

На правах рукописи

Филиппов Владимир Геннадьевич



**ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДОВ
НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ СКЛОНОВ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ СПУТНИКОВОГО
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

Специальность 1.6.22. Геодезия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Кузин Антон Александрович

Официальные оппоненты:

Хорошилов Валерий Степанович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра космической и физической геодезии, профессор;

Куприянов Андрей Олегович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», кафедра прикладной геодезии, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва

Защита диссертации состоится **30 июня 2025 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.8 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 30 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЕНКО
Татьяна Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Природное образование в виде склона зачастую таит в себе опасность на предмет возникновения оползня. Несмотря на развитие технологий прогнозирования и инженерной защиты, склоновые процессы остаются трудно контролируемыми и негативно влияют на сооружения, инфраструктуру и нередко приводят к человеческим жертвам. Важность изучения оползневых процессов подтверждается Постановлениями Правительства Российской Федерации (РФ): «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (№ 794 от 30.12.2003 (ред. от 17.01.2024)), «О силах и средствах системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (№ 1007 от 08.11.2013 (ред. от 05.04.2022)), «О Порядке сбора и обмена в Российской Федерации информацией в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (от 24.03.1997 № 334 (ред. от 16.06.2022)) и другими.

Исследование оползневых деформаций склонов по геодезическим, геологическим, гидрогеологическим и другим данным позволяет рационально выбирать место строительства новых инженерных объектов, а также способствует безопасной эксплуатации уже существующих сооружений.

Периодические геодезические наблюдения на оползне направлены на определение положения деформационных пунктов, закреплённых в его теле, что позволяет оценивать величины смещений оползней и прогнозировать дальнейшее состояние склоновой системы. Определение координат и высот деформационных пунктов, закреплённых в теле оползня, может осуществляться разными методами: линейно-угловых измерений, технологией спутникового позиционирования, методами дистанционного зондирования Земли, аэрофотосъёмки, фотограмметрии, воздушного лазерного сканирования и другими.

Действующая в РФ нормативная документация регламентирует геодезические методы наблюдений за оползневыми склонами, но в недостаточной мере освещены методики работ на основе современных геодезических приборов. В этой связи задачи наблюдения, обработки и интерпретации результатов геодезических наблюдений за оползневыми деформациями склонов с использованием технологии спутникового позиционирования являются актуальными, а их решение способствует усилению роли геодезического обеспечения в рамках комплексных исследований опасных склоновых процессов и снижению рисков, связанных с оползневой активностью.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в теорию и практику геодезических наблюдений за деформациями оползневых склонов и склоновых систем внесли видные российские и зарубежные учёные: В.И. Волков, А.Г. Григоренко, А.К. Зайцев, О.В. Зеркаль, Н.Г. Келль, В.Г. Конусов, А.А. Кузин, В.В. Кюнтцель, Г.П. Левчук, Д.Ш. Михелев, М.Г. Мустафин, В.С. Новак, О.Г. Павловская, В.В. Симонян, В.С. Хорошилов, М.Ј. Auflič, Z. Bai, G. Huang, L. Podolszki, P. Sestras, B. Severine, P.G. Sudani и другие.

Исследованиями оценки стабильности опорных геодезических сетей активно занимались Г.К. Ботян, Н.А. Буденков, М.Я. Брынь, Д.А. Быкасов, В.Н. Ганьшин, Б.Н. Дьяков, А.В. Зубов, В. Карпенко, А. Костехель, В.А. Коугия, Ю.И. Маркузе, В.М. Мартусевич, П. Марчак, А.Ф. Стороженко, Ю.Е. Федосеев, В.Ф. Черников, М. Abbasi, A. Amiri-Simkooei, M. Eshagh, I. Klein и другие.

Изучением оползней с точки зрения их геологической составляющей, проблем оценки устойчивости склонов, а также решения горнотехнических задач занимались такие российские и зарубежные учёные, как А.А. Барях, Д. Варсана, В.В. Глазунов, Р.Э. Дашко, Е.П. Емельянова, Г.С. Золотарёв, И.П. Иванов, В.Д. Ломтадзе, Ю.М. Львович, А.П. Павлов, И.В. Попов,

Г.П. Постоев, Ф.П. Саваренский, Э.И. Старовойтов, К. Терцаги, Г.Л. Фисенко, С. Шарпа, С. Chen, С. Comina, G. Fubelli, A. Vergnano и другие.

Предмет исследования – геодезические методы оценки оползневых деформаций.

Объект исследования – склоновые системы и изменение их геометрических параметров.

Цель работы – повышение точности оценки кинематических характеристик оползневого процесса за счёт разработки методики совместного использования линейно-угловых измерений и технологий спутникового позиционирования.

Идея заключается в использовании технологии спутникового позиционирования в режимах «статика» и «кинематика в реальном времени» и специальных линейно-угловых тахеометрических измерений для оценки оползневого процесса и интерпретации результатов на основе аппроксимации плоскости и определения её системы «центроид – нормаль – точка на нормали».

Задачи исследования:

1. Анализ изученности вопроса геодезического обеспечения наблюдений оползневых деформаций склоновых систем.
2. Разработка нового алгоритма оценки стабильности опорных сетей аппроксимацией плановых координат и высот её пунктов плоскостью.
3. Разработка способа классификации методов и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений.
4. Обоснование применения технологии спутникового позиционирования в режиме реального времени при наблюдениях деформационных пунктов в теле оползня.
5. Разработка метода определения положения недоступных для прямой видимости и наблюдений технологией спутникового позиционирования деформационных пунктов в теле

оползня линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения.

Научная новизна:

1. Установлена зависимость величин отклонений опорных пунктов пространственной сети на основе применения системы «центроид – нормаль – точка на нормали» аппроксимирующей плоскости, приближенной по методу наименьших квадратов, характеризующих её стабильность.

2. Определена зависимость точности измерения смещений оползня технологией спутникового позиционирования в режиме реального времени от условий и параметров наблюдений: продолжительности сеанса наблюдений, удаления ровера от базовой станции, точности ГНСС-приёмника на основе разработанного регламента, учитывающего условия и параметры наблюдений.

3. Получены зависимости точности определения положения деформационных пунктов в теле оползня при многократных наблюдениях с наклонами вехи от способов её установки на пункт.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 1.6.22. Геодезия по пунктам: 3, 4, 9.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработке нового метода оценки стабильности опорной сети аппроксимацией плановых координат и высот её пунктов плоскостью; формировании классификации выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений; обосновании возможности применения технологии спутникового позиционирования в режиме реального времени при наблюдениях за оползневыми деформациями; модификации способа линейно-угловых измерений с принуди-

тельными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения в случае отсутствия прямой видимости между пунктами на оползне.

Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс компанией ООО «Научно-производственное предприятие «БЕНТА», что подтверждается актом внедрения от 15.11.2024.

Методология и методы исследования. В исследовании вопросов геодезического обеспечения наблюдений за деформациями склонов на основе технологии спутникового позиционирования использованы теоретические методы (математическое моделирование, аналитико-статистический анализ для оценки результатов моделирования) и экспериментальные методы (анализ производственных данных результатов оползневых смещений, натурные исследования оползня геодезическими методами).

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценку стабильности пространственной опорной сети целесообразно выполнять по отклонениям от аппроксимирующей плоскости, представляющей собой систему «центроид – нормаль – точка на нормали», определяемой после каждого цикла наблюдений деформационного процесса склона.

2. Использование предложенного регламента применения технологии спутникового позиционирования в режиме реального времени, учитывающего точность ГНСС-приёмника, количество наблюдаемых эпох и удаление ровера от базовой станции позволяет достичь нормативной точности определения оползневых смещений 20 мм в плане и 10 мм по высоте.

3. Положение деформационных пунктов на оползне при отсутствии условий применения технологии спутникового позиционирования возможно определять по результатам линейно-угловых измерений с использованием разработанного способа принудительного отклонения вехи.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается согласованностью результатов теоретических расчётов с результатами экспериментальных наблюдений на местности, а также апробацией результатов исследований на оползневом склоне левого берега реки Тосны и на производственных объектах ООО «НПП «БЕНТА».

Апробация результатов диссертации. За последние 3 года принято участие в 10 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных: Национальная научно-практическая конференция «Устойчивое развитие земельно-имущественного комплекса муниципального образования: землеустроительное, кадастровое и геодезическое сопровождение» (ноябрь 2022 года, г. Омск), XXII Всероссийская конференция «Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения – 2022)» (ноябрь 2022 года, г. Иркутск), XI Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства «Технологическая интеграция» (декабрь 2022 года, г. Минск), Научная конференция студентов и молодых учёных «Полезные ископаемые России и их освоение» (апрель 2023 года, г. Санкт-Петербург), XVI Всероссийская конференция «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (ноябрь 2023 года, г. Пермь), XX Международная выставка и научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (май 2024 года, г. Новосибирск), XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (май 2024 года, г. Санкт-Петербург), V Всероссийская научно-практическая конференция «Геодезия, Картография, Геоинформатика и Кадастры. Инновации в науке, образовании и производстве» (октябрь 2024 года, г. Санкт-Петербург), Научная конференция студентов и моло-

дых учёных Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II «Полезные ископаемые и их освоение» (октябрь 2024 года, г. Санкт-Петербург), XX Всероссийская конференция-конкурс «Актуальные проблемы недропользования» (декабрь 2024 года, г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора:

- выполнение анализа российской и зарубежной литературы по вопросам наблюдения оползневых склонов;

- разработка алгоритма оценки стабильности опорных геодезических сетей на оползневых склонах по пространственным координатам, а также программного обеспечения для его реализации;

- разработка классификации условий и параметров геодезических наблюдений на оползне по получаемой точности определения смещений деформационных пунктов в теле оползня технологией спутникового позиционирования в режиме реального времени;

- разработка метода прогнозирования величин смещений оползня типа «крип» по геодезическим данным на основе линейной аппроксимации величин смещений и анализа изменения коэффициентов уравнения полученной прямой;

- выполнение полевых геодезических работ, обработка и интерпретация данных на оползневом склоне левого берега реки Тосны (Ленинградская область), подтверждающих возможность применения разработанной методики.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 12 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 4 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования

(Scopus). Получен 1 патент и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 292 наименования, и 16 приложений. Диссертация изложена на 211 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков и 54 таблицы.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, к.т.н., доценту А.А. Кузину за неоценимый вклад на всех этапах написания диссертации, преподавателям и сотрудникам кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и лично её заведующему, д.т.н., доценту М.Г. Мустафину за важные замечания и предложения по написанию диссертационной работы.

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 рассмотрены существующие методы наблюдений за деформациями оползневых склонов. Выделены требующие внимания вопросы необходимой точности наблюдений на оползневых склонах, применяемого оборудования и порядка проведения работ. Сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены предлагаемые автором: классификация методов и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений; алгоритм оценки стабильности опорных сетей аппроксимацией плановых координат и высот её пунктов плоскостью; дано обоснование применения технологии спутникового позиционирования в режиме реального времени при наблюдениях деформационных пунктов

в теле оползня; разработан метод определения положения недоступных для прямой видимости и наблюдений технологией спутникового позиционирования деформационных пунктов в теле оползня.

В третьей главе проведены теоретические исследования предлагаемых методик на примере тест-объектов, пунктов сети дифференциальных геодезических станций (СДГС), анализе оползня вблизи Миатлинской гидроэлектростанции и Кой-Таш-верх в городе Майлуу-Суу в Кыргызстане. Доказана возможность применения предлагаемых методик на оползневых склонах.

В четвёртой главе проведены натурные измерения, направленные на исследование деформационного процесса оползневого склона левого берега реки Тосны. В конце четвёртой главы подведены итоги применения методики на объекте, проанализированы полученные результаты, даны рекомендации к применению методики при наблюдениях оползневых склонов.

В заключении приведены основные результаты выполненных исследований и выводы по ним.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Оценку стабильности пространственной опорной сети целесообразно выполнять по отклонениям от аппроксимирующей плоскости, представляющей собой систему «центроид – нормаль – точка на нормали», определяемой после каждого цикла наблюдений деформационного процесса склона.

Наблюдение за деформациями склонов вследствие оползневых процессов предполагает наличие стабильной опорной сети, пространственные координаты пунктов которой с достаточной точностью можно получить спутниковой технологией позиционирования в режиме «статика». Оценку

стабильности в каждом цикле наблюдений предлагается выполнять аппроксимацией пространственных координат опорных пунктов плоскостью, определением положения её характерных элементов (центроида плоскости, нормали к плоскости и точки на нормали к плоскости), и анализом изменения их положений. По величинам изменения положений характерных элементов плоскости между циклами можно оценивать, сохранила ли опорная сеть стабильность, а по направлению смещений определять нестабильные опорные пункты в сети (рисунок 1).

Направляющие косинусы нормали рассчитываются по формулам (1) – (3):

$$\cos \alpha = \frac{I}{\sqrt{I^2 + J^2 + K^2}}, \quad (1) \quad \cos \beta = \frac{J}{\sqrt{I^2 + J^2 + K^2}}, \quad (2)$$

$$\cos \gamma = \frac{K}{\sqrt{I^2 + J^2 + K^2}}, \quad (3)$$

где α, β – углы между положительными направлениями осей координат X, Y и нормалью к плоскости, градусы, γ – угол между отвесной линией и нормалью к плоскости, градусы, I, J, K – коэффициенты, связанные с нормалью к плоскости направляющими косинусами.

Положение центроида плоскости C рассчитывается как среднее арифметическое из соответствующих значений координат и высот опорных пунктов.

Положение точки на нормали к плоскости N определяется соотношениями (4) – (6):

$$X_N = X_C \cdot \cos \alpha \cdot S_M, \quad (4) \quad Y_N = Y_C \cdot \cos \beta \cdot S_M, \quad (5)$$

$$H_N = H_C \cdot \cos \gamma \cdot S_M, \quad (6)$$

где X_C, Y_C, H_C – плановые координаты и высота центроида плоскости C , м, S_M – длина наибольшей средней линии фигуры, полученной в результате ограничения плоскости ломаной линией, построенной по вершинам наиболее удалённых от центроида плоскости C опорных пунктов, м.

Алгоритм анализа смещений характерных элементов плоскости представлен на рисунке 2 и в таблице 1.

Критерием стабильности пунктов при выполнении статических ГНСС-наблюдений предлагается паспортная точность приёмников.

Предложенный метод оценки стабильности пространственной опорной сети показал хорошую сходимость с методом Костехеля (по высоте) и последовательного анализа (в плане).

Разработанным методом была выполнена оценка стабильности пунктов СДГС ГЕОСПАЙДЕР по 5 циклам статических наблюдений в период с 12.04.2021 г. по 11.04.2022 г., была подтверждена их стабильность на данный период в пределах точности установленных на пунктах ГНСС-приёмников.

Метод также был использован при наблюдениях за смещениями оползневого склона левого берега реки Тосны. Согласно принятой в нормативной литературе классификации, оползень относится к типу скольжения, крип, детрузивный, асеквентный, циркуобразный, крупный по площади, неглубокий, средний по объёму, очень медленный, в геоморфологическом отношении приурочен к Предглинтовой низменности, распространены глинистые отложения: нижнекембрийские глины (Є1) лонтоваского горизонта, перекрытые верхнечетвертными озерно-ледниковыми отложениями (lgIII), представленные суглинками. Мощность четвертичных отложений порядка 5 метров. За пределами оползня было заложено 4 опорных пункта, один из которых оказался в нестабильной зоне. Векторы между пунктами в каждом из 4 циклов определялись в режиме «статика» тремя ГНСС-приёмниками EFT M4 в течение 2 часов, после чего выполнялся расчёт координат и высот пунктов и оценка стабильности опорной сети. Предложенный метод оценки стабильности позволил надёжно определить и исключить нестабильный опорный пункт (таблица 2).

2. Использование предложенного регламента применения технологии спутникового позиционирования в режиме реального времени, учитывающего точность ГНСС-приёмника, количество наблюдаемых эпох и удаление ровера от базовой станции позволяет достичь нормативной точности определения оползневых смещений 20 мм в плане и 10 мм по высоте.

Положение деформационных пунктов в теле оползня предлагается определять технологией спутникового позиционирования в режиме реального времени (RTK). Получаемая точность координат и высот при этом зависит от факторов: априорная точность ГНСС-оборудования (ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы), длительность сеанса наблюдений, удаление ровера от базовой станции, количество наблюдаемых спутников и их геометрия, значение факторов снижения точности (DOP), способ подключения к базовой станции (одиночная базовая станция или сетевой режим). Варьируя значениями этих факторов, были определены такие, при которых средняя квадратическая погрешность (СКП) определения смещения деформационного пункта на оползнеопасном склоне относительно опорных не превышает 20 мм в плане и 10 мм по высоте согласно своду правил 420.1325800.2018.

В ходе разработки регламента проведён ряд экспериментов, основанных на сравнении спутниковых измерений с эталонными, полученными с более высокой точностью. Выбрано такое место для экспериментов, где часть небосвода была закрыта препятствиями. В твёрдом покрытии были закреплены дюбели через различные расстояния и высоту, имитируя смещение на оползневом склоне. Расстояния между дюбелями были многократно определены штангенциркулем МИ-1115, превышения – цифровым нивелиром Sokkia SDL50. СКП определения эталонных значений вычислялись по формуле (7) и со-

ставили $m_s = 0,34$ мм и $m_h = 0,58$ мм. Далее, выполнялись многократные определения координат и высот дюбелей в RTK различными ГНСС-приёмниками (EFT M4, Trimble R8, Topcon Hiper V) при различных условиях: количестве эпох от 10 до 240, удалении ровера от базовой станции от 1 до 10 км и др. По разностям высот и решениям обратных геодезических задач между пунктами получены измеренные в RTK расстояния и превышения. Полученные расстояния и превышения принимались как горизонтальные и вертикальные смещения и сравнивались с эталонными. Оценка точности определения смещений выполнялась по формуле (8).

$$m_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n-1}}, \quad (7) \quad m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n}}, \quad (8)$$

где x_i – измеренная величина в данной итерации, x_0 – среднее из всех значений измеренных величин, x – эталонное значение величины, мм, n – количество серий измерений, ед.

В результате экспериментов была получена зависимость величины СКП определения горизонтальных и вертикальных смещений от количества наблюдаемых эпох и удаления от базовой станции. Наилучшие результаты были получены при удалении ровера EFT M4 от базовой станции не более чем на 1 км и количестве эпох не менее 180 при частоте измерений 1 Гц: СКП горизонтальных смещений составили 7 мм и вертикальных – 9 мм, что удовлетворяет требованиям свода правил 420.1325800.2018. На основании исследования составлен регламент наблюдений за смещениями деформационных пунктов на оползне технологией RTK из 5 классов (таблица 3).

Апробация предлагаемого регламента выполнена на рабочих и деформационных пунктах оползневого склона левого берега реки Тосны (рисунок 3). Наблюдения выполнены согласно классам 1 и 2 регламента, СКП смещений не превысили нормативных значений.

3. Положение деформационных пунктов на оползне при отсутствии условий применения технологии спутникового позиционирования возможно определять по результатам линейно-угловых измерений с использованием разработанного способа принудительного отклонения вехи.

В случае невозможности использования на оползневом склоне технологий спутникового позиционирования применяют линейно-угловые измерения. При отвесном положении вехи видимость между прибором и призмённым отражателем может отсутствовать в последующих циклах наблюдений ввиду значительного смещения деформационного пункта вследствие оползневой деформации, вновь появившейся растительности и т.д.

Чтобы исключить необходимость в наблюдении на призмённый отражатель при отвесном положении вехи, предлагается определять плановые координаты и высоту узловой точки призмённого отражателя (съёмочного пикета) при наклоне вехи в нескольких её положениях, без проецирования высотной отметки вниз на величину высоты вехи (рисунок 4). Полученные съёмочные пикеты (4 и более) с плановыми координатами X_i , Y_i и высотами H_i аппроксимируют сферой. Ввиду того, что все съёмочные пикеты будут получены при наклоне вехи, высота которой будет неизменна, отражатель на вехе будет описывать сферу, центр которой будет совпадать с местом установки остря вехи (положением деформационного пункта).

При проведении исследования были рассмотрены факторы, влияющие на точность: СКП определения плановых координат отражателя методом полярной засечки и высоты методом тригонометрического нивелирования (формулы (9) – (10)), СКП из-за смещения узловой точки отражателя, влияние которой сводится к минимуму при использовании отражателей с постоянной $-17,5$ для минипризм диаметром 25 мм или -40 для

минипризм, диаметром 62 мм, а также СКП аппроксимации съёмочных точек сферой, влияние которой минимизируется при наблюдениях согласно схеме на рисунке 4.

$$m_{XY} = \sqrt{m_S^2 + \frac{S^2 \cdot m_\beta^2}{\rho^2}}, \quad (9)$$

$$m_H = \sqrt{\left(\frac{m_v}{\rho} \cdot S \cdot \cos v\right)^2 + (m_S \cdot \sin v)^2 + m_i^2 + m_v^2}, \quad (10)$$

где m_S – СКП измерения расстояний, м, S – измеренное наклонное расстояние, м, m_β , m_v – СКП измерения горизонтальных/вертикальных углов, ", $\rho = 206265''$, v – измеренный вертикальный угол наклона, ", m_i – СКП измерения высоты прибора, м, m_v – СКП измерения высоты отражателя, м.

В ходе экспериментов СКП определения положения деформационного пункта составили величины от 1 до 6,5 мм в зависимости от условий наблюдения (рисунок 5). Метод был задействован при наблюдениях за смещениями оползневого склона левого берега реки Тосны: были определены плановые координаты и высоты 24 деформационных пунктов, недоступных для ГНСС-измерений. Полученные результаты имеют сходимость с экспериментальными наблюдениями: наибольшая СКП определения центра и радиуса сферы составила 4 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научная задача – повышение точности оценки кинематических характеристик оползневого процесса.

На основании выполненных исследований:

1. Разработан метод оценки стабильности опорной сети аппроксимацией плановых координат и высот её пунктов плоскостью. Новый метод позволяет оценивать стабильность опорных сетей в пространстве по данным спутниковых наблюдений.

2. Предложен способ классификации методов и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых

смещений. Предложенный способ классификации позволяет обосновать применение методов и оборудования при различных скоростях оползневых смещений.

3. Выполнено исследование технологии RTK, по результатам которой подготовлена комплексная и универсальная методика определения пространственных смещений наблюдаемых оползневых склонов на основе технологии спутникового позиционирования в режиме реального времени.

4. Предложен метод определения положения недоступных для прямой видимости и наблюдений технологией спутникового позиционирования деформационных пунктов в теле оползня путём выполнения линейно-угловых измерений с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения.

5. Разработан метод корректировки прогноза оползневых смещений по функции, полученной путём линейной аппроксимации величин смещений.

6. Эффективность предложенной методики подтверждена в ходе математических расчётов, моделирований различных возможных вариантов оползневых смещений, а также в ходе её применения при выполнении наблюдений за оползневыми склонами геодезическими методами.

Предлагаемая методика рассмотрена на примерах оползней типа «крип» с равномерными скоростями смещений. В дальнейшем возможно расширить исследование для других типов оползней, а также рассмотреть другие виды аппроксимации, помимо линейной (степенная, экспоненциальная, логарифмическая) при прогнозировании величин оползневых смещений. Предложенный метод оценки стабильности опорных геодезических сетей возможно рассмотреть для применения в других видах геодезических работ с использованием опорных геодезических сетей. К перспективам развития темы

исследования можно отнести вопросы выбора критерия стабильности опорных геодезических сетей.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Кузин, А.А. Метод оценки стабильности геодезических сетей по пространственным координатам на основе аппроксимации координат плоскостью / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов** // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29. – № 6. – С. 5–22. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-6-5-22>.

2. Кузин, А.А. Разработка алгоритма выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений на примере Миатлинской ГЭС / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов** // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28. – № 4. – С. 22–37. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-4-22-37>.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus):

3. Кузин, А.А. Метод определения плановых координат и высоты рабочего репера на оползне с принудительными отклонениями вехи от отвесного положения / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов** // Геодезия и картография. – 2024. – № 9. – С. 2–11. – URL: <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1011-9-2-11>.

4. Кузин, А.А. Прогнозирование величин оползневых смещений на основе геодезических данных / А. А. Кузин, **В.Г. Филиппов** // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 3. – С. 1176–1191. – URL: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1176-1191>.

5. Кузин, А.А. Исследование технологии спутникового позиционирования в режиме реального времени (RTK) для наблюдения за оползневыми деформациями / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов** // Устойчивое развитие горных территорий. –

2024. – Т. 16. – № 4. – С. 1594–1609. – URL: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-4-1594-1609>.

6. Шабаров, А.Н. Методика маркшейдерско-геодезических наблюдений оползневой системы склоновой системы на основе данных спутниковых определений / А.Н. Шабаров, А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 2. – С. 130–144. – URL: https://giab-online.ru/files/Data/2025/2/2_2025_130-144.pdf.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

7. Патент № 2821434 Российская Федерация, МПК G01B 11/03 (2006.01), G01C 15/04 (2006.01); СПК G01B 11/03 (2024.01), G01C 15/04 (2024.01). Способ определения смещений оползня. Заявка № 2024111107: заявл. 23.04.2024: опубл. 24.06.2024 / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов**; заявитель/патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 13 с.: ил. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67988212>.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682111 Российская Федерация. Программа определения положения центра и радиуса сферической поверхности по пространственным координатам. Заявка № 2023681106: заявл. 13.10.2023: опубл. 23.10.2023 / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов**; заявитель/правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=56001220>.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610546 Российская Федерация. Программа оценки стабильности геодезических сетей по пространственным координатам. Заявка № 2023689408: заявл. 27.12.2023: опубл. 11.01.2024 / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов**; заявитель/правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59916340>.

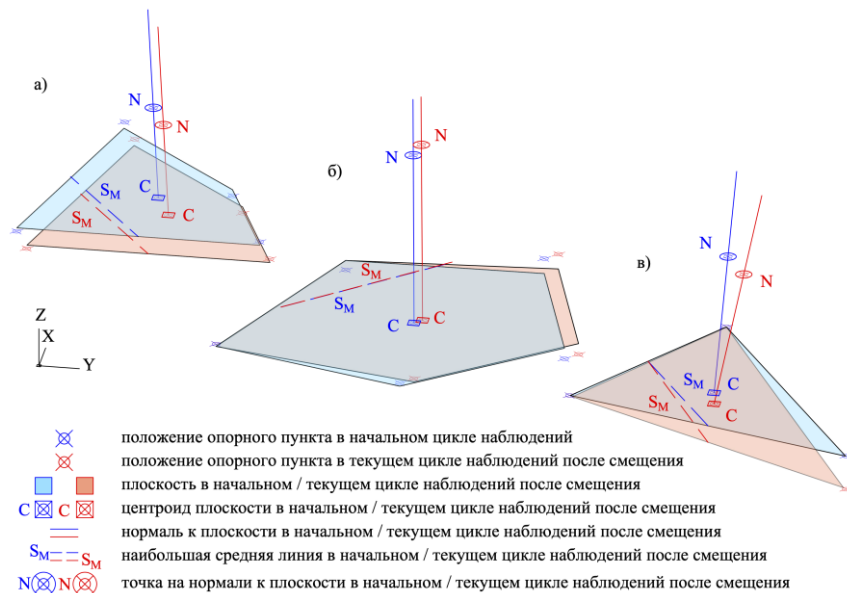


Рисунок 1 – Характерные элементы плоскости (центр тяжести плоскости C , нормаль к плоскости, точка на нормали к плоскости N), полученной путём аппроксимации плановых координат и высот опорных пунктов при различных видах их смещений (а) смещение в пространстве всех опорных пунктов; б) горизонтальное смещение части опорных пунктов; в) вертикальное смещение части опорных пунктов)

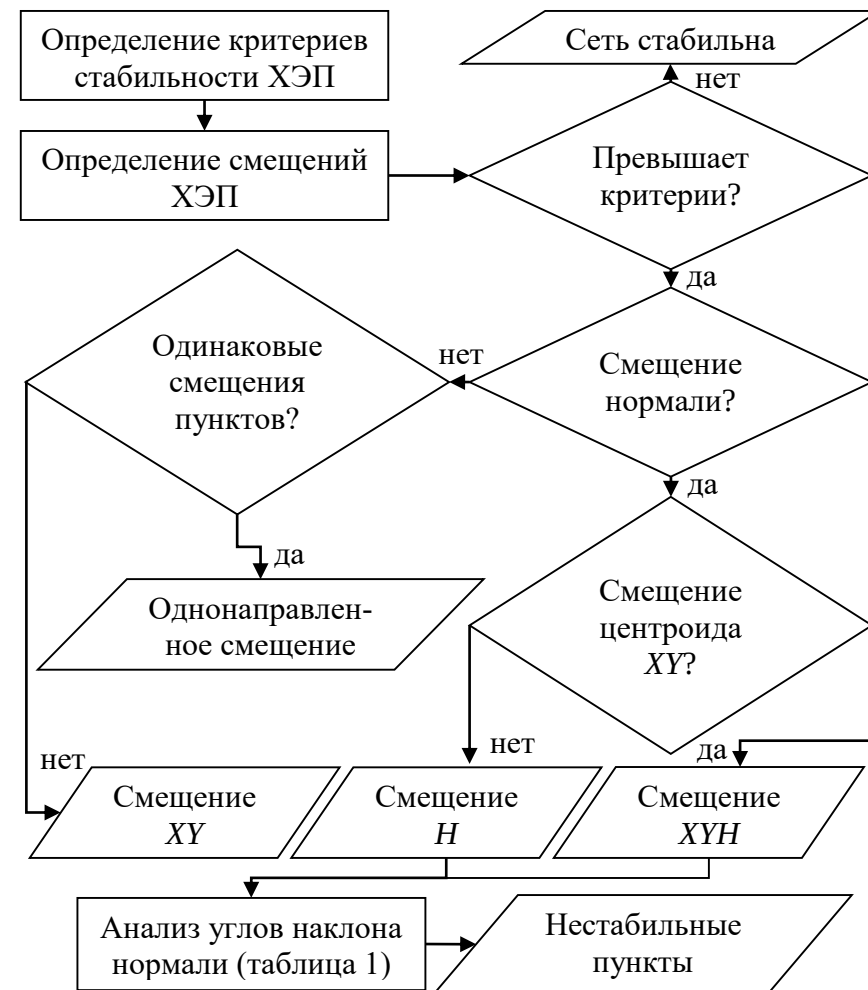


Рисунок 2 – Блок схема алгоритма определения нестабильных пунктов опорной сети и характера их смещений (ХЭП – характерные элементы плоскости, XY – в плане, H – по высоте, XYZ – в пространстве)

Таблица 1 – Выводы о смещениях опорных пунктов по анализу углов α , β , γ наклона нормали к плоскости

Соотношения	Вывод
$\Delta\alpha > m\alpha$, $\Delta\alpha > 0$ $\Delta\beta < m\beta$ $\Delta\gamma > m\gamma$, $\Delta\gamma \approx \Delta\alpha$	Осадка опорных пунктов с $X_k < X_C$, поднятие с $X_k > X_C$
$\Delta\alpha > m\alpha$, $\Delta\alpha < 0$ $\Delta\beta < m\beta$ $\Delta\gamma > m\gamma$, $\Delta\gamma \approx \Delta\alpha$	Осадка опорных пунктов с $X_k > X_C$, поднятие с $X_k < X_C$
$\Delta\alpha < m\alpha$ $\Delta\beta > m\beta$, $\Delta\beta > 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$, $\Delta\gamma \approx \Delta\beta$	Осадка опорных пунктов с $Y_k < Y_C$, поднятие с $Y_k > Y_C$
$\Delta\alpha < m\alpha$ $\Delta\beta > m\beta$, $\Delta\beta < 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$, $\Delta\gamma \approx \Delta\beta$	Осадка опорных пунктов с $Y_k > Y_C$, поднятие с $Y_k < Y_C$
$\Delta\alpha > m\alpha$, $\Delta\alpha > 0$ $\Delta\beta > m\beta$, $\Delta\beta > 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$	Осадка опорных пунктов с $X_k < X_C$, $Y_k < Y_C$, поднятие с $X_k > X_C$, $Y_k > Y_C$
$\Delta\alpha > m\alpha$, $\Delta\alpha > 0$ $\Delta\beta > m\beta$, $\Delta\beta < 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$	Осадка опорных пунктов с $X_k < X_C$, $Y_k > Y_C$, поднятие с $X_k > X_C$, $Y_k < Y_C$
$\Delta\alpha > m\alpha$, $\Delta\alpha < 0$ $\Delta\beta > m\beta$, $\Delta\beta > 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$	Осадка опорных пунктов с $X_k > X_C$, $Y_k < Y_C$, поднятие с $X_k < X_C$, $Y_k > Y_C$
$\Delta\alpha > m\alpha$, $\Delta\alpha < 0$ $\Delta\beta > m\beta$, $\Delta\beta < 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$	Осадка опорных пунктов с $X_k > X_C$, $Y_k > Y_C$, поднятие с $X_k < X_C$, $Y_k < Y_C$

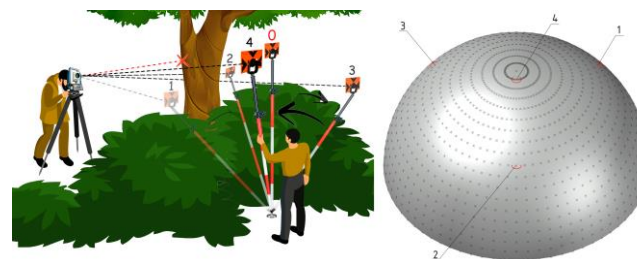


Рисунок 4 – Схема расположения вехи при наблюдении методом по определению плановых координат и высоты деформационного пункта линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения (0 – отвесное положение; 1 – первое положение вехи при наклоне 45° ; 2 – второе положение вехи при наклоне 45° и повороте вокруг деформационного пункта на 120° ; 3 – третье положение вехи при наклоне 45° и повороте вокруг деформационного пункта на 120° ; 4 – четвертое положение вехи при наклоне 10°)

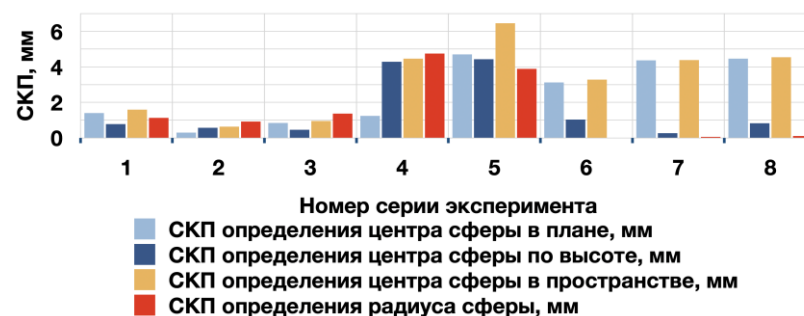


Рисунок 5 – Гистограмма величин СКП определения плановых координат, высоты центра сферы и её радиуса линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения при различных условиях наблюдений

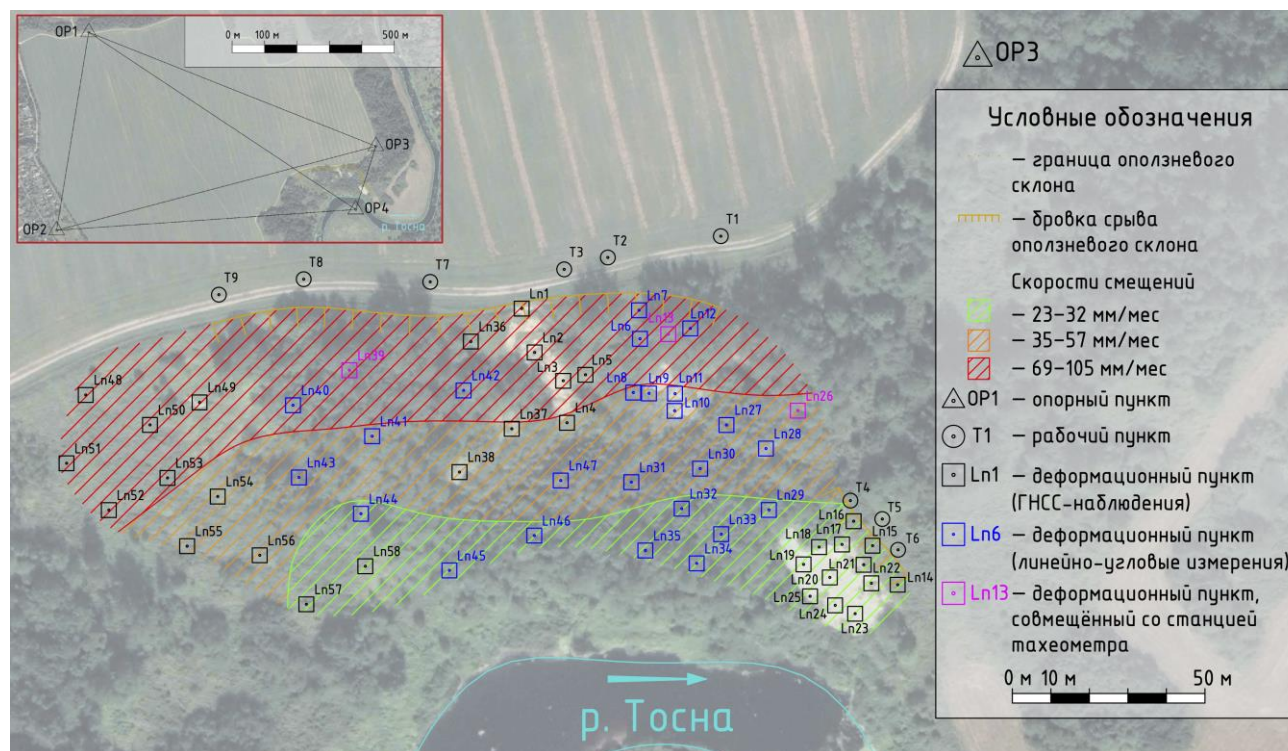


Рисунок 3 – Зоны оползневого склона левого берега реки Тосны по скоростям смещений

Таблица 2 – Величины смещений характерных элементов плоскости и критерии их стабильности для наблюдений за смещениями оползневого склона левого берега реки Тосны

№ циклов наблюдений	ΔX_C , м	ΔY_C , м	ΔH_C , м	α	β	γ	ΔX_N , м	ΔY_N , м	ΔH_N , м
0 – 1	0,000	0,000	0,002	0°00'01,42"	0°00'01,83"	0°00'01,10"	0,003	0,004	0,001
1 – 2	0,000	0,003	0,002	0°00'01,76"	0°00'00,73"	0°00'01,38"	0,004	0,001	0,003
2 – 3	0,001	0,000	0,016	0°00'04,13"	0°00'08,71"	0°00'06,31"	0,010	0,020	0,015
Критерий стабильности	0,003	0,003	0,006	0°00'05,37"	0°00'02,78"	0°00'02,99"	0,013	0,007	0,007

Таблица 3 – Классификация условий и параметров наблюдений по получаемой точности определения смещений деформационных пунктов в теле оползня технологией RTK ($m_{S_{XY}}$, m_{S_H} – СКП определения горизонтальных/вертикальных смещений, мм, m_{XY} , m_H – априорная точность определения плановых координат/высоты, мм + мм/км, БС – базовая станция, XY – наблюдение горизонтальных смещений, H – наблюдение вертикальных смещений)

Условие/параметр наблюдения	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5
СКП определения смещений	$m_{S_{XY}}$: 7 m_{S_H} : 9	$m_{S_{XY}}$: 8 m_{S_H} : 9	$m_{S_{XY}}$: 8 m_{S_H} : 10	$m_{S_{XY}}$: 19 m_{S_H} : 38	$m_{S_{XY}}$: 20 m_{S_H} : 31
Априорная точность ГНСС-оборудования	m_{XY} : 5 + 0,5 m_H : 10 + 0,8	m_{XY} : 5 + 0,5 m_H : 10 + 0,8	m_{XY} : 5 + 0,5 m_H : 10 + 0,8	m_{XY} : 10 + 1,0 m_H : 15 + 1,0	m_{XY} : 8 + 1,0 m_H : 15 + 1,0
Маска возвышения, °	10	10	10	10	10
Частота измерений, Гц	1	1	1	1	1
Минимальное количество используемых ГНСС-систем, ед	4	4	4	2	2
Минимальное количество общих наблюдаемых спутников ровера с базовой станцией, ед	23	23	23	10	9
Максимальное значение PDOP, ед	1,1	1,1	1,1	2,4	2,1
Режим подключения к базовой станции	Одиночная БС/сетевой режим	Одиночная БС/сетевой режим	Одиночная БС/сетевой режим	Одиночная БС/сетевой режим	Одиночная БС/сетевой режим
Удаление наблюдаемого пункта от базовой станции, м	1007	1007	1987	5011	10020
Количество наблюдаемых эпох, ед	180	120	120	10	10
Деформационные пункты	XY, H	XY, H	XY, H	XY	XY
Рабочие пункты	XY, H	XY, H	XY	XY	–