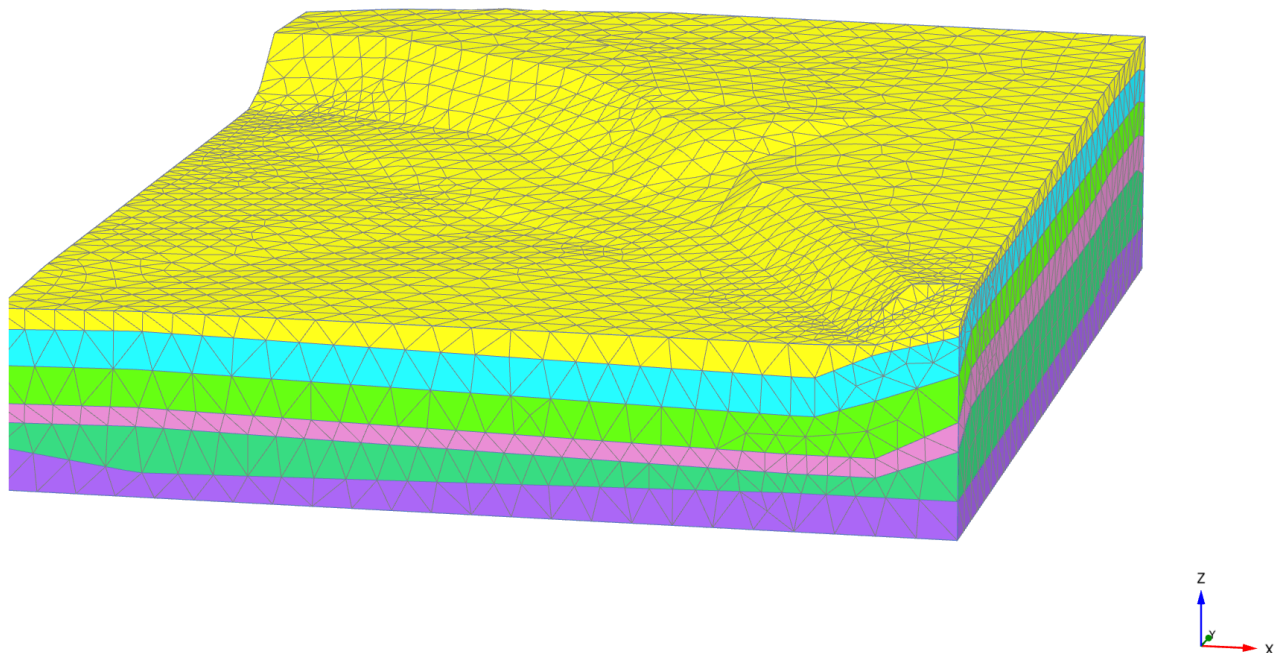


Рисунок 7.11 - Расчетная схема трехмерной геомеханической модели в плоскости X0Z

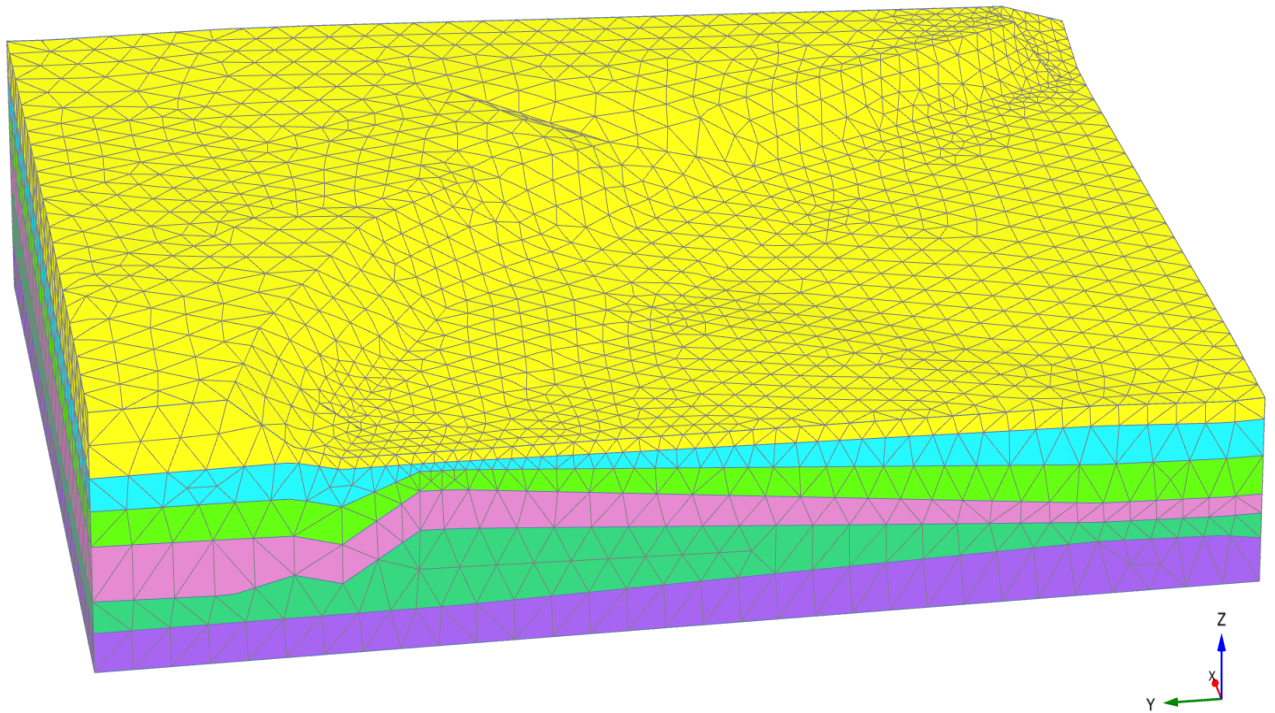


Рисунок 7.12 - Расчетная схема трехмерной геомеханической модели в плоскости Y0Z

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 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 рисунке 7.13 показаны изополя деформаций поверхности склона на этапе вторичной консолидации.

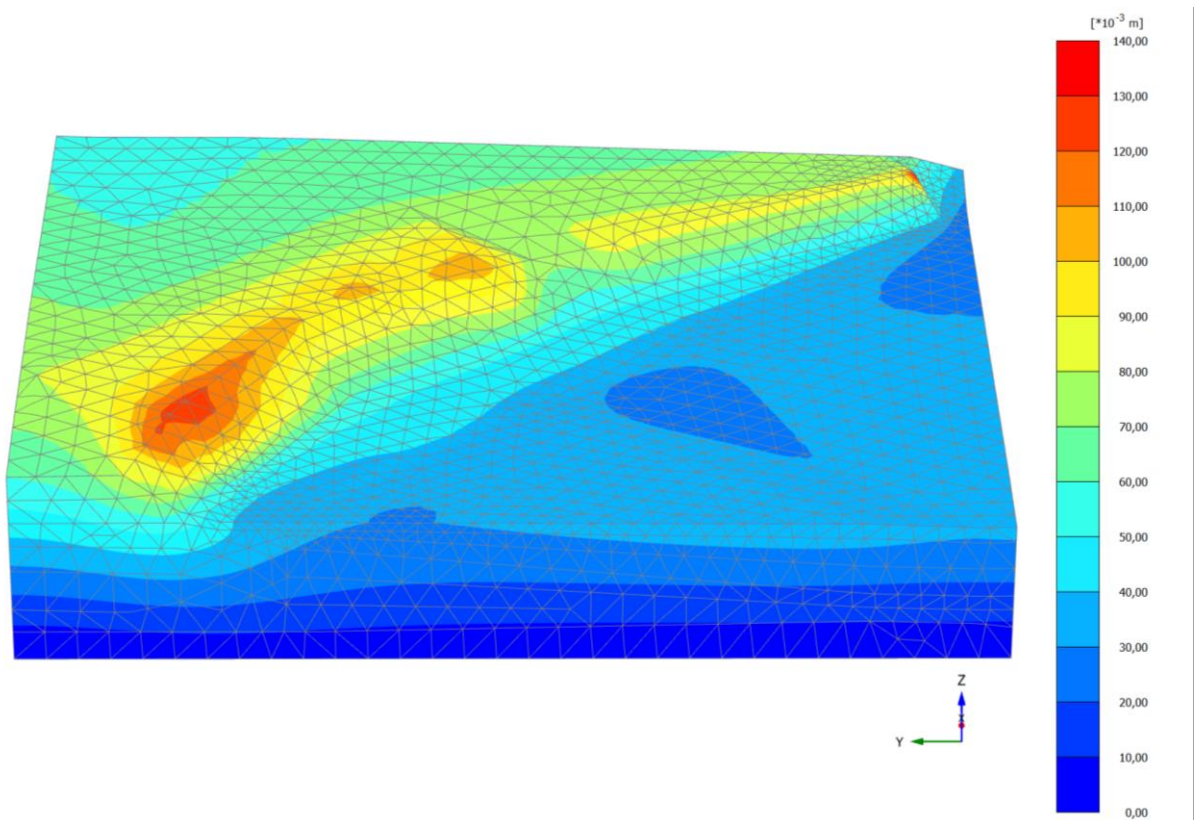


Рисунок 7.13 - Изополя деформаций склона на этапе вторичной консолидации по окончании геодезического мониторинга

Как видно из рисунка 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 рисунке 7.14 показаны средние деформации склона с привязкой к этапам геодезического мониторинга и данные геодезического мониторинга.

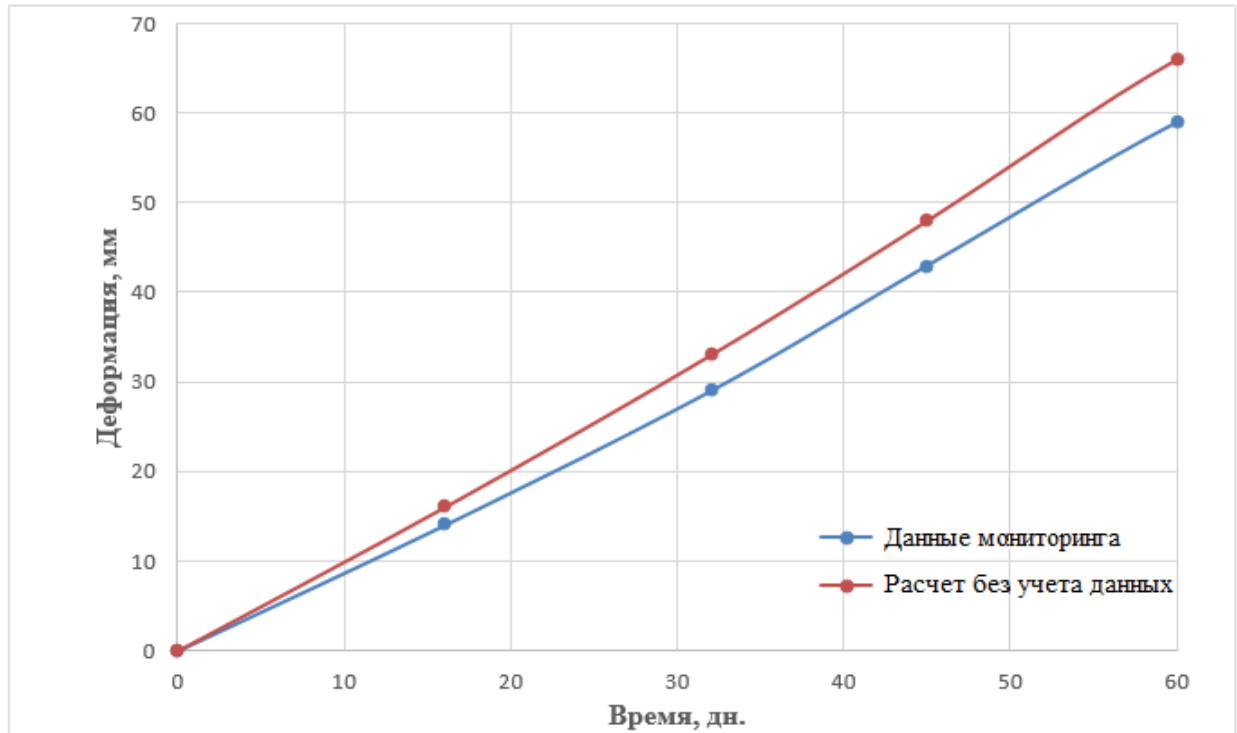


Рисунок 7.14 - Деформации поверхности склона:

ряд 1 - по результатам расчета;

ряд 2 – по данным геодезического мониторинга

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 таблицы 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 необходимое 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 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 таблице 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 (таблица 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_α	0,0002		0,0002
1	C_c	0,00009		0,00010
	C_s	0,000032		0,000036
	C_α	0,00015		0,00017
2	C_c	0,00025		0,00028
	C_s	0,00009		0,00010
	C_α	0,00035		0,00039
3	C_c	0,00018		0,00020
	C_s	0,00005		0,00006
	C_α	0,00023		0,00026
4	C_c	0,00022		0,00025
	C_s	0,00008		0,00009
	C_α	0,00031		0,00035
5	C_c	0,00013	0,00015	
	C_s	0,00005	0,00006	
	C_α	0,00022	0,00025	

Результаты расчета с уточненными характеристиками грунтов основания приведены ниже на рисунках. На рисунке 7.15 показаны изополя деформаций поверхности склона. Как видно из рисунка 7.15, деформации поверхности склона в среднем ниже на 10%, что говорит о более близком к поведению реального склона 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.

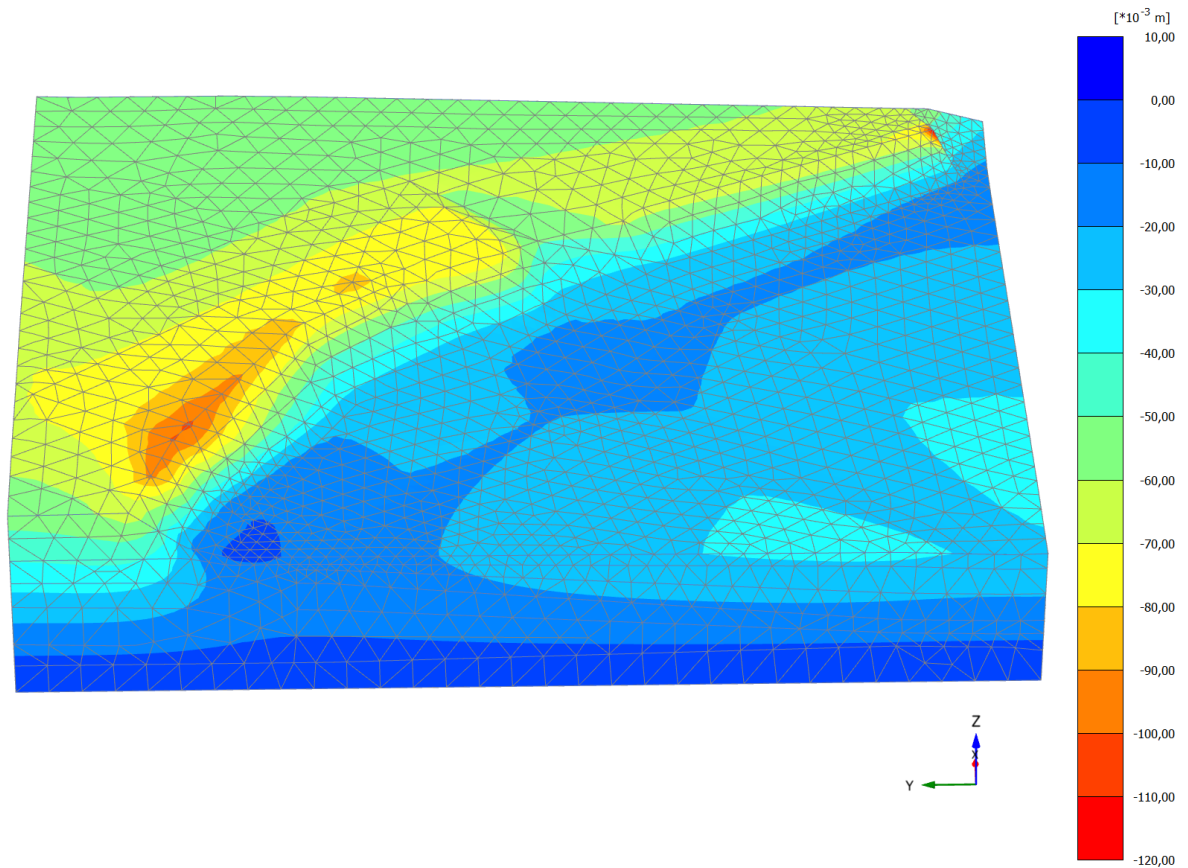


Рисунок 7.15 - Изополя деформаций склона с уточненными характеристиками грунтов основания по окончании геодезического мониторинга

На рисунке 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 ведет себя более

близко по отношению к реальному склону по сравнению с первоначальной.

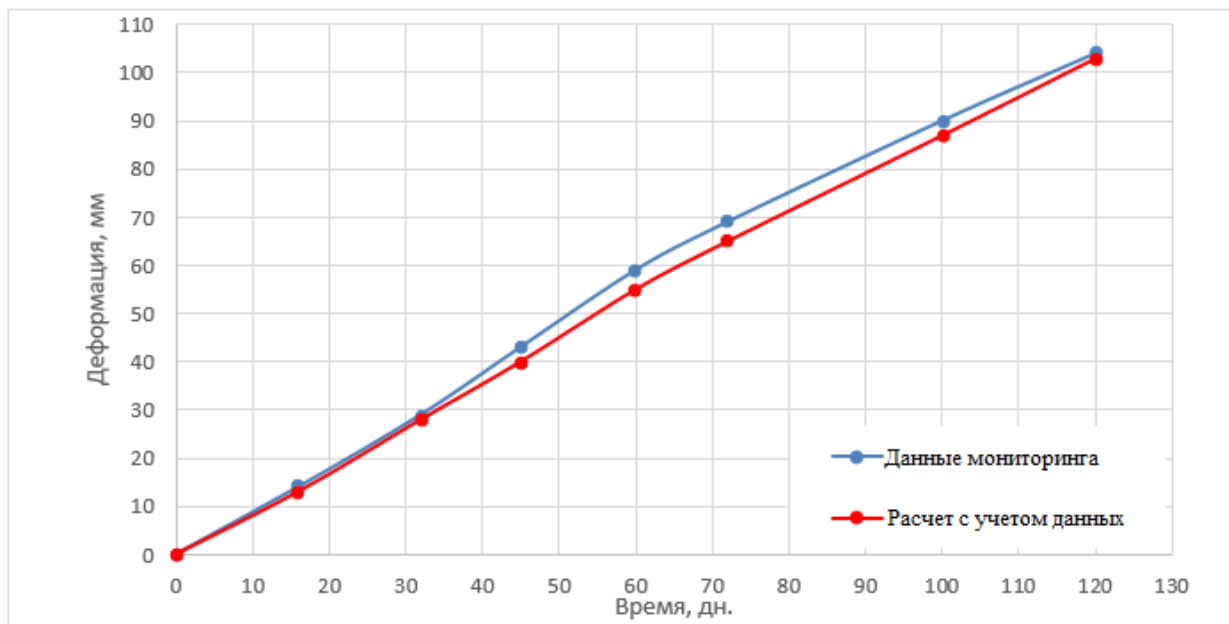


Рисунок 7.16 - Деформации поверхности склона по результатам расчета и по данным геодезического мониторинга:

ряд 1 – по данным геодезического мониторинга,
ряд 2 - по результатам уточненного расчета.

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

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 съемом до 2%, что говорит об общей хорошей сходимости данной 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 рисунке 7.17 представлен график зависимости средней деформации поверхности склона от времени без учета и с учетом результатов геодезического мониторинга, соответственно.

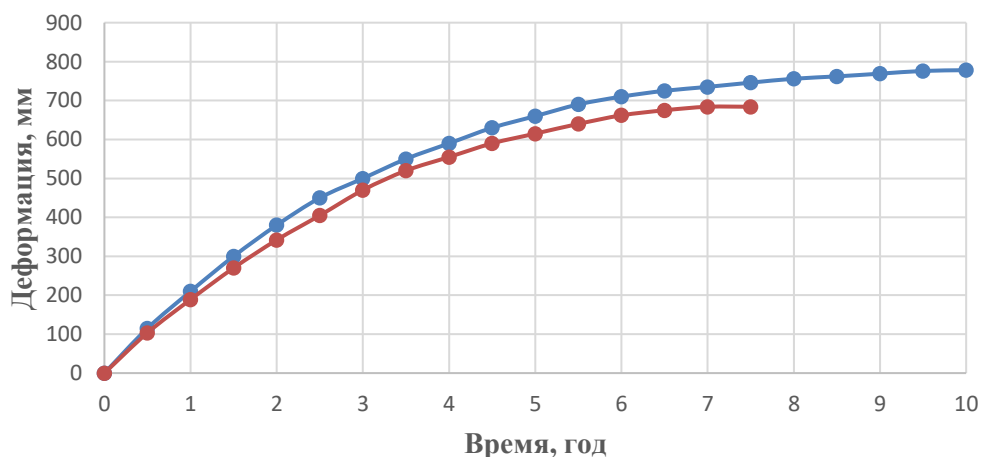


Рисунок 7.17 - График зависимости средней деформации поверхности склона от времени без учета (синяя линия) и с учетом (красная линия) результатов геодезического мониторинга

По результатам выполненных расчетов время завершения вторичной консолидации без учета данных геодезического мониторинга – 9,7 лет, а 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 [190].

7.6 Применение геомеханической модели склона для выбора типа проектируемого фундамента сооружения

Описанная в диссертационной работе 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 22.13330 [214]. 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 монито-

ринга. Данное здание относится к зданиям и сооружениям массового строительства, срок эксплуатации которых в соответствии с таблицей 1 [41] 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 «системы») приведена на рисунке 7.18.

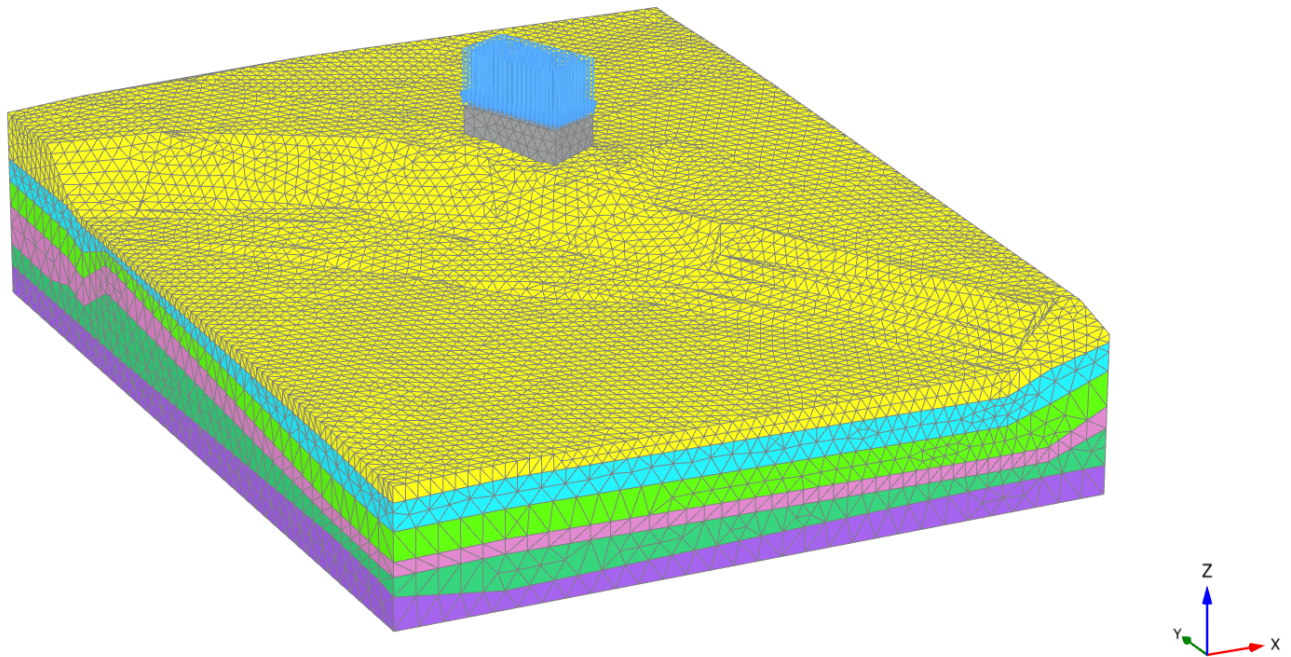


Рисунок 7.18 - Расчетная схема геомеханической модели «системы»

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 рисунке 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 рисунке 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 рисунке 7.21 показан график изменения осадок во времени с учетом и без учета данных геодезического мониторинга. Предельная средняя осадка фундамента в соответствии с [214] для данного типа зданий составляет 15 см. Как видно из рисунка 7.19, осадка фундамента с учетом свойств ползучести грунтов превышает нормативную осадку. Как видно из рисунка 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 до окончания срока эксплуатации.

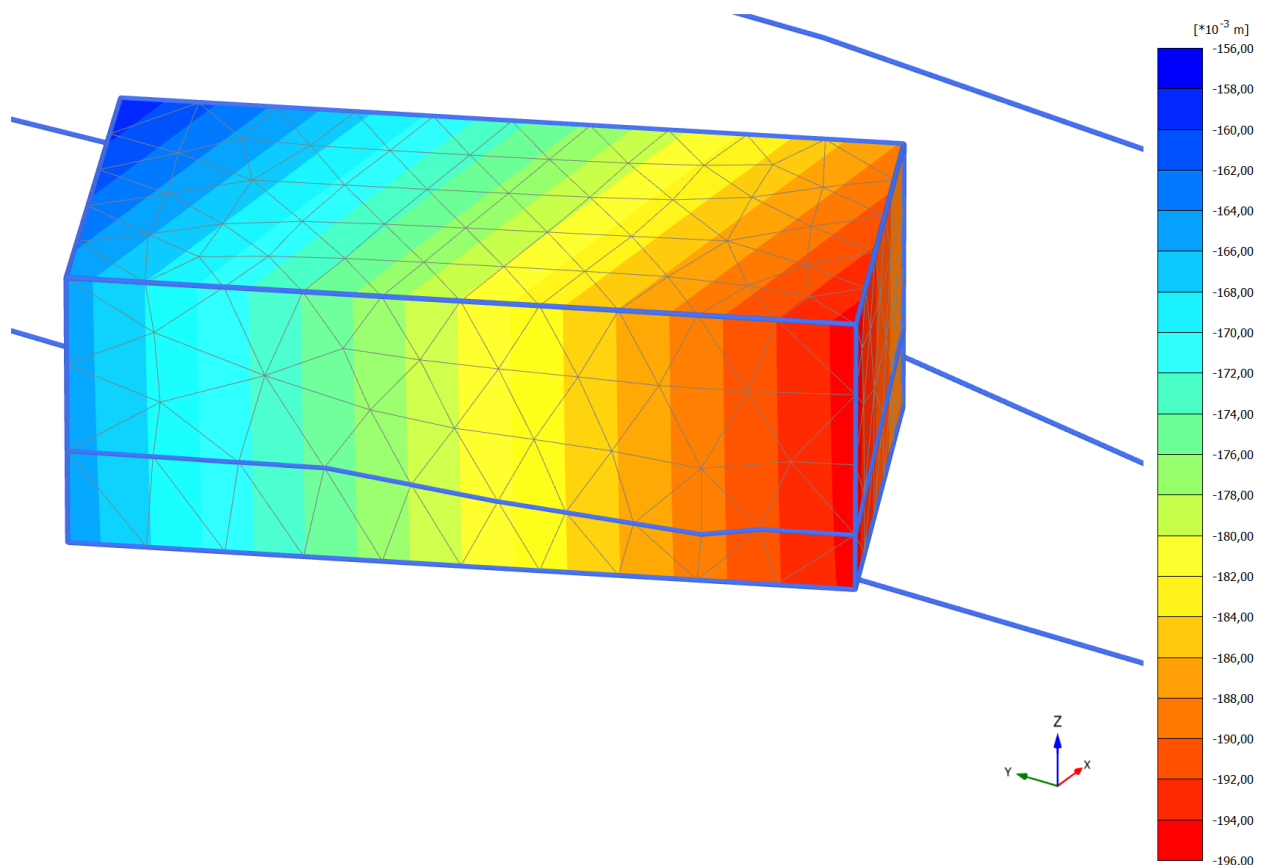


Рисунок 7.19 - Изополя вертикальных перемещений поверхности склона и фундаментов здания без учета данных геодезического мониторинга

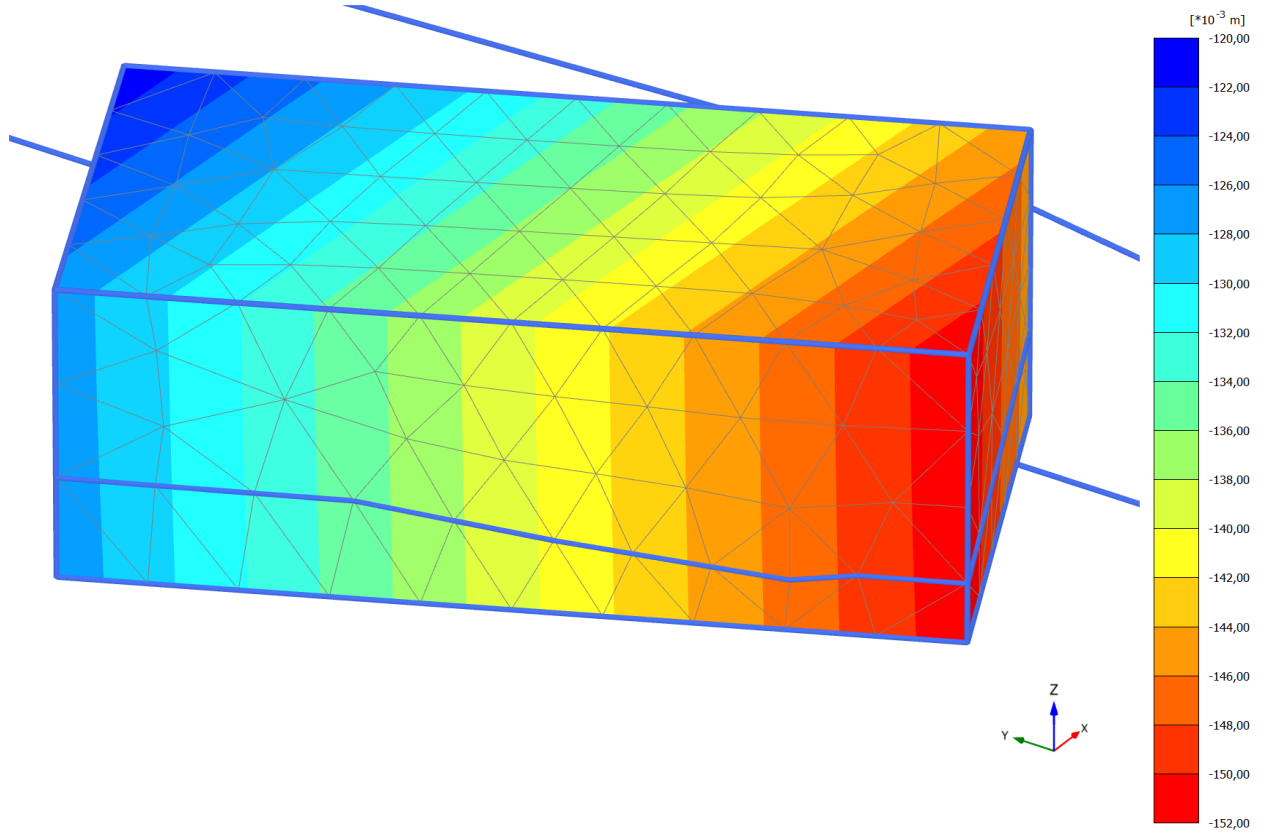


Рисунок 7.20 - Изополя вертикальных перемещений поверхности склона и фундаментов здания с учетом данных геодезического мониторинга

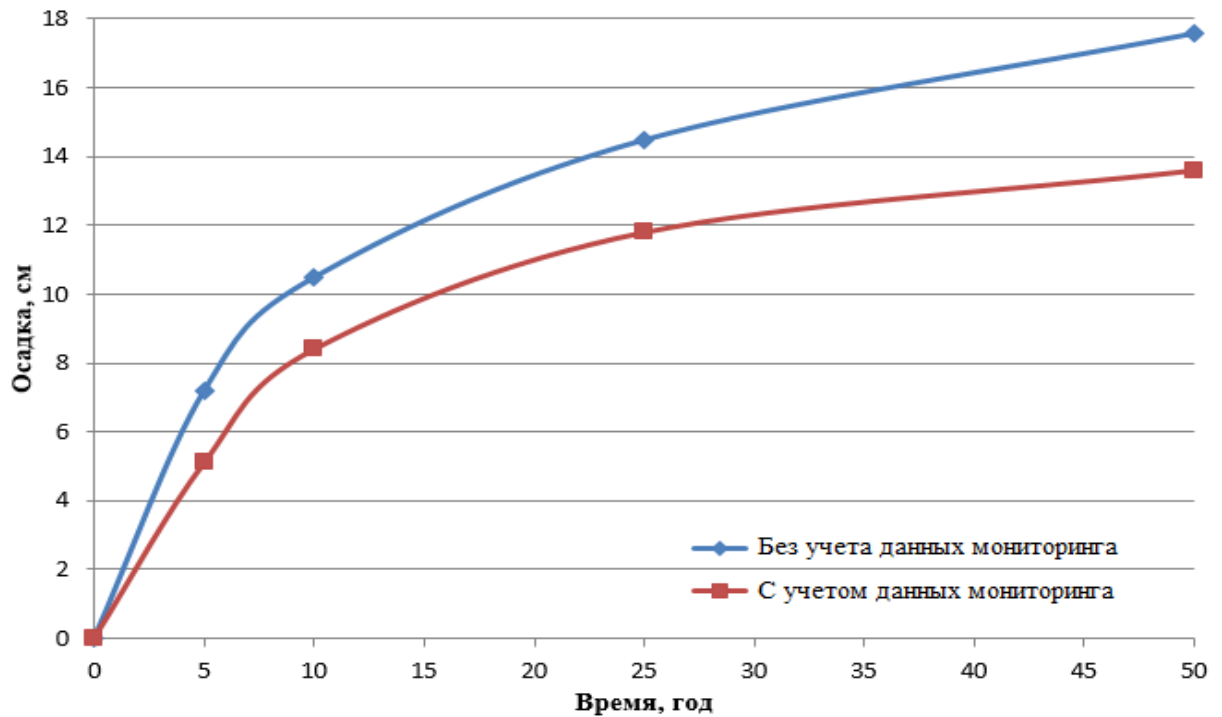


Рисунок 7.21 – График изменения осадок фундамента во времени с учетом и без учета данных геодезического мониторинга

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 необходимо 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 рисунке 7.22 показаны изополя вертикальных перемещений фундаментов здания через 50 лет после приложения полной нагрузки от здания.

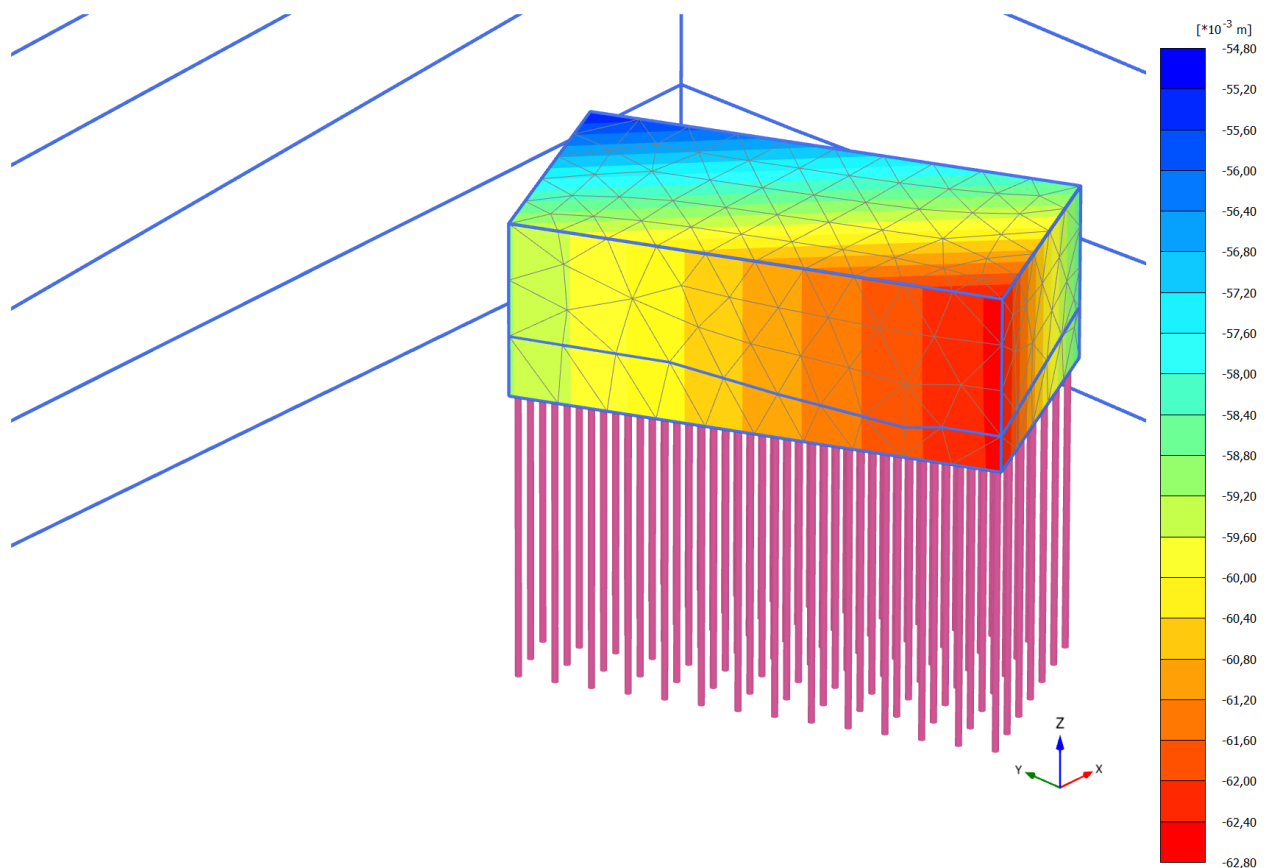


Рисунок 7.22 - Изополя вертикальных перемещений фундаментов здания

Как видно из рисунка 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:

1. При строительстве зданий и сооружений на откосах и склонах, сложенных грунтами с признаками ползучести, необходимо создание геомеханической модели, наиболее приближенной к натурным наблюдениям.
2. В таких случаях необходим расчет осадок фундаментов с учетом ползучести грунтов во времени.
3. Учитывать данные геодезического мониторинга и соответствующей им корректировки расчетных характеристик грунтов основания.
4. Геомеханическая модель склона позволяет рассчитать осадки зданий и сооружений с учетом сроков их эксплуатации, что позволяет выбрать тип фундаментов с минимальными затратами.

7.7 Выводы по Главе 7

1. По авторской программе «Обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений оползней» вычислены параметры среднеквадратических эллипсоидов смещений оползня и получены смещения оползня на Карамышевской набережной и направления смещений в каждом цикле.

2. По полученным параметрам среднеквадратического эллипсоида смещений оползня построена математическая модель смещений оползня.

3. Проведенные исследования оползневого процесса методом корреляционного анализа с использованием теории случайных процессов показывает, что, во-первых, стабилизация оползня еще долго не предвидится и надо предусмотреть противооползневые мероприятия, а, во-вторых, обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений оползней, методика построения которой предложена автором в главе 5, соответствует математической модели, т.е. обе разработки автора достоверны.

4. По предложенной методике, позволяющей прогнозировать деформации поверхности склона во времени при появлении процессов вторичной консолидации в грунтах основания, проведены расчеты напряженно-деформированного состояния Карамышевского оползневого склона, которые показывают, что без учета данных геодезического мониторинга время завершения вторичной консолидации – 9,7 лет, а с учетом данных геодезического мониторинга – 7,2 года. Разница составляет 12% – 778 и 684 мм, соответственно. Следовательно, использование предлагаемой методики прогноза поведения оползня с учетом данных геодезического мониторинга необходимо использовать при проектировании и строительстве зданий и сооружений на поверхности откосов и склонов: результаты уточненного расчета показывают, как меньшие итоговые деформации склона, так и меньший срок окончания вторичной консолидации.

5. Расчет осадок во времени при проектировании двух типов фундаментов – плитного и свайного для 20-и этажного жилого здания на бровке склона в центральной части Карамышевской набережной с габаритами 20×40 м показал, что без учета данных геодезического мониторинга плитный тип фундамента здания не соответствует нормативным требованиям к уровню обеспеченности здания (т.е., времени безаварийной эксплуатации в течение пятидесяти лет). Следовательно, возникает необходимость вместо плитного фундамента проектировать свайный фундамент, т.е. более дорогостоящий. Учет же данных геодезического мониторинга делает обоснованным для данного здания в качестве фундамента выбрать железобетонную плиту толщиной 800 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной проблемы - геодезическое обеспечение мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Разработаны теоретические основы постановки геодезического мониторинга оползневых процессов на склоновых территориях, включающие алгоритмы для определения параметров опорных геодезических сетей и периодичности повторных геодезических наблюдений с учетом требуемой точности определения кинематических характеристик деформационных процессов.

2. Разработана новая методика построения обобщенного среднеквадратического эллипсоида смещений оползневого массива по результатам повторных геодезических наблюдений.

3. Разработан метод обработки результатов геодезического мониторинга деформационных процессов склоновых систем, включающий построение математических моделей, основанных на совокупности процедур системного анализа геодезической информации и обеспечивающих получение обоснованных оценок оползневых рисков и уровня оползневой безопасности.

4. Разработана, теоретически обоснована и исследована на основе данных геодезического мониторинга математическая модель для оценок оползневой безопасности склоновых систем и оценок оползневого риска с позиций ранжирования склоновых систем по степени оползневых рисков.

5. Установлена эффективность применения теории случайных процессов для анализа динамики оползневого процесса методом корреляционного анализа по данным геодезического мониторинга, позволяющая надежно прогнозировать величины смещений и на основе этого вносить соответствующие коррективы в программу геодезических наблюдений (плотность, периодичность, точность и т.д.).

6. Разработан численный критерий для количественного анализа эффективности методов оценки опасных оползневых процессов.

7. Разработана методика корректировки расчетных физико-механических характеристик грунтов склоновых систем на основе величин смещений оползней, полученных по результатам повторных геодезических наблюдений, выполненных в составе мониторинга деформационных процессов.

8. Разработана новая методология геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем.

9. Предложено для повышения надежности проектирования зданий и сооружений на оползневых склонах в обязательном порядке включать в программу геодезических изысканий метод геодезического мониторинга склоновых территорий.

Разработанные методы и рекомендации прошли апробацию и внедрены в практику учебного процесса на кафедре инженерных изысканий и геоэкологии в Московском государственном строительном университете (НИУ МГСУ) (курс «Геодезический мониторинг возведения объектов»), а также на кафедре геодезии и геоинформатики Государственного университета по землеустройству (ГУЗ) (курс «Инженерной геодезии»). Результаты работ использовались при оценке и прогнозе геомеханического состояния породного массива в районе строительства перегонных тоннелей на участке «Петровско-Разумовская» - «Селигерская» и станционных комплексов «Окружная», «Верхние Лихоборы» и «Селигерская» по объекту «Люблинско-Дмитровская линия станция «Петровско-Разумовская» - «Селигерская» (ООО «КИПС-2», г. Москва, 2016-2017 гг.) и при оценке риска оползневой опасности для разработки проекта многофункционального комплекса в Московской области, Сельское поселение Молоковское, д. Андреевское (2017 г.). Получены также два Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2017616941 «Обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений оползней» (20.06.2017 г.), № 2020663549 «Расчет величин смещений оползней (длина, направление)» (28.10.2020 г.) и Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620977 «Оценка оползневых рисков» (18.05.2021 г.).

Таким образом, 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 позволяют нам утверждать о достижении цели исследований - разработке методологии геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем.

Помимо этого, их 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 диссертации. Предложенная в настоящей диссертация методология геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем открывают 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Учебное пособие в 3-х книгах. Книга 1. Под ред.: К.Е. Кочеткова, В.А. Котляревского и А.В. Забегаева / В.А. Котляревский, К.Е. Кочетков, А.А. Носач, А.В. Забегаев и др. // М. : Издательство АСВ, 1995. – 320 с.
2. Аврунев, Е.И. Проектирование специальной инженерно-геодезической сети для наблюдения за движением оползня / Е.И. Аврунев // Методические указания. – Новосибирск : НИИГАиК, 1989. – 25 с.
3. Акимов, В.А. МЧС России. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев // М. : Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
4. Акимов, В.А. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски / В.А. Акимов, В.Д. Новиков, Н.Н. Радаев // М. : ЗАО ФИД "Деловой экспресс, 2001. – 344 с.
5. Аугусти, Н. Вероятностные методы в строительном проектировании / Н. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати // М. : Стройиздат, 1988. – 584 с.
6. Баборыкин, М.Ю. Мониторинг оползней с использованием лазерного сканирования и геодезических наблюдений / М.Ю. Баборыкин, Е.В. Жидиляева // Журнал «Инженерные изыскания», № 3/2014, С. 16-27.
7. Баринов, А.В. Опасные природные процессы / А.В. Баринов, В.А. Седнев, А.Б. Шевчук и др. // Учебник. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. – 334 с.
8. Бацанин, С.Ф. Напряжения в литосфере стабильных областей, обусловленных горизонтальными вариациями мощности земной коры / А.В. Бацанин // Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, № 7, 1988. – С. 22-28.
9. Бахурин, И.М. Сдвигение горных пород под влиянием горных выработок / И.М. Бахурин // М. - Гостоптехиздат, 1946. – 231 с.
10. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Региональные проблемы безопасности с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф. – М. : МГФ "Знание", 1999. – 368 с.

11. Безуглова, Е.В. Оползневая опасность и риск смещений оползней на склонах : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Е.В. Безуглова. - Краснодар, 2005. – 209 с.
12. Безуглова, Е.В. Оценка и управление оползневыйм риском транспортных природно-технических систем черноморского побережья Кавказа : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Е.В. Безуглова. – Краснодар, 2014. – 277 с.
13. Беликов, А.Б. Математическая обработка результатов геодезических измерений / А.Б. Беликов, В.В. **Симонян** // Учебное пособие. Моск. гос. строит. ун-т. 2-е изд. – Москва : - НИУ МГСУ, 2016. – 432 с.
14. Бобрович, А.С. Математическое определение запаса устойчивости оползневых объектов : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.С. Бобрович. – Ульяновск, 2008. – 147 с.
15. Бондарик, Г.К. Инженерная геодинамика / Г.К. Бондарик, В.В. Пендин, Л.А. Ярг // Учебник. Москва : КДУ, 2009. - 440 с.
16. Брайт, П.И. Геодезические методы измерения смещений на оползнях / П.И. Брайт // М. : Недра, 1965. - 116 с.
17. Брынь, М.Я. 2020. Оценка точности вычисления координат центра геодезического пункта на основе элементов центрировки при внецентренных спутниковых измерениях / М.Я. Брынь, Ю.В. Лобанова, **В.В. Симонян** // Инженерные изыскания. -2020. - Том XIV, № 4–5. С. 18-23.
18. Бурков, В.Н. Модели и механизмы управления безопасностью / В.Н. Бурков, Е.В. Грацианский, С.И. Дзюбко, А.В. Щепкин // М. : Изд-во СИНТЕГ, 2001. – 160 с.
19. Бурков, В.Н. Механизмы управления эколого-экономическими системами. [Текст] Монография / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков, А.В. Щепкин // Москва : Новиков Дмитрий Александрович, 2008. – 244 с.

20. Буш, В.В. Геодезические работы при строительстве сооружений башенного типа / В.В. Буш, В.В. Калугин, А.И. Саар // М. : Недра, 1985. – 216 с.
21. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель // 5-е изд. – М. : Высшая школа, 1998. – 576 с.
22. Видуев, Н.Г. Определение уравнения осадки сооружения / Н.Г. Видуев, А.П. Мамин // Инженерная геодезия. – Киев : КИСИ, 1969. – Вып. 6. – С. 103-109.
23. Видуев, Н.Г. Расчет необходимой точности наблюдений за осадками инженерных сооружений / Н.Г. Видуев, В.С. Староверов // Инженерная геодезия. – Киев : КИСИ, 1972. – Вып. 12. – С. 3-12.
24. Виноградов, В.А. Аэрокосмический мониторинг экосистем / В.А. Виноградов // М. : Наука, 1984. – 252 с.
25. Вишняков, Я.Д. Общая теория рисков / Я.Д. Вишняков, Н.Н. Радаев // Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – 2-е изд., испр. - М. : Издательский центр «Академия», 2008. - 368 с.
26. Владимиров, В.А. Катастрофы и экология / В.А. Владимиров, В.И. Измалков // М. : Контакт-Культура, 2000. – 315 с.
27. 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. 2015. № 6 (53). С. 216-221.
28. Вопросы математической теории надежности / Под ред. Б.В. Гнеденко // М. : Радио и связь, 1993. – 376 с.
29. Воробьев, Ю.Л. Основы формирования и реализации государственной политики в области снижения рисков чрезвычайных ситуаций / Ю.Л. Воробьев // М. : ФИД "Деловой экспресс", 2000. – 248 с.
30. Воробьев, Ю.Л. Нормирование рисков техногенных чрезвычайных ситуаций / Ю.Л. Воробьев, Н.П. Копылов, Ю.Н. Шебеко // «Проблемы анализа риска». Том 1, № 2, 2004 г. С. 116-124.
31. Воробьев, Ю.Л. Катастрофы и общество / Ю.Л. Воробьев, В.И. Осипов, В.А. Владимиров и др. // М.: Контакт-Культура, 2000. – 332 с.

32. Галлагер, Р. Метод конечных элементов / Р. Галлагер // Основы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 428 с.
33. Гамбурцев, А.Г. Концепция мониторинга природно-технических систем / А.Г. Гамбурцев // Геоэкология. — 1994. — № 4. — С. 12-19.
34. 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.
35. Гинзбург, Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции / Л.К. Гинзбург // М.: Стройиздат, 1979. — 82 с.
36. Гинзбург, Л.К. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления / Л.К. Гинзбург // М.: Центральное бюро научно-технической информации, 1986. 134 с.
37. Гордеев, В.А. Теория ошибок измерений и уравнивательные вычисления / В.А. Гордеев // Учебное пособие для вузов. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2004. — 429 с.
38. ГОСТ 20522 - 2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 октября 2012 г. № 597-ст : дата введения 2013-07-01. — М. : Стандартинформ, 2012. — 16 с.
39. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Минстроя России от 1 августа 1996 г. № 18-56 : дата введения 1997-01-01. — М. : Стандартинформ, 2012. — 58 с.
40. ГОСТ 30416-96. Грунты. Лабораторные испытания испытаний : межгосударственный стандарт : издание официальное : принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС) 1996-05-15 г. постановлением Минстроя России от 1 августа 1996 г. № 18-57 : дата введения 1997-01-01. — М. : Стандартинформ, 1997. — 19 с.

41. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. № 1974-ст : дата введения 2015-07-01. – М. : Стандартинформ, 2015. - 14 с.
42. Градостроительство на склонах / В.Р. Крогиус, Д. Эббот, К. Поллит, и др.; Под ред. В.Р. Крогиуса // М. : Стройиздат, 1988. – 328 с.
43. Григоренко, А.Г. Измерение смещений оползней / А.Г. Григоренко // М. : Недра, 1988. - 144 с.
44. Грэждяну, П.М., Авербух И.Ш. Вариант вероятностного метода оценки оползнеопасности территории / П.М. Грэждяну, И.Ш. Авербух // В кн. : Современные методы прогноза оползневого процесса. – М. : Наука, 1981. – С. 61-63.
45. Гулакян, К.А. Прогнозирование оползневых процессов / К.А. Гулакян, В.В. Кюнцель, Г.П. Постоев // М. : Недра, 1977. – 135 с.
46. Гуляев, Ю.П. О методологии геодезического мониторинга природно–технических систем / Ю.П. Гуляев // Геодезия и картография. – 2006. – № 3. – С. 19–24.
47. Гуляев, Ю.П. Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений: монография / Ю.П. Гуляев // Новосибирск : СГГА, 2008. – 256 с.
48. Гуляев, Ю.П. Задачи экогеологического и деформационного мониторинга / Ю.П. Гуляев, А.И. Каленицкий // Геодезия и картография. – 1996. – № 3. – С. 49-51.
49. Гуляев, Ю.В. Интеллектуальные системы мониторинга безопасности / Ю.В. Гуляев, Г.А. Кащенко, А.С. Багдасарян, Р.В. Семенов // Информация и безопасность, 2008. Т. 11. №3. – С. 349-354.
50. Елохин, А.Н. Анализ и управление риском: Теория и практика / А.Н. Елохин // М. : Лукойл, 2000. – 185 с.
51. Емельянова, Е.П. Сравнительный метод оценки устойчивости склонов и прогноза оползней / Е.П. Емельянова // М. : Недра, 1971. – 103 с.

52. Емельянова, Е.П. Основные закономерности оползневых процессов / Е.П. Емельянова // М. : Недра, 1972. – 310 с.
53. Ерыш, И.Ф. Оползни Крыма. Ч. 1 и 2 / И.Ф. Ерыш, В.Н. Саломатин // Изд. «Апостроф». Симферополь : 1999. – 422 с.
54. Зайцев, А.К. Проектирование полигонометрического хода заданной точности / А.К. Зайцев // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». №2 - 2011. – С. 7-13.
55. Зайцев, А.К. Трилатерация [Текст]: монография // А.К. Зайцев // 2-е изд., М. : 2018. - 224 с.
56. Зайцев, А.К. Научные труды [Текст]: избранное // А.К. Зайцев // М. : 2018. - 376 с.
57. Заруба, К. Инженерная геология / К. Заруба, В. Менцл // Пер. с англ. – М. : Мир, 1979. – 468 с.
58. Земля - Хроники Жизни [Электронный ресурс] // earth-chronicles.ru.
59. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич // М. : Мир, 1975. – 296 с.
60. Зеркаль, О.В. Оценка устойчивости склонов в условиях сейсмического воздействия / О.В. Зеркаль, И.К. Фоменко, Кан Кай // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 4. С. 32-35.
61. Зеркаль, О.В. Инженерно-геологическое и инженерно-сейсмологическое изучение эпицентральных зон сильных землетрясений / О.В. Зеркаль // Геориск. 2010. № 1. С. 62-65.
62. Золотарев, Г.С. Формирование оползней, селей и лавин / Г.С. Золотарев, С.С. Григорян, С.М. Мягков // Инженерная защита территорий / М. : Изд-во МГУ, 1987. – 389 с.
63. Зоценко, Н.Л. Инженерные мероприятия по стабилизации оползневого склона / Н.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников, М.А. Харченко, В.И. Марченко, В.А. Титаренко // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции НАСКР-2014. Изд-во Чуваш. ун-та, г. Чебоксары. 2014. – С. 359-363.

64. 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 // Журнал "Инженерная геология", Инженерная геология, №1, 2013. – С. 46 – 54.
65. Иванов, И.П. Инженерная геодинамика / И.П. Иванов, Ю.Б. Тржцинский // СПб. : Наука, 2001. – 416 с.
66. Изучение напряженного состояния массивов пород в инженерно-геологических целях / М. : МГУ, 1968. – 136 с.
67. Изучение режима оползневых процессов / М. : Недра, 1982. – 255 с.
68. «Инженерная защита», выпуск № 2 (май – июнь 2014).
69. Инженерно-геологический и геофизический мониторинг природных объектов и инженерных сооружений / Под ред. А.В. Николаева // М. : ГНТП «Безопасность», 1998. – 102 с.
70. Казеев, А.И. Механизм и закономерности развития глубоких оползневых подвижек в г. Москве в фазу катастрофической активизации оползневого процесса : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / А.И. Казеев. - М.: 2012 – 218 с.
71. Калинин, Э.В. Инженерно-геологические расчеты и моделирование / Э.В. Калинин // М. : Издательство Московского университета, 2006. – 256 с.
72. Карпик, А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий / А.П. Карпик // Новосибирск : СГГА, 2004. – 260 с.
73. Кафтан В.И. Геодезические спутниковые измерения, обработка и деформационный анализ: учебное пособие / В.И. Кафтан, П.А. Докукин // Москва : РУДН, 2017. – 272 с.
74. Качанов, С.А. Концепция создания структурированной системы мониторинга и управления системами безопасности и жизнеобеспечения потенциально опасных объектов, зданий и сооружений (утверждена руководством МЧС России) / С.А. Качанов, Н.Г. Топольский и др. // М. : ВНИИ ГОЧС. 2003. – 36 с.

75. Келль, Н.Г. Геодезическое изучение движения оползней на Крымской оползневой станции / Н.Г. Келль // Монографическое описание методик стационарных наблюдений над оползнями Крымской АССР. - Ростов на Дону, 1939. - С. 152 - 169.
76. Кемниц, Ю.В. Теория ошибок измерений / Ю.В. Кемниц // М. : Недра, 1967. – 176 с.
77. Королев, В.А. Мониторинг геологической среды / В.А. Королев. Под ред. В.Т. Трофимова // М. : МГУ, 1995. – 272 с.
78. Краснов, М.Л. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости / М.Л. Краснов, А.И. Киселев, Г.И. Макаренко // М. : Наука, 1981. – 304 с.
79. Кузин, А.А. Геодезическое обеспечение зонирования территорий по степени опасности проявлений оползневых процессов на основе применения ГИС-технологий : специальность 25.00.32 «Геодезия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических / А.А. Кузин. - Санкт-Петербург : 2014. – 133 с.
80. Кузнецов, А.И. Разработка метода определения поверхности скольжения оползня по данным геодезического мониторинга : специальность 25.00.32 «Геодезия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических / А.И. Кузнецов. - М. : 2012. – 184 с.
81. Кучай, В.К. К корреляционной методике оползневого прогноза в условиях Центрального Таджикистана / В.К. Кучай В.К, А.У. Аминов, К.Н. Скрынников // Мат. науч.-техн. совещ. по вопр. методики изуч. и прогноза селей, обвалов и оползней. Душанбе : 1970. – С. 154-189.
82. Кюнтцель, В.В. Закономерности оползневого процесса на Европейской территории СССР / В.В. Кюнтцель // М. : Недра, 1980. – 267 с.
83. Кюнтцель, С.И. Экспертная оценка экологической устойчивости территории в системе мониторинга геологической среды на персональной ЭВМ / В.В. Кюнтцель, А.А. Бондаренко, С.И. Жудина // В сб. : Прикладная геоэкология, чрезвычайные ситуации, земельный кадастр и мониторинг. – М. : 1995. – С. 20-22.
84. Лазарев, В.М. Геоэкологические проблемы оползнеопасных территорий и их решение с использованием геодезических методов технологий : специальность

- 25.00.32 «Геодезия» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических / В.М. Лазарев. – Томск : 2007. – 407 с.
85. Ломтадзе, В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика / В.Д. Ломтадзе // Л.: Недра, 1977. – 479 с.
86. Ляпишев, К.М. Обзор современных исследований оползней по данным аэрофото- и спутниковых съемок / К.М. Ляпишев // Кубанский государственный университет г. Краснодар, Россия. - С. 348-352.
87. Мазуров, Б.Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики [Текст]: монография / Б.Т. Мазуров. – Новосибирск : Агентство «Сибпринт», 2019. – 360 с.
88. Маций, С.И. Новые методологические подходы к определению степени оползневого риска в строительстве / С.И. Маций, Д.В. Плешаков // Известия вузов: Строительство. 2008. - № 5 (593). - С. 93-98.
89. Маций, С.И. Полуколичественная оценка оползневого риска на участках автомобильных дорог / С. И. Маций, Е. В. Безуглова // ГеоРиск. - 2009. - № 2. - С. 22-25.
90. Маций, С.И. Противооползневая защита / С. И. Маций // Краснодар : АлВи-дизайн, 2010. -288 с.
91. Маций, С.И. Управление оползневым риском / С.И. Маций, Е.В. Безуглова // Краснодар : АлВи-дизайн, 2010. - 240 с.
92. Мельчаков, А.П. Оценка и обеспечение конструктивной безопасности строящихся зданий и сооружений : специальность 05.26.04 «Промышленная безопасность» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических / А.П. Мельчаков. - ЮУрГУ. – Челябинск : 1998. - 175 с.
93. Мельчаков, А.П. Прогноз, оценка и регулирование риска аварий зданий и сооружений: теория, методология и инженерные приложения: Монография [Текст] / А.П. Мельчаков, Д.В. Чебоксаров // Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2009. - 114 с.
94. Методические рекомендации для органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации и территориальных подсистем РСЧС по обеспечению без-

опасности населения и территорий при угрозе возникновения оползневых процессов, их прохождению и уменьшению последствий от них (утв. МЧС России 10 декабря 2015 г. № 2-4-87-53-14). - 36 с.

95. Методические рекомендации по оценке оползневой опасности на автомобильных дорогах. ОДМ 218.2.030-2013 / ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО (РОСАВТОДОР) // М. : 2013. - 89 с.

96. Минаев, В.А. Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий // В.А. Минаев, А.О. Фаддеев // М.: Финансы и статистика, изд. дом. ИНФРА – М, 2009. – 370 с.

97. Минаев, В.А. Технологии безопасности в России: состояние и перспективы развития / В.А. Минаев, Ю.В. Дмитриев, И.В. Пеньшин, В.Е. Потанин и др. // Информация и безопасность. – Воронеж : ВГТУ, 2000. – С. 17-22.

98. Михелев, Д.Ш. Принцип обоснования точности геодезических измерений при изучении деформаций инженерных сооружений / Д.Ш. Михелев // Исследования по геодезии, аэрофотосъемке и картографии // МИИГАиК. - М. : 1976.

99. Михелев, Д.Ш. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений / Д.Ш. Михелев, И.В. Рунов, А.И., Голубцов // М. : Недра, 1977. - 152 с.

100. 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. – 2019. – Т. 80. - № 3. – С. 11-19.

101. Неумывакин, Ю.К. Обоснование точности топографических съемок для проектирования / Ю.К. Неумывакин // М. : Недра, 1976. – 160 с.

102. Новиков, В.Ю. Обеспечение безопасности оползнеопасных участков прибрежной урбанизированной территории / В.Ю. Новиков // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 69-72.

103. Носач, В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров / В.В. Носач // М. : МИКАП, 1994. – 354 с.

104. Оползни. Исследование и укрепление / Под ред. Р. Шустер, Р. Кризек // М. : Мир, 1981. – 368 с.

105. Оползни и сели. В двух томах / Редкол.: Е. А. Козловский (гл. ред.) и др. // М. : Центр международных проектов ГКНТ – 1984. – 249 с.
106. Осипов, В.И. Природные катастрофы и устойчивое развитие / В.И. Осипов // Геоэкология. – 1997. – № 2. – С. 5-18.
107. Осипов, В.И. Природные катастрофы на рубеже XXI века / В.И. Осипов // Вестник Российской Академии наук. М. : 2001, том 71, - № 4 – С. 291-302.
108. Осипов, В.И. Опасные экзогенные процессы / В.И. Осипов, В.М. Кутепов, В.П. Зверев и др. Под ред. В.И. Осипова // М. : ГЕОС, 1999. – 290 с.
109. Осипов, В.И. Эффективное использование оползнеопасной территории мегаполисов / В.И. Осипов, Г.П. Постоев // Труды междунар. конф. по геотехнике (7–10 июня 2010). М. : 2010, том 5. С. 1741-1746.
110. Оценка и регулирование качества окружающей природной среды / Под ред. А.Ф. Порядина и А.Д. Хованского // М. : НУМЦ Минприроды России, Издательский Дом Прибой, 1996. – 350 с.
111. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / Под ред. А.Л. Рагозина // М. : Издательская фирма "КРУК", 2002. – 248 с.
112. Павловская, О.Г. Анализ и оценка по геодезическим данным динамики оползней в условиях проведения взрывных работ и разгрузки склонов : специальность 25.00.32 «Геодезия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических / О.А. Павловская. - Новосибирск, 2012. – 146 с.
113. Панкрушин В.К., Кузнецова Л.Х. Применение методов математической статистики для исследования геодезических наблюдений за деформациями / Труды НИИГАиК. – 1971. – Вып. 24. – С. 21–26.
114. Пендин, В.В. Комплексный количественный анализ в инженерной геологии / В.В. Пендин // М. : КДУ, 2009. – 350 с.
115. Пендин, В.В. Изоморфизм и изомерность инженерно-геологических условий / В.В. Пендин // Геоэкология, № 1, 1994. – С. 44-48.
116. Пендин, В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности / В.В. Пендин, И.К. Фоменко // М. : ЛЕНАНД, 2015. - 320 с.

117. Петров, Н.Ф. Оползневые системы. Простые оползни (аспекты классификации) / Н.Ф. Петров // Кишинев : Штиинца, 1988. – 226 с.
118. Петров, Н.Ф. К вопросу о строении и механизмах оползневых систем / Н.Ф. Петров. Инженерные изыскания в строительстве. Материалы Первой Общероссийской конференции изыскательских организаций // М. : ОАО «ПНИИС». 2006. С. 147-155.
119. Плешаков, Д.В. Оценка оползневого риска линейных транспортных сооружений : специальность 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических / Д.В. Плешаков. – Волгоград : 2013. – 200 с.
120. Пособие к МГСН 2.07.01 «Обоснование и мониторинг при строительстве и реконструкции зданий и сооружений» / М. : Москомархитектура, 2004. – 77 с.
121. Потапов, А.А. Фрактальные размерности изображений природных ландшафтов / А.А. Потапов, В.А. Герман // Сб. тезисов 1 междисциплинарного семинара "Фракталы и прикладная синергетика", Москва, 18 – 21 октября 1999 г. – М. : Изд. "Классика", 1999. – С. 51-53.
122. Потапов, А.А. Новейшие методы обработки изображений / А.А. Потапов, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, А.А. Пахомов, В.А. Герман. Под ред. А.А. Потапова // М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
123. Потапов, А.Д. Землетрясения. Причины, последствия и обеспечение безопасности / А.Д. Потапов, И.Л. Ревелис, С.Н. Чернышев; под ред. С.Н. Чернышева // М. : ИНФРА-М, 2018. – 343 с.
124. Природные опасности России. Природные опасности и общество. Тематический том / Под ред. В.А. Владимирова, Ю.Л. Воробьева, В.И. Осипова // М. : Издательская фирма "КРУК", 2002 а. – 248 с.
125. Природные опасности России. Сейсмические опасности. Тематический том / Под ред. Г.А. Соболева // М. : Издательская фирма "КРУК", 2002 б. – 296 с.
126. Пшеничкина, В.А. Методы анализа риска в системе мониторинга технического состояния зданий и сооружений / В.А. Пшеничкина, В.Н. Соснов // ГУ МЧС России

по Волгоградской области. Технологии гражданской безопасности. 2006. - С. 88-92.

127. Рагозин, А.Л. Введение в синергетику опасных природных процессов / А.Л. Рагозин // Мат. междунар. конф. «Анализ и оценка природных рисков в строительстве». – М. : Изд-во ПНИИИС, 1997. – С. 50-52.

128. Рагозин, А.Л. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных природных и техноприродных процессов / А.Л. Рагозин // Промышленное и гражданское строительство. – 1993. – № 1. – С. 25-27.

129. Рагозин, А.Л. Концепция допустимого риска и строительное освоение территорий развития опасных природных и техноприродных процессов / А.Л. Рагозин // Проект. – 199 – № 5 – 6. – С. 20-26.

130. 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. – М. : ВИНТИ, 1993. – С. 42-50.

131. Рагозин, А.Л. Общие закономерности формирования и количественная оценка природных рисков на территории России / А.Л. Рагозин // Вопросы анализа риска. – 1999. – Т. 1. – № 2-4. – С. 28-47.

132. Рагозин, А.Л. Общие положения оценки и управления природным риском / А.Л. Рагозин // Геоэкология. – 1999. – № 5. – С. 417-429.

133. Рагозин, А.Л. Теория и практика оценки геологических рисков / Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук // А.Л. Рагозин // М. – 1997. – 60 с.

134. Радаев, Н.Н. Вероятностная структура природного и природно-техногенного рисков / Н.Н. Радаев // В сб. мат. IX междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М. : ИПУ РАН, 2001. – С. 287-290.

135. Радаев, Н.Н. Элементы теории риска эксплуатации потенциально опасных объектов / Н.Н. Радаев // М. : РВСН, 2000. – 323 с.

136. Радаев, Н.Н. Определение уровней рисков в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / Н.Н. Радаев // Изв. РАН. Сер. Географическая. – 2003. – № 5. – С. 25-30.
137. Радаев, Н.Н. Эффективность принимаемых решений по защите от экстремальных природных явлений / Н.Н. Радаев // Автоматика и телемеханика. – 2002, т. 93. – № 4. – С. 89-92.
138. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов / ПНИИИС. – М. : Стройиздат, 1984. – 80 с.
139. Развитие геологических процессов на территории города Москва. Правительство Москвы / Департамент природопользования и охраны окружающей среды г. Москвы. 06.12.2005.
140. Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы / Правительство Москвы. Комитет по архитектуре и градостроительству г. Москвы // Москва. 2002. – 65 с.
141. Розовский, Л.Б. Введение в теорию геологического подобия и натурного моделирования / Л.Б. Розовский // М. : Недра, 1969. – 128 с.
142. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений / НИИОСП им. Герсеванова / М. : Стройиздат, 1975. - 156 с.
143. Руководство по определению кренов инженерных сооружений башенного типа геодезическими методами / М. : Стройиздат, 1981. – 56 с.
144. Руководство по проектированию и устройству заглублённых инженерных сооружений / НИИСК Госстроя СССР, Москва : Стройиздат. - 1986. – 120 с.
145. Самарский, А.А. Введение в численные методы / А.А. Самарский // М. : Наука, 1982. – 272 с.
146. **Симонян, В.В.** Современное состояние и перспективы развития топографо-геодезического обеспечения работ при проведении противоэрозионных мероприятий / В.В. Симонян // В сб. науч. тр.: Эрозия почв, селевые потоки и методы борьбы с ними. ГрузНИИГиМ, Тбилиси : 1985. - С. 161-165.

147. **Симонян, В.В.** Методика предрасчета точности геодезических измерений и определение периода стабилизации оползня / В.В. Симонян, В.В. Буш // В сб. науч. тр. – М. : МИИЗ, 1991.
148. **Симонян, В.В.** Исследование устройства для бокового нивелирования с приспособлением для компенсирования неперпендикулярности рейки створу В.В. Симонян // В сб. науч. тр. - М. : МИИЗ, 1992. – С. 69-74.
149. **Симонян, В.В.** Исследование точности створных измерений смещений оползней с применением специального устройства / В.В. Симонян // В сб. научных трудов МИСИ, Москва : 1992 – С. 34-37.
150. **Симонян, В.В.** Точность геодезических измерений и определение периода стабилизации оползней / В.В. Симонян, В.В. Буш // В сб. науч. тр.- М. : ГУЗ, 1992. - С. 10-14.
151. **Симонян, В.В.** Корреляционный анализ точности определения координат оползневых точек / В.В. Симонян // ГУЗ, М. : 1992. - Деп. в ОНИПР ЦНИИГАиК 27.01.93 г., № 535 – ГД 93.
152. **Симонян, В.В.** Применение теории случайных функций для анализа оползневых процессов / В.В. Симонян // ГУЗ, М. : 1992. - Деп. в ОНИПР ЦНИИГАиК 27.01.93 г., № 537 – ГД 93.
153. **Симонян, В.В.** Определение главных осей движения оползня / В.В. Симонян // ГУЗ, М. : 1992. - Деп. в ОНИПР ЦНИИГАиК 27.01.93 г., № 538 – ГД 93.
154. **Симонян, В.В.** Обратная геодезическая засечка при определении смещений створных знаков на оползневых площадках / В.В. Симонян // ГУЗ, М. : 1992. - Деп. в ОНИПР ЦНИИГАиК 27.01.93 г., № 534 – ГД 93.
155. **Симонян, В.В.** Принципы расчета точности построения планового геодезического обоснования на оползневом склоне / В.В. Симонян // ГУЗ, М. : 1992. - Деп. в ОНИПР ЦНИИГАиК 27.01.93 г., № 536 – ГД 93.
156. **Симонян, В.В.** Разработка створного комбинированного метода наблюдений за оползнями с использованием электронных дальномеров / В.В. Симонян, В.А. Прокопович // В сб. науч. тр. - М. : ГУЗ, 1993. - С. 11-14.

157. **Симонян, В.В.** Построение единичного эллипса при проектировании главных осей перемещения оползня / В.В. Симонян, А.Н. Сухов, В.А. Прокопович // Геодезия и картография. М. : № 12, 1994. - С. 26-29.
158. **Симонян, В.В.** Разработка метода усовершенствованного бокового нивелирования / В.В. Симонян, В.В. Буш, А.Н. Сухов // Измерительная техника. М. : № 9, 1994. - С. 31-33.
159. **Симонян, В.В.** Определение главных осей движения оползня по эллипсу смещений / В.В. Симонян // В сб. Актуальные проблемы землепользования, землеустройства и кадастров. М. : 2006. – С. 334-344.
160. **Симонян, В.В.** Результаты исследований по определению оползневых смещений с использованием теории случайных функций / В.В. Симонян // В сб. Совершенствование системы образования в области землеустройства и кадастров: Материалы научно-практической конференции (ГУЗ, 29 ноября 2007 года). ГУЗ. - М. : 2007. – С. 188-192.
161. **Симонян, В.В.** Расчет точности геодезических наблюдений за смещениями на оползневых склонах / В.В. Симонян // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. М. : № 9, 2007. - С. 84-87.
162. **Симонян, В.В.** Обоснование точности и разработка методов математико-статистического анализа геодезических наблюдений за смещениями оползней: специальность 25.00.32 «Геодезия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических / В.В. Симонян. - М. : 2008. – 182 с.
163. **Симонян, В.В.** Применение среднеквадратических эллипсов для создания математической модели смещений оползней В.В. Симонян // 5-я международная конференция «Геопространственные технологии и сферы их применения». Материалы конференции. - М. : Информационное агентство «ГРОМ», 2009. – С. 48-49.
164. **Симонян, В.В.** Анализ смещений оползней / В.В. Симонян // Геодезия и картография. М. : № 3, 2009. – С. 33-36.
165. **Симонян, В.В.** Математико-статистический аппарат для анализа оползневых смещений / В.В. Симонян // Проблемы землеустройства и кадастра недвижимости в реализации государственной земельной политики и охраны окружающей среды.

Материалы научно-практической конференции (ГУЗ, 27 мая 2009 г.). – ГУЗ. – М. : 2009. – С. 156-159.

166. **Симонян, В.В.** Построение математической модели смещения оползней на основе среднеквадратических эллипсов смещений / В.В. Симонян // Материалы IV Всероссийской конференция "Перспективы развития инженерных изысканий для строительства в Российской Федерации" (ПНИИС, 17-18 декабря 2008 г.). – ПНИИС. – М. : 2009.

167. **Симонян, В.В.** Определение кренов стен Борисоглебского монастыря - памятника древнерусской архитектуры / В.В. Симонян, А.И. Кузнецов // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. М. : № 9, 2010 - С. 97-100.

168. **Симонян, В.В.** Методика определения кренов стен при использовании электронных тахеометров / В.В. Симонян // Материалы шестой международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Землеустройство, кадастр и геопространственные технологии» 2010. М. : ГУЗ, 2011. - С. 156-161.

169. **Симонян, В.В.** Инструментальное определение деформаций стен Борисоглебского монастыря / В.В. Симонян, А.И. Кузнецов // Геодезия и картография. М. : № 10, 2010. - С. 30-32.

170. **Симонян, В.В.** Анализ векторного поля скоростей на оползневом склоне и определение характеристик реального векторного поля для оползневых процессов / В.В. Симонян, С.К. Варламов // Вестник Московского государственного строительного университета. М. : №1, 2011. - С. 227-233.

171. **Симонян, В.В.** Сравнительный анализ методов створных измерений с целью оценки применимости этих методов для геодезического мониторинга протяженных объектов / В.В. Симонян, А.В. Лабузов, Н.В. Ангелова, М.С. Савин // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». 2011. - № 003-04. С. 20-30.

172. **Симонян, В.В.** Применение случайных функций для анализа оползневых процессов / В.В. Симонян, М.Н. Калинина // Вестник Московского государственного строительного университета. М. : №1, 2011. – С. 233-239.

173. **Симонян, В.В.** Инструментальное определение кренов стен Борисоглебского монастыря / В.В. Симонян, А.И. Кузнецов, Э.С. Черненко, Т.А. Пятницкая // Вестник Московского государственного строительного университета. М. : № 1, том 2, 2011. – С. 239-244.
174. **Симонян, В.В.** Изучение оползневых процессов геодезическими методами [Текст]: монография / В.В. Симонян // Моск. гос. строит. ун-т. – М. : 2011. – 172 с.
175. **Симонян, В.В.** О возможностях геодезического и уровнемерного методов в решении проблемы прогноза времени землетрясения / В.В. Симонян, А.К. Певнев, И.В. Рубцов // «Инженерные изыскания» № 9 / 2013 – с. 29-32.
176. **Симонян, В.В.** Экспериментальные исследования по установлению уравнения регрессии, описывающего закономерности деформаций земной коры при землетрясениях / В.В. Симонян // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». 2013. – № 04. С. 22-28.
177. **Симонян, В.В.** Исследование деформаций подкрановых путей / В.В. Симонян, О.Ф. Кузнецов, А.О. Кузнецова, В.В. Васильев // Информационный электронный журнал "Энергоэффективность и сбережение ресурсов". Оренбург, №1(11) январь 2014. - с. 105-108. Издается порталом www.energyguide.ru.
178. **Симонян, В.В.** Расчет точности наблюдений за деформациями высотных зданий и сооружений с использованием электронных тахеометров / В.В. Симонян, С.В. Шендяпина // Инженерные изыскания. 2014. № 7. С. 68-71.
179. **Симонян, В.В.** Коровые землетрясения и их прогноз / В.В. Симонян, А.К. Певнев // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». 2014. – № 03. С. 37-46.
180. **Симонян, В.В.** Изучение оползневых процессов геодезическими методами [Текст]: монография / В.В. Симонян; 2-е изд. М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. М. : МГСУ, 2015. – 176 с.
181. **Симонян, В.В.** Определение деформаций подкрановых путей, вызванных действием статических нагрузок / В.В. Симонян, О.Ф. Кузнецов // Вестник Московского государственного строительного университета. 2015. № 4. С. 90-95.

182. **Симонян, В.В.** О причинах смещений зданий и сооружений и необходимости их геодезического контроля / В.В. Симонян, Н.А. Шмелин // Инженерные изыскания. 2015. № 4. С. 60-65.
183. **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. 2015. № 4. С. 53-56.
184. **Симонян, В.В.** Теоретическое обоснование построения среднеквадратических эллипсоидов смещений оползня / В.В. Симонян, А.Г. Тамразян, А.А. Кочиев // Геодезия и картография. М. : № 12, 2015. – С. 10-15.
185. **Симонян, В.В.** Геодезический мониторинг зданий и сооружений как основа контроля за безопасностью при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений: [Текст]: монография / В.В. Симонян, Н.А. Шмелин, А.К. Зайцев; под общ. ред. канд. техн. наук, доц. В.В. Симоняна // М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. Москва : НИУ МГСУ, 2015. 144 с.
186. **Симонян, В.В.** О методике расчёта силы и ускорения оползня / В.В. Симонян, А.Г. Тамразян // Международный научно-технический и производственный журнал "Науки о Земле". 2016 – № 1, стр. 49-55.
187. **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. 2016. № 7. С. 101-113.
188. **Симонян, В.В.** Геодезический мониторинг зданий и сооружений как основа контроля за безопасностью при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений: [Текст]: монография / В.В. Симонян, Н.А. Шмелин, А.К. Зайцев; под общ. ред. канд. техн. наук, доц. В.В. Симоняна // М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исслед. Моск. гос. строит. ун-т. 2-е изд. Москва: НИУ МГСУ, 2016. – 144 с.
189. **Симонян, В.В.** Анализ данных геодезического мониторинга деформаций купольных конструкций для контроля их устойчивости В.В. Симонян, Е.В. Борейша // Журнал «Научное обозрение». 2016. № 22. - С. 23-32.

190. **Симонян, В.В.** Комплексный анализ устойчивости склона методами инженерной геодезии и механики грунтов / В.В. Симонян // Новые информационные технологии в науке: сборник статей Международной научно-практической конференции (28 ноября 2016 г., г. Уфа). В 4 ч. Ч.2 / - Уфа : МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2016. – С. 162-169.
191. **Симонян, В.В.** Вероятностный анализ потенциальных возможностей оползневых смещений / В.В. Симонян, А.Г. Тамразян // Журнал "Безопасность жизнедеятельности". № 2 (194). 2017. – С. 28-32.
192. **Симонян, В.В.** Методика расчета точности геодезических измерений при наблюдениях за оползневыми смещениями / В.В. Симонян // В сборнике: Международная научно-практическая конференции «Взаимодействие науки и общества: проблемы и перспективы» (8 июня 2017 г., г. Казань). В 4 ч. Ч. 3 / - Уфа : МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2017. – С. 99-104.
193. **Симонян, В.В.** Численные критерии результативности методов оценки опасных оползневых процессов и их сравнительный анализ / В.В. Симонян, Г.А. Николаева // Журнал «Науки о земле». 2017. № 3. С. 4-14.
194. **Симонян, В.В.** Численный метод сравнительного количественного анализа результативности методов оценки опасных оползневых процессов / В.В. Симонян // В сборнике Международной научно-практической конференции «Современные проблемы инновационного развития науки» (23 июня 2017 г., Волгоград) в 3 ч. Уфа : 2017. С. 87-97.
195. **Симонян, В.В.** Применение геомеханической модели склона с учетом геодезического мониторинга для проектирования фундаментов / В.В. Симонян // В сборнике Международной научно-практической конференции «Концепции устойчивого развития науки в современных условиях» (27 июня 2017 г., Екатеринбург) В 2 ч. ч. 2 / - Уфа : МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2017. – С. 75-79.
196. **Симонян, В.В.** Обоснование периодичности наблюдений за смещениями оползней / В.В. Симонян // В сборнике Международной научно-практической конференции «Научные основы современного прогресса» (3 июля 2017 г., Казань). В 2 ч. ч. 2 / - Уфа : МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2017. – С. 66-67.

197. **Симонян, В.В.** Исследование оползневого процесса методом корреляционного анализа с использованием случайных функций / В.В. Симонян, Г.А. Николаева // Вестник Московского государственного строительного университета. 2017. Т. 12. Вып. 8 (107). С. 846-853.
198. **Симонян, В.В.** Сравнительный анализ численных критериев результативности методов оценки опасных оползневых процессов / В.В. Симонян, Г.А. Николаева // Журнал «Научное обозрение». 2017. № 20. С. 150-161.
199. **Симонян, В.В.** Обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений оползней / В.В. Симонян, А.Г. Тамразян // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. : правообладатель ФГБОУ высшего образования НИУ МГСУ – рег. № 2017616941 от 20.06.2017 г. – М. : Роспатент, 2017.
200. **Симонян, В.В.** Анализ устойчивости склона методами инженерной геодезии и механики грунтов / В.В. Симонян // В сборнике: Международной научной конференции в рамках Года экологии Российской Федерации. Выпуск 8. «Геоэкологические проблемы национальной безопасности России. Техногенез, инженерная геодезия и мониторинг инженерных сооружений». (г. Москва, 20 апреля 2017 г.) / М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. - Электрон. дан. и прогр. (3,6 Мб). – Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2018. С. 79-84.
201. **Симонян, В.В.** Оценка оползневых рисков и безопасность сооружений / В.В. Симонян // сборнике: Международный научный семинар «Опасные для строительства геоэкологические процессы» 8 июня 2018 г. Сборник материалов Международного семинара, посвященного 70-летию доктора геолого-минералогических наук, профессора ВИКТОРА ПЕТРОВИЧА ХОМЕНКО. Москва : 2019. С. 49-54.
202. **Симонян, В.В.** Математическая модель устойчивого равновесия оползня В.В. Симонян, А.А. Кочиев // Вестник Московского государственного строительного университета. 2019. Т. 14. Вып. 10. С. 1292-1298.
203. **Симонян, В.В.** Геодезический мониторинг склоновых территорий как основа для оценки риска и безопасности сооружений / В.В. Симонян // В сборнике Первой Национальной конференции «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ

ОТРАСЛИ И ОБРАЗОВАНИЯ». - Москва, 30 сентября 2020 г. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. С. 778-786.

204. **Симонян, В.В.** Расчет величин смещений оползней (длина, направление) / В.В. Симонян // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. : правообладатель ФГБОУ высшего образования НИУ МГСУ – рег. № 2020663549 от 28.10.2020 г. - М. : Роспатент, 2020.

205. **Симонян, В.В.** Роль геодезических методов в изучении динамики оползней / В.В. Симонян, В.И. Волков // Журнал «Естественные и технические науки» 2021. № 4. С. 193-195.

206. **Симонян, В.В.** Оценка оползневых рисков / В.В.Симонян // Свидетельство о государственной регистрации базы данных : правообладатель ФГБОУ высшего образования НИУ МГСУ – № 2021620977 от 18.05.2021 г. – М. : Роспатент, 2021.

207. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / А.Г. Тамразян, С.Н. Булгаков, И.А. Рахман, А.Ю. Степанов. Под общ. ред. Тамразяна А.Г. // М. : АСВ, 2012. – 304 с.

208. СОЮЗДОРНИИ. Предложения по расчету устойчивости откосов высоких насыпей и глубоких выемок / М. : СОЮЗДОРНИИ, 1966. 68 с.

209. СП 11–104–97. Свод правил. Инженерно-геодезические изыскания для строительства : Одобрен Департаментом развития научно-технической политики и проектно-изыскательских работ Госстроя России (Письмо от 14 октября 1997 г. N 9-4/116). Принят и введен в действие с 1 января 1998 г : дата введения 1998-01-01.

210. СП 11–105–97. Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. I. Общие правила производства работ : Одобрен Департаментом развития научно-технической политики и проектно-изыскательских работ Госстроя России (письмо от 14 октября 1997 г. N 9-4/116). Принят и введен в действие с 1 января 1998 г. : дата введения 1998-01-01.

211. СП 11–105–97. Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов : Одобрен Управлением научно-

технических и проектно-изыскательских работ Госстроя России (письмо от 25.09.2000 N 5-11/88). Принят и введен в действие с 1 января 2001 г. : дата введения 2001-01-01.

212. СП 14.13330.2014. Свод правил. Строительство в сейсмических районах : Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 18 февраля 2014 г. N 60/пр и введен в действие с 1 июня 2014 г. : дата введения 2014-06-01.

213. СП 22.13330.2016. Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* : Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 970/пр и введен в действие с 17 июня 2017 г. : дата введения 2017.06.17.

214. СП 22.13330.2011. Свод правил. Свайные фундаменты : Утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 27 декабря 2010 г. N 786 и введен в действие с 20 мая 2011 г. : дата введения 2011.05.20.

215. СП 47.13330.2016. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 : Утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1033/пр и введен в действие с 1 июля 2017 г. : дата введения 2017.07.01.

216. СП 436.1325800.2018. Свод правил. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов : Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 5 декабря 2018 г. N 787/пр и введен в действие с 6 июня 2019 г. : дата введения 2019.06.06.

217. Тамразян, А.Г. О назначении уровня риска строительных систем с учетом регулирования надежности их сечений / А.Г. Тамразян // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2001. № 3. С. 30-33.

218. Тамразян, А.Г. К оценке определения уровня риска чрезвычайных ситуаций по основным признакам его проявления на сооружения / А.Г. Тамразян // Бетон и железобетон. 2001, № 5, С. 8-10.
219. Тамразян, А.Г. Надежность и защита московских зданий массовых серий от прогрессирующего обрушения при чс природного и техногенного характера / А.Г. Тамразян // Безопасность жизнедеятельности. 2002. № 1. С. 35-39.
220. Тамразян, А.Г. Оценка рисков при техногенных воздействиях на объекты строительства / А.Г. Тамразян // Строительная безопасность. 2006. № 1. С. 44-46.
221. 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; Рос. акад. архитектуры и строит. наук; Моск. гос. строит. ун-т; Рос. о-во по неразрушающему контролю и техн. диагностике [и др.]. - М., 2009. - Вып. 8. - С. 166-179.
222. Тамразян, А. Г. Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений / А.Г. Тамразян // Вестник Московского государственного строительного университета. 2011. № 2-1. С. 21-27.
223. Тамразян, А. Г. К задачам мониторинга риска зданий и сооружений / А.Г. Тамразян // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI в. 2013. № 3(170). С. 19-21.
224. 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. 2018. № 1 (16). С. 106-114.
225. Тамразян, А.Г. Определение физической уязвимости зданий от смещающихся оползней / А.Г. Тамразян, **В.В. Симонян** // «Лолейтовские чтения-150». Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям: сборник докладов Международной научно-практической конференции (г. Москва, 30 ноября 2018 г.): М-во науки и высшего образования Рос. Федерации,

- Нац. Исследоват. Моск. Гос. Строит. Ун-т. – М. : Изд-во МИСИ – МГСУ, 2018. – С. 433-441.
226. Теоретические основы инженерной геологии. Геологические основы / Под ред. Е. М. Сергеева // М. : Недра, 1985. – 332 с.
227. Тер-Мартirosян, З.Г. Механика грунтов [Текст]: монография / З.Г. Тер-Мартirosян // М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. - 552 с.
228. Тер-Степанян Г.И. Геодезические методы изучения динамики оползней / Г.И. Тер-Степанян // М. : Недра, 1979. – 157 с.
229. Тер-Степанян, Г.И. Многолучевой дифференциальный метод наблюдений вертикальных смещений оползневых точек / Г.И. Тер-Степанян // Проблемы геомеханики. – 1971. – № 5. – С. 147-156.
230. Тер-Степанян, Г.И. Использование наблюдений за деформациями склона для анализа механизма оползня / Г.И. Тер-Степанян // Проблемы геомеханики. – 1967. – №1. – С. 16-51.
231. Тер-Степанян, Г.И. О механизме многоярусных оползней / Г.И. Тер-Степанян // Труды к VII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. – М.: Госстройиздат, 1969. – С. 190-199.
232. Тихвинский, И.О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов / И.О. Тихвинский // М. : Наука, 1988. – 142 с.
233. Тихвинский, И.О. Контроль активности оползней / И.О. Тихвинский, Г.П. Постоев // Горный журнал. – 1997. – №1. – С. 32-35.
234. Тихонов, А.В. Принципы исследования глубоких оползней г. Москвы : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / А.В. Тихонов. - М. : 2010 – 177 с.
235. Туголуков, А.М. Анализ причин аварий зданий и сооружений и рекомендации по их устранению / А.М. Туголуков // Специальное и подземное строительство. М. : Изд-во ЦНИИПромзданий, 1994. - С. 36-46.

236. Устинов, А.В. Технология мониторинга перемещений гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания / А.В. Устинов, В.И. Кафтан // Гидротехническое строительство. 2019. С. 2-7.
237. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев // М. : Недра, 1987. – 221 с.
238. Фаддеев А.О. Математическое моделирование и методы оценки рисков в территориальных системах, подвергающихся воздействию геодинамических факторов : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.О. Фаддеев. – М. : 2011. – 432 с.
239. Фоменко, И.К. Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов / И.К. Фоменко // Инженерная геология, №6, 2012. С. 44-53.
240. Фоменко, И.К. Математическое моделирование напряженного состояния инженерно-геологического массива, сложенного анизотропными горными породами : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / И.К. Фоменко. - М. : 2001. - 138 с.
241. Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / И.К. Фоменко. - М. : 2014. – 320 с.
242. Хаин, В.Е. Геодинамические процессы, эволюция взглядов и современные представления. Океанология, геофизика океана. Т. 2. Геодинамика / В.Е. Хаин. Отв. ред. О. Г. Сорохтин // М.: Наука, 1979.
243. Хван, А.П. Возможная модель оползня / А.П. Хван // Строительство и техногенная безопасность. Выпуск 15–16, 2006 г. С. 55–56.
244. Хорошилов, В.С. Деформационный мониторинг инженерных объектов как составная часть геодезического мониторинга / В.С. Хорошилов, Ж.А. Хорошилова // Интерэкспо Геосибирь, изд-во: Сибирский государственный университет геосистем и технологий (Новосибирск). Том 1, № 1, 2012. – С. 77-80.

245. Шарый, С.П. Курс вычислительных методов / С.П. Шарый // Институт вычислительных технологий СО РАН. – Новосибирск : 2012. – 315 с.
246. Швец, В.Б. Усиление и реконструкция фундаментов / В.Б. Швец, В.И. Феклин, Л.К. Гинзбург // М. : Стройиздат, 1985. – 204 с.
247. 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. Вып. 76. – М. : 1976. – С. 39-40.
248. Шеко, А.И. Оценка опасности и риска экзогенных геологических процессов / А.И. Шеко, В.С. Круподеров // Геоэкология. – 1994. № 1. – С. 11-20.
249. Шеховцов, Г.А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений : [Текст]: монография / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова – Н.Новгород : Нижегород. Гос. Архит.-строит. Ун-т. – 2014. – 256 с.
250. Экзогенные геологические опасности. Тематический том / Под ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко // М. : Издательская фирма «КРУК», 2002. – 348 с.
251. Abramson, L.W. Slope Stability and Stabilization Methods / L.W. Abramson, T.S. Lee, S. Sharma, G.M. Boyce // New York: John Wiley & Sons, 2002. – 736 p.
252. Albataineh, N. Slope stability analysis using 2D and 3D methods / N. Albataineh // Ohio, United States: The University of Akron, 2006. – 126 p.
253. Alonso, E.E. Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays / E.E. Alonso // Geotechnique. - 1976. - № 26. - P. 453-472.
254. Amatruda, G. A key approach: the IMIRILAND project method. In: Identification and mitigation of large landslide risks in Europe / G. Amatruda, Ch. Bonnard and others // Ch. Bonnard, F. Forlati, C. Scavia (Ed.), (2004). P. 13-43.
255. Australian Geomechanics Society. Landslide risk management concepts and guidelines / Australian Geomechanics Society, Sub-Committee on Landslide Risk Management. Australian Geomechanics, 2000. - Vol. 35. - P. 49-92.
256. Australian Geomechanics Society. Practice note guidelines for landslide risk management 2007. Australian Geomechanics. - 2007. - Vol. 42. - No 1. -P. 63-114.
257. 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 Western // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 2, 2000.
258. Bromhead, E.N. *The stability of slopes* / E. N. Bromhead // London and New York : Taylor & Francis, 2005. - 411 p.
259. Cavounidis, S. On the ratio of factors of safety in slope stability analyses / S. Cavounidis // *Geotechnique*. - 1987. - 37 (2). - P. 207-210.
260. Chowdhury, R. *Geotechnical slope analysis* / R. Chowdhury, Ph. Flentje, G. Bhattacharya // London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2010. - 721 p.
261. Chowdhury, R. Role of slope reliability analysis in landslide risk management / R. Chowdhury, P. Flentje // *Bull. Eng. Geol. Env.* (2003) 62. - Pp. 41-46.
262. Coggan, J.S. Evaluation of techniques for quarry slope stability assessment / J.S. Coggan, D. Stead, J. Eyre // *Trans. Instit. Min. Metall.* 1998. – pp. 139 – 147.
263. Czaja, J. Numeryczne przedstawienie metody wyznaczania deformacji obiektów na podstawie okresowych obserwacji geodezyjnych / J. Czaja // *Pr. Komis. garn.-geod. PAN – Krakowie, Geod.*, 1974, 18. S. 47-59.
264. Duncan J. Michael. Discussion of "Probabilistic slope stability analysis for practice" / Michael Duncan J., Michael Navin, Thomas F. Wolff // *Can. Geotech. J.* - 2003. - Vol. 40. - P. 848-850.
265. Einstein Herbert H. Risk assessment and uncertainties / Herbert H. Einstein, Karam Karim S. // *International conference on «Landslides - Causes, Impacts and Countermeasures»*. - Davos, Switzerland, 2001. - P. 457-488.
266. El-Ramly H. Probabilistic slope stability analysis for practice / H. El-Ramly, N. R. Morgenstern, D. M. Cruden // *Can. Geotech. J.* - № 39. - 2002. - Pp. 665-683.
267. Ela, Šegina. Monitoring Surface Displacement of a Deep-Seated Landslide by a Low-Cost and near Real-Time GNSS System / Ela Šegina, Tina Peternel, Tilen Urbancic and others // *Remote Sens.* 2020, 12, 3375; doi:10.3390/rs12203375.
268. 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"*, Naples (Italy). (2005). Patron Editore, Vol. 2, p. 53-61.

269. Fell, R. "Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning" / R. Fell, J. Corominas, C. Bonnard, L. Cascini, E. Leroi, W.Z. Savage // *Engineering Geology*, (2008). Vol. 102, pp. 99-111.
270. Fenton Gordon A. Risk assessment in geotechnical engineering / Gordon A. Fenton, D. V. Griffiths John Wiley & Sons // Inc., 2008. - 462 p.
271. 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, Santiago, Chile. (2011).
272. Glade, T. The nature of landslide hazard and impact / T. Glade, MG Anderson, Crozier MJ (eds) // *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, (2005). pp 43-74.
273. Hasanuddin, Z. Abidin. Studying landslide Displacements in Megamendung (Indonesia) using GPS survey method / Z. Abidin Hasanuddin, Gamal Mai, Andreas Heri // *ITB Journal of Engineering Science*, 2004. Vol. 36, No. 2, pp. 109-123.
274. Husein Malkawi A. I. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability / A. I. Malkawi, W. F. Hassan, F. A. Abdulla // *Structural Safety*. -2000.-№22.-P. 161-187.
275. JIS Q 2001:2001. Guidelines for development and implementation of risk management system.
276. Keefer, D.K. Landslides caused by earthquakes / D.K. Keefer // *Geological Society of America Bulletin* 95, (1984). P. 406-421.
277. Landslide risk management: concepts and guidelines // *Australian Geomechanics Journal*. Australian Geomechanics Society (AGS), 2000. - V. 35. -№ 1. - P. 49-92.
278. Lee, E.M. Landslide risk assessment / E.M. Lee and D.K.C. Jones / Thomas Telford limited // 2004. 454 p.
279. Lee J.F. «Statistical approach to earthquake-induced landslide susceptibility» / J.F. Lee, C.C. Huang, C.T. Lee, K.L. Pan, M.L. Lin, J.J. Dong // *Engineering Geology*, Vol. 100, 2008. – pp. 43-58.
280. Li, Z. "Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards" / Z. Li, F. Nadim, H. Huang, M. Uzielli, S. Lacasse // *Landslides*, (2010). pp. 1-10.

281. Malkawi Husein, A.I. An efficient search method for finding the critical circular slip surface using the Monte Carlo technique / A.I. Husein Malkawi, W.F. Hassan, S.K. Sarma // *Can. Geotech. J.*, 2001. - № 38: 1081-1089.
282. Mustafa, Zeybek. Monitoring landslides with geophysical and geodetic observations / Zeybek Mustafa, Sanlıoglu Ismail, Ozdemir Adnan // *Environ Earth Sci* (2015) 74:6247–6263. DOI 10.1007/s12665-015-4650-x.
283. National Institute of Building Sciences (NIBS), (2004). "HAZUS-MH: Users's Manual and Technical Manuals". Report prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
284. Peidou, AC. An overview of landslide detection and monitoring using geodetic satellite observations / AC. Peidou, G. Fotopoulos // International Conference 'Science in Technology' SCinTE 2015.
285. e-LIBRARY.RU : научная электронная библиотека : [newsru.com>world/28dec2015/chinasuic.html](http://newsru.com/world/28dec2015/chinasuic.html). – Москва, 2015 - . - URL : . <https://elibrary.ru> (09.02.2016). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст: электронный.
286. Practice note guidelines for landslide risk management // *Australian Geomechanics Journal*. Australian Geomechanics Society (AGS), 2007. - V. 42.-№1.-P. 63-114.
287. SafeLand. Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies. 7th Framework Programme Cooperation Theme 6 Environment (inecluding 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. April, 2011. 195 p.
288. Shao-tang, Liu. Choice of surveying methods for landslides monitoring / Liu Shao-tang, Z. Wang // *Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, Xi'an, China, 2008, pp. 1211-1216.
289. Simonyan, V.V. Device for side leveling compensating for nonperpendicularity between the leveling rod to the line of range / V.V. Simonyan, V. V. Bush, A. N. Sukhov // *Measurement Techniques*. USA: September 1994, Volume 37, Issue 9, pp 1025-1028.

290. Simonyan, V.V. On the method of calculating the force and acceleration landslide / V.V. Simonyan // The VIII International Scientific Conference for professors, young scientists, PhD students "Innovation In Agriculture". RUDN, 20-22 April 2016 - P. 119-124.
291. 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, AISC 692. Springer International Publishing AG 2018. Pp 729-738.
292. Simonyan, V.V. Evaluation criteria of landslide stability / V.V. Simonyan, A.V. Labuznov // MATEC Web Conferences. Volume 196, 03003 (2018). XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP). 6 p.
293. 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 164, 02022 (2020) Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019). 9 p.
294. Slope stability and stabilization methods. Second edition / Lee W. Abramson, Thomas S. Lee, Sunil Sharma, Glenn M. Boyce. A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, INC., 2002. - 712 p.
295. Stead, D. Numerical modelling of rock slopes using a total slope failure approach / D. Stead, J.S. Coggan // In: Landslides from Massive Rock Slope Failure / Ed.by (eds.) E.S.G.A. Springer, 2006. – pp. 129-138.
296. Uzielli, M. "A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides" / M. Uzielli, F. Nadim, S. Lacasse, A.M. Kaynia // Eng. Geol. Vol. 102, (2008). pp. 251-256.
297. 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, Lacerda, Ehrlich, Fontoura & Sayao (eds.), 1, A.A. Balkema Publishers, (2004). pp. 39-56.

298. Varnes, D. J. Slope Movement Types and Processes / D. J. Varnes // Chapter 2, Landslides: Analysis and Control, Special Report 176, Transportation Research Board, National Academy of Sciences. Washington, D. C. - 234 p.
299. Vavrowsky, Georg. Risk management by the client in the life cycle of a project; focus on geotechnical risk management in the design and construction stage / Georg Vavrowsky, Rudolf Pottler // Int. conf. on Probabilistics in geotechnics / Technical and economic risk estimation. - Graz, Austria, 15-19 September 2002. - P. 167-177.
300. Virk, AS. Advanced MT-InSAR Landslide Monitoring: Methods and Trends / AS Virk, A Singh, SK Mittal // J Remote Sens GIS 7 (2018) : 225. doi:10.4172/2469-4134.1000225.
301. Volkov, V.I. Program and goal-oriented approach to organization of monitoring Deformations of Buildings and Structures / V.I. Volkov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – №725-726. – Pp. 118-123.
302. www.Grandars.ru
303. Zhang M. Is air pollution causing landslides in China? / M. Zhang, M.J. McSaveney // Earth Planetary Science Letters 481 (2018) 284-289.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Координаты точек оползневой сети на Карамышевском оползневом склоне по данным геодезического мониторинга

Таблица А1 - Координаты, м

Пункт	Коорд.	6.02.07	22.02.07	09.03.07	22.03.07	6.04.07	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

Продолжение таблицы 1

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
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

Продолжение таблицы 1

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
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

Продолжение таблицы 1

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
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

Продолжение таблицы 1

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
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

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Планы смещений оползня с изолиниями в пространстве

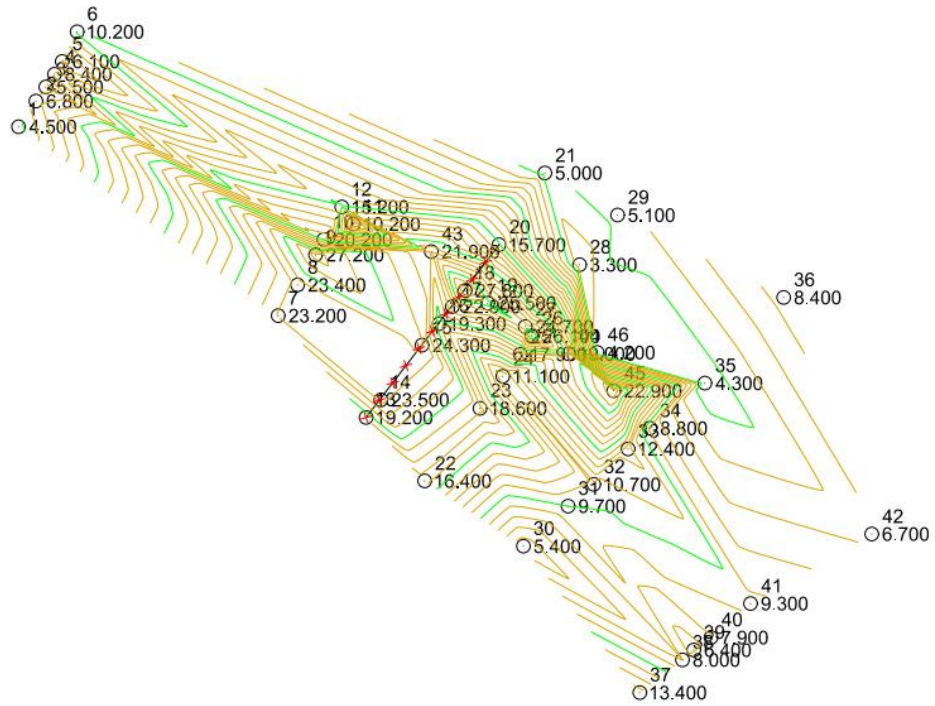


Рисунок Б.1 - План смещений оползня в 1-м цикле

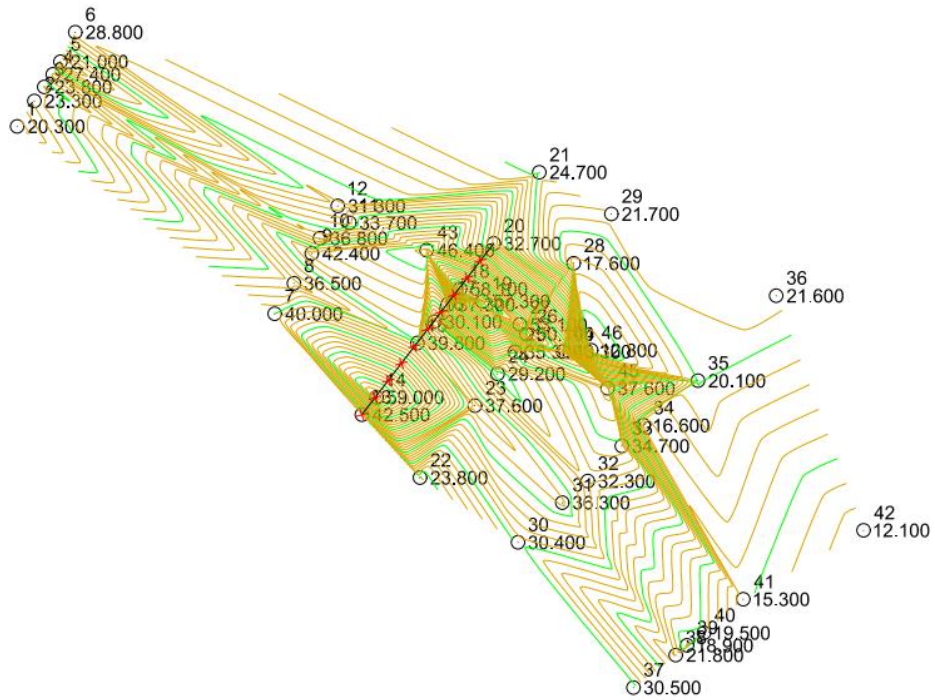


Рисунок Б.2 - План смещений оползня во 2-м цикле

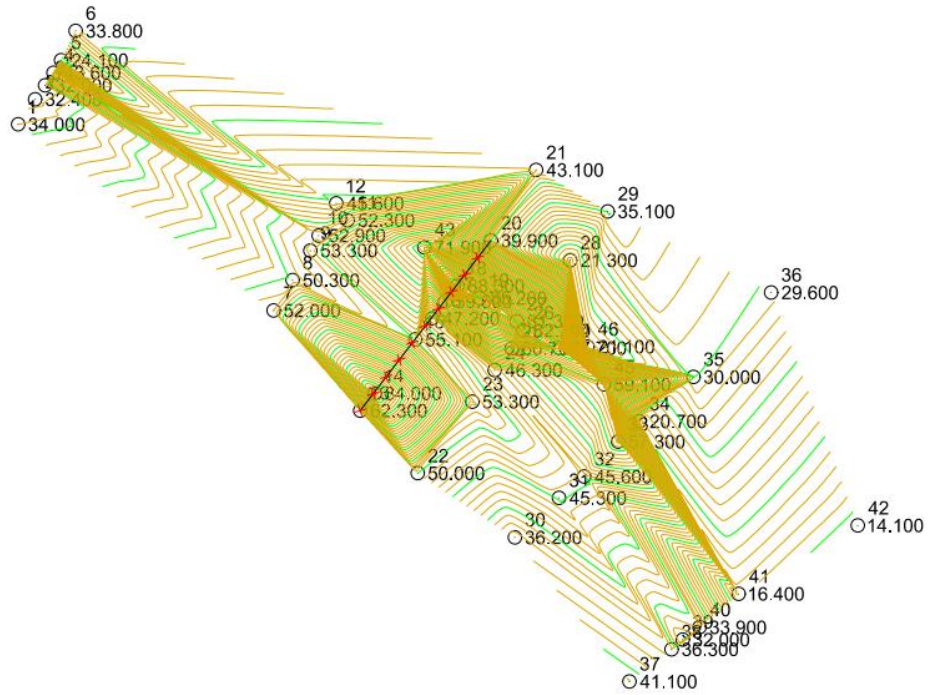


Рисунок Б.3 - План смещений оползня в 3-м цикле

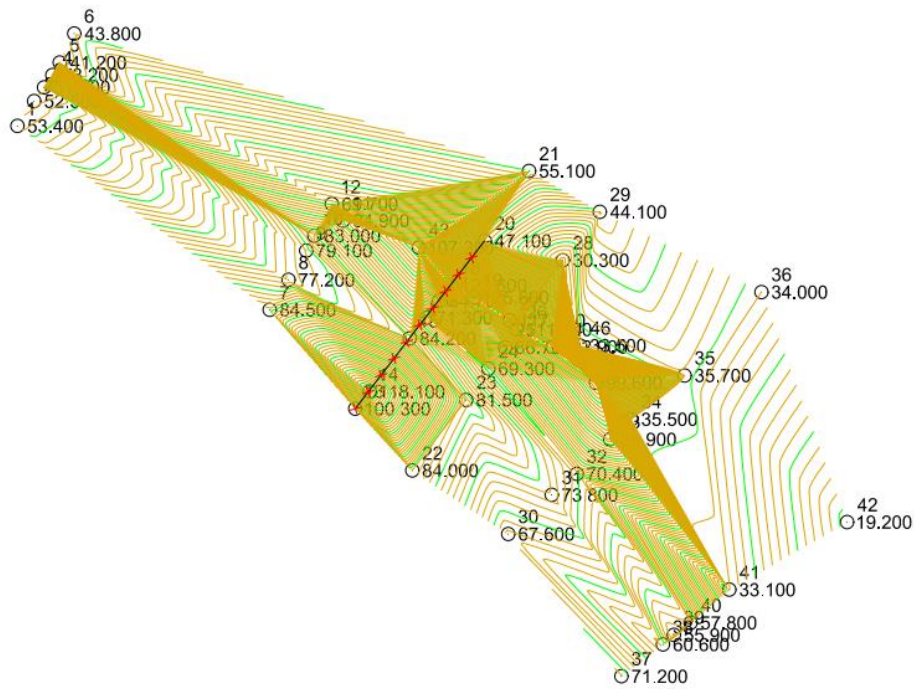


Рисунок Б.4 - План смещений оползня в 4-м цикле

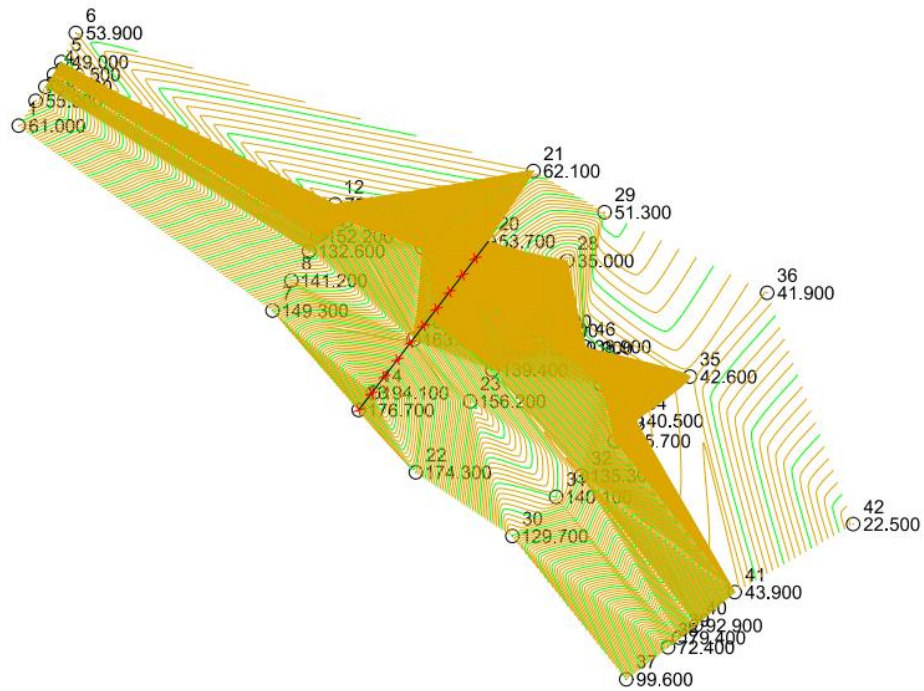


Рисунок Б.5 - План смещений оползня в 5-м цикле

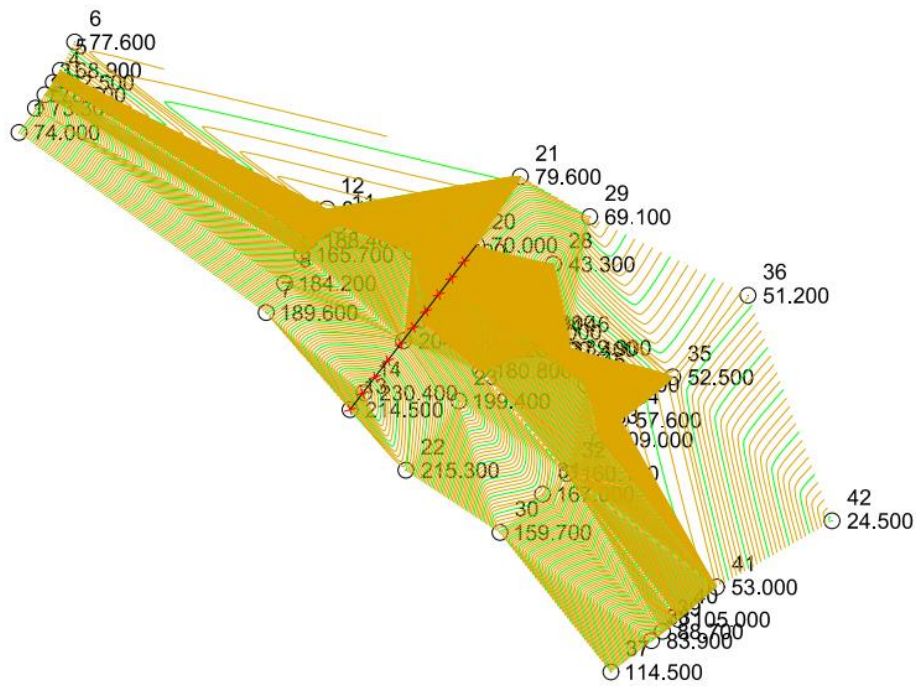


Рисунок Б.6 - План смещений оползня в 6-м цикле

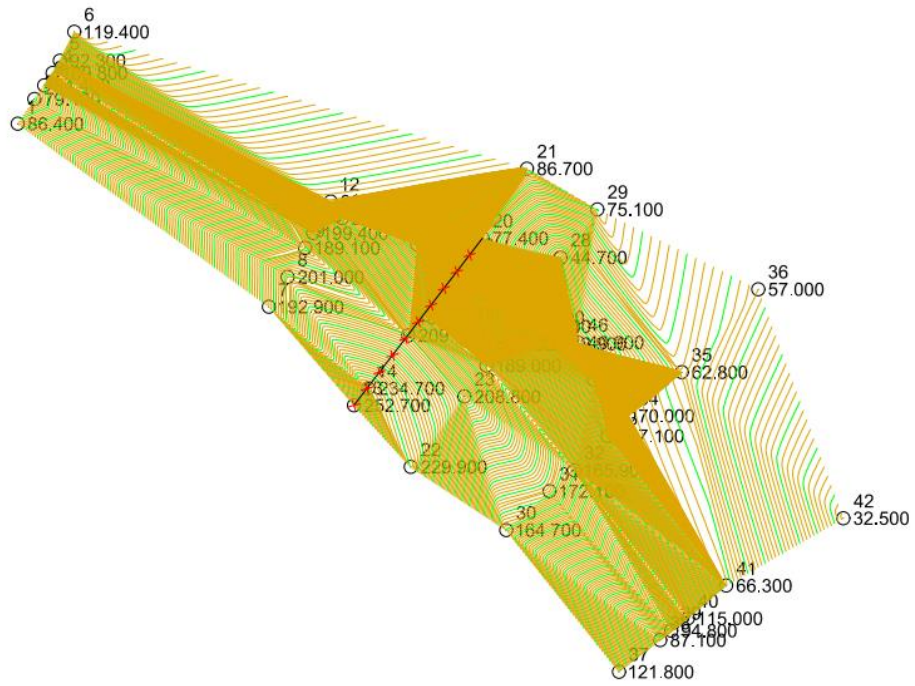


Рисунок Б.7 - План смещений оползня в 7-м цикле

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Планы смещений оползня с изолиниями во времени

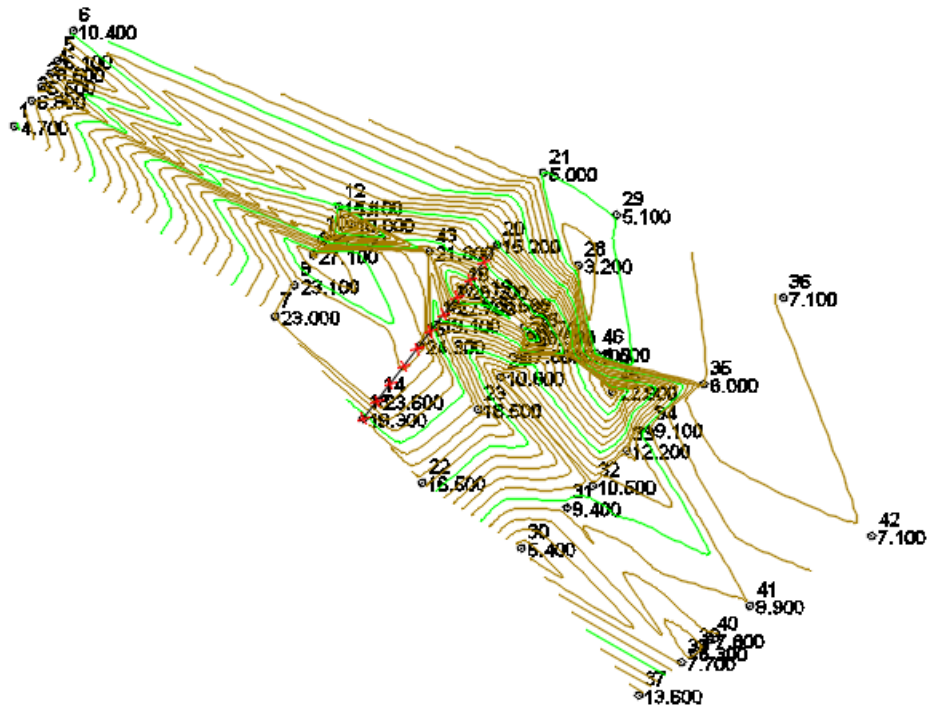


Рисунок В.1 - План смещений оползня в 1-м цикле

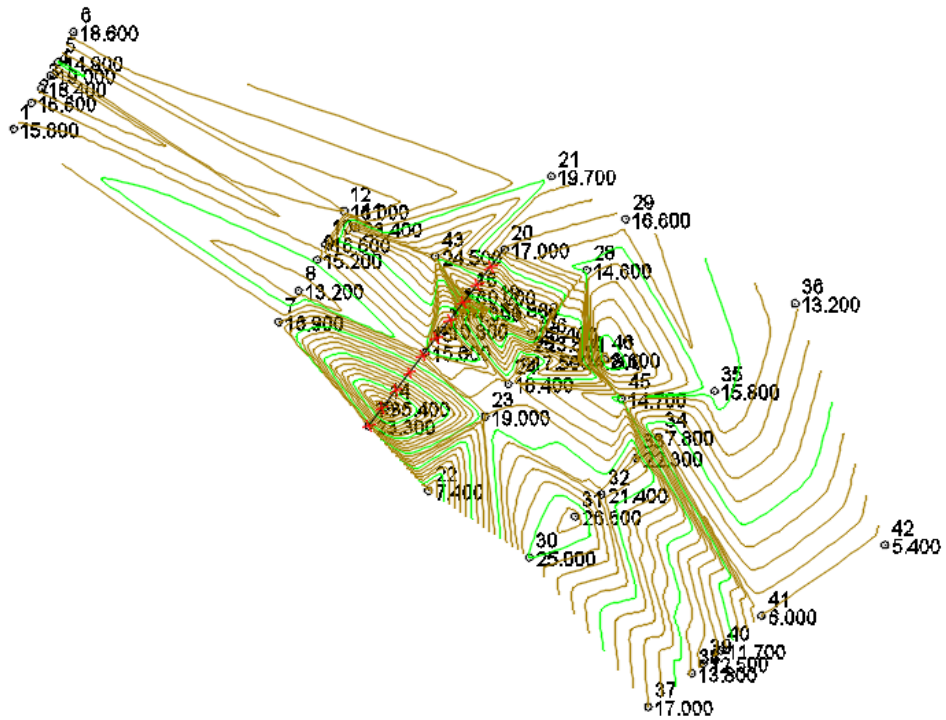


Рисунок В.2 - План смещений оползня во 2-м цикле

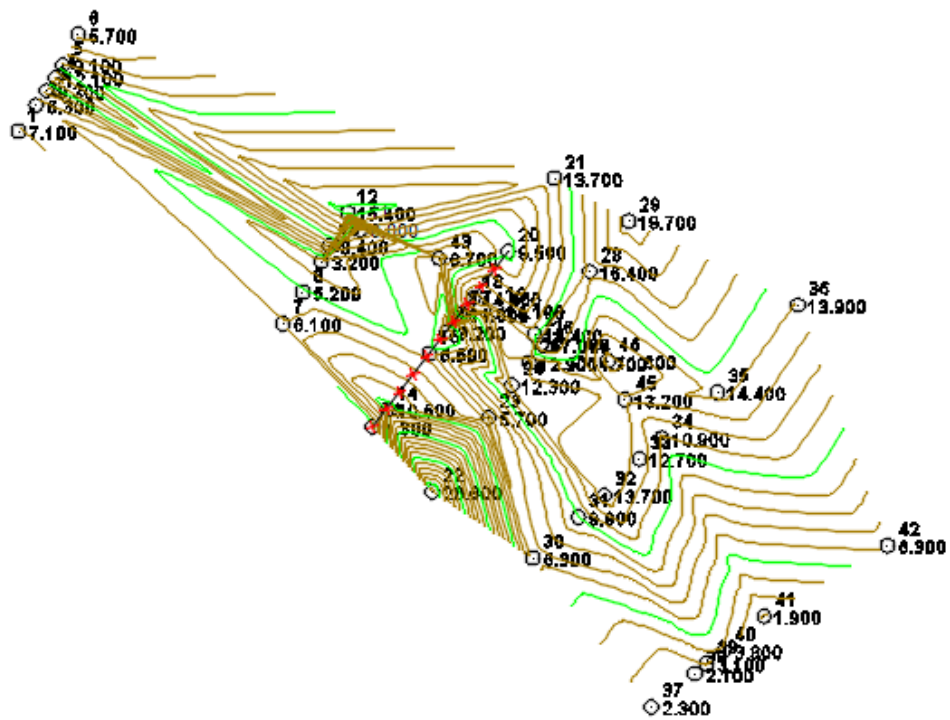


Рисунок В.5 - План смещений оползня в 5-м цикле

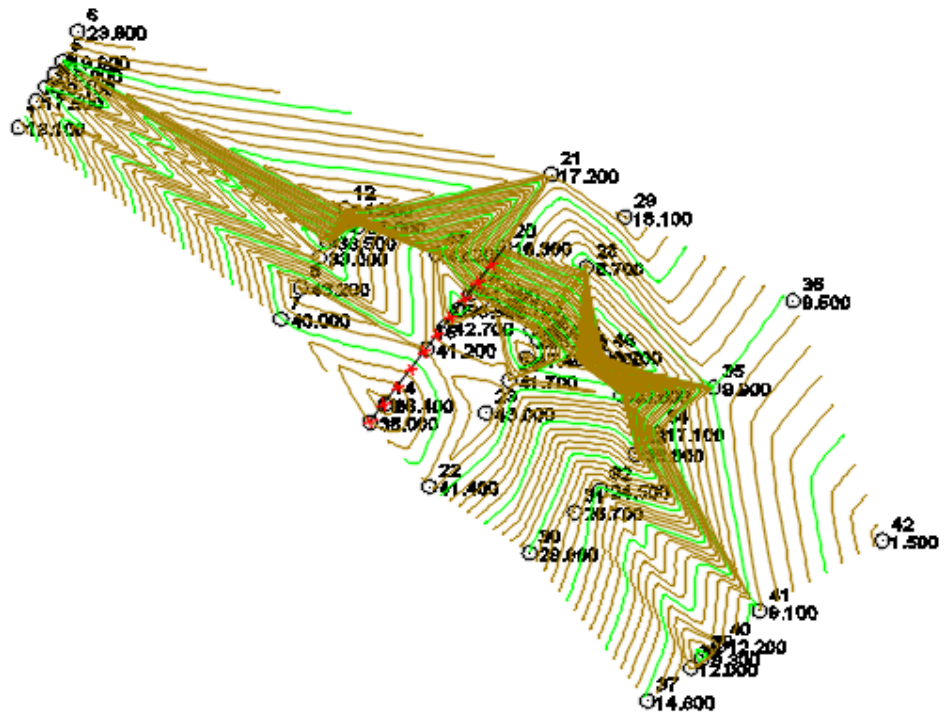


Рисунок В.6 - План смещений оползня в 6-м цикле

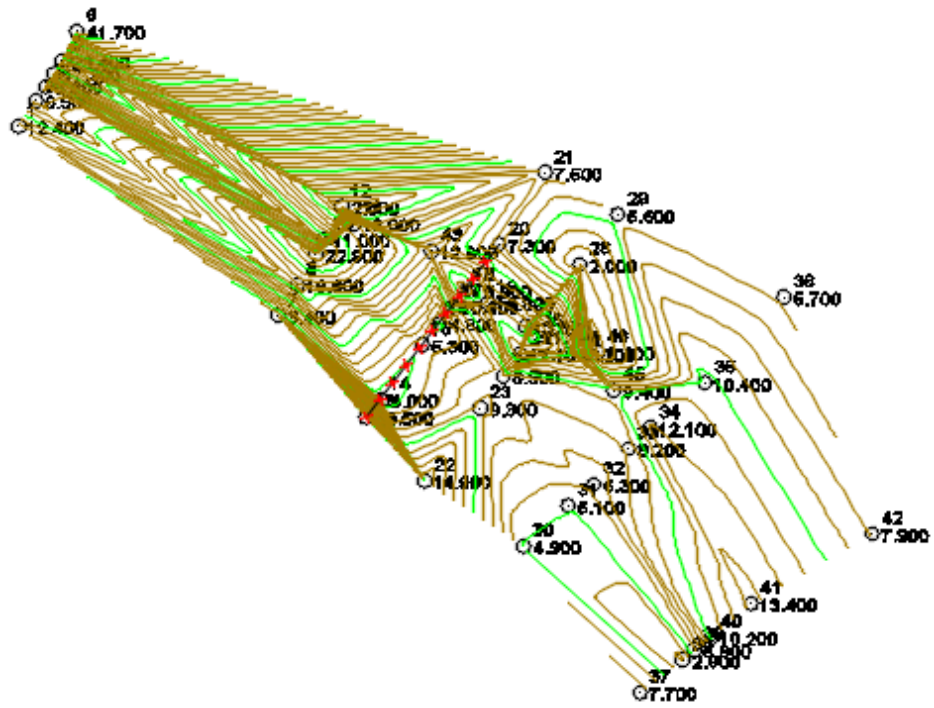


Рисунок В.7 - План смещений оползня в 7-м цикле

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Пример создания геодезической сети на склоне р. Москва 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.

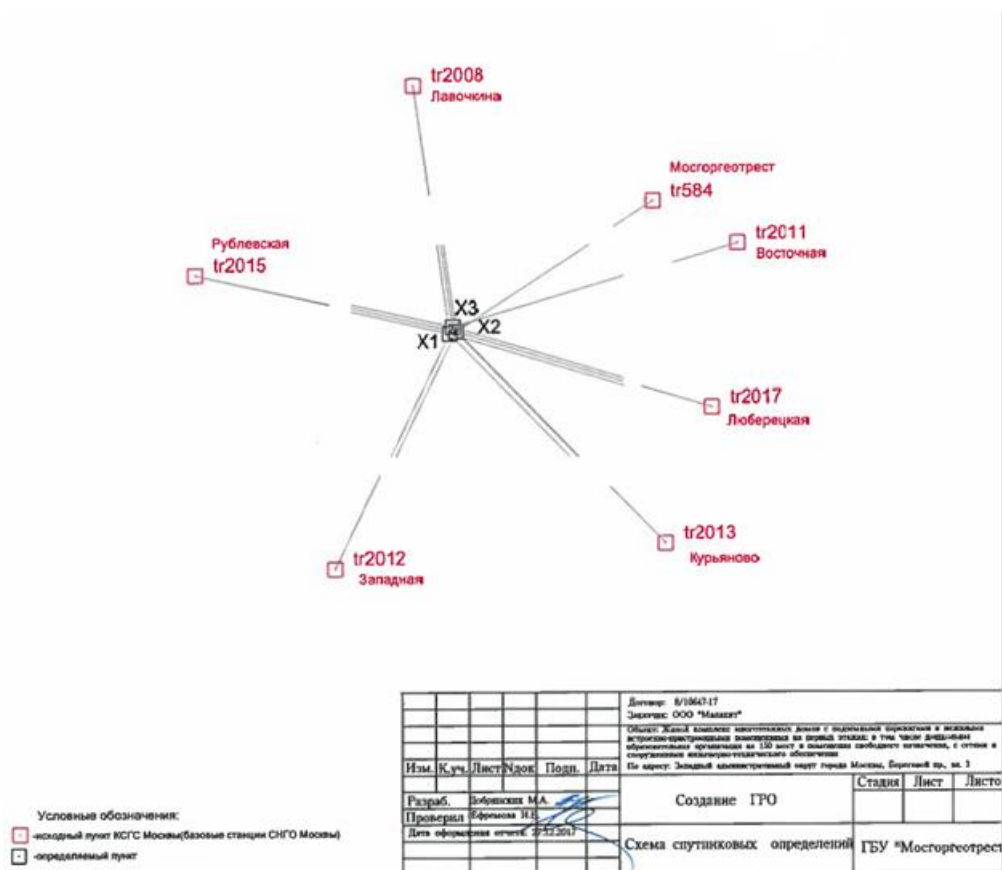


Рисунок Г.1 – Схема спутниковых определений

Таблица Г.1 - СКП уравненных координат

Номер пункта	Мх, м	Му (м)
X1	0,0029	0,0025
X2	0,0027	0,0023
X3	0,0026	0,0023

СКП взаимного положения смежных пунктов геодезической сети не превышает 1 см.

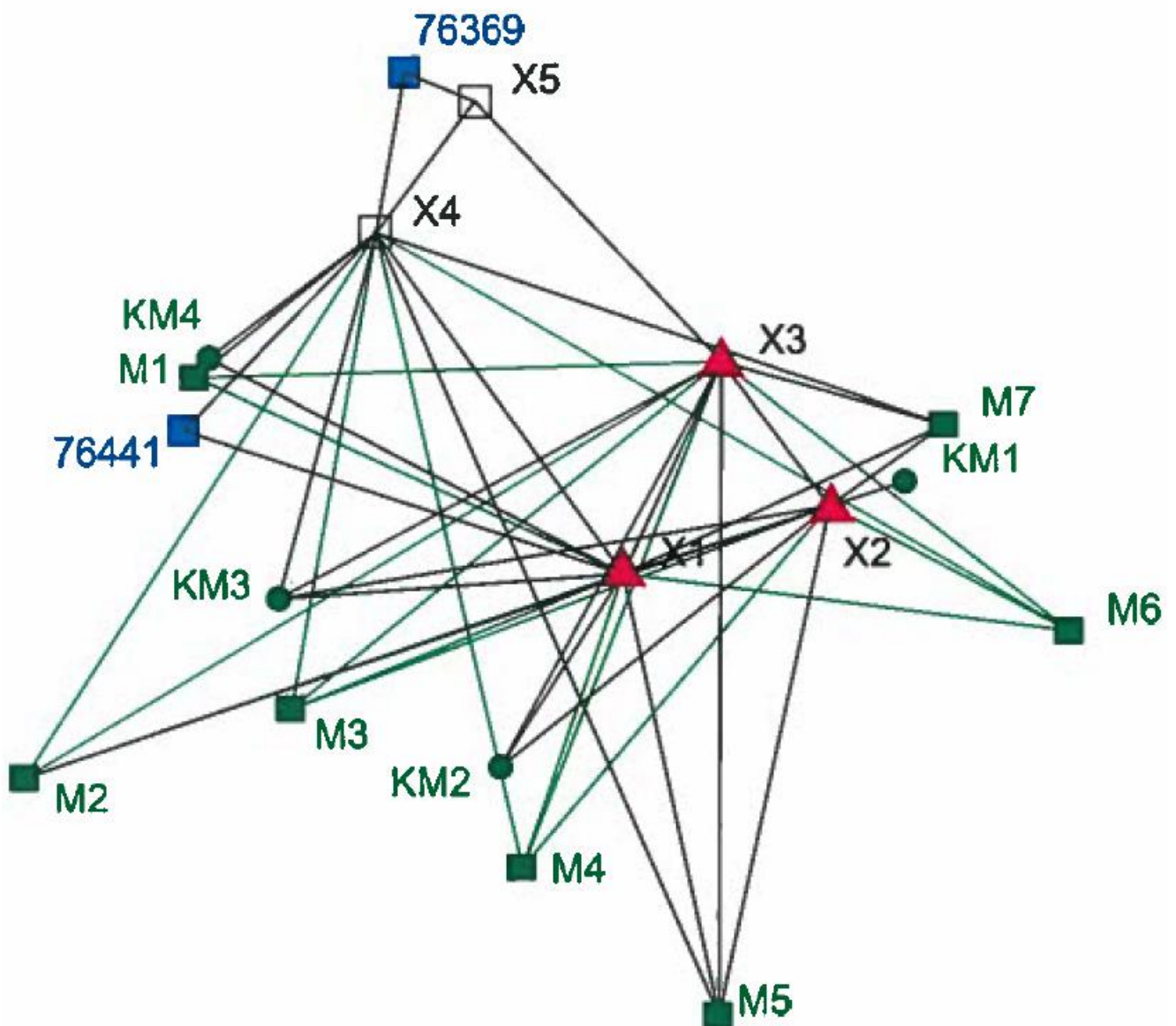


Рисунок Г.2 – Схема линейно-угловых измерений

Таблица Г.2 - СКП уравненных координат

Номер пункта	Мх, м	Му (м)
76369	0,0047	0,0057
76441	0,0071	0,0022
М1	0,0069	0,0024
М2	0,0081	0,0045
М3	0,0058	0,0034
М4	0,0033	0,0052
М5	0,0020	0,0069
М6	0,0047	0,0028
М7	0,0033	0,0019

СКП взаимного положения смежных пунктов геодезической сети не превышает 3 см.

Вывод: создание геодезической сети на оползневых склонах по точности соответствуют действующим СНиП и СП. Необходим новый подход к проектированию сети.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д**Программа «Обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений
оползней» на языке Delphi**

```
unit Unit1;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  
Dialogs, StdCtrls;
```

```
type
```

```
TForm1 = class(TForm)
```

```
    Memo1: TMemo;
```

```
    Memo2: TMemo;
```

```
    Button1: TButton;
```

```
    Button2: TButton;
```

```
    Memo3: TMemo;
```

```
    Label1: TLabel;
```

```
    Label2: TLabel;
```

```
    Label3: TLabel;
```

```
    Label4: TLabel;
```

```
    Label6: TLabel;
```

```
    Label8: TLabel;
```

```
    Label10: TLabel;
```

```
    Label11: TLabel;
```

```
    Label5: TLabel;
```

```
    Label7: TLabel;
```

```
    Label9: TLabel;
```

```

    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form1: TForm1;
    x,y,z:array[0..100] of real;
    a1:array[1..3,1..3] of real;
    n,n1,n2,i:integer;
    t,tx,ty,tz,xy,xz,yz,sx,sy,sz,
    mxy,myz,mxz,rx,ryz,rxz,max,min,sr,
    mrxy,mryz,mrxz,a,b,c,det,k:real;
implementation
    {$R *.dfm}
    procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    n:=Memo1.Lines.count;
    n1:=Memo2.Lines.count;
    n2:=Memo3.Lines.count;
    for i:=0 to n-1 do begin
    x[i]:=strtofloat(form1.Memo1.Lines[i]);
    y[i]:=strtofloat(form1.Memo2.Lines[i]);
    z[i]:=strtofloat(form1.Memo3.Lines[i]) end;

    tx:=0;ty:=0;tz:=0;
    for i:=0 to n-1 do

```

```

begin tx:=tx+x[i];ty:=ty+y[i];tz:=tz+z[i];end;
tx:=tx/n ;ty:=ty/n ;tz:=tz/n ;

sx:=0;sy:=0;sz:=0;
for i:=0 to n-1 do begin
sx:=sx+sqr(tx-x[i]); sy:=sy+sqr(ty-y[i]);sz:=sz+sqr(tz-z[i]) end;
sx:=sqrt(sx/(n-1)); sy:=sqrt(sy/(n-1)); sz:=sqrt(sz/(n-1));

mxy:=0;myz:=0;mxz:=0;
for i:=0 to n-1 do
begin mxy:=mxy+(tx-x[i])*(ty-y[i]);
      myz:=myz+(ty-y[i])*(tz-z[i]);
      mxz:=mxz+(tx-x[i])*(tz-z[i]);
end;
mxy:=mxy/(n-1); myz:=myz/(n-1); mxz:=mxz/(n-1);
rxy:=mxy/(sx*sy); ryz:=myz/(sy*sz); rxz:=mxz/(sx*sz);
mrxy:=(1-sqr(rxy))/sqrt(n);
mryz:=(1-sqr(ryz))/sqrt(n);
mrxz:=(1-sqr(rxz))/sqrt(n);
rxz:=0;ryz:=0;
//Определитель
K:=Sqr(sx*sy*sz)*(1-sqr(rxy));
//Коэффициенты матрицы
a1[1,1]:=sqr(sy*sz)/k;
a1[2,2]:=sqr(sx*sz)/k;
a1[3,3]:=1/sqr(sz);
a1[1,2]:=-sx*sy*sqr(sz)*rxy/k;
a1[1,3]:=0;
a1[2,3]:=0;
a1[2,1]:=a1[1,2];a1[3,1]:=a1[1,3]; a1[3,2]:=a1[2,3];

```

```

a:=sz;
det:=sqr(a1[1,1]-a1[2,2])+sqr(2*a1[2,1]);
b:=sqrt(2/(a1[1,1]+a1[2,2]+sqrt(det)));
c:=sqrt(2/(a1[1,1]+a1[2,2]-sqrt(det)));
max:=a;if max<b then max:=b;if max<c then max:=c;
min:=a;if min>b then min:=b;if min>c then min:=c;
if (min<a)and(a<max) then Sr:=a;
if (min<b)and(b<max) then Sr:=b;
if (min<c)and(c<max) then Sr:=c;
Label11.Caption:='Результаты расчетов';
Label4.Caption:='Большая полуось= ' +
floattostrf(max,ffixed,10,3)+' Метр.';
Label6.Caption:='Средняя полуось= ' +
floattostrf(sr,ffixed,10,3)+' Метр.';
Label8.Caption:='Малая полуось= ' +
floattostrf(min,ffixed,10,3)+' Метр.';
Sr:=sqrt(sqr(a)+sqr(b)+sqr(c));
Label5.Caption:=' Смещение= ' +
floattostrf(sr,ffixed,10,3)+' Метр.';
Label7.Caption:='Число измерений= '+inttostr(n);

// Расчет угла
A:=0;B:=0;C:=0;
for i:=0 to n-1 do begin
A:=A+sqr(x[i]); B:=B+sqr(y[i]);C:=C+x[i]*y[i] end;
sr:=0.5*Arctan(2*B/(A-C));sr:=sr*180/pi;
Label9.Caption:='Угол= ' +
floattostrf(sr,ffixed,10,2)+' Град.'
end;

```

```
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);  
begin  
Close  
end;  
end.
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Е**Программа «Расчет величин смещений оползней (смещения, направления)»
на языке Delphi**

```
unit Unit1;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  
Dialogs, StdCtrls;
```

```
type
```

```
TForm1 = class(TForm)
```

```
    Memo1: TMemo;
```

```
    Memo2: TMemo;
```

```
    Button1: TButton;
```

```
    Button2: TButton;
```

```
    Memo3: TMemo;
```

```
    Label1: TLabel;
```

```
    Label2: TLabel;
```

```
    Label3: TLabel;
```

```
    Label4: TLabel;
```

```
    Label6: TLabel;
```

```
    Label8: TLabel;
```

```
    Label10: TLabel;
```

```
    Label11: TLabel;
```

```
    Label5: TLabel;
```

```
    Label7: TLabel;
```

```
    Label9: TLabel;
```



```

Memo4: TMemo;
Label12: TLabel;
Memo5: TMemo;
Label13: TLabel;
Memo6: TMemo;
Label14: TLabel;
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

var
  Form1: TForm1;
x,y,z,xn,yn,zn,xk,yk,zk:array[0..100] of real;
a1:array[1..3,1..3] of real;
n,i:integer; // n1,n2,
t,tx,ty,tz,xy,xz,yz,sx,sy,sz,
mxy,myz,mxz,rx,ryz,rxz,max,min,sr,
mrxy,mryz,mrxz,a,b,c,det,k:real;
implementation
{$R *.dfm}
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
  n:=Memo1.Lines.count;//n1:=Memo2.Lines.count;n2:=Memo3.Lines.count;
  for i:=0 to n-1 do begin
    xn[i]:=strtofloat(form1.Memo1.Lines[i]);
    yn[i]:=strtofloat(form1.Memo2.Lines[i]);

```

```

zn[i]:=strtofloat(form1.Memo3.Lines[i]);
xk[i]:=strtofloat(form1.Memo4.Lines[i]);
yk[i]:=strtofloat(form1.Memo5.Lines[i]);
zk[i]:=strtofloat(form1.Memo6.Lines[i]) end;

```

```

for i:=0 to n-1 do begin
x[i]:=xk[i]-xn[i];
y[i]:=yk[i]-yn[i];
z[i]:=zk[i]-zn[i] end;

```

```

tx:=0;ty:=0;tz:=0;
for i:=0 to n-1 do
begin tx:=tx+x[i];ty:=ty+y[i];tz:=tz+z[i];end;
tx:=tx/n ;ty:=ty/n ;tz:=tz/n ;

```

```

sx:=0;sy:=0;sz:=0;
for i:=0 to n-1 do begin
sx:=sx+sqr(tx-x[i]); sy:=sy+sqr(ty-y[i]);sz:=sz+sqr(tz-z[i]) end;
sx:=sqr(sx/(n-1)); sy:=sqr(sy/(n-1)); sz:=sqr(sz/(n-1));

```

```

mxy:=0;myz:=0;mxz:=0;
for i:=0 to n-1 do
begin mxy:=mxy+(tx-x[i])*(ty-y[i]);
      myz:=myz+(ty-y[i])*(tz-z[i]);
      mxz:=mxz+(tx-x[i])*(tz-z[i]);
end;
mxy:=mxy/(n-1); myz:=myz/(n-1); mxz:=mxz/(n-1);
rxy:=mxy/(sx*sy); ryz:=myz/(sy*sz); rxz:=mxz/(sx*sz);
mrxy:=(1-sqr(rxy))/sqr(n);
mryz:=(1-sqr(ryz))/sqr(n);

```

```

mrxz:=(1-sqr(rxz))/sqrt(n);
rxz:=0;ryz:=0;
//Определитель
K:=Sqr(sx*sy*sz)*(1-sqr(rxy));
//Коэффициенты матрицы
a1[1,1]:=sqr(sy*sz)/k;
a1[2,2]:=sqr(sx*sz)/k;
a1[3,3]:=1/sqr(sz);
a1[1,2]:=-sx*sy*sqr(sz)*rxy/k;
a1[1,3]:=0;
a1[2,3]:=0;
a1[2,1]:=a1[1,2];a1[3,1]:=a1[1,3]; a1[3,2]:=a1[2,3];
a:=sz;
det:=sqr(a1[1,1]-a1[2,2])+sqr(2*a1[2,1]);
b:=sqrt(2/(a1[1,1]+a1[2,2]+sqrt(det)));
c:=sqrt(2/(a1[1,1]+a1[2,2]-sqrt(det)));
max:=a;if max<b then max:=b;if max<c then max:=c;
min:=a;if min>b then min:=b;if min>c then min:=c;
if (min<a)and(a<max) then Sr:=a;
if (min<b)and(b<max) then Sr:=b;
if (min<c)and(c<max) then Sr:=c;
Label11.Caption:='Результаты расчетов';
Label4.Caption:='Большая полуось= '+
floattostrf(max,ffixed,10,3)+' Метр.';
Label6.Caption:='Средняя полуось= '+
floattostrf(sr,ffixed,10,3)+' Метр.';
Label8.Caption:='Малая полуось= '+
floattostrf(min,ffixed,10,3)+' Метр.';
Sr:=sqrt(sqr(a)+sqr(b)+sqr(c));
Label5.Caption:=' Смещение= '+

```

```
floattostrf(sr,ffixed,10,3)+'  Метр.';
Label7.Caption:='Число измерений= '+inttostr(n);

// Расчет угла
A:=0;B:=0;C:=0;
for i:=0 to n-1 do begin
A:=A+sqr(x[i]); B:=B+sqr(y[i]);C:=C+x[i]*y[i] end;
sr:=0.5*Arctan(2*B/(A-C));sr:=sr*180/pi;
Label9.Caption:='Угол=          '+
floattostrf(sr,ffixed,10,2)+'  Град.'
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
Close
end;
end.
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Расчет повреждаемости здания на оползневом склоне

Для данного типа расчетов был выбран программный комплекс PLAXIS 2D. В качестве расчетной была выбрана модель слабого грунта с учетом ползучести. Исходя из анализа результатов расчетов, были выбраны два основных фактора, наиболее сильно влияющие на изменение НДС системы «оползневой склон – фундамент – сооружение»: высота оползневого склона и скорость его деформации. Было рассмотрено три различных случая высоты оползневого склона: 10, 15 и 25 метров. Для каждого из выбранных вариантов была проведена серия расчетов влияния скорости деформирования склона на внутренние усилия в конструкциях здания. В качестве изменяемого параметра скорости был выбран коэффициент ползучести грунта основания оползневого склона. На рисунке 1 приведена расчетная схема задачи. На рисунках 2 и 3 показаны результаты расчета – деформированная конечно-элементная схема и изополюля полных вертикальных перемещений, соответственно. Анализ приведенных расчетов показал, что проявление процессов ползучести грунтов в основании зданий и сооружений вызывает их неравномерную осадку, что в свою очередь влияет на возникновение дополнительных усилий в конструкциях здания. Количественный анализ зависимости внутренних усилий в конструкциях от скорости деформирования оползневого склона в таком случае необходим и заслуживает отдельного изучения.

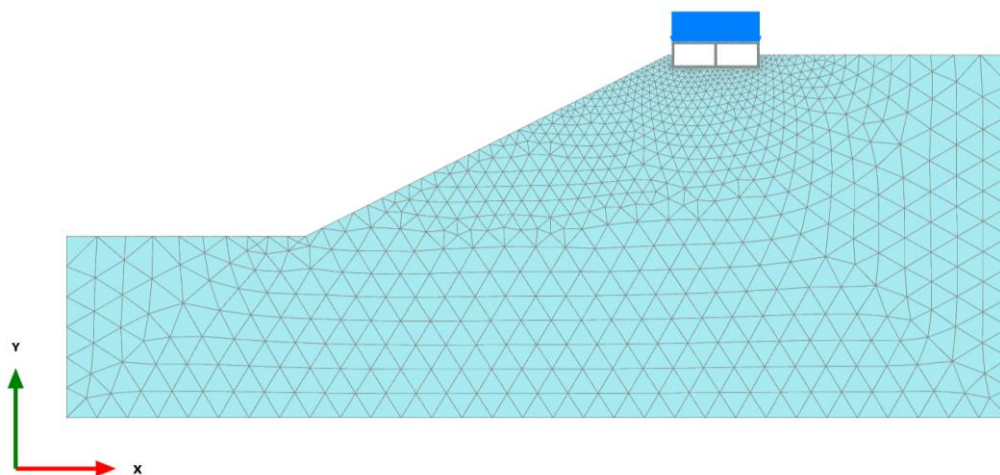


Рисунок Ж.1 – Расчетная схема задачи здания на оползневом склоне высотой 25 м

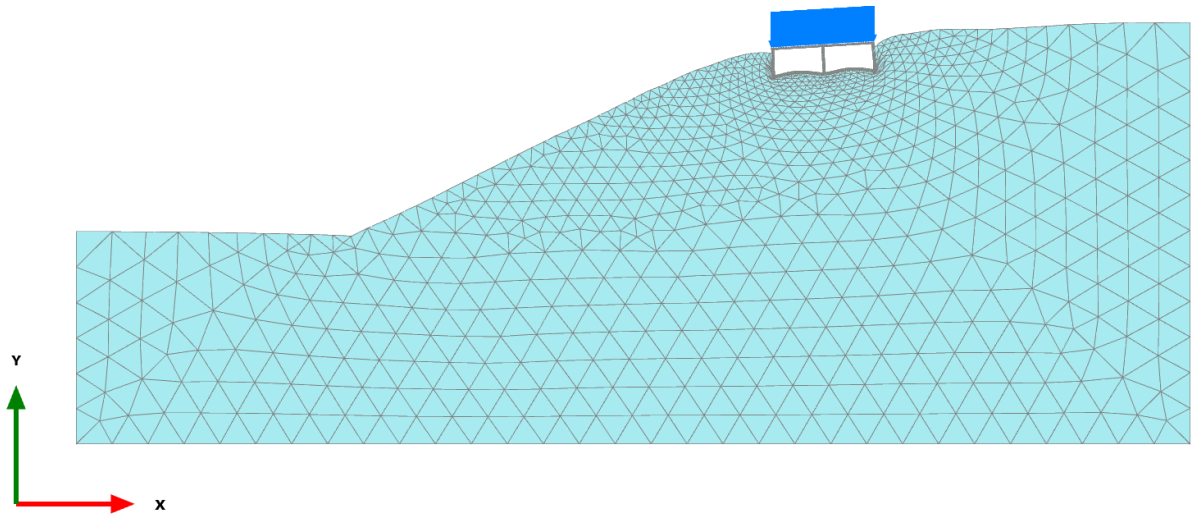


Рисунок Ж.2 – Деформированная конечно-элементная схема (масштаб деформаций увеличен в 50 раз)

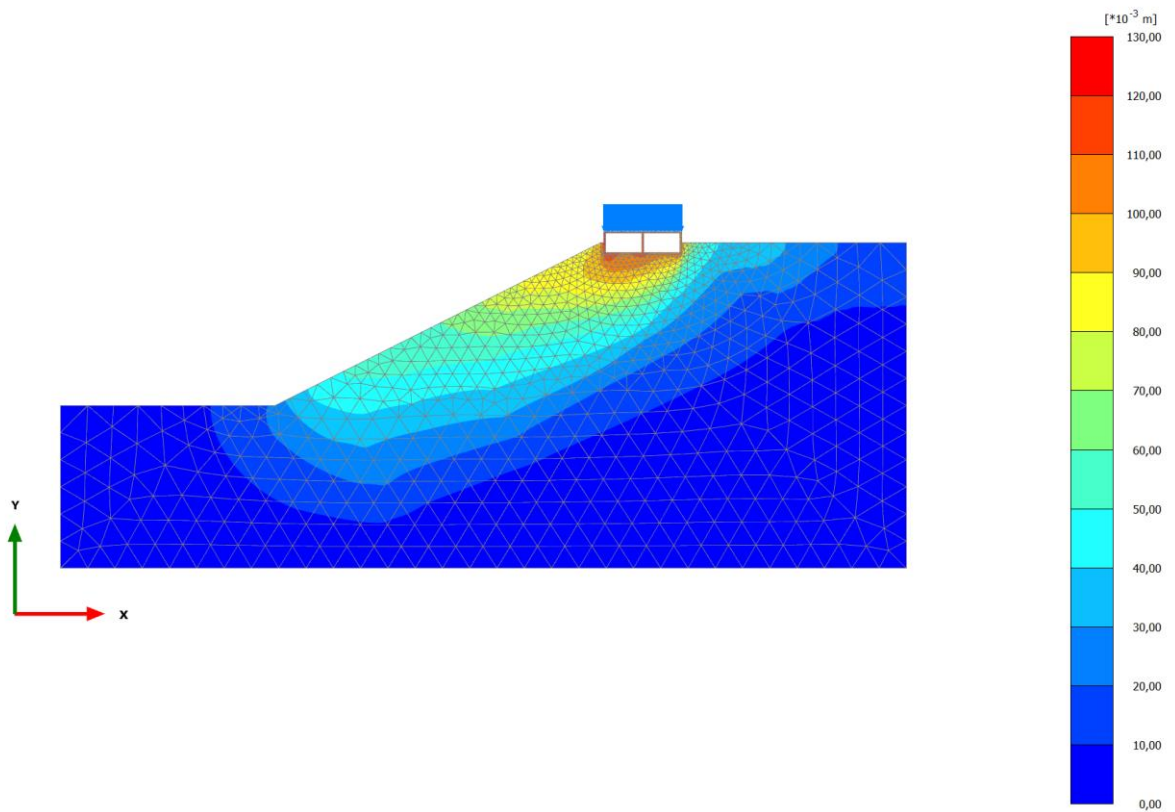


Рисунок Ж.3 – Изополя полных перемещений по окончании процесса ползучести в рунтах основания

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Анализ уязвимости зданий и сооружений на оползнеопасных территориях

Анализ уязвимости зданий и сооружений на оползневых склонах включает в себя:

- определение наиболее уязвимого расположения здания относительно поверхности склона;
- определение наиболее уязвимого типа фундамента;
- определение наиболее уязвимой конструктивной схемы здания на оползневом склоне;
- анализ влияния этажности на уязвимость здания.

Определение наиболее уязвимого расположения здания относительно поверхности склона

Уязвимость здания в значительной степени зависит от его расположения относительно склона. Для количественного определения уязвимости здания в зависимости от его расположения можно рассмотреть два крайних случая - расположение здания вдоль и поперек поверхности склона. Данную задачу можно решить численными методами, в том числе методом конечных элементов. Для решения задачи в рамках настоящей работы использовался ПК Plaxis 2D 2018. Все расчеты производились с применением модели слабого грунта с учетом ползучести Soft soil creep. Данная модель позволяет учесть деформации ползучести склона во времени. Физико-механические характеристики грунта, использовавшиеся в расчете, показаны в таблице И.1.

Таблица И.1 - Физико-механические характеристики грунта

Параметр	Значение
Вес грунта γ_{unsat} , кН/м ³	18,0
Вес грунта в водонасыщенном состоянии γ_{sat} , кН/м ³	18,0

Продолжение таблицы И.1

Модифицированный коэффициент разбухания k^* , д.е.	0,05
Модифицированный коэффициент сжимаемости λ^* , д.е.	0,01
Модифицированный коэффициент ползучести μ^* , д.е.	0,001
Удельное сцепление c , кПа	17,9
Угол внутреннего трения φ , °	21,2

Расчетные схемы задач в случае расположения здания вдоль и поперек поверхности склона показаны на рисунке 1. На рисунках 2 и 3 показаны изополя вертикальных и горизонтальных перемещений здания после строительства и 10 лет эксплуатации.

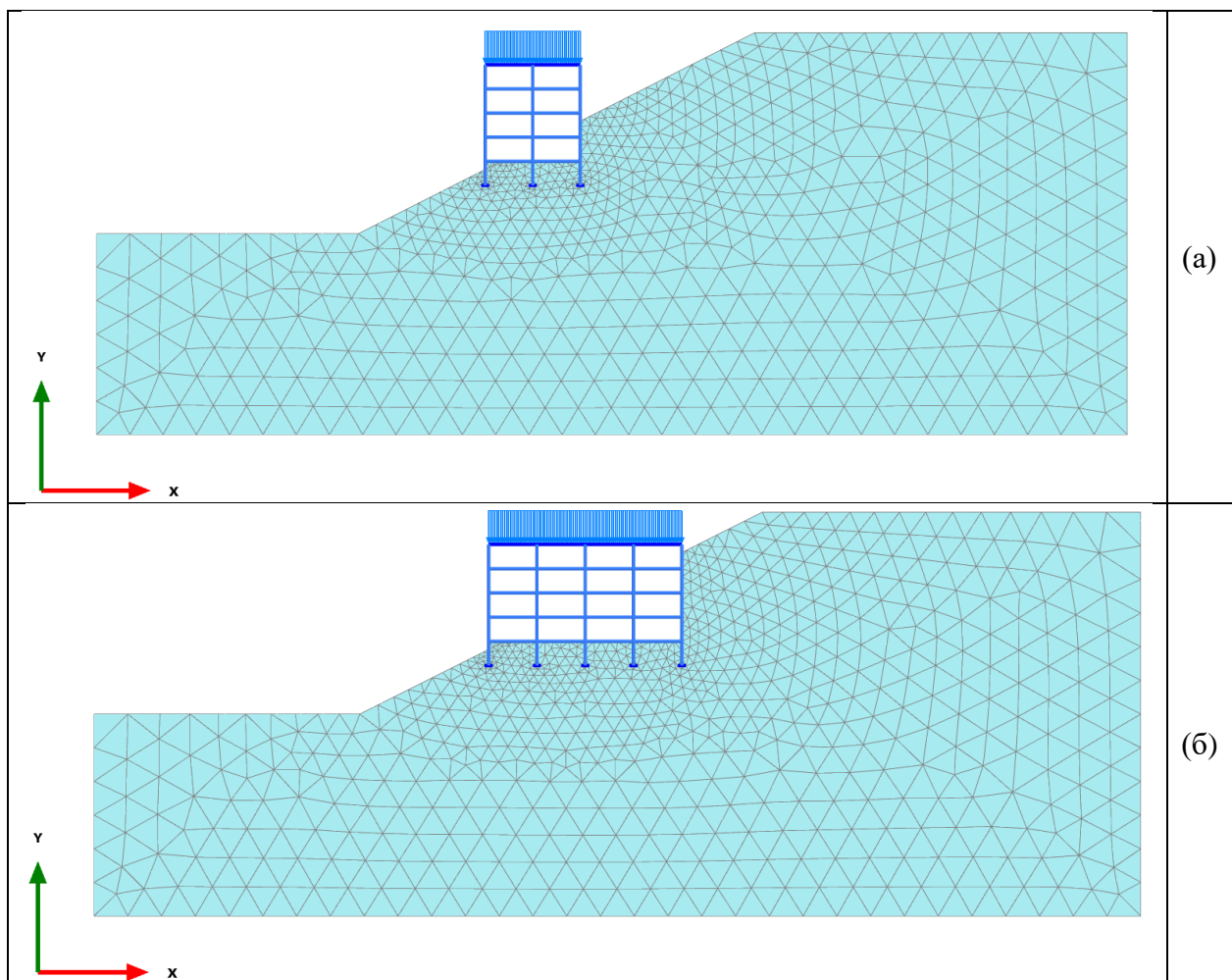


Рисунок И.1 - Расчетные схемы задачи при расположении здания относительно поверхности склона поперек (а) и вдоль (б)

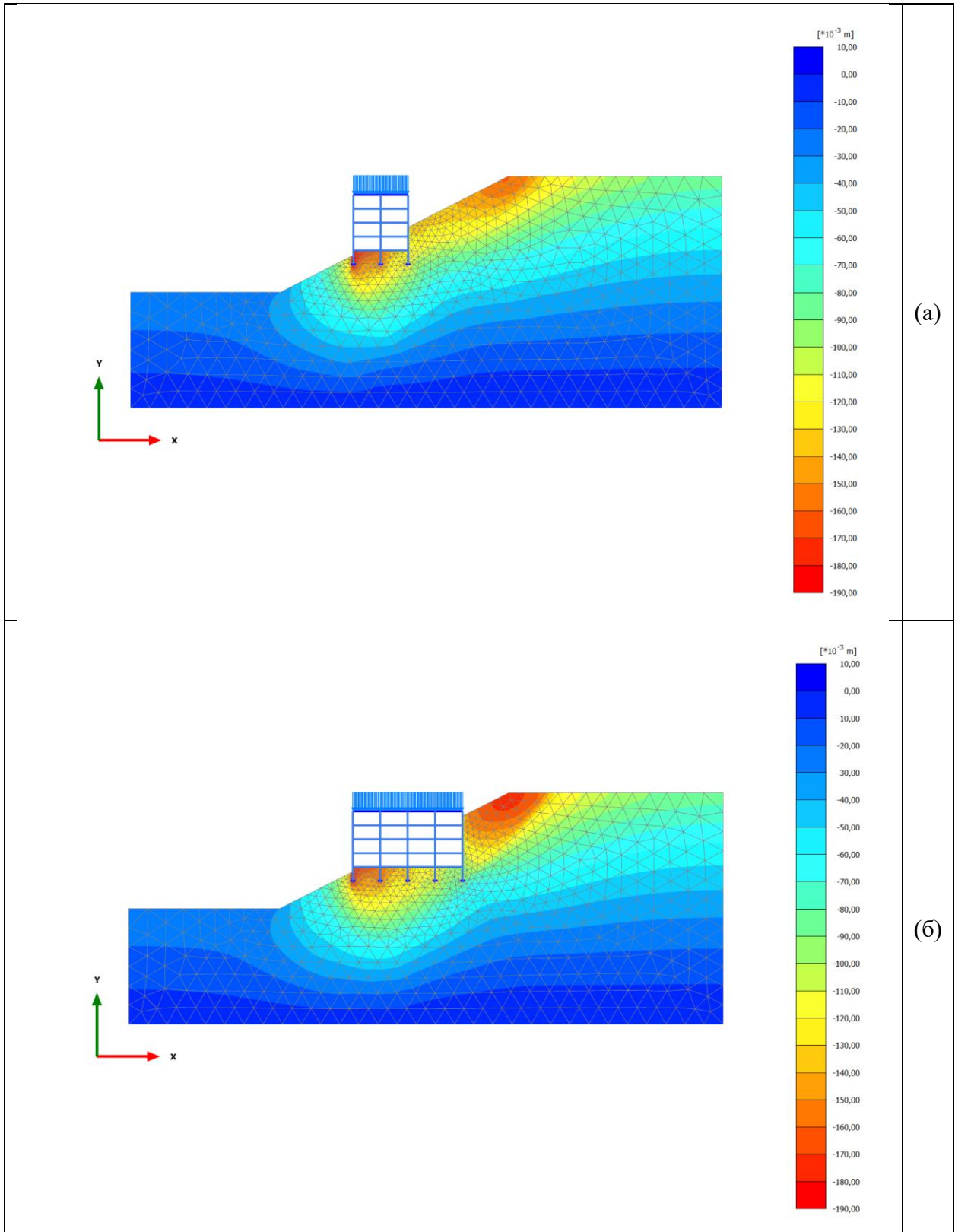


Рисунок И.2 - Изополя вертикальных перемещений, полученные в результате решения задачи при расположении здания относительно поверхности склона поперек (а) и вдоль (б)

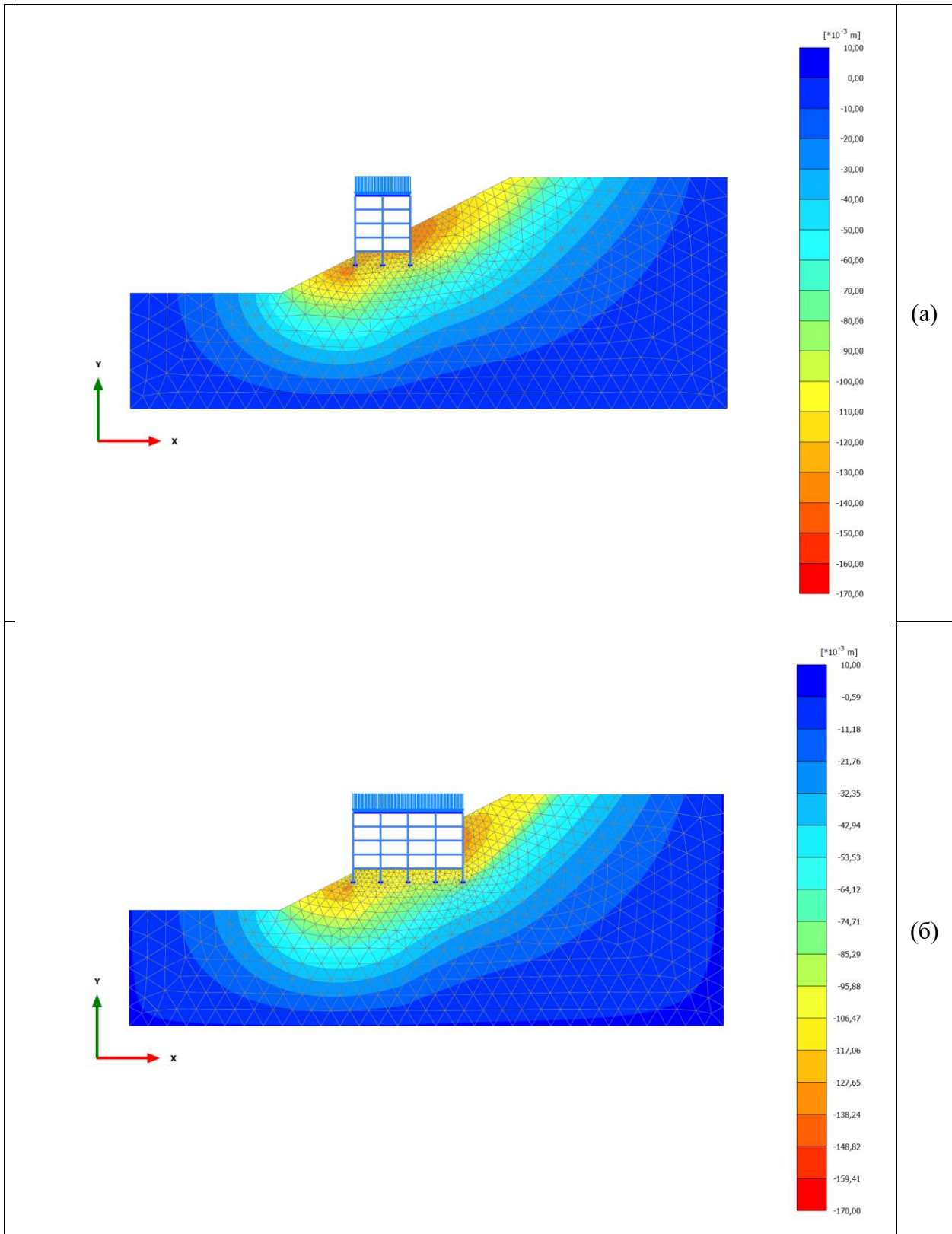


Рисунок И.3 - Изополя горизонтальных перемещений, полученные в результате решения задачи при расположении здания относительно поверхности склона поперек (а) и вдоль (б)

Из анализа результатов расчетов, приведенных на рисунках 2 и 3 можно сделать вывод, что при расположении здания поперек относительно поверхности склона его уязвимость выше, чем при расположении вдоль. Так, например, вертикальная осадка в первом и втором случаях составляет 18,7 и 17,9 см, соответственно, а относительная разность осадок - 0,0055 и 0,0035. Следовательно, в дальнейших расчетах имеет смысл рассматривать расположение здания поперек относительно поверхности склона как уязвимое.

Определение наиболее уязвимого вида фундамента

В процессе анализа уязвимости здания следует также рассмотреть различные виды конструкций фундаментов зданий и сооружений. Наиболее распространенными видами фундаментов в настоящее время являются:

- ленточные;
- столбчатые;
- плитные;
- свайные.

В силу того, что из перечисленных выше свайные фундаменты наименее подвержены дополнительным деформациям, вызванным движением оползневых масс, а столбчатые фундаменты не представляется возможным изучать в плоской постановке, в качестве основных в рамках расчета выбраны ленточные и плитные фундаменты. На рисунке 4 и 5 приведены результаты расчетов здания на оползневом склоне на ленточном и плитном фундаментах.

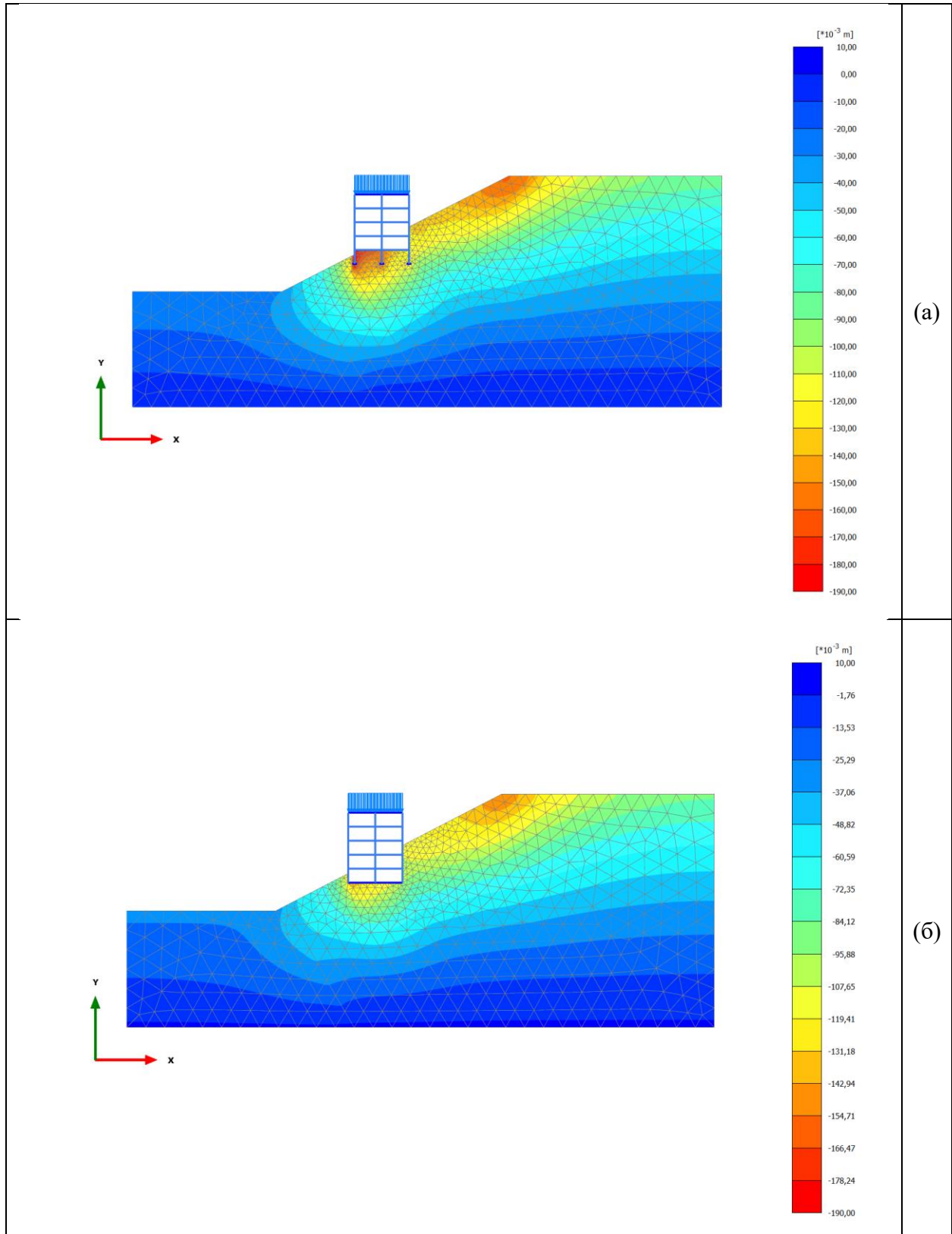


Рисунок И.4 - Изополя вертикальных перемещений здания на ленточном (а) и плитном (б) фундаментах

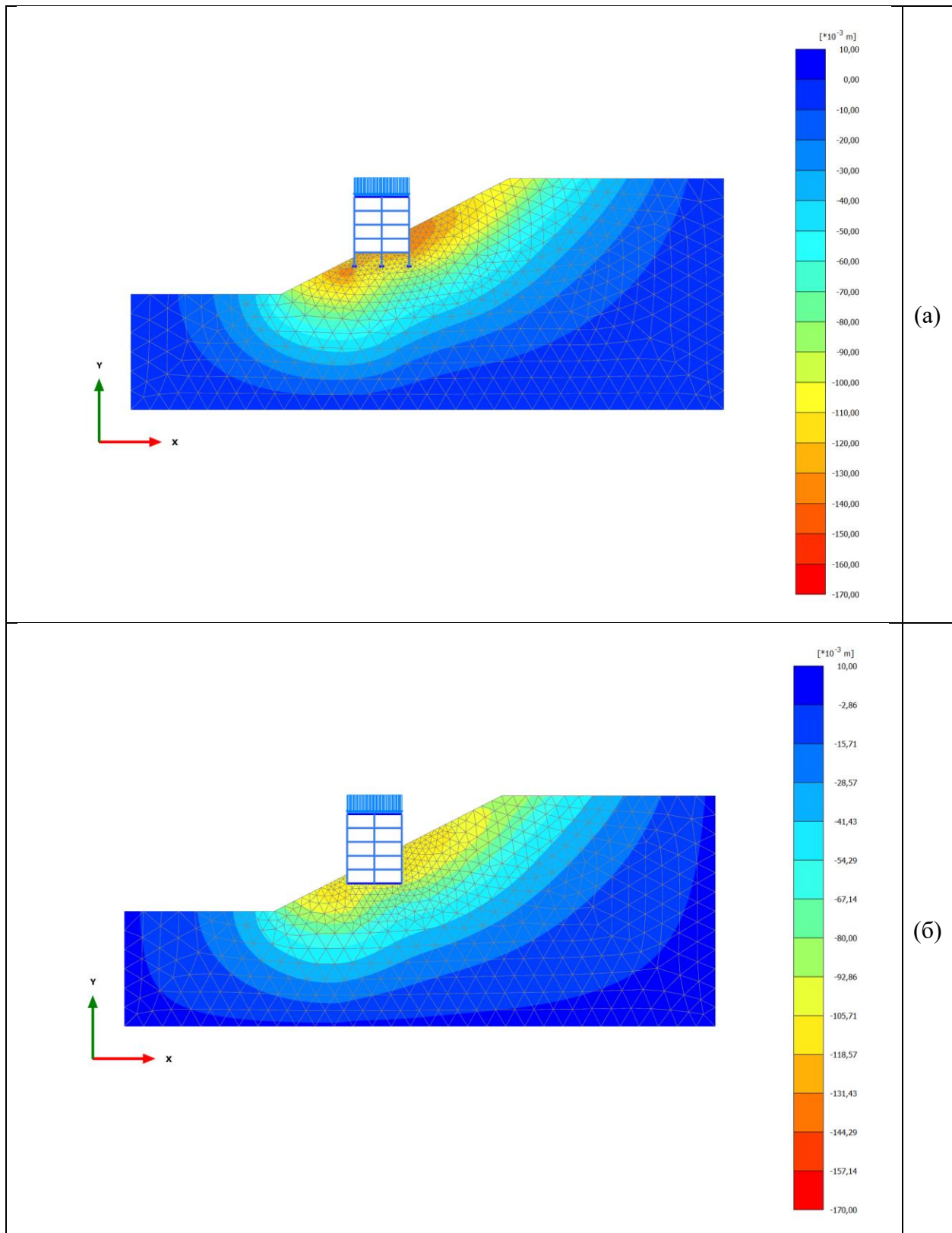


Рисунок И.5 - Изополя горизонтальных перемещений здания на ленточном (а) и плитном (б) фундаментах

Из анализа результатов расчетов, приведенных на рисунках 4 и 5 можно сделать вывод, что уязвимость здания в значительной мере зависит от выбранного вида фундамента. Наиболее уязвимым можно считать сооружение на ленточном фундаменте, что, вероятнее всего, вызвано большей пространственной жесткостью здания на плитном фундаменте. Вертикальная осадка в первом и втором случаях составляет 18,7 и 14,2 см, соответственно, а относительная разность осадок - 0,0055 и 0,0033.

Определение наиболее уязвимой конструктивной схемы здания

Уязвимость здания на оползневом склоне также зависит и от выбранной конструктивной схемы здания. В данной работе можем учесть влияние конструктивной схемы здания на его уязвимость, опираясь на таблицу Г.1 [213]. В данной таблице приведены предельные максимальные или средние осадки и относительные разности осадок для зданий с различными конструктивными схемами. К зданиям производственного и гражданского назначения относятся пункты 1-3 данной таблицы. В таблице И.2 приведен фрагмент таблицы Г применительно к производственным и гражданским зданиям.

Таблица И.2 - Фрагмент таблицы Г.1 СП 22.13330.2016 применительно к зданиям производственного и гражданского назначения

Сооружения	Предельная деформация основания фундаментов		
	Относительная разность осадок $\Delta S / L$	Крен i	Максимальная S_{\max} или средняя $S_{\text{ср}}$, см
1. Производственные и гражданские одноэтажные и многоэтажные с полным каркасом: - железобетонным; - то же, с устройством железобетонных поясов или монолитных перекрытий, а также здания монолитной конструкции - стальным - то же с устройством железобетонных поясов или монолитных перекрытий.	0,002	-	10
	0,003	-	15
	0,004	-	15
	0,005	-	18

Продолжение таблицы И.2

2. Здания и сооружения, в конструкциях которых не возникают условия от неравномерных осадок	0,006	-	20
3. Многоэтажные бескаркасные здания с несущими стенами из:	- крупных панелей	0,0016	12
	- крупных блоков или кирпичной кладки без армирования	0,0020	12
	- то же, с армированием, в том числе с устройством железобетонных поясов или монолитных перекрытий, а также здания монолитной конструкции	0,0024	18

Видно, что допустимые средние осадки и относительные разности осадок для зданий различных конструкций имеют существенные различия. Рассматривая изменение средней осадки и относительной разности осадок во времени, можно оценить уязвимость зданий различных конструкций. Для этого произведем расчет осадки во времени и построим графики «осадка-время» и «относительная разность осадок-время». Ограничим срок эксплуатации зданий 50 годами. На данных графиках отметим горизонтальные линии, ограничивающие предельные значения для различных конструкций. Полученные графики показаны на рисунках 6 и 7.

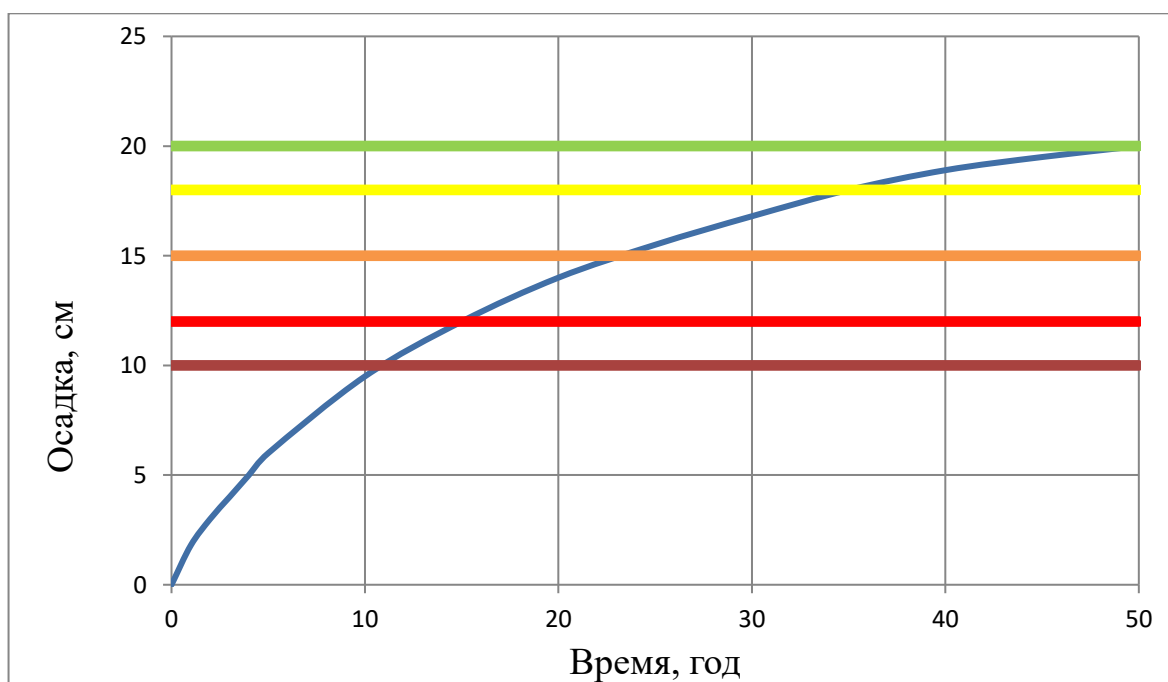


Рисунок И.6 - Зависимость средней осадки во времени и допустимые средние осадки для зданий различных конструкций

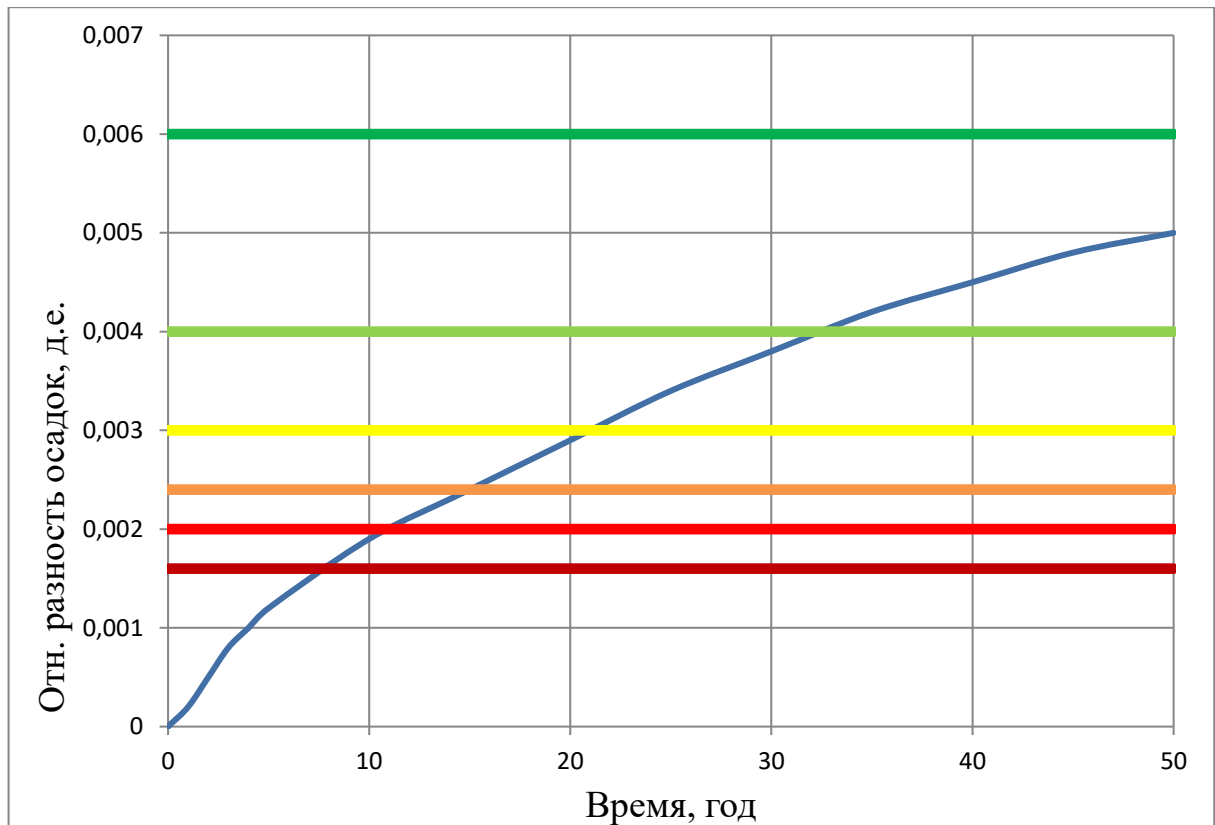


Рисунок И.7 - Зависимость относительной разности осадок во времени и допустимые средние осадки для зданий различных конструкций

Анализируя результаты расчетов, показанные на рисунках 6 и 7, можно сделать вывод, что наиболее уязвимыми являются здания с полным железобетонным каркасом и здания из крупных панелей.

Анализ влияния этажности на уязвимость здания

Жилые дома в зависимости от этажности разделяют на:

- малоэтажные (1-2 этажа);
- средней этажности (3-5 этажей);
- многоэтажные (6-10 этажей);
- повышенной этажности (11-16 этажей);
- высотные (>16 этажей).

Этажность здания оказывает существенное влияние на нагрузку, передаваемую на его фундаменты. Нагрузка на фундаменты в свою очередь оказывает влияние на устойчивость склона и среднюю осадку здания. В рамках настоящей работы

был выполнен ряд расчетов зданий различной этажности на оползневом склоне. На рисунке 8 приведены результаты расчета осадок зданий на оползневом склоне после 50 лет эксплуатации.

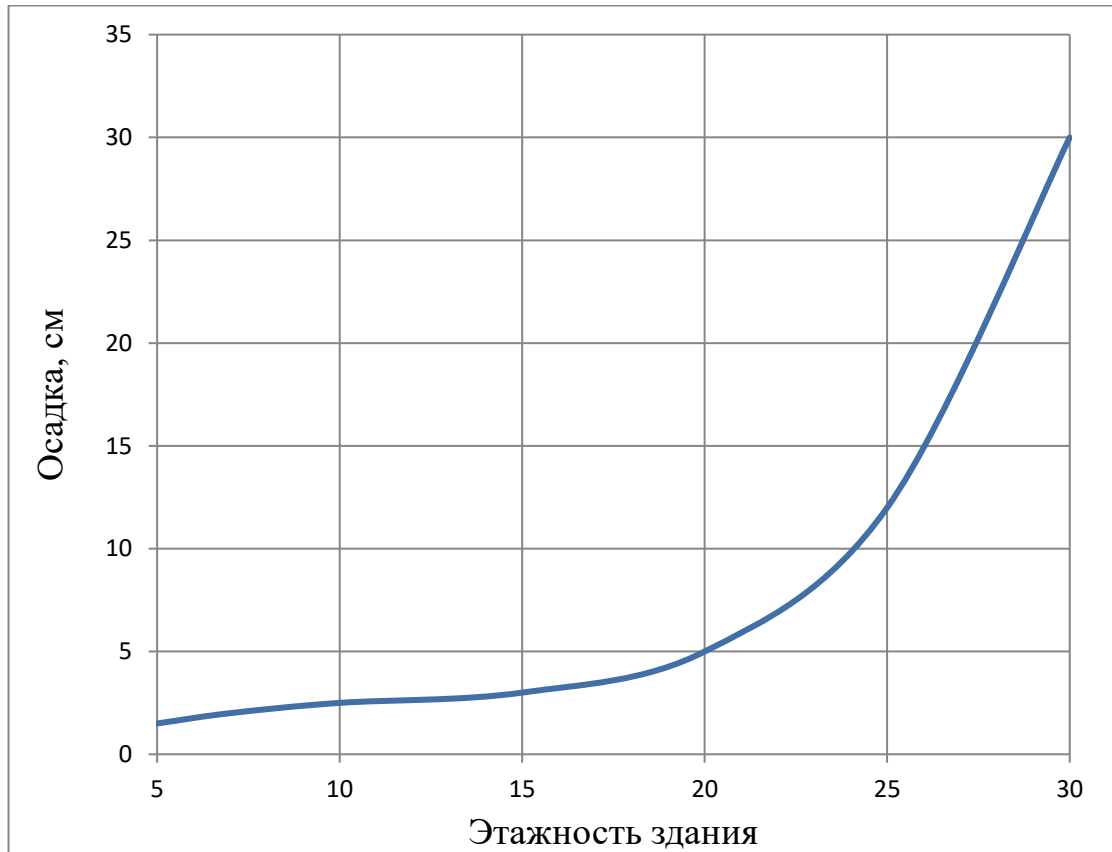


Рисунок И.8 - Влияние этажности на осадку здания

Из анализа результатов расчетов, приведенных на рисунке 5.37, можно сделать вывод, что зависимость уязвимости здания от его этажности носит экспоненциальный характер и требует комплексных расчетов НДС системы «сооружение-оползневой склон» в каждом конкретном случае.

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017616941 от 20.06.2017

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017616941

Обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений
оползней

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет" (НИУ МГСУ) (RU)*

Авторы: *Симонян Владимир Викторович (RU),
Тамразян Ашот Георгиевич (RU)*

Заявка № 2017613674

Дата поступления 21 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 июня 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**№ 2020663549 от 28.10.2020****РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ****СВИДЕТЕЛЬСТВО****о государственной регистрации программы для ЭВМ****№ 2020663549****Расчет величин смещений оползней (длина, направление).**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ) (RU)*

Автор: *Симомян Владимир Викторович (RU)*

Заявка № **2020662495**

Дата поступления **16 октября 2020 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **28 октября 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Излиев**



Свидетельство о государственной регистрации базы данных**№ 2021620977 от 18.05.2021****РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ****СВИДЕТЕЛЬСТВО****о государственной регистрации базы данных****№ 2021620977****Оценка оползневых рисков**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ) (RU)**

Автор(ы): **Симомян Владимир Викторович (RU)**

Заявка № **2021620871**

Дата поступления **30 апреля 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре баз данных **18 мая 2021 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Акты внедрения результатов диссертационного исследования ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «КИПС-2»

Юридический адрес: 127560, г. Москва, ул. Пришивина, д. 20, корп. 1
Фактический адрес: 127474, г. Москва, Бескудниковский б-р, д. 21А
ИНН 7708102517/ КПП 771501001, ОГРН 1027739372638, ОКПО 18321118
Р/с 40702810238050102154 в ПАО Сбербанк России г. Москва
К/с 3010181040000000225, БИК 044525225
Тел./факс: 8(495)787-07-98, gk-kips.com, e-mail: kips@gk-kips.com

30 августа 2017 г.

г. Москва

АКТ

о внедрении результатов докторской диссертационной работы
Симоняна Владимира Викторовича

Настоящий акт составлен о том, что отдельные положения докторской диссертации к.т.н. Симоняна Владимира Викторовича на тему «Разработка методологии оценки и обеспечения безопасности сооружений на оползнеопасных территориях на основе геодезического мониторинга», реализованы при оценке и прогнозе геомеханического состояния породного массива в районе строительства перегонных тоннелей на участке «Петровско-Разумовская» - «Селигерская» и станционных комплексов «Окружная», «Верхние Лихоборы» и «Селигерская» по объекту «Люблинско-Дмитровская линия станция «Петровско-Разумовская» - «Селигерская».

Предложенная к.т.н. Симоняном В.В. методика оценки и обеспечения безопасной эксплуатации зданий по данным геодезического мониторинга использована при строительстве объекта «Люблинско-Дмитриевская линия Мосметрополитена на участке от ст. «Петровско-Разумовская» до ст. «Селигерская».

По сравнению с ранее применяемой, использование данной методики позволило получить качественно новые результаты для обоснования своевременной корректировки проектной документации, принятия оперативных решений и предотвращения возможных аварийных ситуаций, тем самым существенно повысить безопасность данного объекта.

Председатель: генеральный директор ООО «КИПС-2», к.т.н.

Гл. маркшейдер

Начальник ОППиОМ



Е.П. Власенко

В.В. Лоцилин

М.В. Полозова

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«ЭнергоПоинт»

123458, г. Москва, ул. Маршала Катукова, д. 24, корп. 6, офис 101.
 ИНН 7702803749 КПП 770201001 р/с 40702810000180000555
 в ОАО «МОСКОВСКИЙ КРЕДИТНЫЙ БАНК» БИК 044585659 к/с 30101810300000000659
 Телефон: 8 (499) 124-65-04; 8 (499) 125-09-38

Утверждаю:

Генеральный директор

А.Б. Баюков

«3» июня 2017 г.



АКТ

о внедрении результатов докторской диссертации

Симоняна Владимира Викторовича на тему

«Разработка методологии оценки и обеспечения безопасности сооружений на оползнеопасных территориях на основе геодезического мониторинга»

Комиссия в составе:

- Баюков А.Б. – генеральный директор;
- Акимов А.Ю. – главный инженер проектов;
- Мисохников Л.Г. – главный специалист

составили настоящий акт о том, что следующие положения диссертационной работы, выполненного Симоняном В.В. «Разработка методологии оценки и обеспечения безопасности сооружений на оползнеопасных территориях на основе геодезического мониторинга», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы в практической деятельности ООО «ЭнергоПоинт»:

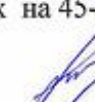


- методика оценки рисков на основе математической модели оползневых процессов и среднеквадратических эллипсоидов смещений оползней;
- методика корректировки расчетных характеристик грунтов по данным геодезического мониторинга.

Указанные методики применялись при проведении инженерных изысканий для разработки проекта строительства многофункционального комплекса по адресу: Московская область, Сельское поселение Молоковское, д. Андреевское.

Использование разработанных в диссертации методов дало возможность правильно оценить риск оползневой опасности участков склоновых территорий, правильно скорректировать план застройки, что позволило повысить безопасность проектируемых сооружений на таких выявленных участках на 45-50%.

Председатель комиссии:

Члены комиссии:

 Баюков А.Б.
 Акимов А.Ю.
 Мисохников Л.Г.

Утверждаю
Проректор по научной работе
д.т.н., проф. Д.А. Шаповалов

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования к.т.н., доцента
НИУ МГСУ Симоняна Владимира Викторовича



Государственный университет по землеустройству на факультете «Городской кадастр» готовит инженеров по специальности «Прикладная геодезия». Составной частью программы подготовки студентов по этой специальности является тема «Геодезические методы исследования деформаций зданий, инженерных сооружений и объектов недвижимости».

Наблюдения за оползнями – один из разделов этой темы, содержание которой отражены в разработке ряда ученых геодезистов (Брайт П.И., Тер-Степанян Г.И., Кузнецов А.И. и др.). Во всех этих работах постановка геодезических наблюдений за оползнем и их результаты рассматриваются в отрыве от его геомеханической модели. В докторской диссертации Симоняна В.В. впервые такая связь устанавливается. В работе представлена методика корректировки геомеханической модели, построенной только на основе геологических изысканий данными геодезического мониторинга. Наглядно показано, что подобная корректировка существенно снижает риск возникновения оползневых смещений.

Новизной в исследованиях темы диссертации являются: предложение по схеме опорной (локальной) сети на склоновых территориях; методика расчета точности геодезических наблюдений за смещениями оползня; обоснование периодичности наблюдений за движением оползня; построение среднего квадратического эллипсоида его смещения; исследования оползневого процесса методом корреляционного анализа с использованием теории случайных процессов. Эти разработки позволят существенно углубить раскрытие темы в лекционном курсе и в дальнейшем, несомненно, будут использованы в учебном процессе при подготовке специалистов по прикладной геодезии.

Разработанный в диссертации алгоритм комплексной оценки рисков склоновых систем, предполагающий ведение их геодезического мониторинга, используется в Государственном университете по землеустройству при чтении курсов «Прикладная геодезия» и «Изыскания инженерных сооружений».

Заведующий кафедрой геодезии и
геоинформатики ГУЗ д.т.н., проф.

К.т.н., проф.

10.10.17

В.Н. Баранов

А.К. Зайцев

УТВЕРЖДАЮ

Проректор ФГБОУ ВО

«Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет

Королев Е.В.

«26» января 2017 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования
к.т.н., доцента Симоняна Владимира Викторовича в учебный процесс

НИУ МГСУ подтверждает, что результаты диссертационного исследования к.т.н., доцента Симоняна Владимира Викторовича на тему «Разработка методологии оценки и обеспечения безопасности сооружений на оползнеопасных территориях на основе геодезического мониторинга» в части корректировки расчетных характеристик грунтов по данным геодезического мониторинга при проектировании фундаментов на оползневых склонах и расчета точности геодезических наблюдений за деформациями высотных зданий и сооружений внедрены в учебный процесс при подготовке лекционного и практического материала по дисциплинам направления подготовки и специальности 08.00.00 «Техника и технологии строительства».

Использование результатов диссертационного исследования к.т.н., доцента Симоняна Владимира Викторовича в учебном процессе позволило повысить уровень подготовки обучающихся и на качественно новом уровне освещать отдельные вопросы инженерно-геодезических и инженерно-геологических изысканий.

Директор ИГЭС д.т.н., проф.



Н.А. Анискин

Зав.каф. «ИиГЭ» д.г.-м.н., доц.



А.А. Лаврусевич