

*На правах рукописи*

**Симонян Владимир Викторович**



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

*Специальность 25.00.32 – Геодезия*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)».

Научный консультант:  
доктор технических наук, профессор

*Волков Виктор Иванович*

Официальные оппоненты:

*Гайрабеков Ибрагим Гиланиевич*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова», кафедра «Геодезия и земельный кадастр», заведующий кафедрой;

*Кафтан Владимир Иванович*

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук, главный научный сотрудник;

*Столбов Юрий Викторович*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина», кафедра геодезии и дистанционного зондирования, профессор.

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», г. Москва

Защита состоится 27 декабря 2021 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 27 сентября 2021 г.

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ**  
диссертационного совета



**КУЗИН**  
Антон Александрович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**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» возобновлять и совершенствовать свои жизненные и ресурсные потенциалы в условиях неблагоприятного антропогенного и природного воздействия на геосферы Земли. В Российской Федерации в 1996 году была принята концепция «Устойчивого развития территорий». При этом, весьма значимыми и актуальными встают вопросы, которые исходят от геологической составляющей окружающей среды (оползневые опасности или риски). Следовательно, гарантия безопасности сооружений на склоновых территориях и населения, их защищенность от оползневых процессов есть одно из неперемных 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. 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.

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. ЮНЕСКО в 2007 году объявила об активизации борьбы с оползнями.

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. 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 вы-

полнения. 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 раздельно в зависимости от объекта наблюдений. Поэтому никогда и не ставилась задача по оценке риска и уровня безопасности склоновых территорий на основе применения геодезических методов. 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.

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.

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 новую 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 сред-



ства 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 оползневой 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 математико-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 полу-

чать 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 23 всероссийских и международных научно-практических конференциях. Основные: на научной конференции молодых ученых ГУЗ «Актуальные проблемы землепользования, землеустройства и кадастров» (Москва, 2006 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

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 ЕММФТ 2017» (Владивосток, 2017 г.); на Международной научно-практической конференции «Взаимодействие науки и общества: проблемы и перспективы» (Казань, 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 (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 диссер-

тационном 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.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен анализ проблемных вопросов геодезического обеспечения мониторинга природно-техногенных склоновых систем и их безопасности.

**Во второй главе** рассмотрены существующие методы оценки оползневых рисков (качественный и количественный прогноз оползневой опасности) и предложен сравнительный метод численных критериев эффективности этих методов.

**В третьей главе** разработаны методы постановки геодезического мониторинга оползневых смещений, включающие новые подходы к проектированию опорной геодезической сети, обоснование точности и периодичности геодезических наблюдений смещений оползней в зависимости от скорости смещений, обоснование точно-

сти наблюдений деформаций зданий и сооружений, возведенных на склоновых территориях. Предложена методика корректировки расчетных характеристик грунтов по результатам повторных геодезических наблюдений.

**В четвертой главе** разработана новая методика и вероятностно-статистический аппарат, основанный на получении обобщенных среднеквадратических эллипсоидов смещений оползней, обеспечивающие математическую обработку и интерпретацию результатов повторных геодезических наблюдений деформаций оползней.

**В пятой главе** рассматриваются вопросы механико-математического обоснования условий, при которых возникает потенциальная возможность момента смещения оползня.

**В шестой главе** приведена методология математического моделирования и оценки рисков СС в условиях воздействия оползневых факторов. Обоснование уровня оползневой безопасности производится на основании результатов повторных геодезических наблюдений.

**В седьмой главе** приведены результаты использования работ диссертации по оценке и прогнозированию деформации поверхности склона во времени при проявлении процессов вторичной консолидации в грунтах основания.

## **ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

**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.**

Основным принципом построения специальных планово-высотных опорных сетей на оползневых склонах является обеспечение заданных допусков определения смещений оползневых точек. При повторных геодезических наблюдениях деформаций оползневых склонов точность наблюдений  $\sigma_s$  надо ставить в зависимости от изменения величины самой деформации  $S$  и связать точность наблюдений за оползнем с его скоростью  $V$ . По правилам теории по-



грешностей, приняв наблюдения в циклах равноточными, получим (1)

$$\sigma_s = 0,2V\Delta t, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  - интервал времени между циклами наблюдений.

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

Координатный метод наблюдений при использовании электронных тахеометров позволяет получать пространственные координаты оползневых точек. Учитывая, что смещения оползневых точек определяют по разностям их координат, полученных в разных циклах наблюдений, формула для вычисления СКП перемещения  $m_{s_i}$  будет (2)

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

где  $m_D$  – СКП наклонного расстояния;  $D_{0-i}$  – наклонное расстояние;  $m_\beta$  – СКП измерения углов;  $\rho$  – число секунд в одном радиане, равное  $206265''$ ;  $z_{0-i}$  – зенитное расстояние. Так, например, при  $D = 100$  м,  $z = 30^\circ$ ,  $m_D = 2$  мм,  $m_\beta = 2''$ , погрешность перемещения точки  $m_{s_i} = 3,2$  мм, что соответствует скорости  $V = 15$  мм/мес.

Частота наблюдений также должна находиться в зависимости от скорости смещения оползня. Если скорость оползня оценивается 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  $\Delta t$  между циклами измерений. Поставим условие, чтобы смещения  $S$  были бы меньше критического смещения  $S_{\text{крит}}$ . Тогда интервал времени  $\Delta t$  между циклами наблюдений определим по формуле (3)

$$\Delta t \leq \frac{S_{\text{крит}}}{V}. \quad (3)$$

Для определения  $S_{\text{крит}}$  рассмотрим смещения 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. Тогда  $S_{\text{крит}} \leq \frac{V_1 + V_2}{2} \Delta t$ . Подставив данные скоростей в формулу получим, что в месяц  $S_{\text{крит}} \leq 65$  мм. В таблице 2 приведены значения интервала времени  $\Delta t$  между циклами наблюдений при соответствующих скоростях смещения оползней.

Исходя из общих предположений о ходе оползневых смещений временной интервал  $\Delta t$  задаем в начале наблюдений. Затем в процессе наблюдений его необходимо корректировать: периодичность наблюдений должна изменяться в соответствии с изменениями скорости смещения оползня. В периоды активизации она должна увеличиваться и уменьшаться в периоды угасания.

Довольно эффективным методом создания опорной геодезической сети для наблюдений за смещениями оползневых точек, является метод полигонометрии. Методом полигонометрии опорная сеть создается в виде отдельного хода (рисунок 1), опирающегося на два исходных пункта  $A, B$  и направления.

Выполним проектирование полигонометрического хода заданной точности.

Требование к точности хода задается в виде выражения (4)

$$M = Tm, \quad (4)$$

где  $T$  – коэффициент «понижения точности измерений» ( $1 < T < 4$ );  $m$  – точность измерений, а теоретически СКП заданной функции (5)

$$M = \mu \sqrt{P^{-1}} \quad (5)$$

(решает «прямую задачу оценки точности сети»), где  $\mu$  – СКП результата измерения (угла или стороны), вес  $P$  которого принимаем равным единице (СКП единицы веса);  $P^{-1}$  – обратный вес оцениваемой функции. Сравнивая эти формулы между собой видим, что  $P^{-1} = T^2$ . Тогда (6)

$$m = \frac{M}{T} = \frac{M}{\sqrt{P^{-1}}} \quad (6)$$

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 формулы неизвестной является лишь обратный вес  $P^{-1}$  искомой функции, зависящий от геометрии сети. При классическом решении оценки качества проекта сети геометрическая схема ее на плане уже определена. Следовательно, значение обратного веса  $P^{-1}$  заданной функции вычисляется либо по способу «метода наименьших квадратов», либо по приближенным формулам. Но все три элемента в формулах  $M$ ,  $\mu$  и  $T$  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.

Из формулы СКП  $M$  взаимного положения конечных точек такого хода (СКП функции) определим обратный вес  $P^{-1}$  рассматриваемого полигонометрического хода:

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

в которой  $m_s$  – СКП измерения сторон, мм;  $m_{\beta}$  – СКП измерения углов, сек.;  $n$  – число сторон хода,  $L$  – длина хода дана в километрах и  $\rho = 0,206265''$ ). Из сравнения формул СКП  $M$  следует, что СКП единицы веса  $\mu = m_s$  (обратный вес измеренных сторон  $Q_s = 1$ ). Поскольку отношение квадратов СКП во втором слагаемом формулы есть обратный вес  $Q_{\beta}$  измеренных углов  $\frac{m_{\beta}^2}{m_s^2} = Q_{\beta}$ , то формула примет

вид  $P^{-1} = n + 2Q_{\beta}L_{\text{км}}^2(n+3)$ . Обозначив  $2Q_{\beta}L_{\text{км}}^2 = K$ , где  $K$  – «геометрический коэффициент хода», получим, что обратный вес хода равен (7)

$$P^{-1} = n + K(n+3). \quad (7)$$

Два слагаемых формулы являются 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  $Q_{\beta}$  и длины хода  $L$ . Тогда следуют два очевидных вывода:

1. Обратный вес  $Q_{\beta}$  измеренных углов полигонометрического хода обратно пропорционален удвоенному квадрату его длины, выраженной в километрах (8):

$$Q_{\beta} = \frac{K}{2L_{\text{км}}^2}. \quad (8)$$

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  $Q_{\beta}$ ,  $L_{\text{км}}$  и  $n$  хода, при которых будет выполняться условие (6), соответствующее требованию к точности хода (4)? Здесь возможны два варианта решения этого вопроса:

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

Задаваясь различными значениями длины хода  $L_{\text{км}}$  и коэффициентом  $q_1 = Q_{\beta}$  получим геометрический коэффициент хода  $K$ , а далее для заданного значения  $T = \sqrt{P^{-1}}$ , вычисляем допустимую длину хода (9):

$$L_{\text{км}} = \sqrt{\frac{T^2 - n}{2q_1(n+3)}} = \sqrt{\frac{T^2 - n}{2Q_{\beta}(n+3)}}. \quad (9)$$

У современных электронных тахеометров точность измерения расстояний  $m_S = 2$  мм. А точность измерения углов  $m_{\beta}$  может быть 1", 2" и 3". Тогда, соответственно,  $q_1 = 0,25; 1; 2,25$ . Допустимая длина полигонометрического хода для различных значений  $T$ ,  $n$  и  $q_1$ , вычисленная по формуле (5) приведена в таблице 3.

Таблица 3 позволяет подбирать различные варианты геометрических и точностных параметров предполагаемого к проектированию полигонометрического хода, в котором при конкретном зна-

чении СКП линейных измерений будет удовлетворять условию (4). 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 (10):

$$S_{\text{км}} = \frac{L_{\text{км}}}{n}. \quad (10)$$

*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.*

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  $\beta$  (правая часть условия) на обратный вес  $P^{-1}$  полигонометрического хода.

При  $q_2 = 1$  влияние обратных весов угловых и линейных измерений одинаково. Из (3) получим (11):

$$n = \frac{T^2}{2} \quad \text{и} \quad K = \frac{T^2}{2(n+3)} = \frac{n}{n+3}. \quad (11)$$

При  $q_2 = 0,25$ , влияние обратного веса угловых измерений не существенно. При этом (12):

$$n = \frac{T^2}{5} \quad \text{и} \quad K = \frac{4n}{n+3}. \quad (12)$$

При  $q_2 = 2,25$  не существенно влияние обратного веса линейных измерений. Здесь имеем (13):

$$n = \frac{T^2}{1,44} \quad \text{и} \quad K = \frac{0,44n}{n+3}. \quad (13)$$

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

1. По заданному значению коэффициента  $T$  в формуле (4) определяем допустимый обратный вес  $P^{-1}$  проектируемого полигонометрического хода:  $P^{-1} = T^2$ .

2. По вычисленному значению коэффициента пропорциональности  $q_2$  из соответствующей формулы (11), (12) или (13) определяем допустимое число сторон  $n$  в проектируемом ходе и значение коэффициента  $K$ .

3. По принятому значению  $Q_\beta$  из формулы (8) определяем для расчётного в пункте 2 значения  $K$  допустимую длину  $L_{км}$  проектируемого хода (14):

$$L_{км} = \sqrt{\frac{K}{2Q_\beta}}. \quad (14)$$

4. Из формулы (14) по ранее полученным допустимым значениям  $L_{км}$  и  $n$  (см. пункты 3 и 2) вычисляем примерное значение длины  $S$  сторон 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. Учитывая, что полигонометрический ход прокладывается в прямом и обратном направлениях (как замкнутый ход), то погрешность определения координат точек уменьшается в корень из двух.

**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.**

Если векторы всех наблюдаемых точек отнести к началу условной системы пространственных координат, то получается нормальное поле распределения векторов смещений в пространстве, изображенной на рисунке 2, на которой показаны 46 векторов смещений оползневых точек.

Выражение для плотности нормального закона распределения в пространстве при числе измерений  $n = 3$  примет вид (15):

$$f(x_1, x_2, x_3) = \frac{\sqrt{|C|}}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{ij} (x_i - m_{x_i})(x_j - m_{x_j})}, \quad (15)$$

где  $|C|$  – определитель матрицы  $C$ ;  $C = \|c_{ij}\|$  – матрица, обратная корреляционной матрице  $K$ , т.е. если корреляционная матрица  $K = \|K_{ij}\|$ , то элементы этой матрицы  $c_{ij} = (-1)^{i+j} \frac{M_{ij}}{|K|}$ , где  $|K|$  – определитель корреляционной матрицы;  $M_{ij}$  – минор этого определителя, полученный из него вычеркиванием  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ . Причем  $|C| = \frac{1}{|K|}$ .

Корреляционная матрица  $K$  будет равна (16):

$$K = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Используя коэффициенты корреляции  $r_{ij}$ , которые связаны с элементами корреляционной матрицы  $\|K_{ij}\|$  формулами  $K_{ij} = r_{ij} \sigma_i \sigma_j$ , где  $\sigma_i \sqrt{D_i}$ ,  $\sigma_j \sqrt{D_j}$ ,  $r_{ij} = 1$ ,  $D_i$  – дисперсия,  $\sigma_i$  – среднеквадратическое отклонение соответствующей случайной величины, формула (16), разлагая, например, по первой строке, примет вид  $|K| = \sigma_1^2 \sigma_2^2 \sigma_3^2 (1 - r_{12}^2 - r_{23}^2 - r_{13}^2 + 2r_{12}r_{23}r_{13})$ , а определитель матрицы  $|C|$ , будет  $|C| = \frac{1}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 \sigma_3^2 (1 - r_{12}^2 - r_{23}^2 - r_{13}^2 + 2r_{12}r_{23}r_{13})}$ .

Рассмотрим теперь поверхность плотности нормального распределения функцией трех переменных  $(x_1, x_2, x_3)$ , представленной формулой (15).

В сечении поверхности распределения (15) плоскостями, перпендикулярными осям будем иметь уравнение (17):

$$c_{11}(x-m_x)^2 + 2c_{12}(x-m_x)(y-m_y) + 2c_{13}(x-m_x)(z-m_z) + \\ + c_{22}(y-m_y)^2 + 2c_{23}(z-m_z)(y-m_y) + c_{33}(z-m_z)^2 = \lambda^2, \quad (17)$$

где  $\lambda$  произвольная константа.

Поскольку  $r_{ij} < 1$  значения коэффициентов  $c_{ij} > 0$ . Отсюда заключаем, что поверхность (17) 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 (17) являются корнями уравнения третьей степени относительно переменной  $\lambda$ , решив которое всегда получим три действительных корня. Найдем их в порядке возрастания  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ . Главные оси  $C < B < A$  также в порядке возрастания будут (18):

$$C = \sqrt{\frac{1}{\lambda_1}}, \quad B = \sqrt{\frac{1}{\lambda_2}}, \quad A = \sqrt{\frac{1}{\lambda_3}}. \quad (18)$$

Формулы (18) полностью решают задачу нахождения главных осей эллипсоида.

Смещение оползневого тела  $R$  равно (19):

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} = \sqrt{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3}}. \quad (19)$$

Все вышеприведенные формулы имеют место в общем случае, при любых случайных величинах  $(x, y, z)$ .

Рассмотрим 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 оси эллипсоида будут (20):

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \sigma_z, \\ B = \sqrt{\frac{2}{a_1 + a_2 + \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + 4a_3}}}, \\ A = \sqrt{\frac{2}{a_1 + a_2 - \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + 4a_3}}}. \end{array} \right. \quad (20)$$



Угол между осью абсцисс и большой полуосью эллипсоида вычислим по следующей формуле (21):

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left( \frac{2a_1 a_2}{a_1 - a_2} \right). \quad (21)$$

Таким образом, получено кубическое уравнение для определения главных осей ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) среднеквадратического эллипсоида смещения оползня на основе геодезического мониторинга.

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

Уровень оползневой безопасности  $S_{\text{оп}}$  (изменяется в пределах от 0 до 1) и степень оползневой опасности связаны между собой следующим соотношением:  $S_{\text{оп}} = 1 - R_{\text{оп}}$ , где  $R_{\text{оп}}$  - степень оползневой опасности ( $R_{\text{оп}} \in [0; 1]$ ).

Степень оползневой опасности будем определять по формуле (22):

$$R_{\text{оп}} = P(H) \cdot V_m(H), \quad (22)$$

где  $P(H)$  и  $V_m(H)$  - интегральные критерии уровня оползневой опасности и оползневой уязвимости (безразмерные коэффициенты), которые представляет собой долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной ситуации (сочетания показателей опасности и показателей уязвимости) на склоновой территории. Они должны занимать место между «идеальным» вариантом ( $P(H)^{\text{ид}} = 0$ ) и ( $V_m(H)^{\text{ид}} = 0$ ) и «негативно-идеальным» вариантом ( $P(H)^{\text{нег-ид}} = 1$ ) и ( $V_m(H)^{\text{нег-ид}} = 1$ ).

Интегральный критерий уровня оползневой опасности и оползневой уязвимости вычислим по формулам (23):

$$P(H) = k_{\text{норм}} \sum_{i=1}^n \delta_i W_i \quad \text{и} \quad V_m(H) = k_{\text{норм}} \sum_{i=1}^n \delta_i W_i, \quad (23)$$

где  $\delta_i$  - коэффициент значимости  $i$ -го показателя оползневой опасности (уязвимости);  $W_i$  - значение весового коэффициента  $i$ -го пока-

зателя оползневой опасности (уязвимости);  $k_{\text{норм}}$  – нормирующий множитель, приводящий к  $0 \leq P(H) \leq 1$  и  $0 \leq V_m(H) \leq 1$ .

Следовательно, оценка ключевой определяемой величины – степени оползневой опасности – сводится к задаче определения коэффициентов значимости оползневых опасностей и оползневых уязвимостей и их весовых коэффициентов.

Коэффициент значимости  $i$ -го оползневой опасности  $\delta_i$  представляет собой вероятность реализации  $i$ -й опасности (уязвимости) оползневой опасности, при этом интенсивность проявлений свойств соответствующего ему категории оползневой опасности (оползневой уязвимости) относится к определенному диапазону величин  $[a, b]$ , значения которых являются «рисковыми». Тогда коэффициент значимости  $i$ -го риска оползневой опасности (оползневой уязвимости) определяется на основании соотношения (24):

$$\delta_i = \int_a^b f(B_i) dB_i, \quad (24)$$

где  $B_i$  – интенсивность проявления свойств оползневой опасности (оползневой уязвимости) в зависимости от их потенциальной разрушительной силы, соответствующего  $i$ -му показателю оползневой опасности (оползневой уязвимости);  $f(B_i)$  – закон распределения (плотность вероятностей) интенсивности проявления свойств  $i$ -го показателя опасности (уязвимости) оползневой опасности.

Закон распределения  $f(B_i)$  строится стандартным образом в виде гистограммы, используя границы интервалов группировки значений интенсивности проявления свойств показателей опасности (уязвимости) оползневой опасности. 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 (уязвимости) оползневой опасности. И эта зависимость далее характеризует искомым закон распределения  $f(B_i)$ .

Предлагаемая методология математического моделирования и комплексной оценки оползневых рисков позволяет в полной мере

раскрыть вторую проблему-неопределенность, связанную с неполнотой информации о состоянии сложных СС, возникающую при решении проблем обеспечения оползневой безопасности и комплексной оценки рисков в СС.

**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.**

Поскольку под *оползневой опасностью* будем понимать негативную для нее вероятностную возможность реализации оползневых процессов, протекающих в природной, техногенной и антропогенной составляющих среды СС, то определим ее следующими показателями, которые можно получить по данным геодезических определений: а) крутизна  $\theta$  склона; б) высота  $H$  склона; в) объем  $V$  смещающихся пород оползня; г) скорость  $v$  смещения оползня. Степень уязвимости по всем четырем показателям устанавливаем по одному из 4-х категорий уязвимости, принимая во внимание известные значения параметров отличительных признаков (таблица 4).

Распределения вероятностей проявления показателей интенсивности свойств оползневого процесса, принадлежащих к «рисковому» интервалам разбиения диапазона опасности оползневых процессов показана на рисунке 3,  $a - z$ .

Получим соотношения полиномиальных зависимостей для функций распределения вероятностей интенсивности проявления (формулы (25), (26), (27) и (28)):

- крутизны склона:

$$f(\theta) = -0,0167\theta^3 + 0,1\theta^2 + 0,1167\theta - 1 \cdot 10^{-12}; \quad (25)$$

- высоты склона:

$$f(H) = -0,0417H^3 + 0,3H^2 - 0,358H + 0,3; \quad (26)$$

- объемов смещающихся пород:

$$f(V) = 0,0167V^3 - 0,15V^2 + 0,5333V + 0,2; \quad (27)$$

- скорости смещения оползня:

$$f(v) = 0,025v^3 - 0,225v^2 + 0,7v + 0,2. \quad (28)$$

Коэффициенты значимости оползневых опасностей на основании соотношения (24) для данных показателей опасностей будут:

$$\delta_{\theta} = 0,20; \quad \delta_H = 0,20; \quad \delta_V = 0,60; \quad \delta_v = 0,70.$$

Для определения весовых коэффициентов рассмотренных оползневых опасностей для всех категорий опасностей, необходимо учитывать такой показатель, как подверженность территории оползневому процессу, % (таблица 5).

Весовые коэффициенты оползневой опасности  $W_i$  рассчитываем по формуле (29)

$$W_i = \frac{Z_i}{\sum_{i=1}^n Z_i}, \quad (29)$$

где  $Z_i$  – значимость весового коэффициента  $i$ -ой категории оползневой опасности.

Сами величины  $Z_i$  определим на основании соотношения (30)

$$Z_i = \frac{S_i}{S}, \quad (30)$$

где  $S_i$  – площадь территории, (%), подверженной  $i$ -й категории оползневой опасности;  $S$  – общая площадь подверженности территории оползневым процессам (таблица 6).

Анализ результатов исследований показателей оползневой опасности на возможность реализации оползневых процессов на склоновых территориях, позволяет рекомендовать следующие ранжированные по степени значимости  $\delta_i$  и оцененные по соответствующей шкале весов  $W_i$  количественные оценки оползневой опасности, в которой каждой категории опасности присвоен соответствующий код (таблица 7).

Таким образом, уровень оползневой опасности склоновых территорий зависит от четырехмерного вектора ранжировок (таблица 8 (фрагмент)).

Коэффициенты значимости оползневых уязвимостей и их весовые коэффициенты определим по аналогии с оползневой опасностью. Поскольку под *оползневой уязвимостью* будем понимать

свойство строительного объекта терять способность к выполнению своих естественных функций вследствие его поражения оползневой опасностью определенной интенсивности и длительности воздействия, то определим ее следующими показателями, которые получают по данным геодезического мониторинга: а) трещины сооружений; б) осадки сооружений; в) горизонтальные перемещения сооружений; г) 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 9).

Распределение вероятностей проявления показателей интенсивности свойств оползневого процесса, принадлежащих к «рисковым» интервалам разбиения уязвимости оползневых процессов, показано на рисунке 4,  $a - z$ .

Определим соотношения полиномиальных зависимостей для следующих функций распределения вероятностей интенсивности проявления оползневой уязвимости сооружений по формулам (31), (32), (33) и (34):

- трещин:

$$f(T) = 0,0333T^3 - 0,25T^2 + 0,716T - 1 \cdot 10^{-12}; \quad (31)$$

- осадок:

$$f(S) = -0,0333S^3 + 0,25S^2 - 0,4167S + 0,8; \quad (32)$$

- горизонтальных перемещений:

$$f(\Delta S) = 0,025\Delta S^3 - 0,2\Delta S^2 + 0,57\Delta S + 0,3; \quad (33)$$

- крена:

$$f(K) = 0,025K^3 - 0,225K^2 + 0,7K + 0,2. \quad (34)$$

Коэффициенты значимости оползневых уязвимостей на основании соотношения (24) для данных показателей уязвимостей имеют вид

$$\delta_T = 0,50; \quad \delta_S = 0,60; \quad \delta_{\Delta S} = 0,70; \quad \delta_K = 0,70.$$

Для определения весовых коэффициентов необходимо перемножить соответственно по категориям показатели подверженности территорий оползневым процессам и повторяемости между собой.

Получим структуру комплексной уязвимости склоновой территории от оползневых процессов с учетом повторяемости (таблица 10).

Весовые коэффициенты оползневой уязвимости  $W_i$  рассчитаны по аналогии с весовыми коэффициентами оползневой опасности по формулам (29) и (30), в которых  $Z_i$  – значимость весового коэффициента  $i$ -ой категории оползневой уязвимости;  $S_i$  – площадь территории, (%), подверженной  $i$ -й категории оползневой уязвимости с учетом повторяемости случаев в год;  $S$  – общая площадь, (%), подверженности территории оползневым процессам (таблица 11).

Анализ результатов исследований показателей оползневой уязвимости вероятностной возможности поражения сооружений оползневой опасностью вследствие реализации оползневых процессов, позволяет рекомендовать следующие ранжированные по степени значимости  $\delta_i$  и оцененные по соответствующей шкале весов  $W_i$  количественные оценки оползневой уязвимости, в которой каждой категории уязвимости присвоен соответствующий код (таблица 12).

Таким образом, уровень оползневой уязвимости склоновых территорий зависит от четырехмерного вектора ранжировок. Результат этой методики представлен в виде таблицы 13 (фрагмент).

Описание категорий по степени оползневого риска можно рекомендовать следующим образом (таблица 14).

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 (35)

$$R_{\text{р-на}} = \frac{\sum_{i=1}^k P(H)_i \cdot V_m(H)_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^k S_i} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^k S_i}, \quad (35)$$

где  $k$  – количество склоновых территорий в районе, подверженных оползневым процессам;  $S_i$  – площади склоновых территорий, для которых оценены степени риска поражения оползневыми процессами.

Аналогично, по формуле (36) можно рассчитать степень риска поражения оползневыми процессами целого региона.

$$R_{\text{per}} = \frac{\sum_{i=1}^k R_{\text{р-на},i} \cdot S_{\text{р-на},i}}{\sum_{i=1}^k S_{\text{р-на},i}}, \quad (36)$$

где  $k$  – количество районов в регионе, подверженных оползневым процессам;  $S_i$  – площади районов для которых оценены степени риска поражения оползневым процессам.

Таким образом, системный анализ результатов геодезического мониторинга и комплексные оценки рисков СС в условиях воздействия геодинамических факторов позволяет в полной мере разрешить третью и частично первую проблемы-неопределенности, связанные с неполнотой информации о пространственном распределении внешнего воздействия на систему и неопределенности в поведении СС.

**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.**

При проектировании зданий и сооружений на склонах возникает необходимость наиболее точного прогноза напряжений и деформаций в основании. Предложим методику корректировки расчетных характеристик грунтов, слагающих склон, используя данные скоростей смещения оползня, полученных по нескольким циклам геодезического мониторинга.

Сущность предлагаемой методики 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 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 методики 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.

В качестве примера рассмотрим смещения Карамышевского оползня, полученные по данным геодезического мониторинга и инженерно-геологических изысканий по первым четырем циклам (таблица 15, рисунок 5).

Из таблицы 15 видно, что деформации по результатам расчета в среднем выше на 12,2%, чем деформации поверхности склона по данным геодезического мониторинга. Был выполнен повторный расчет, значения характеристик грунтов в котором были повышены на 12,2%.

Результаты такого расчета можно сравнить с результатами всех циклов геодезического мониторинга (таблица 16). При хорошей сходимости можно утверждать, что предложенная в данной работе методика позволяет прогнозировать деформации поверхности склонов во времени. Точный прогноз деформаций поверхности склона во времени позволит проектировать сооружения на его поверхности с наибольшей экономической выгодой.



Как видно из графика (рисунок 6), геомеханическая модель с уточненными характеристиками грунтов ведет себя более близко по отношению к реальному склону по сравнению с первоначальной. В приведенных выше расчетах данных геодезического мониторинга достаточно, чтобы обеспечить сходимость результатов расчета с уточненными характеристиками грунтов с данными съемок до 2%, что говорит об общей хорошей сходимости данной методики.

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. На рисунке 7 представлен график зависимости средней деформации поверхности склона от времени без учета и с учетом результатов геодезического мониторинга, соответственно.

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.

### **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.

**Перспективы развития темы диссертации.** Предложенная в настоящей диссертации 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### *Публикации в изданиях из Перечня ВАК*

1. **Симомян, В.В.** Анализ смещений оползней / В.В. Симомян // Геодезия и картография. М. : № 3, 2009. – С. 33-36.
2. **Симомян, В.В.** Инструментальное определение деформаций стен Борисоглебского монастыря / В.В. Симомян, А.И. Кузнецов // Геодезия и картография. М. : № 10, 2010. - С. 30-32.
3. **Симомян, В.В.** Анализ векторного поля скоростей на оползневом склоне и определение характеристик реального векторного поля для оползневых процессов / В.В. Симомян, С.К. Варламов // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2011 – №1. – С. 227 – 233.
4. **Симомян, В.В.** Применение случайных функций для анализа оползневых процессов / В.В. Симомян, М.Н. Калинина // Вестник

Московского государственного строительного университета. – 2011. – №1. – С. 233 – 239.

5. **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. 2011. – №1. – Т 2. – С. 239 – 244.

6. **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.

7. **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.

8. **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.

9. **Симонян, В.В.** К разработке модели оползневой 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.

10. **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.

11. 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.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus*

12. **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.

13. **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.

14. **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.

15. **Simonyan, V.V.** Calculating the accuracy of strain observations of high-rise buildings and structures using electronic total stations / V.V. Simonyan, S.V. Shendypina // E3S Web of Conferences 164, 02022 (2020) Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019). 9 p.

*Публикации в прочих изданиях:*

16. **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.

17. **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.

18. **Симонян, В.В.** Сравнительный анализ методов створных измерений с целью оценки применимости этих методов для геодезического мониторинга протяженных объектов / В.В. Симонян, А.В. Лабужнов, Н.В. Ангелова, М.С. Савин // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». 2011. - № 003-04. С. 20-30.

19. **Симонян, В.В.** Экспериментальные исследования по установлению уравнения регрессии, описывающего закономерности деформаций земной коры при землетрясениях / В.В. Симонян // Междуна-

родный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». 2013. – № 04. С. 22-28.

20. **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.

21. **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.

22. **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.

23. **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.

24. **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.

25. **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.

26. **Симонян, В.В.** Вероятностный анализ потенциальных возможностей оползневых смещений / В.В. Симонян, А.Г. Тамразян // Журнал "Безопасность жизнедеятельности". № 2 (194). 2017. – С. 28-32.

27. **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 инновацион-

ного развития науки» (23 июня 2017 г., Волгоград) в 3 ч. Уфа : 2017. С. 87-97.

28. **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.

29. **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.

30. **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.

31. **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.

32. **Симонян, В.В.** Оценка оползневых рисков и безопасность сооружений / В.В. Симонян // В сборнике: Международный научный семинар «Опасные для строительства геозкологические 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.

33. **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.

34. **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.

35. **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.

#### *Монографии*

36. **Симонян, В.В.** Изучение оползневых процессов геодезическими методами: монография / В.В. Симонян // 2-е изд. М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. М.: МГСУ, 2015. – 176 с.

37. **Симонян, В.В.** Геодезический мониторинг зданий и сооружений как основа контроля за безопасностью при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений: монография / В.В. Симонян, Н.А. Шмелин, А.К. Зайцев; под общ. ред. к.т.н., 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.

#### *Свидетельства*

38. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017616941 Российская Федерация. Обобщенный среднеквадратический эллипсоид смещений оползней : № 2017613674 ; заявл. 21.04.2017 ; опубл. 20.06.2017 / **В.В. Симонян**, А.Г. Тамразян // заявитель НИУ МГСУ. – 1 с.

39. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663549 Российская Федерация. Расчет величин смещений оползней (длина, направление) : № 2020662495 ; заявл. 28.10.2020 ; опубл. 28.10.2020 / **В.В. Симонян** // заявитель НИУ МГСУ. – 1 с.

40. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620977 Российская Федерация. Оценка оползневых рисков : № 2021620871 ; заявл. 30.04.2021 ; опубл. 18.05.2021 / **В.В. Симонян** // заявитель НИУ МГСУ. – 1 с.



Таблица 1 – Значения СКО  $\sigma_S$  смещений в зависимости от скоростей

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

Таблица 2 - Значения интервала времени  $\Delta t$  между циклами наблюдений

$V$ , мм/мес	5	10	15	20	30	40	50	70	100
$\Delta t$ , мес	13	6,5	4,3	3,2	2,2	1,6	1,3	0,9	0,6



Рисунок 1 - Вытянутый ход полигонометрии

Рисунок 2 - Нормальное поле распределения векторов смещений оползня в пространстве

Таблица 3 - Допустимая длина хода  $L_{KM}$  для различных значений  $q_1$ ,  $n$  и  $T$

$T = 3$				$T = 2$			
$n$	$q_1=0,25$	$q_1=1$	$q_1=2,25$	$n$	$q_1=0,25$	$q_1=1$	$q_1=2,25$
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	-	-	-	-
6	0,82	0,41	0,27	-	-	-	-
7	0,63	0,32	0,21	-	-	-	-

Таблица 4 –Шкала оползневой опасности

Показатели оползневых опасностей	Категории опасности оползневых процессов			
	Чрезвычайно опасные	Весьма опасные	Опасные	Умеренно опасные
Крутизна, град	> 35	20 - 35	8 - 20	4 - 8
Высота, м	> 400	250 - 400	40 - 250	< 40
Объем, м <sup>3</sup>	10 - 20	5 - 10	0,001 - 5	< 0,001
Скорость, м/год	4,5 - 6	3 - 4,5	1,5 - 3	0 - 1,5

Таблица 5 – 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

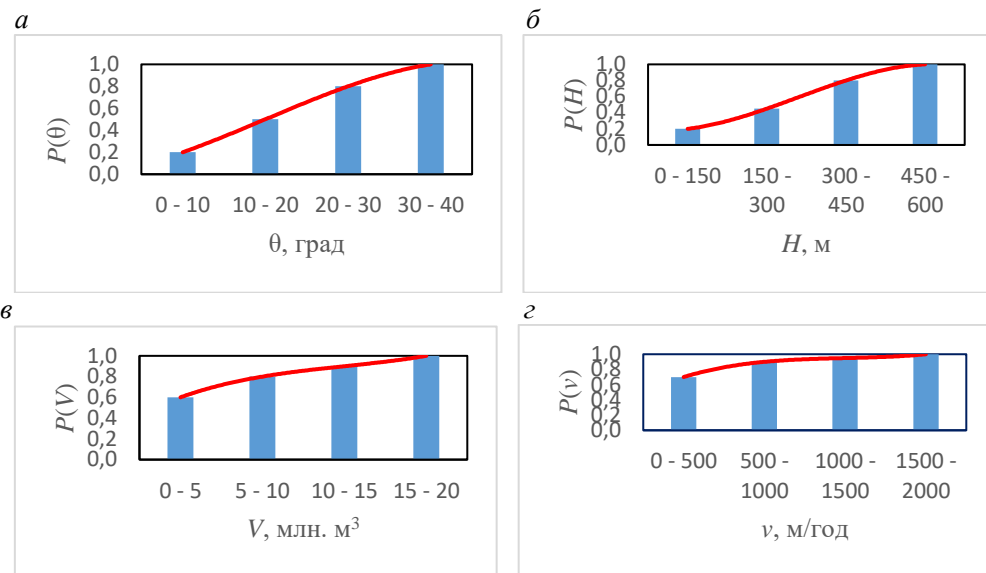


Рисунок 3 - Функция распределения вероятностей проявления интенсивности крутизны  $P(\theta)$  (а), высоты  $P(H)$  (б), объемы смещающихся пород  $P(V)$  (в), скорости смещения  $P(v)$  оползня (z)

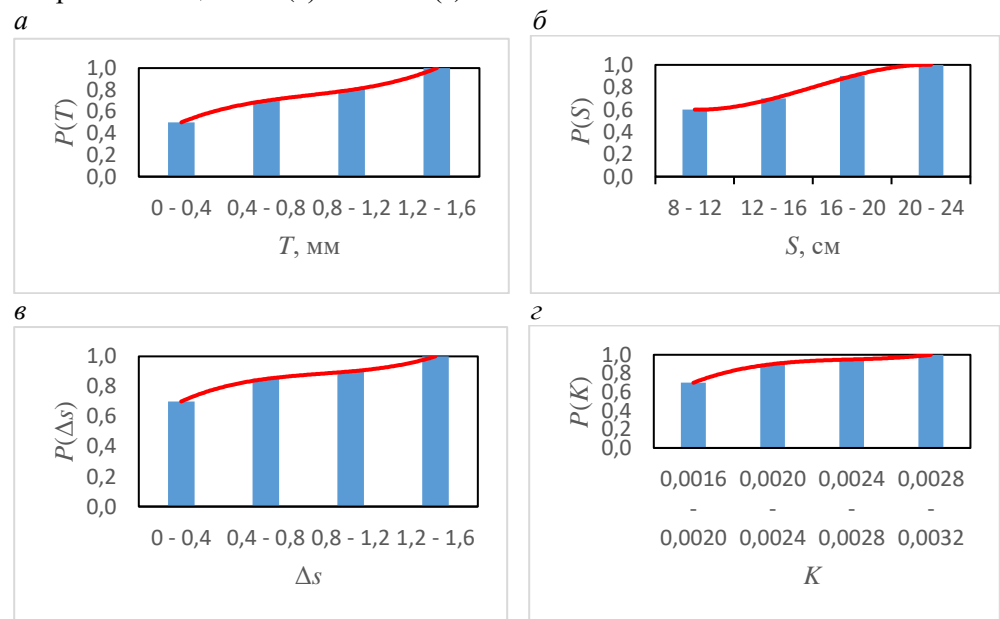


Рисунок 4 - Функция распределения вероятностей проявления интенсивности трещины  $P(T)$  (а), осадки  $P(S)$  (б), горизонтальные перемещения  $P(\Delta s)$  (в), крена  $P(K)$  (z) сооружения

Таблица 6 - Значения величин  $W_i$  и  $Z_i$

Категории опасности оползневых процессов	Значимость $Z_i$	Весовой коэффициент оползневой опасности $W_i$
Умеренно опасные	0,01	0,02
Опасные	0,055	0,08
Весьма опасные	0,20	0,30
Чрезвычайно опасные	0,40	0,60
	$\Sigma = 0,665$	1,00

Таблица 7 – Количественные оценки оползневой опасности

Показатели оползневой опасности	Категории опасности	Код	Весовой коэф-т $W_i$	Коэф-т значимости $\delta_i$
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	

Таблица 8 - Оценка критерия уровня оползневой опасности  $P(H)$  ( $k_{\text{норм}} = 0,9804$ )

Код	$P(H)$	Код	$P(H)$	Код	$P(H)$	Код	$P(H)$
0000	0,0333	1122	0,4137	2222	0,5000	3330	0,6020
0001	0,0745	1123	0,6196	2223	0,7059	3331	0,6431
0002	0,2255	1130	0,3980	2230	0,4843	3332	0,7941
0003	0,4314	1131	0,4392	2231	0,5255	3333	1,0000

Таблица 9 – Шкала оползневой уязвимости

Показатели оползневых уязвимостей	Категории уязвимости оползневых процессов			
	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 м	1,1 м	0,5 м	0,2 м
Крены	0,004	0,0035	0,003	0,002

Таблица 10 – Структура комплексной подверженности территории оползневым процессам

Категории опасности оползневых процессов	Подверженность территории оползневым процессам, % с учетом повторяемости
Умеренно опасные	0,75
Опасные	2,75
Весьма опасные	3,50
Чрезвычайно опасные	4,00

Таблица 11 - Значения величин  $W_i$  и  $Z_i$

Категории опасности оползневых процессов	Значимость $Z_i$	Весовой коэф-т 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

Таблица 12 – Количественные оценки оползневой уязвимости

Показатели оползневой уязвимости	Категории уязвимости	Код	Весовой коэф-т $W_i$	Коэф-т значимост и $\delta_i$
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	

Таблица 13 – 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	1122	0,8033	2222	0,8889	3330	0,7744
0001	0,3344	1123	0,8344	2223	0,9200	3331	0,9144
0002	0,3889	1130	0,6400	2230	0,7255	3332	0,9689
0003	0,4200	1131	0,7800	2231	0,8655	3333	1,0000

Таблица 14 - 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
$0,3 \leq R < 0,5$	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

Таблица 15 - Сравнение результатов предварительного расчета с результатами геодезического мониторинга

Циклы	1	2	3	4
Данные геодезического мониторинга, мм	14	29	43	59
Данные первоначального расчета, мм	16,1	33,2	48,5	66,2

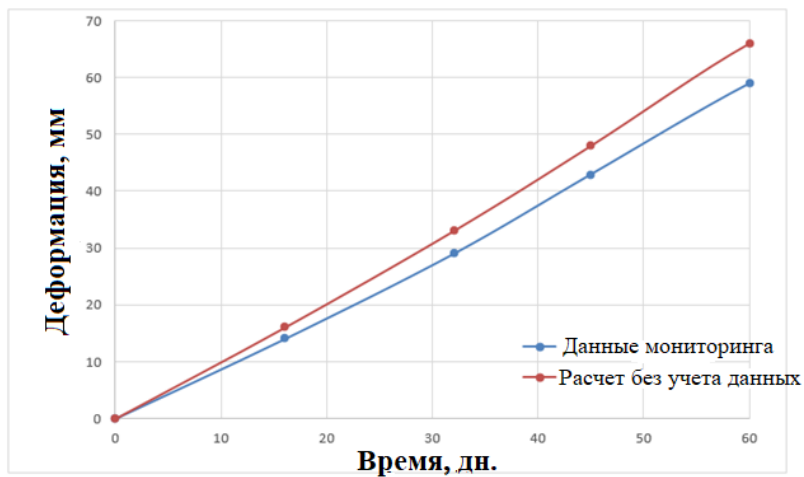


Рисунок 5 - Деформации поверхности склона

Таблица 16 - Сравнение результатов уточненного расчета с результатами геодезического мониторинга

№ цикла	1	2	3	4	5	6	7
Данные геомониторинга, мм	14	29	43	59	69	90	104
Данные уточненного расчета, мм	13,2	28,1	40,6	55,2	65,4	87,1	103,2

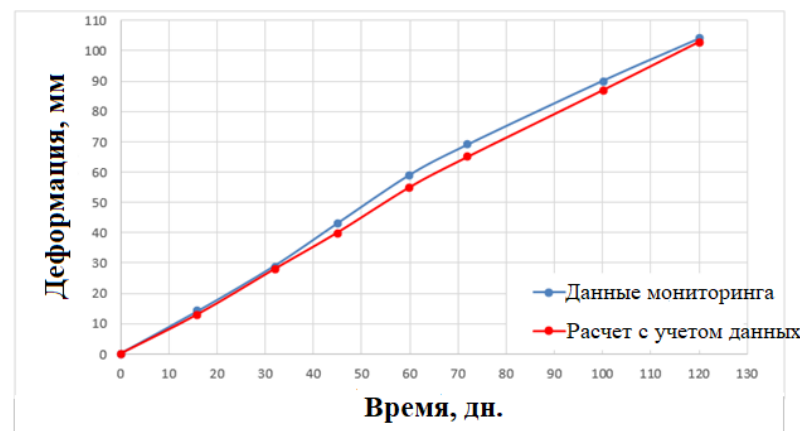


Рисунок 6 - Деформации поверхности склона по результатам расчета и по данным геодезического мониторинга

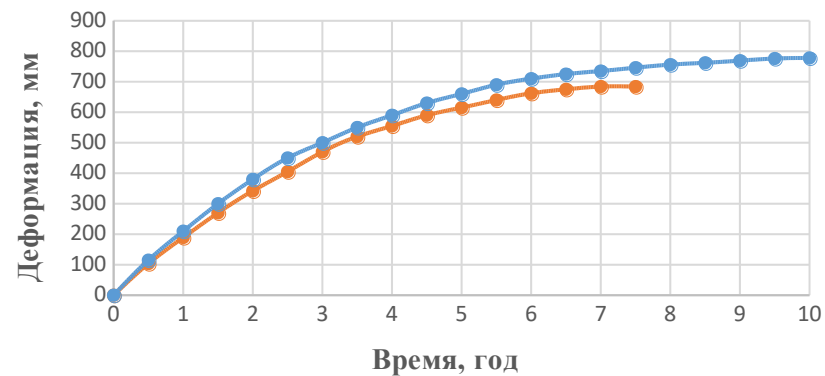


Рисунок 7 - График зависимости средней деформации поверхности склона от времени без- и с учетом (синяя и красная линии) геодезического мониторинга