

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Филиппов Владимир Геннадьевич



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

Специальность 1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Кузин А.А.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ.....	11
1.1 Обоснование необходимости исследования оползневой опасности склонов.....	11
1.2 Состояние изученности вопроса наблюдений за оползневыми склонами геологическими, гидрогеологическими, геомеханическими и другими методами	13
1.2.1 Обзор разработанных классификаций оползневых склонов.....	13
1.2.2 Факторы, влияющие на деформационные процессы оползневых склонов.....	15
1.2.3 Применение инженерно-геологических данных при изучении оползневых процессов.....	16
1.2.4 Применение инженерно-гидрогеологических, геоморфологических и геофизических данных при изучении оползневых процессов	18
1.2.5 Применение методов моделирования для расчёта напряжённо-деформированного состояния оползневого склона геомеханическими методами	20
1.2.6 Основные свойства и классификации грунтов, используемые в геомеханических расчётах	22
1.2.7 Расчёт устойчивости оползневых склонов геомеханическими методами.....	24
1.3 Состояние изученности вопросов наблюдения оползневых склонов геодезическими методами	25
1.3.1 Обзор нормативной документации, регламентирующей порядок проведения работ по инженерным изысканиям на оползневых склонах	25
1.3.2 Обзор применяемых геодезических методов при наблюдениях за оползневыми деформациями	28
1.3.3 Обзор применяемых методов оценки стабильности опорных сетей при наблюдениях за оползневыми деформациями.....	35
1.3.4 Обзор методов прогнозирования оползневых смещений	36
1.4 Постановка задачи наблюдения оползневых склонов геодезическими методами	38
1.5 Выводы по главе 1	39
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ.....	41
2.1 Разработка метода оценки стабильности опорных сетей аппроксимацией плановых координат и высот их пунктов плоскостью.....	41
2.2 Разработка способа выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений	62

2.3 Разработка метода определения положения деформационных пунктов технологией RTK с увеличенным периодом наблюдений	68
2.4 Разработка метода определения положения деформационных пунктов линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения	71
2.5 Разработка метода прогнозирования величин оползневых смещений линейной аппроксимацией с дальнейшей корректировкой функции	76
2.6 Выводы по главе 2.....	80
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	82
3.1 Исследование метода оценки стабильности опорных сетей аппроксимацией плановых координат и высот их пунктов плоскостью.....	82
3.1.1 Исследование метода на примере модельных сетей.....	82
3.1.1 Исследование метода по данным наблюдений сети ГЕОСПАЙДЕР.....	84
3.2 Исследование способа выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений	88
3.2.1 Характеристика оползня вблизи Миатлинской ГЭС	89
3.2.2 Исследование способа выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений на примере оползня вблизи Миатлинской ГЭС	91
3.3 Исследование метода определения положения деформационных пунктов технологией RTK с увеличенным периодом наблюдений	97
3.4 Исследование метода определения положения деформационных пунктов линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения	106
3.5 Исследование метода прогнозирования величин оползневых смещений линейной аппроксимацией с дальнейшей корректировкой функции	115
3.5.1 Характеристика оползня Кой-Таш-верх в городе Майлуу-Суу в Кыргызстане	116
3.5.2 Исследование метода прогнозирования величин оползневых смещений по геодезическим данным на примере оползневого склона вблизи Миатлинской ГЭС и оползня Кой-Таш-верх в городе Майлуу-Суу в Кыргызстане.....	117
3.6 Выводы по главе 3.....	123
ГЛАВА 4 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	125
4.1 Применение методики наблюдений оползневых склонов геодезическими методами при определении величин смещений оползневого склона левого берега реки Тосны	125
4.1.1 Характеристика оползневого склона левого берега реки Тосны	126

4.1.2 Закрепление опорной и деформационной сетей для наблюдений оползневого склона левого берега реки Тосны.....	129
4.1.3 Определение положения опорных пунктов технологией спутникового позиционирования в режиме «статика»	130
4.1.4 Оценка стабильности опорной сети аппроксимацией плановых координат и высот её пунктов плоскостью.....	133
4.1.5 Определение положения деформационных пунктов технологией RTK с увеличенным периодом наблюдений	137
4.1.6 Определение положения деформационных пунктов линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения	138
4.1.7 Результаты геодезических наблюдений оползневого склона левого берега реки Тосны..	140
4.1.8 Прогнозирование величин оползневых смещений по геодезическим данным.....	143
4.2 Выводы по главе 4.....	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	147
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	148
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения.....	181
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение «Способ определения смещений оползня».....	182
ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа оценки стабильности геодезических сетей по пространственным координатам»	183
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа определения положения центра и радиуса сферической поверхности по пространственным координатам»	184
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Классификация оползневых процессов	185
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Блок-схема алгоритма определения нестабильных опорных пунктов и характера их смещений.....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Плановые координаты и высоты деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны, полученные с применением технологии RTK (местная система координат «МСК-47 зона 2»).....	191
ПРИЛОЖЕНИЕ И Плановые координаты и высоты рабочих пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны, полученные с применением технологии RTK (местная система координат «МСК-47 зона 2»)	194
ПРИЛОЖЕНИЕ К Плановые координаты и высоты деформационных пунктов, полученных линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения на оползневом склоне левого берега реки Тосны.	195

ПРИЛОЖЕНИЕ Л Скорости смещений деформационных пунктов оползневого склона левого берега реки Тосны, полученные по результатам геодезических наблюдений с 0 (15.07.2023 г.) по 3 (28.07.2024 г.) циклы наблюдений	198
ПРИЛОЖЕНИЕ М Уравнения прогноза смещений деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны по данным 0 – 1 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 07.10.2023 г.)	200
ПРИЛОЖЕНИЕ Н Прогнозные величины смещений деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны на 27.04.2024 г. по данным 0 – 1 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 07.10.2023 г.)	202
ПРИЛОЖЕНИЕ П Уравнения прогноза смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны по данным 0 – 2 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 27.04.2024 г.)	204
ПРИЛОЖЕНИЕ Р Прогнозные величины смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны на 28.07.2024 г. по данным 0 – 2 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 27.04.2024 г.)	206
ПРИЛОЖЕНИЕ С Уравнения прогноза смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны по данным 0 – 3 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 28.07.2024 г.)	208
ПРИЛОЖЕНИЕ Т Прогнозные величины смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны на 19.07.2025 г. по данным 0 – 3 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 28.07.2024 г.)	210

ВВЕДЕНИЕ

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, M.J. Auflić, 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. Брынть, Д.А. Быкасов, В.Н. Ганышин, 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, M. Abbasi, A. Amiri-Simkoeei, 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 принудительными 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 (приложение А).

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 молодых 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 (пункты списка литературы № 45 – 54, 127, 136), 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, в 4 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получен 1 патент (приложение Б) и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (приложения В, Г).

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.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ

1.1 Обоснование необходимости исследования оползневой опасности склонов

Исследования и обработка статистических данных по всему миру показывают, что к настоящему году число природных катаклизмов с каждым годом имеет тенденцию на увеличение. В последнее столетие число природных катаклизмов и число их жертв значительно возросло. По данным Организации Объединённых Наций, за последние 20 лет произошло порядка 7056 природных катаклизмов, в которых 1,35 миллиона людей погибли и 4,2 миллиарда людей пострадали [236]. На государственном уровне тратятся колоссальные по своим объёмам бюджетные средства на устранение последствий разрушительных действий природных катаклизмов. При этом цены на мероприятия по ликвидации катастроф имеют тенденцию на рост: для РФ общая сумма выплат на ликвидации чрезвычайных ситуаций разного характера в 2018 году составляла 11 миллиардов рублей, в то время как в 2019 году сумма составила уже порядка 20 миллиардов рублей. Существенный рост цен в совокупности с увеличивающимся числом случаев отрицательно сказывается на благосостоянии государств, подвергающихся катаклизмам. Директором Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и ликвидации чрезвычайных ситуаций Сергеем Диденко в 2020 году отмечено, что при инвестировании подобных объёмов средств в профилактику чрезвычайных ситуаций, из резервного фонда можно было бы сэкономить порядка 230 миллиардов рублей, а расходы на профилактику чрезвычайных ситуаций в 12 раз эффективнее, чем на ликвидацию их последствий [32]. Вопрос поиска методов, способов, инструментов, направленных на снижение числа жертв природных катастроф, минимизация разрушительного влияния процессов стоит на повестке дня различных государств, независимо от их материального благосостояния, занимаемой площади, плотности населения или его численности.

Возникновение чрезвычайных ситуаций зачастую связано с оползневой активностью. Оползни относятся к опасным природным явлениям, сопровождающимся сходом со склонов масс грунта, горных пород под действием силы тяжести или в совокупности с оказываемыми на склон дополнительными нагрузками, вызванными природными или техногенными факторами. Нередки случаи схода оползней непосредственно в населённых пунктах, а также в близком расположении от них, что представляет реальную угрозу жизни и здоровью проживающих там людей. Самым большим из известных оползней считается оползень в горах Харт Маунтинз в штате Вайоминг (в настоящее время – территория Соединённых Штатов Америки). Оползень сошёл порядка тридцати миллионов лет назад и покрыл площадь в две тысячи квадратных километров [26]. Оползневая опасность в штате не стала единичным случаем: в 2010 году были

зафиксированы обрушения склона на территории национального лесопарка Бриджер-Титон вблизи курортного города Джексон, также располагающегося в штате Вайоминг Соединённых Штатов Америки. Оползень был вызван сейсмической активностью, сопровождавшейся землетрясением магнитудой 4,6. На момент активизации оползня его скорость достигала 2,5 см/сут [13].

Наиболее крупным за последние столетия считается оползень, сошедший на Центральном Памире в ночь с 18 на 19 февраля 1911 г. (в настоящее время – территория Горно-Бадахшанской автономной области Республики Таджикистан). Оползень, вызванный сильным землетрясением (магнитудой 9 баллов), накрыл собой деревню Усой, все жители которой погибли в результате катастрофы. Оползень получил название «Усойский завал» и имел огромные масштабы: его объём составил 2,2 км³, масса – 6 млрд тонн, длина – 5 км, ширина – 3,2 км, площадь – 10,8 км², высота – 567 м. Подобная высота завала послужила естественной плотиной для реки Мургаб, что послужило причиной образования Сарезского озера [101]. Образовавшееся озеро и в наши дни представляет угрозу и опасность Таджикистана, Афганистана, Узбекистана и Туркмении, так как в случае повторных сейсмических колебаний возможно разрушение естественной плотины, что создаст бурные селевые потоки, а также повлечёт за собой затопление огромного количества населённых пунктов. По предварительным оценкам, на 2022 год в потенциально опасной зоне проживает порядка 6 млн человек [70].

В настоящее время также известны случаи оползневой активности. В 2021 году на туркменском побережье Каспийского моря был обнаружен крупнейший активный оползень на суше. Скорость его смещения на данный момент составляет 2,5 см/год, однако эта величина непостоянна и напрямую зависит от уровня воды в бассейне. Объём сдвигающихся масс составляет порядка 10 км³, оползневой участок вытянут вдоль береговой линии на 25 км и удаляется в сторону суши на 5 км. При этом сходу оползня способствует геологическое строение территории: известняковые блоки скользят по пластам глин [69].

Территория РФ не является исключением для перечисления случаев оползневой активности. Около 40 % территории России подвержены оползневому смещению по условиям рельефа и геологическим особенностям местности [34]. В Европейской части России наиболее уязвимыми территориями остаются Ставропольский край, Краснодарский край, республика Дагестан [95], Кабардино-Балкарская республика, республика Северная Осетия, Чечено-Ингушетия, а также Чувашская республика [102]. Сход наиболее крупного оползня за последние годы отмечен в Хабаровском крае, в результате которого была перекрыта река Бурея. Масса оползня составила порядка 4 тонн, а причиной его схода стал подмыв подножья склона [125]. В Краснодарском крае величина территорий, подверженных оползневому смещению возрастает к югу, доходя до 80 % в пределах Сочи. На территории Кавказских Минеральных Вод активизация

оползней отмечается с 1989 года в среднем каждые 3 – 4 года, а на территории Алании процент территорий, подверженных оползневым смещениям доходит до 85 % в некоторых административных районах [41].

Подобные величины распространения оползней обуславливают необходимость их изучения различными методами, в том числе геодезическими, которые позволяют выполнить количественную оценку величин оползневых смещений и, как следствие, прогнозирование опасных оползневых подвижек. Появление современных геодезических приборов позволяет повысить точность прогноза скоростей и величин схода оползневых масс. Эти и другие факторы позволяют минимизировать ущерб, приносимый сходом оползней.

1.2 Состояние изученности вопроса наблюдений за оползневыми склонами геологическими, гидрогеологическими, геомеханическими и другими методами

Изучение оползней связано не только с геодезией, но и с такими науками, как инженерная геология, геодезия, гидрогеология, геоморфология, геофизика, геомеханика, маркшейдерское дело. Изучение оползней может осуществляться по самым разным наборам исходных данных, среди которых можно выделить не только отдельные вышеперечисленные виды изысканий как средства получения данных, но и объединение методов для расширения области знания об исследуемом объекте [39].

1.2.1 Обзор разработанных классификаций оползневых склонов

На сегодняшний день широко распространены различные классификации, подготовленные как отечественными учёными, так и зарубежными исследователями [93, 132]. Классификация оползней может способствовать выделению определённых методов, с помощью которых возможно наблюдение тех или иных видов оползневых склонов при определённых факторах [4]. Выделение категорий по определённым признакам позволяет принимать конкретные действия и использовать те методы, которые будут наиболее эффективны при наблюдениях за смещениями на оползневом склоне. Среди таких признаков можно выделить тип рельефа, структуру оползневого материала [287], возраст оползня [253] и многие другие факторы.

Одни из первых классификаций в СССР были созданы такими учёными, как И.В. Попов, А.П. Павлов, Ф.П. Саваренский и Г.С. Золотарёв. Учёными были предложены две классификации:

- региональная;
- генетическая.

И.В. Поповым было введено понятие «региональный тип оползней». Согласно такой классификации, оползни группировались по регионам. В каждом из регионов оползни с общими

геологическими, литологическими и климатическими условиями распределялись по возрасту. Позднее А.П. Павловым в дополнение к возрасту было предложено включить разделение по формам развития. В классификации Ф.П. Саваренского в качестве признаков использовалось строение оползневого склона и положение поверхности скольжения оползня (ПСО) относительно слагающих склон пород. В работах Г.С. Золотарёва, по наработкам И.В. Попова, А.П. Павлова и Ф.П. Саваренского, а также зарубежных коллег была составлена общая инженерно-геологическая классификация гравитационных склоновых процессов. Основываясь на разделении по генетическим типам, в классификации Г.С. Золотарёва было использовано два признака: механизм смещения пород и их состав (строение, свойства и т.д.), механизм при этом отмечался в качестве ведущего признака.

Основываясь на различных преобладающих факторах, учёными были созданы различные классификации. Так, в классификации Е.П. Емельяновой за основной классификационный признак была предложена форма оползневого тела. В классификации В.В. Кюнтцеля 1980 года оползни распределялись по механизму их смещения. В классификации Г.В. Постоева была выделена важность учёта преобладающей силы воздействия на смещения оползневого тела, а также характер деформирования грунтов в начальный период формирования оползневого процесса, так как, по мнению учёного, именно на основании правильно сформированных сведений за этот период можно лучше понять структуру всего оползневого процесса в целом. Г.В. Постоевым была создана классификация по признакам проявления, а именно преобладающему фактору формирования оползневых смещений: его форма, характер трещиноватости, форма стенки срыва и др. Н.Н. Масловым была предложена классификация оползней по морфологическому признаку, в которой были систематизированы формы нарушения устойчивости откосов. Н.В. Родионовым за основу классификации был взят признак потери устойчивости.

Существуют также региональные классификации оползней. Одна из наиболее известных была составлена Г.Б. Пальшиным и Ю.Б. Тржцинским. Учёными была выполнена классификация оползней юга Восточной Сибири, где широко распространены оползни в скальных и полускальных породах. Наиболее популярной зарубежной классификацией оползней является классификация Д. Варнса, созданная в 1958 году. В качестве ключевых критериев были выбраны тип движения горных масс и тип пород [92].

Существуют также классификации, предлагаемые в нормативных документах. В рекомендациях по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития оползней (1969 г.), помимо обозначенных ранее классификаций, предлагается систематизация оползней по размерам: при этом предлагается учитывать их площадь и глубину захвата [97]. В своде правил 420.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых

процессов. Общие требования» (СП 420) предлагается классификация по трём признакам: по глубине захвата пород оползневыми деформациями, по объёму, а также по скорости оползневых процессов [111].

На основе перечисленных выше факторов и признаков, обобщённая классификация оползневых процессов представлена в приложении Д.

1.2.2 Факторы, влияющие на деформационные процессы оползневых склонов

Основной причиной схода оползней является нарушение баланса силы тяжести и совокупности сил, удерживающих грунт на склоне. При этом данное нарушение баланса может быть вызвано различными факторами. Природу появления оползней можно в целом разделить на две большие группы: природные и техногенные факторы.

Одной из частых причин схода оползня природного характера является сейсмическая активность [206, 245, 255]. Подземные толчки могут провоцировать оползневое тело на ускорение его перемещения, образовывать новые пространства, через которые могут просачиваться потоки грунтовых вод, что в целом напрямую влияет на скорость протекания оползневого процесса.

Дождевые осадки являются одной из наиболее явных причин схода оползневых масс [176, 185, 210]. Размокший грунт приводит к изменению значения коэффициента устойчивости за счёт появления скольжения масс. Это связано с тем, что дождевые или талые воды проникают глубоко в грунт, в результате чего создаётся гидростатическое давление, понижающее сопротивление сдвигу. Глинистые грунты наиболее уязвимы к таким моментам, так как после засушливой погоды имеют свойство покрываться большими трещинами, куда с лёгкостью проникает влага после дождей либо после таяния снега весной.

Изменение уровня грунтовых вод также является частой проблемой, в результате которой могут наблюдаться подвижки грунтов [146, 200, 211]. Движение грунтовых вод оказывает давление на грунт, что напрямую сказывается на уменьшении устойчивости склонов. Резкие скачки в уровне грунтовых вод могут вызывать сильные разжижения грунтов, слагающих склон. При постоянном изменении уровня воды склон может легко подняться и вызвать новые оползневые процессы [218]. Наиболее уязвимы к этому будут песчаные грунты, так как фильтрующиеся грунтовые воды могут уносить частицы песка, ослабляя прочность пород склона за счёт появления пор. В случае если грунтовые воды идут с большим напором, это может влиять как подъёмная сила для верхних слоёв грунта.

Строение оползня также существенно влияет на наличие сдвижений. Такие показатели, как глубина ПСО, разрозненность оползневых блоков, их расположение по отношению к уровню грунтовых вод могут изменить картину деформационного процесса с течением времени [275].

Кроме того, в качестве факторов стоит учитывать такие моменты, как наличие распространённой корневой системы склона [241]. Уничтожение деревьев на склонах неблагоприятно сказывается на устойчивости не только за счёт того, что корни способны удерживать грунт, но и из-за резко изменяющегося режима вод в приповерхностных слоях в случае выкорчёвывания большого количества деревьев на площади склона. Корни деревьев активно участвуют в осушении почвы от перенасыщенности влагой грунтовыми водами, что положительно влияет на устойчивость грунта.

Некоторые исследователи также связывают вулканическую активность [171, 231] или деятельность цунами [220] с причинами схода оползневых масс. В действительности для вулканической активности такое возможно как следствие сдвижений земной коры в горных хребтах [27], однако не всегда причины оползневой активности видны наглядно. В качестве примера можно привести исследования Мацутинского оползня, располагающегося в Центральном Кавказе. По результатам анализа особенностей геологического строения района и петрографического состава обломков горных пород, оползень характеризуется как эндогенно обусловленный с глубинным поступлением оползнеобразующих масс. Структура появления оползневой активности напоминает процесс извержения грязевого вулкана: происходит вывод на земную поверхность обводнённых подвижных масс, образовавшихся в геодинамических условиях сжатия [10].

Техногенные факторы, к которым можно отнести строительство зданий, инженерных сооружений, дорог [154], тоннелей [261] и другие работы, которые могут быть связаны с подрезкой склона или перегрузкой верхней части склона оказывают влияния на вероятность схода оползней на склоновых системах. Котлованы, применяющиеся в строительстве, в случае их близкого расположения к нестабильным откосам, могут спровоцировать движение грунтов. Взрывные работы также оказывают существенное влияние и могут стать причиной схода оползневых масс.

1.2.3 Применение инженерно-геологических данных при изучении оползневых процессов

Исследования в области инженерной геологии применительно к оползневым процессам заключаются в определении состава и строения пород и грунтовых массивов, экзогенных геологических процессов с целью уточнения сведений о видах оползней, причинах их возникновения, а также прогнозирования возможности возникновения оползневых деформаций при техногенном вмешательстве. Основные задачи, которые стоят перед инженерно-геологическими изысканиями: ответить на вопросы о возрасте оползневого склона, его генезисе, фациальной принадлежности. Кроме того, в задачи входит обозначение литологической характеристики пород, условия их залегания, степень тектонической нарушенности склона и

другие задачи. В рамках выполнения инженерно-геологической съёмки, являющейся частью комплекса изыскательских работ, предполагается получение детальной характеристики инженерно-геологических условий участка: определение типов оползней, а также их принадлежности к литологическим и стратиграфическим комплексам пород, определение стадии развития оползневого процесса и степени его активности на наблюдаемый период. Изучение внутреннего строения тела оползня также входит в задачу инженерно-геологической съёмки. Здесь важно установить стратиграфические горизонты, оказавшиеся под влиянием оползневых смещений, степень нарушения структур пород, слагающих тело оползня, мощность оползневых накоплений, их фации, а также глубину залегания ПСО. Изучение физико-механических свойств пород служит источником данных для инженерно-геологического расчленения толщи и, как следствие, выявления горизонтов, влияющих на устойчивость склонов в наибольшей мере. В зависимости от типа слагаемых пород (глинистые/песчаные/обломочные, обломочно-глинистые, глинисто-обломочные/полускальные/скальные) будут различаться определяемые свойства. В таблице 1 представлены свойства грунтов, необходимые к определению в зависимости от типов грунтов, из которых сложен оползневой склон.

Таблица 1 – Определяемые характеристики грунтов в зависимости от типа грунтов, из которых складывается оползневой склон [97]

Тип грунтов оползневого склона	Определяемые характеристики грунтов
Глинистые	Гранулометрический состав, объёмный вес, сопротивление сдвигу, сопротивление выдавливанию конуса, характер и скорость размокания, набухание, усадка, реологические свойства (ползучесть, длительная прочность), сжимаемость, чувствительность к нарушению структуры, состав водной, солянокислой и щелочной вытяжек
Песчаные	Минералогический состав, максимальная молекулярная влагоёмкость, суффозионные и пливунные свойства, уплотняемость при вибрации
Обломочные, обломочно-глинистые, глинисто-обломочные	Зерновой состав, петрографический состав включений, объёмный вес, консистенция глинистого заполнителя, сопротивление сдвигу
Полускальные	Объёмный вес, природная влажность, сопротивление раздавливанию, сопротивление сдвигу, размягчение при водонасыщении и прочность после предварительного попеременного увлажнения и высушивания
Скальные	Объёмный вес, сопротивление сдвигу, сопротивление раздавливанию, коэффициент размягчения

Кроме того, для более точного и корректного прогнозирования поведения оползневых склонов важно учитывать помимо литологического состава пород инженерно-геологические типы имеющихся или потенциально возможных оползней. Факторы и свойства, на которых необходимо сделать акцент при рассмотрении тех или иных видов оползней представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Факторы, имеющие значение при исследовании конкретных типов оползней [97]

Тип оползня	Ключевой критерий при изучении оползня
Выдавливания	Зависимость прочности грунта от нагрузок, реологическое поведение грунта
Срезания	Микротрещиноватость грунта, сопротивление сдвигу по пластованию и перпендикулярно ему
Течения	Зависимость сопротивления сдвигу от влажности
Крип	Реологические свойства грунтов
Разжижения	Состав поглощённого комплекса и минерализации поровых растворов, сопротивление сдвигу, тиксотропные свойства выщелоченных грунтов
Десерпционный	Набухание грунта, усадка грунта, сопротивление сдвигу по предварительно увлажнённым плоскостям
Проседания	Сопротивление просадочного лёссового грунта сдвигу при условии его полного водонасыщения без уплотнения – в стадии допросадочных деформаций
Выплывания	Величины критических градиентов, при которых развивается суффозионный вынос частиц и выплывание грунта, величина максимальной молекулярной влагоёмкости (для водонасыщенных грунтов, подлежащих осушению)
Скольжения	Сопротивление грунта сдвигу по плоскостям напластования, по плоскостям трещин, или же вдоль ПСО ранее сместившихся оползней

1.2.4 Применение инженерно-гидрогеологических, геоморфологических и геофизических данных при изучении оползневых процессов

Гидрогеология изучает влияние грунтовых вод на смещения оползней. При гидрогеологических изысканиях уделяются внимание водотокам и системам водотоков, протекающих по оползневому склону, заболоченным участкам, водопунтам и местам сброса воды на склон. При изучении оползневых смещений с точки зрения влияния водных структур на деформации имеет место детальный анализ обводнённости оползневого склона, в котором необходимо уделить внимание выявлению особенностей распределения подземных вод по телу оползня. Берётся во внимание расположение колодцев, источников, бессточных площадок, мест скопления поверхностных и подземных вод. Подземные воды при этом стоит рассматривать с точки зрения характера распространения водоносного горизонта: возможно наличие единого выдержанного водоносного горизонта, либо располагающихся на различных уровнях нескольких потоков, в том числе и соединяющихся между собой. Гидрогеологические методы изучения оползней позволяют определить расположение и тип источников питания оползней, наличие или отсутствие сообщения между водоносными горизонтами, выявить возможность осушения пород с помощью дренажей, оценить степень водопроницаемости пород. Для решения всех вышеперечисленных задач используются опытные гидрогеологические работы, которые подразумевают пробные и опытные откачки, а также опыты по определению направления и скорости движения подземных вод. Путём выполнения пробных откачек возможно приближённо оценить степень обводнённости оползневого склона, предварительно выявить расположение

источников питания оползневого тела со стороны коренного массива, а также оценить возможность проведения опытных откачек. Опытные откачки, в свою очередь, производятся в случае, когда на оползневом склоне предполагается дренирование (осушение) тела оползня или водоносных горизонтов, осуществляющих его питание. Режимные гидрогеологические наблюдения могут выполняться с целями выявления источников питания оползневого тела водами, наличия корреляции между режимами подземных вод и смещениями оползневого тела, определения уровня подземных вод, при котором оползневой склон наиболее стабилен по условиям равновесия, выявления водоносных горизонтов, наличия или отсутствия взаимодействия водоносных горизонтов между собой и с поверхностными водами, расположения уровней подземных вод на конкретный временной промежуток, а также изменения химического состава подземных вод. Последнее, в свою очередь, служит для оценки условий питания грунтов, слагающих оползневой склон, определения уровня взаимодействия различных водоносных горизонтов, а также позволяет оценить степень их агрессивного влияния на материал конструкций противооползневых сооружений и зданий иного типа, располагающихся на оползневых склонах или вблизи них. Режимные наблюдения применяют в районах развития оползней, в которых наиболее вероятно их появление вследствие действия подземных вод. К таким оползням относят, например, оползни выплывания, однако если в склоне формируются водоносные горизонты, способные впоследствии сформировать оползни иных типов (скольжения, выдавливания, проседания, срезания), подобные методы также уместны для применения [97].

Геоморфология рассматривает влияние строения рельефа на оползневые смещения. Например, в зависимости от вида геоморфологического элемента назначается то или иное количество створов при выполнении буровых и горнопроходческих работ, направленных на изучение оползневого процесса. Оценка изменений рельефа склона в целом и микрорельефа поверхности оползневого тела может выполняться как визуально, так и инструментально с помощью высокоточных геодезических измерений. Геоморфологические исследования позволяют выявлять особенности строения оползневого тела с последующим выделением составных элементов [55]. По результатам геоморфологических исследовательских работ возможно создание геоморфологических профилей с отображением форм рельефа на склоне и слагающих его горных пород [118].

Информацию о протекании оползневых процессов можно получить геофизическими методами. Геофизические методы наблюдений за оползневыми склонами активно используются в настоящее время и претерпевают изменения с точки зрения автоматизации сбора и обработки данных [196]. В процессе исследований оползневых процессов геофизические исследования применяются для уточнения геологического строения склона, трещиноватости пород, а также для

определения направления движения оползневого потока, грунтовых вод. Помимо этого, геофизические методы могут представлять сведения о потенциально возможных зонах оползневого смещения за счёт применения комплексов электро- и сейсморазведки. Для изучения режима влажности грунтов по временным периодам и глубинам расположения увлажнённого грунта применяются методы теплопроводности, диэлектрической проницаемости, нейтронный метод или метод сопротивлений. Подобная характеристика наиболее свойственна оползням типа оползания и оплывин. Динамику оползневых смещений также наблюдают с использованием микросейсмических методов и пьезоэлектрических датчиков, которые помещаются в тело оползня в наиболее близкое расположение к ПСО. Для оценки влияния увеличивающейся обводнённости грунта на оползневые смещения также могут применяться геофизические методы, например, с точки зрения выявления мест утечки водных потоков из подземных коммуникаций либо выявления заброшенных подземных сетей, дренажей и тому подобное. В геофизических задачах активно применяются методы каротажа, резистивиметрии, а также методы заряженного тела [97].

1.2.5 Применение методов моделирования для расчёта напряжённо-деформированного состояния оползневого склона геомеханическими методами

Для выявления характера оползневых смещений также выполняют геомеханические расчёты с определением параметров напряжённо-деформированного состояния (НДС) объекта исследования [35], что в свою очередь представляет собой совокупность напряжений и деформаций, возникающих при воздействии на твёрдое тело внешних нагрузок. Несомненной важностью исследования НДС оползневых склонов является возможность оценки рисков обрушения склона, а также прогнозирование возможных величин деформаций, что особенно важно при техногенном вмешательстве в его строение и структуру.

Для оценки НДС могут использоваться эксперименты либо применяться моделирование. Методы математического моделирования часто применяются при расчёте потенциальных смещений оползней [19, 33, 58, 129, 134]. На основе данных моделирования возможно выделение территорий, подверженных оползневым смещениям, в том числе и с применением современных методов по использованию нейронных сетей [44]. Методы моделирования, в свою очередь, подразделяются на физические и математические. К физическим методам моделирования геомеханического состояния массива относят центробежное моделирование, метод на эквивалентных материалах, оптически-поляризационный метод, а также аналоговое моделирование.

Математические методы получили широкое применение при геотехническом анализе ввиду удобства их применения, в связи с чем в настоящее время получили распространение

большое количество программных продуктов, среди которых в качестве примера можно привести КРЕДО ОТКОС [88], Ansys [144], fine GEO5 [181], Malinin Soft GeoStab [180], midas GTS NX [94], Plaxis [239], которые могут быть применены при расчётах НДС грунтов, располагающихся в пределах зоны влияния оползня и с учётом возведённых на них зданий и инженерных сооружений. К методам математического моделирования относят метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных элементов (МГЭ), метод конечных разностей (МКР).

В настоящее время наиболее эффективным методом анализа НДС является МКЭ [1, 20, 28, 62]. Наиболее эффективным применением метода являются случаи, в которых неизвестны размеры и форма деформационных неоднородностей. В большинстве случаев программной реализации поддаётся именно численный МКЭ. Численное моделирование на основе МКЭ отличается от иных инженерных расчётов наличием термина «модель грунта». Это связано с тем, что метод позволяет за счёт нескольких различных уравнений описать модель поведения грунта, при этом, используя различные комбинации подобных уравнений в совокупности с учётом цели и задач расчёта, позволяет более точно, наглядно и в то же время более быстро выполнить соответствующие геотехнические расчёты. Подобные методы нашли свои решения во многих программных комплексах. Наиболее популярным в мире и располагающий наибольшим количеством таких моделей является программный продукт Plaxis [239]. Задачи можно условно разделить на четыре класса:

- расчёт предельного состояния;
- решение задач нагрузки;
- решение задач разгрузки и повторной нагрузки;
- выполнение оценки влияния (геотехнический прогноз).

В зависимости от того или иного типа задачи следует подобрать соответствующую модель грунта для правильного геотехнического анализа. При рассмотрении моделей грунта, используемых в программном продукте Plaxis, следует чёткое разделение выбираемой модели грунта в зависимости от применяемой к ней задачи. Для расчёта устойчивости откосов, склонов, в том числе и оползневых, насыпей, плотин, дамб наиболее удачным будет применение идеально-пластической модели грунта «Мора-Кулона». В ней используется закон упругости (Гука), а также одноимённое уравнение предельного состояния Мора-Кулона. Модель грунта «Мора-Кулона» позволяет учесть деформационные характеристики при расчёте предельного состояния и прочностные при расчёте деформаций. При выполнении расчётов величин осадок плотин, насыпей, дамб, фундаментов разных типов, а также оценки перемещений ограждающих защитных конструкций котлованов, подпорных стен подойдут модели грунтов «Soft soil», в том числе с учётом ползучести «Soft soil creep», анизотропности «S1Clay» и с учётом сложного напряжённого состояния «NGI-ADP», и упругопластическая модель упрочняющегося грунта

«Hardening soil», в том числе с улучшенным описанием области малых деформаций «Hardening soil small». Для решения задач разгрузки и повторной нагрузки наиболее подходящей будет модель грунта «Hardening soil». Для переуплотнённых грунтов возможно применение модели «OC-Clay», которая учитывает специфику таких грунтов. Задачи оценки влияния жизненно необходимы в случае строительства в плотно застроенной среде. Здесь в качестве дополнительной к предыдущим данным информации требуются сведения о малых перемещениях грунтов, что позволит выполнить более точный прогноз осадки, особенно на ранних этапах после консолидации грунта. В вышеупомянутых моделях «Hardening soil small», а также в обобщённой модели «Generalized Hardening soil» и модели, предназначенной для переуплотнённых грунтов «OC-Clay» реализован механизм расчёта подобных ситуаций [65].

МГЭ основан на преобразовании дифференциальных уравнений в эквивалентные интегральные уравнения. При таком подходе массив грунта рассматривается как единое целое с конкретными заданными характеристиками по всему протяжению. МГЭ способен давать более точные результаты за счёт отсутствия разбиения массива на отдельные составляющие элементы, но в то же время метод имеет узкую спецификацию по моделированию исключительно однородных сред.

Для расчёта НДС также может применяться МКР, суть которого заключается в замене производных разностными схемами. При использовании МКР в пределах расчётной области строится сетка, для каждого узла которой записывается разностное уравнение. В конечном итоге реализуется система линейных алгебраических уравнений, решение которых проще и занимает меньшее количество времени в случае применения метода в несложных задачах. Каждый из узлов сетки представляет некоторый объём среды рассматриваемого грунта, характеризующий физико-механические свойства грунта. В связи с большими вычислительными затратами при решении сложных задач метод не используется в настоящее время [90, 131].

1.2.6 Основные свойства и классификации грунтов, используемые в геомеханических расчётах

Расчёты НДС так или иначе требуют наличия данных о свойствах располагаемых на склоне грунтов. Свойства грунта характеризуют его особенности, которые слагаются из взаимоотношения его компонентов. Различают физические, механические, магнитные, электрические, водные и другие свойства грунтов.

На основании физических и механических свойств производятся расчёты воздействия техногенных объектов при взаимодействии с геологической средой. В связи с этим имеет смысл сделать акцент при рассмотрении оползневых склонов именно на данные категории свойств грунтов. К физическим свойствам грунтов относят такие свойства, которые определяют их

поведение при взаимодействии с результатами инженерно-хозяйственной деятельности человека. К физическим свойствам грунтов относят:

- гранулометрический состав (для дисперсных грунтов): количественное содержание в грунте первичных частиц по фракциям;
- плотность;
- пористость: характеризует объём пор в единице грунта;
- влажность: отношение объёма воды в грунте к объёму грунта;
- предел пластичности (для глинистых грунтов): влажность, при которой грунт переходит из пластичного состояния в текучее;
- набухаемость (для глинистых грунтов): способность увеличивать объём при замачивании;
- усадочность (для глинистых и органогенных грунтов): способность уменьшать объём при обезвоживании;
- размокаемость: способность при замачивании в спокойной воде терять свою связность с превращением в рыхлую массу;
- размягчаемость: способность снижать прочность при взаимодействии с водой.

При воздействии нагрузок на грунты проявляются их механические свойства. При этом механические свойства грунтов подразделяются на прочностные и деформационные. К прочностным механическим свойствам грунтов относят:

- угол внутреннего трения (φ): параметр линейной зависимости сопротивления сдвигу от вертикальной нагрузки;
- сцепление (c): характеристика структурных связей грунта.
- прочность: способность грунта к сопротивлению разрушению под влиянием механических напряжений;
- просадочность: (для лессовых и пылеватых грунтов): способность к уменьшению в объёме при увлажнении.

К деформационным механическим свойствам грунтов относят:

- модуль общей деформации (E_o): отношение разности конечного и начального напряжений к разности конечной и начальной относительной продольной деформации;
- модуль упругости (E): отношение напряжения, при котором начинается разрушение, к разности относительной деформации конца и начала разгрузки;
- сжимаемость: (для дисперсных грунтов): способность к уменьшению в объёме при нагрузке [113].

1.2.7 Расчёт устойчивости оползневых склонов геомеханическими методами

Для расчёта устойчивости склонов на практике активно применяются методы предельного равновесия. В расчётных моделях при этом прибегают к условностям:

- используется гипотеза однородного тела;
- рассматривается определённая форма ПСО;
- силы используются при расчётах вместо напряжений;
- давление грунтовых вод и сейсмичность не учитывается (принимаются допущения) [96].

Недостатком применения подобных методов остаётся необходимость задания ПСО заранее, в то время как она может быть неизвестна доподлинно [43, 56]. В связи с этим ПСО принимается для расчётов как круглоцилиндрическая, полигональная либо комбинированная, заданная логарифмической спиралью. Существует большое разнообразие среди методов расчёта устойчивости склона. При этом методы делятся по механизмам: удовлетворяющие общему равновесию моментов (Феллениуса, Бишопа), методы равновесия сил (Шахунянца, Крея, Маслова-Берера) и методы равновесия моментов и сил (Янбу, Моргенштерна-Прайса, Спенсера). В зависимости от учёта сил, прилагаемых на склон, можно выделить три категории методов:

- учитывающие только основные силы;
- учитывающие горизонтальные силы взаимодействия отсеков;
- учитывающие горизонтальные и вертикальные силы взаимодействия между отсеками.

Методы Моргенштерна-Прайса и Спенсера считаются самыми надёжными с точки зрения учёта сил, методы Шахунянца, Бишопа и Янбу занижают устойчивость и могут применяться для проверки устойчивости относительно состояния предельного равновесия, при котором коэффициент устойчивости $K_{уст} = 1$, а методы Феллениуса и подобные имеют сильное занижение устойчивости и добавляются в современные программные комплексы по расчётам устойчивости только по причинам того, что они хорошо знакомы пользователям [126].

В маркшейдерском деле имеет место маркшейдерское обеспечение оценки устойчивости откосов бортов карьеров. Значительное количество трудов в направлении данной тематики посвятил Г.Л. Фисенко [128]. В его работах рассматриваются вопросы нахождения баланса в значениях величин углов откосов бортов карьеров, так как нередко случаи, при которых углы наклонов принимаются меньше допустимых нормативными документами, что серьёзно сказывается на экономической составляющей. В то же время слишком большие углы откосов могут вызывать оползневые процессы, серьёзно оказывая влияние на безопасность при работах. Для определения оптимальных углов откоса Г.Л. Фисенко предлагает учитывать геологические и гидрогеологические условия при маркшейдерских работах для выполнения корректных расчётов.

В рамках противодействия оползневым процессам при маркшейдерских работах уместно применение различных способов расчётов объёмов оползаемого грунта по расчётам параметров призмы обрушения [135], коэффициента запаса устойчивости склона на основе данных о физико-механических свойствах грунтов склона и другие величины, которые стали доступны для расчётов с появлением соответствующих исследований в этих областях [98].

1.3 Состояние изученности вопросов наблюдения оползневых склонов геодезическими методами

1.3.1 Обзор нормативной документации, регламентирующей порядок проведения работ по инженерным изысканиям на оползневых склонах

Основным нормативным документом, регулирующим вопросы инженерных изысканий при строительстве в районах, подверженных оползневым смещениям, является СП 420 [111]. Нормативный документ обосновывает требования при выполнении инженерных изысканий в районах возможного развития и активизации оползневых процессов как для подготовки документации по территориальному планированию, так и выполнению работ по возведению в таких локациях зданий и инженерных сооружений. Среди видов изысканий, обязательных к выполнению в случае осуществления градостроительной деятельности, отмечены инженерно-геодезические, инженерно-геологические, инженерно-гидрометеорологические и инженерно-экологические изыскания. В СП 420 приведена классификация оползней по трём категориям: по глубине захвата пород оползневыми деформациями (от мелкого: менее 5 м, до очень глубокого: более 20 м), по объёму оползневого тела (от очень малого: менее 100 м³, до грандиозного: более 10 000 000 м³), а также по скорости оползневых процессов (от экстремально медленного: менее 16 мм/год, до экстремально быстрого: более 5 м/с). Также в СП 420 приведены методы, которыми следует определять горизонтальные и вертикальные смещения оползней: для определения горизонтальных смещений предполагается использование метода геодезических спутниковых определений, створных наблюдений, триангуляции, трилатерации, полигонометрии, линейно-угловых измерений, отдельных направлений, а для вертикальных – геометрическое, тригонометрическое или спутниковое нивелирование.

В СП 420 также отмечено, что инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов должны выполняться в порядке, предусмотренным сводом правил 47.13330 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения» (СП 47) [112], сводом правил 317.1325800 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» (СП 317) [109] и ГОСТ 24846 – 2019 «Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений» (ГОСТ «Грунты») [23].

В СП 47 оползневые процессы упоминаются в рамках инженерно-геологических и инженерно-гидрометеорологических изысканий, рекомендаций по инженерно-геодезическим изысканиям на оползневых участках не предоставлено. В качестве методик наблюдений рекомендуется руководствоваться нормативными техническими документами, принятыми федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере геодезии и картографии, а также по согласованию с ним другими федеральными органами исполнительной власти в пределах их компетенции.

В СП 317 отмечается, что геодезические наблюдения за движениями земной поверхности и опасными природными процессами включают выявление признаков движений земной поверхности и/или развития опасных природных процессов (карстовые воронки, оползни, осыпи и др.). Необходимую точность определения планово-высотного положения опорных и деформационных пунктов геодезических сетей специального назначения, в том числе применяющихся при наблюдениях за оползневыми склонами, согласно СП 317, устанавливают в задании или программе в зависимости от назначения создаваемой сети. Также в СП 317 подробно приведены требования к точностям при использовании методов триангуляции, трилатерации и полигонометрии, однако, данные методы больше направлены на отдельные измерения углов и/или расстояний и в настоящее время с появлением современных электронных тахеометров ушли на второй план. Применение технологии спутникового позиционирования также ограничивается лишь предельно допустимыми средними квадратическими погрешностями (СКП) определения положения опорных пунктов.

ГОСТ «Грунты» регулирует наблюдения за деформациями зданий и сооружений, в том числе и располагающихся на оползневых склонах. Согласно документу, измерения классифицируются четырьмя классами точности: обозначена предельная СКП определения горизонтальных и вертикальных смещений: от 1 до 10 мм для вертикальных смещений и от 2 до 20 мм для горизонтальных. Для метода тригонометрического нивелирования указаны предельные СКП измерения расстояний и вертикальных углов в зависимости от класса точности измерений (II, III или IV). Также для тригонометрического нивелирования ограничена предельная длина луча визирования 100 м. Для работ по наблюдениям оползневых процессов отмечено, что грунтовые реперы для нивелирования стоит закреплять вне зоны влияния оползневого процесса, однако о способах и методах расчёта зоны влияния в документе не упоминается.

В разделе «Мониторинг при строительстве на территориях с распространением оползневых процессов» свода правил 305.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве» (СП 305) [106] отмечено, что

контроль смещений поверхности грунтового массива и конструкций рекомендуется выполнять геодезическими методами, в том числе спутниковыми, а СКП измерения данным методом не должна превышать 20 мм. В СП 305 перечислено большое количество методов, применяемых при геотехническом мониторинге, однако сведения о них ограничиваются лишь типом используемого оборудования без указания рекомендуемых характеристик, контролируемым параметром этим методом, а также возможностью или невозможностью применения автоматизации при выполнении работ данным методом.

В своде правил 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003» (СП 116) [107] в пункте 4.2 упоминается, что проектирование инженерной защиты от опасных природных процессов, к которым относятся смещения оползней, необходимо выполнять на основе результатов инженерно-геодезических, инженерно-геологических, инженерно-геотехнических, инженерно-гидрологических, инженерно-гидрометеорологических и инженерно-экологических изысканий. Это подтверждает мысль о том, что к исследованию оползневых процессов требуется комплексный, разносторонний подход. Аналогичный перечень видов изысканий упоминается в своде правил 436.1325800.2018 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов. Правила проектирования» (СП 436) [108]. При этом в СП 436 обозначен инструментальный контроль при мониторинге склоновых процессов и техническом мониторинге, в рамках которого должен выполняться геодезический контроль перемещений склонов и сооружений.

Свод правил 11-104-97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства» [110] обозначают в п. 10.14 следующие виды работ при инженерно-геодезических изысканиях в районах развития склоновых процессов:

- создание (развитие) опорной и съёмочной геодезических сетей;
- топографическая съёмка потенциально неустойчивого склона (оползня) в масштабах 1:200 – 1:10000 при проведении специальной оползневой съёмки;
- геодезические наблюдения за кинематикой (подвижками) склона и деформациями зданий и сооружений.

При этом в п. 10.17 – 10.18 отмечено, что наблюдения за кинематикой склона включают в себя определение и вертикальных, и горизонтальных смещений точек на поверхности и в глубине склона. Геодезические методы при наблюдениях за кинематикой склона и изучении склоновых процессов являются основными.

СКП определения подвижек склона относительно опорных пунктов аналогична указанной в СП 420 и составляет 20 мм в плане (для горизонтальных смещений) и 10 мм по высоте (для

вертикальных смещений). Отмечено, что после первых циклов геодезических измерений требования к точности корректируют в зависимости от скорости подвижек.

ГОСТ Р 55535 – 2013 «Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Общие технические требования к системам геодезического мониторинга» [21] регламентирует методы и технологии выполнения геодезических работ в системах геодезического мониторинга деформаций с использованием ГНСС-аппаратуры сегмента потребителей. Согласно п. 4.6, геодезические методы применяются при исследовании деформационных процессов, в том числе при изучении кинематической составляющей характеристик исследуемого объекта, а согласно п. 4.7, задачами геодезических методов при таких исследованиях являются корреляционная оценка причинно-следственных связей, приводящих к кинематическим проявлениям деформационных процессов, а также зонирование деформационных процессов для определения наиболее активных зон в пространстве и времени. Основой геодезических методов согласно п. 4.8 являются методы относительных спутниковых измерений с использованием ГНСС.

ГОСТ Р 55535 – 2013 определяет, что при наблюдении оползневых явлений геодезическими методами мониторинга, следует различать три фазы кинематики развития оползня:

- крип: медленное смещение, процесс может развиваться столетиями;
- активная фаза: отделение от массива и обрушение оползневого массива;
- фаза релаксации: образование языка оползня, скорости имеют тенденцию к затуханию.

1.3.2 Обзор применяемых геодезических методов при наблюдениях за оползневыми деформациями

Опираясь на вышеупомянутые документы, а также техническую литературу, выделяют классические и современные методы наблюдений за деформациями [3, 86]. Классическим методам свойственно раздельное получение данных, в связи с чем можно выделить следующие категории методов: одномерные, двумерные, высотные, а также пространственные, получаемые комбинацией двумерных плановых и высотных данных [114]. Современным методам свойственно одновременное получение пространственных данных.

К одномерным методам относят такие методы, как метод измерений малых углов, метод измерения расстояний и метод створов. Данные методы отличаются своей простотой с точки зрения математической обработки и несложностью выполнения измерений. Метод измерения малых углов направлен на определение величины горизонтального угла между опорным пунктом и деформационным пунктом, закреплённым в теле оползня. По изменению величины горизонтального угла можно судить о наличии оползневых смещений. Метод измерения

расстояний направлен на определение смещений за счёт анализа изменения расстояний между закреплёнными в теле оползня деформационными пунктами и опорными пунктами, располагающимися вне зоны влияния оползня. Метод створов, как и метод расстояний направлен на определение линейных смещений деформационных пунктов, закреплённых в теле оползня, различие заключается в направлении оценки смещения: в случае метода створов оцениваются смещения относительно створа, закреплённого опорными пунктами. Существенной особенностью створных методов является то, что для их применения в обязательном порядке необходимо знать направление движения оползня, так как от этого зависит место закрепления опорных пунктов, и, как следствие, возможность определения смещения. При этом несмотря на то, что створные методы отошли на второй план при появлении современных электронных тахеометров, с помощью координатного метода возможно выполнять подобные наблюдения более точно [100, 124].

К двумерным, или плановым методам можно отнести методы триангуляции, трилатерации, методы геодезических засечек, в которые входят прямые угловые, линейные, обратные линейно-угловые, полярные засечки, а также методы полигонометрии. Для данной группы методов уже не требуются сведения о направлении смещения оползня. Также, в отличие от створных методов, они позволяют определять не только величину смещения в конкретном одном направлении, а горизонтальное смещение деформационного пункта, закреплённого в теле оползня, относительно опорных пунктов, расположенных вне зоны влияния оползня. При этом методы засечек при использовании современного оборудования способны обеспечивать высокую точность определения положения при учёте таких факторов, как СКП измерения углов и СКП измерения расстояний при проектировании наблюдений [38].

Смещения оползня, как правило, проходят как в горизонтальном, так и вертикальном направлении, именно поэтому двумерные методы используются в сочетании с методами определения превышений между опорными пунктами и деформационными пунктами, закреплёнными в теле оползня. Таким образом, определяются вертикальные смещения оползня методами геометрического нивелирования в случае применения нивелиров и тригонометрического нивелирования при использовании электронных тахеометров. Достоинствами геометрического нивелирования остаются высокая точность измерений [37, 60, 82, 117], несложный и не трудоёмкий процесс работы на полевом этапе. При этом к недостаткам стоит отнести повышение трудоёмкости работ на местности с большим перепадом высот, что характерно для оползневых склонов, а также получение информации только о вертикальном оползневом смещении. В то же время метод тригонометрического нивелирования позволяет определять превышения при больших перепадах высот, но его главным недостатком остаётся необходимость учёта влияния атмосферы на вертикальную рефракцию [12, 187, 201, 205, 219,

251], особенно при больших длинах визирования [283, 286]. При этом подобные поправки в вертикальную рефракцию изменчивы и требуют повторного определения, особенно в случаях, когда наблюдения выполняются в течение длительного периода времени, например, при больших объёмах работ, при наблюдениях в разное время суток или в разные дни. В ряде современных исследований предлагается использовать переносные метеорологические станции для определения условий и параметров наблюдений непосредственно в момент наблюдения с целью учёта влияния рефракции [292], однако это накладывает сложности ввиду повышенной трудоёмкости выполнения работ, дальнейшей обработки полученных данных и, как следствие, увеличения стоимости выполнения работ. Весомое количество исследований посвящено исследованию точности тригонометрического нивелирования [40, 64, 76, 78, 79, 80, 81, 83, 122, 123].

К современным методам можно отнести геодезические способы получения пространственных данных [212]. Несомненным преимуществом применения методов определения пространственного положения наблюдаемого объекта является возможность построения цифровых трёхмерных моделей местности и цифровых моделей рельефа [66, 177, 266, 267, 289]. Построенные модели наглядно отражают состояние местности на момент наблюдения, а с помощью специализированного программного обеспечения позволяют визуализировать величины смещений наглядно в виде схем [233].

Технология спутникового позиционирования находит своё применение в наблюдениях за оползневыми склонами в настоящее время [152]. Нередко технологии спутникового позиционирования применяются при постоянных (многолетних) наблюдениях [158, 226]. Многолетние наблюдения являются важным преимуществом использования технологии спутникового позиционирования при наблюдениях за оползнями. Повторяемость наблюдений, а также сохранение преемственности между циклами наблюдений – важный аспект получения достоверных сведений о величинах смещений. Характер движения оползня бывает различным, величины смещений могут быть различимы и в течение нескольких часов, и быть небольшими, неразличимыми в течение нескольких лет. В период, когда динамика движения оползня находится на этапе затухания, между заметным смещением может пройти большой промежуток времени. Технология спутникового позиционирования позволяет проводить подобные многолетние наблюдения. Подобные долговременные наблюдения выполняются с целью наблюдений многолетних смещений земной коры [209, 290], смещения центра масс Земли [258, 259] и другие задачи, характеризующиеся решением вопросов глобальных масштабов. Методику геодезических наблюдений технологией спутникового позиционирования можно разделить на абсолютные [7] и относительные методы. Несмотря на то, что технология спутникового позиционирования активно используется в самых различных видах геодезических работ, среди

которых наблюдения за оползнями не исключение [59], методика проведения работ с его применением не описана полно в достаточной мере. При этом, согласно различным опубликованным данным, при определённых условиях технологией спутникового позиционирования возможно определение положения деформационных пунктов с точностью, удовлетворяющей программе II класса нивелирования [67]. Большинство работ, выполняемых с применением технологии спутникового позиционирования, опирается на личный опыт, реже – на проведённые научные исследования. Чаще всего, при проведении работ, оценка точности полученных данных основывается на расчётах СКП определения положения опорного или деформационного пункта [42], которая рассчитывается прибором по алгоритмам, задаваемым заводом изготовителем и не всегда отражает действительное положение вещей. С точки зрения практического применения, интересен вопрос о возможности применения в тех или иных условиях различного геодезического ГНСС-оборудования (ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы), в том числе при его систематизации по цене. Авторами [198] проведено исследование ГНСС-приёмников потребительского класса и оценена возможность его применения при определении положения цели. Использование бюджетных недорогих ГНСС-приёмников [150, 179, 223, 224, 280] позволит сделать процесс геодезических наблюдений более доступным, что может положительно сказаться на динамике наблюдений за деформациями. При наблюдениях за оползнями также уместно применение режима быстрой статики [257]. Ряд исследований доказывает возможность применения технологии спутникового позиционирования в иных режимах, отличных от режима «статика» для наблюдений деформаций в пределах миллиметровой точности.

В настоящее время вектор исследований в технологии спутникового позиционирования направлен на исследование технологии спутникового позиционирования в режиме реального времени (технология RTK) [263]. Если ранее технология спутникового позиционирования использовалась для обнаружения смещений в долгосрочной перспективе, то в настоящее время предпринимаются активные действия по исследованию методов по обнаружению смещений, происходящих в короткий промежуток времени [281], при этом технологией RTK возможно получить точность определения осадок порядка 2 мм при последующей обработке полученных данных с фильтрацией полученных результатов [250].

Технология спутникового позиционирования широко распространена при ведении различных маркшейдерско-геодезических работ ввиду своей оперативности и повышающейся доступности для инженера: возможно приобрести ГНСС-оборудование за приемлемую стоимость и при этом иметь возможность выполнять наблюдения с достаточной точностью [179, 198, 224, 280, 281]. Технология RTK упрощает процесс получения сведений за счёт отсутствия необходимости в постобработке полученных в ходе измерений данных. Технология RTK имеет

большой потенциал в рамках инженерно-геодезических работ по наблюдениям за смещениями деформационных пунктов в теле оползня [204, 250], что представляет интерес в исследовании получаемой точности в рамках проведения данных работ при различных условиях и внешних факторах.

Особенность технологии RTK заключается в получении поправок в измерения псевдодальностей и несущей фазы до спутников в режиме реального времени, что позволяет получать плановые координаты и высоты опорных и деформационных пунктов без постобработки. Дифференциальные поправки при этом вычисляются и транслируются от ГНСС-приёмника, установленного на опорном пункте. При этом расстояние между базовой станцией и ровером может достигать нескольких десятков километров. Возможны также сетевые технологии формирования дифференциальных поправок, например, Virtual Reference Station (VRS, в переводе с англ. – «виртуальная базовая станция») от нескольких ГНСС-приёмников, установленных на опорных пунктах с известными плановыми координатами и высотами и работающих в сети дифференциальных геодезических станций (СДГС) [57, 119]. Основными преимуществами технологии выступают точность, простота и относительная экономичность метода. Получение плановых координат и высот деформационных пунктов в реальном времени в заданной пользователем системе координат позволяют оперативно решать поставленные задачи в короткие сроки как после, так и во время полевых наблюдений, что может быть полезным в случае необходимости корректировки процесса полевых наблюдений для получения более качественных результатов.

В настоящее время технология RTK активно развивается и применяется в самых различных сферах: геодезические изыскания, кадастровые работы [163], геодезическое сопровождение строительства, удалённое управление техникой [256], а также во многих других сферах. Технология RTK нередко используется при добыче полезных ископаемых или при открытой геотехнологии: миссии по геологоразведке, картографированию местности, 3D-моделированию окружающего пространства. ГНСС-аппаратура также используется и при маркшейдерско-геодезических работах по наблюдениям за смещениями рабочих реперов наблюдательной станции на карьерах. В настоящее время круг выполняемых задач с применением технологии спутникового позиционирования существенно расширился. К решению таких задач, как многолетние наблюдения за движениями земной коры, при которых ГНСС-приёмник работает в режиме «статика» [226, 258], добавились возможности для решения многих других инженерных задач за счёт развития технологии RTK. Исследования точности измерений технологией RTK подтверждают достаточно высокую точность наблюдений, которая могла бы удовлетворить требованиям при наблюдениях за оползневыми смещениями [31].

Важным вопросом остаётся зависимость получаемой точности наблюдений методом от параметров наблюдений, среди которых, например, вариант подключения: к одиночной базовой станции или в сетевом режиме, в том числе с применением технологии VRS [252]. Технологии сетевого режима подключения к базовым станциям имеют широкое распространение в наши дни за счёт активного внедрения частными компаниями сервисов по предоставлению данных, полученных с применением СДГС [57, 119, 138]. Частично вопрос, связанный с сетевым режимом, раскрыт в ряде исследований [186], однако в ключе наблюдений за оползневыми склонами, более приближенным к реальным условиям, будет подключение к установленной самостоятельно одиночной базовой станции, так как плотности пунктов СДГС вдали от населённых пунктов может быть недостаточно. Кроме того, ряд исследований подтверждает, что технологией RTK возможно наблюдать не только длительные во времени смещения, но и производить наблюдения коротких по интервалам колебаний при фильтрации шумов в измерениях [288]. Также технологии RTK позволяют получать величины смещений в динамике, что применимо к перемещающимся объектам [120, 204, 256].

В современных исследованиях рассматриваются также вопросы о получаемой точности по результатам использования ГНСС-оборудования при подключении в сетевом режиме [269]. Широкое распространение ГНСС-приёмников различного класса точности и ценового диапазона обосновывает ветвь исследований, направленных на создание частных сетей с последующей оценкой получаемой точности по результатам их использования [141].

Обработка измерений, полученных технологией спутникового позиционирования, предполагает выполнения уравнивания сети. Методы, используемые в уравнивании, можно отнести к строгим, среди которых основными является параметрические методы уравнивания, например – метод наименьших квадратов (МНК) [8], и нестрогим, к которым можно отнести коррелятное уравнивание. При этом возможны варианты обработки измерений в сети при наблюдениях без опорных пунктов [9], в том числе с применением в качестве вычислений поисковых методов [137].

Использование электронных тахеометров также является распространённым при геодезических наблюдениях за деформациями [265]. Современные исследования, направленные на повышение точности линейно-угловых измерений, рассматривают применение переносных станций, предназначенных для получения параметров атмосферы на объекте работ с вводом соответствующих поправок в измеряемое расстояния [145]. Используя при этом современные роботизированные тахеометры, возможно выполнять измерения многократно, оценивая смещения в динамике за счёт реализации функции автоматического захвата цели [164, 222].

Лазерное сканирование также нашло применение в наблюдении оползней. Метод позволяет определять смещения за счёт построений облаков точек лазерных отражений по

циклом наблюдений [208]. Здесь важными направлениями в исследовании остаются угол падения лазерного луча и его влияние на получаемую точность, отражающие свойства грунтов оползня, а также освещённость объекта наблюдения. На основе лазерного сканирования можно анализировать наличие характерных признаков схода оползня, такие как обнажающиеся разрывы в грунте [182]. Основной упор в исследованиях, посвящённых методам лазерного сканирования, сделан на автоматическую постобработку полученных облаков точек лазерных отражений [268], при этом нередко в таких задачах используют дополнительные оптические сенсоры для выполнения наблюдений без закрепления марок на поверхностях объектов [243].

Методы фотограмметрии всё чаще находят своё применение ввиду доступности оборудования: камеры стали широко распространены в настоящее время, их технические характеристики стали достаточно высокими для получения качественных снимков, а их компактность и портативность позволяют с лёгкостью выполнять наблюдения без дополнительного оборудования. Весомое количество исследований посвящено исследованиям возможности использования камер потребительского класса [282].

Ввиду того, что зачастую оползневые склоны являются достаточно крутыми, нередко покрыты густой растительностью, установка прибора, а также нахождение на этом склоне человека, выполняющего наблюдения, чрезвычайно опасно. Так получили развитие и начали активно применяться дистанционные методы наблюдений. К ним можно отнести методы наблюдений с применением беспилотных воздушных судов [25, 173]. При этом имеет место закрепление на корпусе беспилотного воздушного судна сканирующих устройств. Подобный метод получил название воздушного лазерного сканирования [228]. Помимо этого, беспилотные воздушные судна также используются и для методов фотограмметрии [159, 188], при этом в настоящее время по снимкам получают пространственные модели наблюдаемых объектов [260, 279].

Методы дистанционного зондирования Земли также нашли распространение: процесс получения космических снимков упростился, а их качество существенно возросло, что делает возможным их применение при наблюдении оползней [11, 147, 149, 151, 157, 166, 178, 192, 193, 202, 216, 217, 225, 230, 232, 270, 271, 278, 291]. Метод имеет несомненное преимущество в отсутствии необходимости присутствия на объекте для получения сведений о его смещении. Зачастую оползневые склоны являются неприступными, и традиционными геодезическими методами невозможно выполнить наблюдения на подобных объектах [247]. Вопросы, требующие исследования, касаются точности определения смещений по полученным снимкам, а также периодичности циклов наблюдений, которая зависит от периода обращения спутника вокруг Земли. Однако в зарубежных работах активно предлагаются решения по данному вопросу: так, в работе [155] предлагается метод прогнозирования между проведёнными определениями

смещений по космическим снимкам. Таким образом, автор предлагает на основе математических расчётов получить информацию о смещениях в периоды отсутствия наблюдений. Метод дистанционного зондирования Земли по результатам сравнения с другими геодезическими методами показывает свою состоятельность и перспективность [237]. По данным измерений InSAR представляется возможным получения облаков точек объектов [276], что позволяет вести наблюдения за смещениями в пространственном представлении. Одним из главных недостатков в использовании спутниковой радарной интерферометрии остаётся высокая стоимость получаемых снимков, однако существуют исследования, в которых по общедоступным, но обладающим низкой точностью снимкам Landsat, были определены оползневые участки за счёт объединения снимков, полученных в разные сезоны [160]. Кроме того, объединение технологий машинного обучения и технологий получения радарных космических снимков позволяет автоматизировать процессы распознавания оползневых участков [139]. При этом если в ранних исследованиях уточнялось, что методы спутниковой радарной интерферометрии подходят только для быстротекущих оползневых процессов, то на данном этапе рядом исследований подтверждается возможность использования метода для медленных оползней в том числе [221].

Тенденцией в настоящее время стало объединение методов для их использования в решении задач. В качестве примера можно привести объединение методик лазерного сканирования и ГНСС-технологий для определения объёма оползня [169]. Нередко для наблюдений оползней ГНСС-технологии используются в совокупности с другими методами, такими как радарная интерферометрия [156] и другими методами.

1.3.3 Обзор применяемых методов оценки стабильности опорных сетей при наблюдениях за оползневыми деформациями

В настоящее время зарубежными учёными активно исследуются методы, в которых внутри деформационной сети определяется группа взаимно устойчивых пунктов, которые будут представлять собой опорную сеть [235]. Наблюдения за деформациями также может выполняться с незакреплённых опорных пунктов сети, такой метод активно изучается и имеет название «метод свободных станций», или «метод свободной сети» [229, 238, 274]. Вопросы определения нестабильных опорных пунктов в сети рассматриваются во многих зарубежных работах, в которых предполагается различный подход с точки зрения алгоритмов выявления опорных пунктов, которые были под влиянием деформаций [153, 174, 184, 197, 215, 244]. Вопросы закрепления опорных и деформационных сетей также остаются важными в ходе исследования процессов смещений оползней. От степени проработанности вопросов проектирования геодезических сетей зависит качество получаемого результата по наблюдениям смещений, именно поэтому данный вопрос активно изучается на предмет построения сетей с точки зрения

максимальной надёжности [143, 227, 242, 248, 249], качества [190, 191, 195], а также экономической целесообразности [172, 240].

Существуют различные способы оценки стабильности геодезических сетей. При этом оценка стабильности сети является важнейшей задачей в случае применения технологий спутникового позиционирования при наблюдениях за оползневыми склонами, так как в качестве опорного пункта, на который устанавливается ГНСС-приёмник в режиме базовой станции, используют наиболее стабильный по результатам оценки опорный пункт. В связи с этим важной задачей является определение в сети стабильных опорных пунктов [165, 199].

Большое количество методов подразумевает использование МНК для поиска опорных пунктов, которые потеряли стабильность [140]. Помимо этого, имеют место робастные методы оценивания стабильности сети [167, 168, 203, 234].

Наиболее классическими в этом вопросе считаются метод А. Костехеля и метод П. Марчака [30]. Можно выделить несколько категорий таких методов: методы В. Карпенко, в которых применяется корреляционный и дисперсионный методы анализа, методы, в основе которых заложен принцип неизменной отметки одного из наиболее стабильных реперов опорной сети (методы А. Костехеля, В.Н. Ганьшина, А.Ф. Стороженко, Г.К. Ботяна) [14], а также методы, в основе которых заложен принцип неизменной средней отметки всех реперов опорной сети либо группы наиболее стабильных реперов (методы В.Ф. Черникова, П. Марчака) [6, 36]. В ряде случаев при геодезических наблюдениях сложных технических объектов отмечаются затруднения в применении традиционных способов оценки стабильности [15, 75]. В работах [68, 71, 72] предлагается оценивать стабильность опорной сети по отклонению нормали к линии, поверхности треугольника или набору из поверхностей треугольников. Предлагается 3 варианта: построение нормали к линии, соединяющей 2 репера, построение нормали к поверхности треугольника в случае, если таких реперов больше 2, а также анализ множества таких поверхностей для пространственных смещений. В случае анализа отклонения нормали к поверхности треугольника предлагается построение ряда треугольников между всеми реперами опорной сети, что несколько усложняет процесс оценки стабильности, при этом результат позволяет оценить стабильность реперов только по наличию или отсутствию вертикальных смещений реперов, а не пространственных.

1.3.4 Обзор методов прогнозирования оползневых смещений

Вопросы прогнозирования смещений оползней имеют важный и основной характер ввиду того, что сведения о наличии смещений без их интерпретации представляют малую информативность для определения рисков сдвиговых процессов, а также не позволяют определить полную картину оползневых смещений.

В настоящее время для составления прогнозов смещений деформационных пунктов по геодезическим данным могут использоваться различные модели: статические, динамические, кинематические, каждая из которых в зависимости от объекта применения могут лучше или хуже отражать возможные деформации с точки зрения прогноза смещений [142]. Предлагается использовать различные виды моделей оползней: статическую, кинематическую и динамическую, при этом в работе [284] производится анализ результатов, получаемых по каждой из моделей. Согласно проведённому исследованию, динамические модели оползней являются более показательными, чем другие.

Важной составляющей при прогнозировании оползневых смещений остаётся вопрос правильного определения критериев оползневой опасности, от которых зависит, возможно ли отличить равномерное смещение оползневого тела во времени от скорого обрушения склона [87].

Анализируя смещения деформационных пунктов, закреплённых в теле оползня, возможно выполнять прогноз величины и скорости оползневых смещений на будущие периоды времени. Данному вопросу в настоящее время уделяется недостаточно внимания, однако такой прогноз может существенно дополнить получаемые сведения в ходе инженерно-геологических и геотехнических изысканий.

Имеется ряд исследований, посвящённых вопросам прогноза оползневых смещений [194]. Прогнозные модели состояются в том числе и геофизическими методами, причём нередко в сочетании с геодезическими методами сбора информации [273]. Для сбора информации и получения сведений об изменениях в реальном времени используют различные датчики и сенсоры, размещаемые в грунте наблюдаемого оползневого склона. Это могут быть датчики, регистрирующие сейсмический шум [175, 213, 272], выполняющие контроль электропроводности грунта, содержания в нём влаги. По полученным данным выполняется оценка влияния этих факторов на сход оползневых масс [162]. При этом в настоящее время с развитием технологии «интернета вещей» стало возможным получение данных в большом объёме удалённо, не находясь непосредственно на опасном объекте [170, 264].

Построение геологических и геотехнических моделей оползневых склонов способствует возможности определения вероятности наличия оползневых смещений в дальнейшем. При этом геодезические методы активно применяются для уточнения подобных моделей [254]. Полученные данные геодезическими методами также возможно использовать для прогнозирования смещений [89, 115, 183, 285].

Важным этапом в прогнозировании является метод математического моделирования. На основании создания моделей с различными параметрами представляется возможным предполагать величины смещения оползней.

В настоящее время широко распространены методы анализа временных рядов: авторегрессионные модели (AR-модели), моделирование рядов по скользящему среднему (MA-модели), интегрированные модели авторегрессии (ARIMA), в том числе её комбинация с сезонностью в данных (SARIMA). Прогноз будущих значений с применением перечисленных выше методов будет сильно зависеть от предыдущих значений ряда: их количества, а также наличия в ряде стационарности, сезонности и автокорреляции, что характерно для оползневых смещений и в большинстве случаев не позволит выполнить точный прогноз при их наличии в ряде.

1.4 Постановка задачи наблюдения оползневых склонов геодезическими методами

В дополнение к методам моделирования, среди которых МКЭ, МГЭ, МКР и др., наиболее подходящим для задач определения численных характеристик величин смещений оползневых масс остаются геодезические методы наблюдений, так как именно они позволяют получить сведения о фактических величинах смещений оползаемого грунта, которые впоследствии можно использовать для оценки опасности процесса на данный момент времени и на будущие периоды. Главным достоинством геодезических наблюдений остаётся оперативное определение положения деформационных пунктов с возможностью дальнейшей интерпретации полученных данных: косвенное определение ПСО, прогнозирование величин оползневых смещений за счёт анализа динамики его смещений, что существенно расширяет область получаемых знаний об исследуемом объекте. Кроме того, геодезические методы отличаются высокой точностью, а также скоростью выполнения работ по определению смещений в каждом цикле наблюдений. В связи с этим вопросы необходимости геодезического обеспечения наблюдений оползневых склонов остаются актуальными.

В то же время способы сбора данных геодезическими методами претерпели существенные изменения: стали повсеместно применяться методы определения пространственного положения. Оборудование, позволяющее определять пространственные положения объектов, становится доступнее для потребителей. Одновременное определение плановых координат и высот опорных и деформационных пунктов позволяет существенно упростить процесс полевых работ. Анализ пространственных смещений при этом более информативен, в особенности при наблюдениях оползневых склонов, так как они в большинстве случаев такие смещения имеют пространственный вектор. В связи с этим разработка алгоритмов обработки пространственных данных, а также изучение вопросов получаемой точности определения положения пространственными методами имеет важное значение в настоящее время. Наиболее показательный пример – технология спутникового позиционирования, стоимость оборудования для использования которой может быть невысокой относительно иных методов

позиционирования, однако технология позволяет получать пространственное положение наблюдаемых пунктов. При этом ряд вопросов методики применения технологии спутникового позиционирования при наблюдении оползневых склонов остаётся открытым для исследований. К таким вопросам можно отнести способы оценки стабильности пространственных опорных сетей, методику наблюдения пространственного положения деформационных пунктов спутниковыми методами с применением технологии RTK, способы наблюдения деформационных пунктов при затруднённых условиях на склоне, а также возможность прогнозирования величин оползневых смещений по геодезическим данным.

Другой актуальной проблемой остаётся обоснование методики выполнения наблюдений деформаций склонов геодезическими методами с помощью нормативной документации. С появлением широкого спектра измерительного оборудования сохраняется тенденция на опережение появления новых средств измерений вводу соответствующей нормативно-правовой документации, регламентирующей порядок проведения работ, что делает последние редакции документов или нецелесообразными к применению, или вызывает сложности в их интерпретации на реальные объекты и производственные задачи. По большей части современные методы остаются в недостаточной мере подкреплёнными нормативной документацией. В настоящее время наблюдается проблема своевременной актуализации нормативно-правовых актов, регулирующих порядок проведения инженерных работ, в том числе и по геодезическим наблюдениям оползневых склонов. Развитие технологий, появление новых средств измерений, методов и способов обнаружения смещений происходит быстрее, чем порядок проведения работ подобными методами и средствами измерений закрепляется в нормативных документах. При этом в процессе подготовки отчётной документации по выполнению работ обязательным является обоснование необходимой точности измерений, возможности применения тех или иных средств измерений со ссылками на соответствующие актуальные нормативно-правовые акты. Зачастую сделать это невозможно, что накладывает трудности на обоснование корректности выполнения подобного рода работ. Более того, при наличии актуальной нормативной документации не всегда сведения в ней могут быть изложены корректно, что не остаётся незамеченным профессиональным сообществом [85].

Для исключения обозначенных выше проблем предлагается разработка методики выполнения наблюдений оползневых склонов спутниковыми методами позиционирования.

1.5 Выводы по главе 1

Согласно рассмотренным научным работам и нормативно-технической документации, можно сделать вывод о том, что изучению вопросов деформаций склонов оползневыми процессами посвящено обширное количество трудов и исследований. В то же время с

появлением современных геодезических приборов, развитием технологий определения пространственного положения наблюдаемых пунктов, можно выделить ряд задач, которые требуют более детального рассмотрения и изучения. К ним можно отнести:

- вопросы проектирования опорных сетей и методов оценки их стабильности по данным пространственного положения их пунктов, полученных технологией спутникового позиционирования вместо классических методов раздельного определения положения пунктов и оценки стабильности в плане и по высоте;

- изучение вопросов зависимости точности наблюдения рабочих и деформационных пунктов технологией RTK от количества эпох;

- вопросы организации геодезических наблюдений методами линейно-угловых измерений при отсутствии возможности применения технологии спутникового позиционирования на деформационных пунктах;

- вопросы повышения качества прогноза величин деформаций оползневых склонов на основе геодезических данных.

В рамках диссертационного исследования обозначенные вопросы будут рассматриваться применительно для оползней с равномерными скоростями смещений типа «крип», возникающих на естественных склонах, согласно классификации, представленной в рекомендациях по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития оползней [97].

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

2.1 Разработка метода оценки стабильности опорных сетей аппроксимацией плановых координат и высот их пунктов плоскостью

Важным этапом при наблюдениях за деформациями склонов является оценка стабильности опорной сети, так как она должна сохраняться на длительный срок, который может насчитывать месяцы, годы и даже десятилетия в случае многолетних наблюдений. От качества данных, полученных в начальном цикле наблюдений, будет зависеть качество оценки стабильности в дальнейших циклах и, как следствие, качество наблюдений за деформациями склонов. При наблюдениях опорных пунктов технологией спутникового позиционирования получают данные о пространственных положениях опорных пунктов, в связи с чем возникает вопрос о методах оценки стабильности опорных сетей в пространстве. Именно поэтому вопрос оценки стабильности опорных сетей остаётся важным в плане исследований [2, 148, 161, 277].

Действующие нормативные документы, определяющие порядок проведения работ по наблюдениям за оползневыми деформациями и за деформациями зданий и сооружений, обозначают необходимость оценки стабильности опорных сетей для каждого цикла наблюдений. Пункт 4.8.14 СП 420 обозначает, что в каждом цикле наблюдений за оползневыми процессами должен выполняться контроль устойчивости пунктов плановой опорной геодезической сети. Аналогичная информация предоставляется в ГОСТ «Грунты» в пунктах 5.1.8 и 5.2.2. Согласно СП 420, в случае выполнения линейных, угловых или линейно-угловых измерений критерий устойчивости опорных пунктов – неизменность в пределах точности измеренных значений горизонтальных углов и/или линий между опорными пунктами. При использовании технологии спутникового позиционирования контролируется неизменность положения (в пределах СКП измерений) уравненных плановых координат и высот пунктов. Значения критериев устойчивости обосновываются в программе. Пункт 4.8.18 обозначает способы контроля устойчивости пунктов сети, среди которых измерение превышений внутри куста реперов (в случае использования одного куста реперов), измерение превышений внутри каждого куста реперов и превышений между кустами (при использовании двух и более кустов реперов) или сравнение превышений между реперами сети, уравненной как свободная (то есть вычисленной относительно одного исходного репера), если опорные реперы территориально не объединены в кусты [111].

Из этого следует, что, нормативные документы обозначают необходимость проведения работ по оценке стабильности опорных сетей, однако вопросы методологии её выполнения описаны только для высотных сетей. В то же время в производстве широко распространены методы и приборы, позволяющие выполнять одновременное определение плановых координат и

высот опорных и деформационных пунктов. В случае построения пространственных сетей, в том числе технологией спутникового позиционирования, вопросы методологии остаются открытыми: значения критериев стабильности должны быть обоснованы в программе. Оценка стабильности пространственных сетей при этом значительно сложнее с точки зрения математического аппарата и процесса вычислений. Данные моменты обуславливают необходимость в разработке метода оценки стабильности опорной сети одновременно по плановым координатам и высотам её пунктов с обоснованием получения критериев стабильности.

Предлагается выполнять оценку стабильности опорных сетей аппроксимацией плановых координат и высот их пунктов плоскостью и анализировать изменение положения характерных элементов этой плоскости (центроида плоскости, нормали к плоскости и точки на нормали к плоскости) с целью выявления нестабильных опорных пунктов на основе критериев стабильности. Предлагаемый метод снижает количество выполняемых вычислений при раздельной оценке стабильности сети в плане и по высоте и дополняет метод оценки стабильности по отклонениям нормали [68].

Процесс аппроксимации плановых координат и высот опорных пунктов плоскостью и вычисления положения её характерных элементов реализуется по МНК. Уравнение плоскости в общем виде имеет вид (1):

$$IX_k = JY_k + KH_k + D = 0, \quad (1)$$

где X_k, Y_k – плановые координаты опорного пункта, м,

H_k – высота опорного пункта, м,

k – порядковый номер опорного пункта в интервале $[1; \infty]$, плановые координаты и высота которого аппроксимируются плоскостью, ед,

I, J, K, D – коэффициенты, связанные с нормалью к плоскости направляющими косинусами на основе выражений (2) – (4) и рассчитываемые по формулам (5) – (7), ед:

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

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

$$\cos \gamma = \frac{K}{\sqrt{I^2 + J^2 + K^2}}, \quad (4)$$

$$I = \left(\sum_{k=1}^n (X_k \cdot Y_k) - \sum_{k=1}^n (Y_k \cdot H_k) \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^n (Y_k \cdot H_k) - \sum_{k=1}^n (H_k \cdot H_k) \right) - \left(\sum_{k=1}^n (X_k \cdot H_k) - \sum_{k=1}^n (H_k \cdot H_k) \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^n (Y_k \cdot Y_k) - \sum_{k=1}^n (Y_k \cdot H_k) \right), \quad (5)$$

$$J = \left(\sum_{k=1}^n (X_k \cdot H_k) - \sum_{k=1}^n (H_k \cdot H_k) \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^n (X_k \cdot Y_k) - \sum_{k=1}^n (X_k \cdot H_k) \right) - \left(\sum_{k=1}^n (X_k \cdot X_k) - \sum_{k=1}^n (X_k \cdot H_k) \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^n (Y_k \cdot H_k) - \sum_{k=1}^n (H_k \cdot H_k) \right), \quad (6)$$

$$K = \left(\sum_{k=1}^n (X_k \cdot X_k) - \sum_{k=1}^n (X_k \cdot H_k) \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^n (Y_k \cdot Y_k) - \sum_{k=1}^n (Y_k \cdot H_k) \right) - \left(\sum_{k=1}^n (X_k \cdot Y_k) - \sum_{k=1}^n (Y_k \cdot H_k) \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^n (X_k \cdot Y_k) - \sum_{k=1}^n (X_k \cdot H_k) \right), (7)$$

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,

n – количество опорных пунктов, плановые координаты и высоты которых аппроксимируются плоскостью, ед.

Значения плановых координат центроида плоскости C будут рассчитываться по формулам (8) – (9), высоты – по формуле (10):

$$X_C = \frac{\sum_{k=1}^n X_k}{n}, \quad (8)$$

$$Y_C = \frac{\sum_{k=1}^n Y_k}{n}, \quad (9)$$

$$H_C = \frac{\sum_{k=1}^n H_k}{n}. \quad (10)$$

Нормаль к плоскости будет иметь своё начало в центроиде плоскости C . При нестабильности опорной сети и смещении опорных пунктов нормаль будет отклоняться от положения, рассчитанного в предыдущем цикле наблюдений: будут изменяться направляющие косинусы $\cos\alpha$, $\cos\beta$, $\cos\gamma$ и, как следствие, углы α , β , γ . Для удобства оценки стабильности опорной сети возможно представить отклонение нормали не только в угловой, но и в линейной мере. Для этого необходимо отметить на нормали условную точку N , которая могла бы быть однозначно определена математическими соотношениями при любой конфигурации опорной сети. Предлагается ограничить полученную путём аппроксимации плоскость ломаной линией, построенной по вершинам наиболее удалённых от центроида плоскости C опорных пунктов, в результате чего будет получена фигура плоского многоугольника. Определив длину наибольшей средней линии S_M полученного многоугольника, возможно вычислить положение условной точки N , которая будет располагаться на нормали и будет удалена от центроида C плоскости на длину наибольшей средней линии многоугольника S_M (рисунок 1).

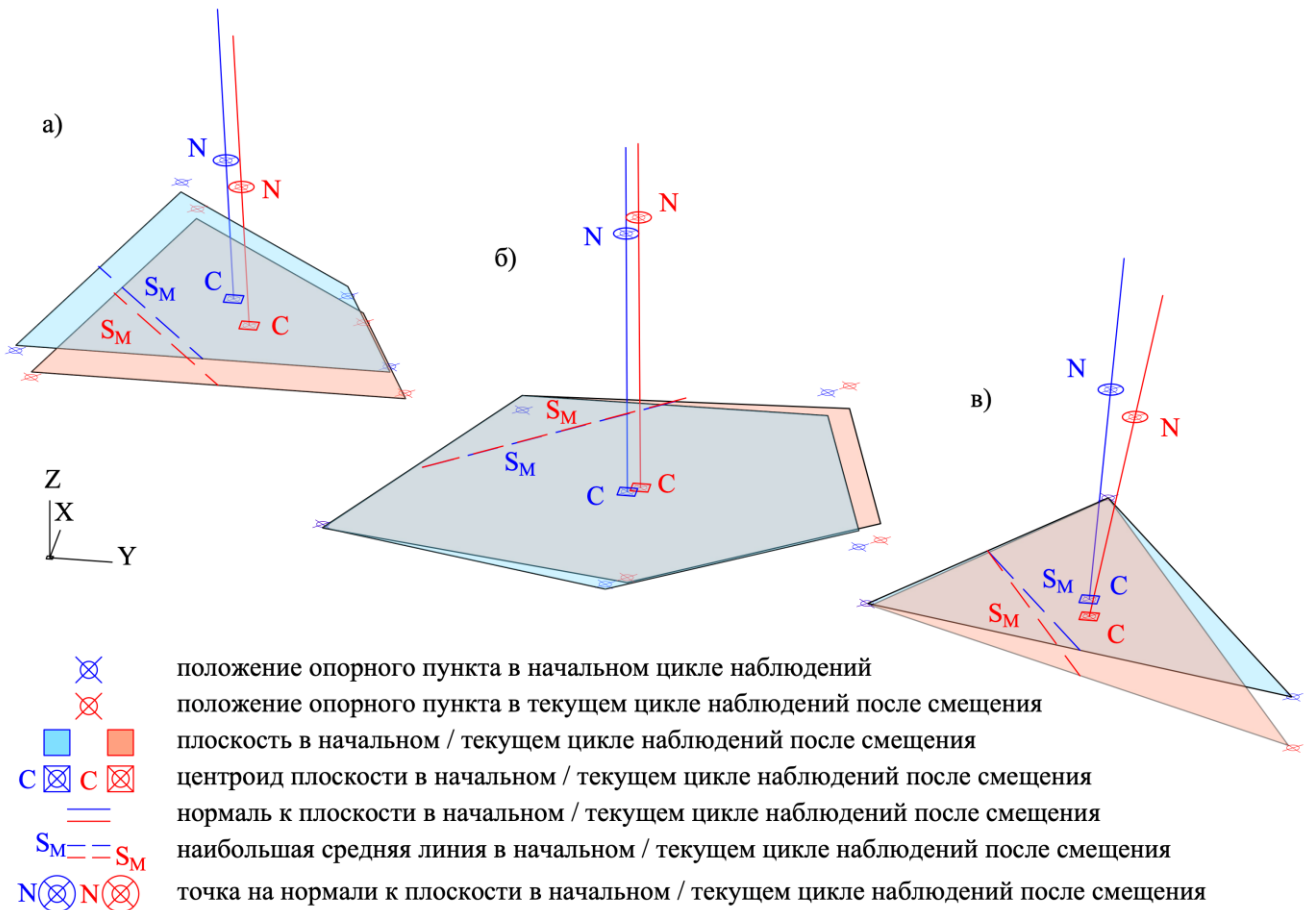


Рисунок 1 – Характерные элементы плоскости (центр масс плоскости C , нормаль к плоскости, точка на нормали к плоскости N), полученной путём аппроксимации плановых координат и высот опорных пунктов при различных видах их смещений (а) смещение в пространстве всех опорных пунктов, б) горизонтальное смещение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

Положение точки на нормали к плоскости N в таком случае будет определяться соотношениями (11) – (13):

$$X_N = X_C \cdot \cos \alpha \cdot S_M, \quad (11)$$

$$Y_N = Y_C \cdot \cos \beta \cdot S_M, \quad (12)$$

$$H_N = H_C \cdot \cos \gamma \cdot S_M, \quad (13)$$

где S_M – длина наибольшей средней линии фигуры, полученной в результате ограничения плоскости ломаной линией, построенной по вершинам наиболее удалённых от центра масс плоскости C опорных реперов, м.

Таким образом, выполнив аппроксимацию плановых координат X_k , Y_k и высот H_k опорных пунктов плоскостью в каждом цикле наблюдений, можно определить изменения ΔX_C , ΔY_C , ΔH_C , $\Delta \alpha$, $\Delta \beta$, $\Delta \gamma$, ΔX_N , ΔY_N , ΔH_N значений X_C , Y_C , H_C , α , β , γ , X_N , Y_N , H_N между циклами наблюдений по формуле (14):

$$\Delta = v_i - v_0, \quad (14)$$

где v_i – значение положения характерного элемента плоскости в текущем цикле наблюдений, ед, v_0 – значение положения характерного элемента плоскости в начальном цикле наблюдений, ед.

Вопросы интерпретации полученных данных при анализе деформаций имеют существенное значение. Это обусловлено необходимостью в отделении измерений, полученных с СКП, близкой к величине смещения от измерений, которые по результатам вычислений показывают непосредственное наличие смещения. Для таких целей имеет смысл руководствоваться критерием стабильности сети [214]. Так, при оценке стабильности сети в качестве критерия стабильности может выступать СКП определения положения опорного пункта [130].

Для определения наличия нестабильных опорных пунктов сети предлагается вычислять критерий стабильности $mX_C, mY_C, mH_C, m\alpha, m\beta, m\gamma, mX_N, mY_N, mH_N$ для каждого из характерных элементов плоскости по следующей схеме: на основе данных о СКП mX_k, mY_k, mH_k определения плановых координат X_k, Y_k и высот H_k каждого из опорных пунктов в начальном цикле наблюдений, по формуле (15) моделируется n вариантов плановых координат $X_{k_{\text{мод}}}, Y_{k_{\text{мод}}}$ и высот $H_{k_{\text{мод}}}$ опорных пунктов:

$$\begin{pmatrix} X_{k_{\text{мод}}} \\ Y_{k_{\text{мод}}} \\ H_{k_{\text{мод}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_k \\ Y_k \\ H_k \end{pmatrix} \pm \sigma \begin{pmatrix} m_{X_k} \\ m_{Y_k} \\ m_{H_k} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где m_{X_k}, m_{Y_k} – СКП определения плановых координат X_k, Y_k опорного пункта, м,

m_{H_k} – СКП определения высоты H_k опорного пункта, м,

σ – множитель доверительного интервала, $\sigma \in [1;3]$, ед.

Моделирование возможно выполнить в программном продукте Microsoft Excel с помощью команды «НОРМ.ОБР», указав в качестве её параметров вероятность с помощью функции «СЛЧИС()», среднее значение в виде значения плановой координаты или высоты опорного пункта в начальном цикле наблюдений, а также стандартное отклонение, равное СКП определения положения опорного пункта в начальном цикле наблюдений. Число n подбирается исходя из принципа $n \rightarrow \infty$, а его значение ограничивается аппаратными возможностями вычислительной системы. Опытным путём было получено оптимальное значение n , равное 1000.

СКП mX_k, mY_k, mH_k определения плановых координат X_k, Y_k и высот H_k опорных пунктов могут быть приняты, основываясь на нормативной документации о требуемой точности к СКП определения положения опорных пунктов (СП 420 для оползневых наблюдений и т.п.) либо на основе данных о результатах уравнивания сети. Каждый вариант плановых координат и высот аппроксимируется плоскостью: значения $X_C, Y_C, H_C, \alpha, \beta, \gamma, X_N, Y_N, H_N$ определяются n раз. Разброс

плановых координат X_k , Y_k и высот H_k опорных пунктов между вариантами вызовет разброс значений X_C , Y_C , H_C , α , β , γ , X_N , Y_N , H_N , что позволит определить СКП mX_C , mY_C , mH_C , $m\alpha$, $m\beta$, $m\gamma$, mX_N , mY_N , mH_N значений X_C , Y_C , H_C , α , β , γ , X_N , Y_N , H_N по формуле Бесселя (16):

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n-1}}, \quad (16)$$

где x_i – значение положения характерного элемента плоскости в данном варианте, мм,
 x – среднее из всех значений положения характерного элемента плоскости, мм,
 n – количество вариантов, ед.

Вычисленные величины СКП изменения положения каждого из характерных элементов плоскости в начальном цикле наблюдений выступают критерием стабильности сети. Превышение значениями ΔX_C , ΔY_C , ΔH_C , $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$, ΔX_N , ΔY_N , ΔH_N между циклами наблюдений величин своих критериев стабильности mX_C , mY_C , mH_C , $m\alpha$, $m\beta$, $m\gamma$, mX_N , mY_N , mH_N будет говорить об изменении положения данного характерного элемента плоскости и, следовательно, о нестабильности опорной сети. Анализ того, какие именно характерные элементы плоскости изменили положение позволит определять характер смещения опорных пунктов, а также определять конкретные нестабильные опорные пункты. Алгоритм анализа представлен в виде блок-схемы в приложении Е.

Рассмотрим ключевые моменты представленного алгоритма более подробно.

Этап 1: определение критериев стабильности характерных элементов плоскости. На данном этапе определяются значения mX_C , mY_C , mH_C , $m\alpha$, $m\beta$, $m\gamma$, mX_N , mY_N , mH_N по данным начального цикла наблюдений.

Этап 2: определение положения характерных элементов плоскости в предыдущем и текущем циклах наблюдений. На данном этапе определяются значения X_C , Y_C , H_C , α , β , γ , X_N , Y_N , H_N в текущем и предыдущих циклах наблюдений. Далее, оцениваются изменения ΔX_C , ΔY_C , ΔH_C , $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$, ΔX_N , ΔY_N , ΔH_N этих значений между циклами наблюдений и в случае, если они превышают значения своих критериев стабильности mX_C , mY_C , mH_C , $m\alpha$, $m\beta$, $m\gamma$, mX_N , mY_N , mH_N , можно говорить о нестабильности опорной сети и перейти к этапу 3.

Этап 3: анализ положения нормали к плоскости. В случае если одновременно выполняются условия $\Delta\alpha < m\alpha$, $\Delta\beta < m\beta$ и $\Delta\gamma < m\gamma$, положение нормали считается стабильным и можно говорить либо о горизонтальном смещении части опорных пунктов либо об одностороннем смещении всех опорных пунктов. В таком случае для дальнейшего анализа следует перейти к этапу 3.1. В ином случае при невыполнении хотя бы одного из условий, положение нормали считается нестабильным и можно говорить о наличии или пространственных, или вертикальных смещений части опорных пунктов, либо о

разнонаправленных смещениях всех опорных пунктов. В таком случае следует перейти к этапу 3.2.

Этап 3.1: анализ пространственного положения центроида плоскости C и точки на нормали к плоскости N . Вычисляются соотношения $\Delta X_C/\Delta X_k$, $\Delta Y_C/\Delta Y_k$, $\Delta H_C/\Delta H_k$, $\Delta X_N/\Delta X_k$, $\Delta Y_N/\Delta Y_k$, $\Delta H_N/\Delta H_k$. Значения всех соотношений, близкое к 1, будет говорить о том, что сместились все опорные пункты. Вектор направления смещения опорных пунктов можно определить по наибольшим значениям ΔX_k , ΔY_k , ΔH_k . В ином случае, если у какого-либо из соотношений значение меньше 1, это будет означать, что данный опорный пункт сместился больше, чем центроид плоскости C , точка на нормали к плоскости N и другие опорные пункты. В таком случае, опорной сети будет свойственно горизонтальное смещение части опорных пунктов. По наименьшему значению соотношения можно определить опорный пункт с наибольшим смещением, а по наибольшим величинам ΔX_k , ΔY_k сделать вывод о направленности вектора смещения вдоль оси X или Y .

Этап 3.2: анализ планового положения центроида плоскости C . В случае, если $\Delta X_C > mX_C$ или $\Delta Y_C > mY_C$, можно говорить о наличии пространственного смещения части опорных пунктов. В ином случае, при одновременном выполнении условий $\Delta X_C < mX_C$ и $\Delta Y_C < mY_C$ можно сделать вывод, что смещения опорных пунктов характеризуются осадкой или поднятием. С целью дальнейшего анализа необходимо перейти к этапу 3.2.1, в котором представляется возможным определить опорные пункты, смещения которых могли характеризоваться осадкой или поднятием.

Этап 3.2.1: анализ углов α , β , γ наклона нормали к плоскости. По анализу углов α , β , γ наклона нормали к плоскости можно определить нестабильные опорные пункты в сети (таблица 3).

Таблица 3 – 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 плановыми координатами $X_k < X_C$ Поднятие опорных пунктов с плановыми координатами $X_k > X_C$
$\Delta\alpha > m\alpha$, $\Delta\alpha < 0$ $\Delta\beta < m\beta$ $\Delta\gamma > m\gamma$, $\Delta\gamma \approx \Delta\alpha$	Осадка опорных пунктов с плановыми координатами $X_k > X_C$ Поднятие опорных пунктов с плановыми координатами $X_k < X_C$
$\Delta\alpha < m\alpha$ $\Delta\beta > m\beta$, $\Delta\beta > 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$, $\Delta\gamma \approx \Delta\beta$	Осадка опорных пунктов с плановыми координатами $Y_k < Y_C$ Поднятие опорных пунктов с плановыми координатами $Y_k > Y_C$
$\Delta\alpha < m\alpha$ $\Delta\beta > m\beta$, $\Delta\beta < 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$, $\Delta\gamma \approx \Delta\beta$	Осадка опорных пунктов с плановыми координатами $Y_k > Y_C$ Поднятие опорных пунктов с плановыми координатами $Y_k < Y_C$

Продолжение таблицы 3

$\Delta\alpha > m\alpha, \Delta\alpha > 0$ $\Delta\beta > m\beta, \Delta\beta > 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$	Осадка опорных пунктов с плановыми координатами $X_k < X_C, Y_k < Y_C$ Поднятия опорных пунктов с плановыми координатами $X_k > X_C, Y_k > Y_C$
$\Delta\alpha > m\alpha, \Delta\alpha > 0$ $\Delta\beta > m\beta, \Delta\beta < 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$	Осадка опорных пунктов с плановыми координатами $X_k < X_C, Y_k > Y_C$ Поднятия опорных пунктов с плановыми координатами $X_k > X_C, Y_k < Y_C$
$\Delta\alpha > m\alpha, \Delta\alpha < 0$ $\Delta\beta > m\beta, \Delta\beta > 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$	Осадка опорных пунктов с плановыми координатами $X_k > X_C, Y_k < Y_C$ Поднятия опорных пунктов с плановыми координатами $X_k < X_C, Y_k > Y_C$
$\Delta\alpha > m\alpha, \Delta\alpha < 0$ $\Delta\beta > m\beta, \Delta\beta < 0$ $\Delta\gamma > m\gamma$	Осадка опорных пунктов с плановыми координатами $X_k > X_C, Y_k > Y_C$ Поднятия опорных пунктов с плановыми координатами $X_k < X_C, Y_k < Y_C$

По представленному методу оценки стабильности опорных сетей аппроксимацией плановых координат и высот их пунктов плоскостью разработан и реализован алгоритм в программном продукте на языке программирования Python (приложение В) [51, 104].

Применение данного алгоритма для оценки стабильности опорных сетей, наблюдаемых технологией спутникового позиционирования в режиме «статика», предлагается осуществлять по следующей схеме:

В начальном цикле наблюдений:

1. Определение критериев стабильности характерных элементов плоскости.
2. Определение положения характерных элементов плоскости в текущем цикле наблюдений.

В последующих циклах наблюдений:

1. Определение положения характерных элементов плоскости в текущем цикле наблюдений и их смещений относительно начального цикла наблюдений.

Если сеть стабильна, наиболее надёжный опорный пункт из предыдущего цикла наблюдений принимается как наиболее надёжный опорный пункт в текущем цикле наблюдений, пункты 1 – 3 алгоритма действий по обработке последующих циклов наблюдений повторяются при дальнейших наблюдениях.

Если обнаружен нестабильный опорный пункт, существует несколько вариантов:

– если нестабильный опорный пункт не пригоден для дальнейшего использования (уничтожен), опорный пункт исключается из обработки, по данным начального цикла наблюдений определяются новые критерии стабильности, а в дальнейших циклах наблюдений выполняется оценка стабильности без учёта данного опорного пункта.

– если нестабильный опорный пункт сместился, но есть предпосылки для его стабилизации, при оценке стабильности в следующем цикле наблюдений текущий цикл наблюдений можно рассматривать как начальный цикл наблюдений, определив для него критерии стабильности.

– в случае если определено, что стабильность потеряли все опорные пункты сети, необходимо повторно выполнить ограниченное уравнивание, а в качестве исходного пункта использовать другой наиболее надёжный опорный пункт, выбрав его по наименьшим СКП определения его положения из предыдущего цикла наблюдений, с плановыми координатами и высотой из предыдущего цикла наблюдений. Повторный анализ поможет выявить случай, при котором опорный пункт был ошибочно отнесён к наиболее надёжному опорному пункту и потерял стабильность.

Сравним оценку стабильности опорных пунктов предлагаемым методом с классическими с разделением на плановые и высотные сети на примере моделирования сетей.

При оценке стабильности плановых сетей наиболее распространённым является метод последовательного анализа, суть которого заключается в том, что каждая пара опорных пунктов p и q рассматривается в качестве исходной стороны, при этом пункт p считается исходным, а q – ориентирным. Вся сеть в текущем цикле перемещается до совмещения исходных пунктов в текущем и начальном цикле и разворачивается для совмещения исходных направлений и затем пересчитывается (без изменения масштабного коэффициента). Коэффициент устойчивости в k цикле для данной исходной стороны вычисляется по формуле (17):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta S_i^k)^2}{n-1}}, \quad (17)$$

где n – количество пунктов, ед,

ΔS_i^k – величина, рассчитываемая по формуле (18):

$$\Delta S_i^k = \sqrt{(X_i^k - X_i^0)^2 + (Y_i^k - Y_i^0)^2}, \quad (18)$$

где X_i^k – координата X пункта i в k цикле, м,

X_i^0 – координата X пункта i в 0 цикле, м,

Y_i^k – координата Y пункта i в k цикле, м,

Y_i^0 – координата Y пункта i в 0 цикле, м.

Значения σ оцениваются для каждой из сторон сети. Опорная сторона $p-q$ с минимальным значением σ считается наиболее стабильной.

Для оценки стабильности высотных сетей существуют различные математические методы, в основе которых лежат принципы неизменности отметки одного из наиболее стабильных реперов (способы А. Костехеля, Г.К. Ботяна, В.Н. Ганышина, Мартусевича и др.) либо принципы неизменности средней отметки всех реперов сети (способы П. Марчака, В. Черникова и др.). В способе А. Костехеля предполагается, что значения одноимённых уравненных превышений между опорными пунктами между циклами зависит исключительно от их осадок, в связи с чем предлагается оценивать их изменения между циклами, а наиболее

стабильный опорный пункт выбирать по минимальному значению суммы квадратов отклонений. Значение расхождения вычисляется по формуле (19):

$$v = h_k - h_0, \quad (19)$$

где h_k – превышение в k цикле, м,

h_0 – превышение в 0 цикле, м.

Далее один из опорных пунктов выбирается в качестве исходного, после чего выполняется уравнивание. Вычисляют квадраты расхождений превышений vv для каждой пары опорных пунктов, а затем сумму $[vv]$. Процесс выполняется для всех опорных пунктов сети – каждый опорный пункт выбирается в качестве исходного. Опорный пункт, для которого значение суммы квадратов отклонений $[vv]$ минимально, считается наиболее стабильным в текущем цикле.

Для количественной оценки стабильности сети А. Костехелем предлагается определять степень устойчивости или неустойчивости опорных пунктов по формуле (20):

$$N = \frac{\Delta_{пред}}{\Delta}, \quad (20)$$

где Δ – величина, рассчитываемая по формуле (21),

$\Delta_{пред}$ – величина, рассчитываемая по формулам (22) – (23):

$$\Delta = H_k - H_0, \quad (21)$$

где H_k – высота пункта в k цикле, м,

где H_0 – высота пункта в 0 цикле, м,

$$\Delta_{пред} = m_L \sqrt{L}, \quad (22)$$

$$\Delta_{пред} = m_h \sqrt{N}, \quad (23)$$

где m_L – СКП измерения превышения на 1 км двойного хода, мм/км,

L – длина хода, км,

m_h – СКП измерения превышения на станции, мм,

N – число штативов, ед.

Для проверки методов оценки стабильности и их сравнения с пространственным методом оценки смоделируем сеть из 3 опорных пунктов с расстояниями между опорными пунктами до 1 км. Плановые координаты и высоты опорных пунктов в 0 цикле представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Плановые координаты и высоты опорных пунктов модельной опорной сети в 0 цикле

Цикл	Пункт	X , м	Y , м	H , м
0	1	200,542	439,703	0,787
	2	366,749	394,567	0,935
	3	188,483	217,615	1,386

Далее смоделируем смещение опорного пункта 2 на величину 4 мм в плане и 1,5 мм по высоте между циклами, а количество циклов наблюдений примем равным 10. Результаты моделирования плановых координат и высот представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Плановые координаты и высоты опорных пунктов модельной опорной сети в 1 – 9 циклах

Цикл	Пункт	X, м	Y, м	H, м
1	1	200,542	439,703	0,787
	2	366,753	394,571	0,934
	3	188,483	217,615	1,386
2	1	200,542	439,703	0,787
	2	366,757	394,575	0,932
	3	188,483	217,615	1,386
3	1	200,542	439,703	0,787
	2	366,761	394,579	0,931
	3	188,483	217,615	1,386
4	1	200,542	439,703	0,787
	2	366,765	394,583	0,929
	3	188,483	217,615	1,386
5	1	200,542	439,703	0,787
	2	366,769	394,587	0,928
	3	188,483	217,615	1,386
6	1	200,542	439,703	0,787
	2	366,773	394,591	0,926
	3	188,483	217,615	1,386
7	1	200,542	439,703	0,787
	2	366,777	394,595	0,925
	3	188,483	217,615	1,386
8	1	200,542	439,703	0,787
	2	366,781	394,599	0,923
	3	188,483	217,615	1,386
9	1	200,542	439,703	0,787
	2	366,785	394,603	0,922
	3	188,483	217,615	1,386

Следующим действием смоделируем выполненные линейно-угловые наблюдения в данной сети, а также результаты нивелирования с учётом СКП наблюдений. Примем СКП измерения угла 5", СКП измерения расстояний 2 мм + 2 мм/км СКП измерения превышений 1,5 мм/км двойного хода. Результаты моделирования представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Смоделированные измерения в сети с учётом СКП измерений

Цикл	Сторона	Направление	Расстояние	Превышение
0	1 – 2	0°0'6"	172,225	0,148
	1 – 3	282°5'6"	222,416	0,599
	2 – 1	0°0'3"	172,225	–0,148
	2 – 3	59°58'48"	251,183	0,451
	3 – 1	0°0'8"	222,417	–0,600
	3 – 2	317°53'47"	251,177	–0,450
1	1 – 2	359°59'57"	172,23	0,148

Продолжение таблицы 6

1	1 – 3	282°5'2"	222,417	0,599
	2 – 1	0°0'1"	172,231	–0,147
	2 – 3	59°58'48"	251,183	0,452
	3 – 1	359°59'49"	222,417	–0,599
	3 – 2	317°53'48"	251,183	–0,452
2	1 – 2	359°59'57"	172,231	0,145
	1 – 3	282°4'56"	222,417	0,599
	2 – 1	0°0'1"	172,232	–0,145
	2 – 3	59°58'35"	251,192	0,454
	3 – 1	0°0'3"	222,413	–0,599
	3 – 2	317°53'39"	251,187	–0,454
3	1 – 2	359°59'58"	172,234	0,144
	1 – 3	282°4'52"	222,416	0,599
	2 – 1	0°0'6"	172,237	–0,144
	2 – 3	59°58'42"	251,191	0,455
	3 – 1	0°0'0"	222,417	–0,599
	3 – 2	317°53'41"	251,196	–0,455
4	1 – 2	359°59'56"	172,238	0,142
	1 – 3	282°4'48"	222,413	0,599
	2 – 1	0°0'1"	172,241	–0,142
	2 – 3	59°58'33"	251,203	0,457
	3 – 1	0°0'7"	222,415	–0,600
	3 – 2	317°54'2"	251,196	–0,457
5	1 – 2	359°59'55"	172,243	0,141
	1 – 3	282°4'32"	222,417	0,599
	2 – 1	359°59'56"	172,242	–0,141
	2 – 3	59°58'19"	251,208	0,459
	3 – 1	359°59'57"	222,417	–0,599
	3 – 2	317°53'44"	251,205	–0,458
6	1 – 2	0°0'2"	172,246	0,139
	1 – 3	282°4'25"	222,408	0,600
	2 – 1	0°0'3"	172,243	–0,139
	2 – 3	59°58'16"	251,211	0,459
	3 – 1	0°0'3"	222,416	–0,599
	3 – 2	317°53'52"	251,212	–0,460
7	1 – 2	0°0'8"	172,244	0,139
	1 – 3	282°4'23"	222,415	0,599
	2 – 1	0°0'3"	172,246	–0,138
	2 – 3	59°58'17"	251,217	0,462
	3 – 1	0°0'0"	222,412	–0,599
	3 – 2	317°53'48"	251,218	–0,461
8	1 – 2	0°0'3"	172,247	0,136
	1 – 3	282°4'20"	222,411	0,600
	2 – 1	0°0'1"	172,249	–0,136
	2 – 3	59°58'2"	251,225	0,463
	3 – 1	359°59'59"	222,412	–0,599
	3 – 2	317°53'53"	251,222	–0,463
9	1 – 2	0°0'5"	172,257	0,135
	1 – 3	282°4'14"	222,415	0,599

Продолжение таблицы 6

9	2 – 1	359°59'58"	172,251	–0,135
	2 – 3	59°57'57"	251,228	0,464
	3 – 1	0°0'4"	222,413	–0,599
	3 – 2	317°53'44"	251,229	–0,465

Полученные данные использовались для параметрического уравнивания по методу наименьших квадратов. Для уравнивания в плане поочередно каждая из сторон принималась в качестве исходной, при этом первый опорный пункт стороны принимался исходным с плановыми координатами (0, 0), а второй опорный пункт принимался ориентирным, координаты которого рассчитывались по формулам полярной засечки (формулы (24) – (25)):

$$X = D \cos \beta, \quad (24)$$

$$Y = D \sin \beta, \quad (25)$$

где D – измеренное расстояние, м,

β – измеренное направление, угловые секунды.

Уравненные плановые координаты опорных пунктов сети представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Уравненные плановые координаты опорных пунктов сети

Цикл	Пункт	Исходная сторона					
		1 – 2		1 – 3		2 – 3	
		X, м	Y, м	X, м	Y, м	X, м	Y, м
0	1	0,000	0,000	0,000	0,000	172,225	–0,010
	2	172,257	0,004	172,224	–0,036	0,000	0,000
	3	46,589	–217,483	46,511	–217,498	125,744	217,495
1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	172,230	–0,010
	2	172,257	0,004	172,230	–0,041	0,000	0,000
	3	46,589	–217,483	46,511	–217,498	125,744	217,495
2	1	0,000	0,000	0,000	0,000	172,230	–0,010
	2	172,257	0,004	172,230	–0,030	0,000	0,000
	3	46,579	–217,487	46,511	–217,498	125,744	217,495
3	1	0,000	0,000	0,000	0,000	172,235	–0,008
	2	172,257	0,004	172,234	–0,035	0,000	0,000
	3	46,574	–217,484	46,511	–217,498	125,744	217,495
4	1	0,000	0,000	0,000	0,000	172,239	–0,004
	2	172,257	0,004	172,235	–0,021	0,000	0,000
	3	46,556	–217,488	46,511	–217,498	125,744	217,495
5	1	0,000	0,000	0,000	0,000	172,243	–0,007
	2	172,257	0,004	172,243	–0,019	0,000	0,000
	3	46,553	–217,491	46,511	–217,498	125,744	217,495
6	1	0,000	0,000	0,000	0,000	172,247	0,003
	2	172,257	0,004	172,247	–0,018	0,000	0,000
	3	46,533	–217,485	46,511	–217,498	125,744	217,495
7	1	0,000	0,000	0,000	0,000	172,244	–0,005
	2	172,257	0,004	172,244	–0,010	0,000	0,000
	3	46,538	–217,492	46,511	–217,498	125,744	217,495
8	1	0,000	0,000	0,000	0,000	172,248	0,000
	2	172,257	0,004	172,246	–0,001	0,000	0,000

Продолжение таблицы 7

8	3	46,520	-217,492	46,511	-217,498	125,744	217,495
9	1	0,000	0,000	0,000	0,000	172,255	-0,002
	2	172,257	0,004	172,259	-0,004	0,000	0,000
	3	46,521	-217,495	46,511	-217,498	125,744	217,495

Для уравнивания по высоте каждый из реперов поочерёдно принимался в качестве исходного с высотой 0 м. Уравненные высоты опорных пунктов сети представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Уравненные высоты опорных пунктов сети

Цикл	Пункт	H, м		
		Исходный пункт 1	Исходный пункт 2	Исходный пункт 3
0	1	0,000	-0,148	-0,599
	2	0,148	0,000	-0,451
	3	0,599	0,451	0,000
1	1	0,000	-0,147	-0,599
	2	0,147	0,000	-0,452
	3	0,599	0,452	0,000
2	1	0,000	-0,145	-0,599
	2	0,145	0,000	-0,454
	3	0,599	0,454	0,000
3	1	0,000	-0,144	-0,599
	2	0,144	0,000	-0,455
	3	0,599	0,455	0,000
4	1	0,000	-0,142	-0,599
	2	0,142	0,000	-0,457
	3	0,599	0,457	0,000
5	1	0,000	-0,141	-0,599
	2	0,141	0,000	-0,458
	3	0,599	0,458	0,000
6	1	0,000	-0,139	-0,599
	2	0,139	0,000	-0,46
	3	0,599	0,460	0,000
7	1	0,000	-0,138	-0,599
	2	0,138	0,000	-0,461
	3	0,599	0,461	0,000
8	1	0,000	-0,136	-0,599
	2	0,136	0,000	-0,463
	3	0,599	0,463	0,000
9	1	0,000	-0,135	-0,599
	2	0,135	0,000	-0,464
	3	0,599	0,464	0,000

Далее на основе уравненных плановых координат и высот пунктов оценивалась стабильность сети в плане по методу последовательного анализа, по высоте методом А. Костехеля и в пространстве методом аппроксимации пространственных координат плоскостью. Результаты оценки стабильности сети в плане представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Оценка стабильности опорной сети в плане по методу последовательного анализа

Циклы	σ, мм			Наиболее стабильное направление
	Исходное направление			
	1 – 2	1 – 3	2 – 3	
0 – 1	8	8	4	1 – 2, 1 – 3
0 – 2	13	9	14	1 – 3
0 – 3	14	15	11	2 – 3
0 – 4	27	16	23	1 – 3
0 – 5	29	31	34	1 – 2
0 – 6	35	36	38	1 – 2
0 – 7	28	36	39	1 – 2
0 – 8	43	38	53	1 – 3
0 – 9	40	47	59	1 – 2

Метод последовательного анализа для опорной сети из 3 пунктов выявил верно наиболее стабильное направление только в 33 % случаев. При малом количестве пунктов в процессе уравнивания ошибки могут распределяться равномерно между смежными опорными сторонами, что может затруднять процесс определения наиболее стабильной опорной стороны.

Результаты оценки стабильности по высоте методом А. Костехеля представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Оценка стабильности опорной сети по высоте по методу А. Костехеля

Циклы	σ, мм			Наиболее стабильный опорный пункт
	Исходный пункт			
	1	2	3	
0 – 1	1	2	1	1, 3
0 – 2	9	18	9	1, 3
0 – 3	16	32	16	1, 3
0 – 4	36	72	36	1, 3
0 – 5	49	98	49	1, 3
0 – 6	81	162	81	1, 3
0 – 7	100	200	100	1, 3
0 – 8	144	288	144	1, 3
0 – 9	169	338	169	1, 3

Для оценки стабильности по высоте во всех случаях были верно определены наиболее стабильные опорные пункты.

Далее выполнялась оценка стабильности опорной сети в пространстве. Критерий стабильности был получен исходя из того, что при стабильности опорных пунктов, смещение плоскости, полученной путём аппроксимации пространственных координат в 0 цикле, будет обусловлено лишь СКП измерений. Таким образом, было выполнено моделирование возможных положений плоскости в 0 цикле на основе СКП определения положений опорных пунктов, полученных в результате его уравнивания. Так были получены критерии для каждого характерного элемента плоскости с доверительной вероятностью 68,3 %, 95,5 % и 99,7 % (1 σ , 2 σ и 3 σ соответственно). Затем оценивались смещения характерных элементов плоскости и в случае,

если значения превышали критерии стабильности, делался вывод о стабильности сети и характере смещения её опорных пунктов. Результаты оценки стабильности в пространстве представлены в таблицах 11 – 12.

Таблица 11 – Оценка стабильности опорной сети в пространстве путём аппроксимации пространственных координат опорных пунктов плоскостью (ΔX_C , ΔY_C – смещение центроида плоскости по осям X , Y соответственно, м, ΔH_C – смещение центроида плоскости по высоте, м, α , β , γ – углы наклона нормали к плоскости, ΔX_N , ΔY_C – смещение точки на нормали плоскости по осям X , Y соответственно, м, ΔH_N – смещение точки на нормали плоскости по высоте, м, 2σ – критерий стабильности характерного элемента плоскости с доверительной вероятностью 95,5 %)

№ циклов	ΔX_C	ΔY_C	ΔH_C	α	β	γ	ΔX_N , м	ΔY_N , м	ΔH_N , м
0 – 1	0,000	0,001	0,002	0°00'00,22"	0°00'00,92"	0°00'00,90"	0,000	0,001	0,003
0 – 2	0,003	0,002	0,001	0°00'09,27"	0°00'02,29"	0°00'01,79"	0,008	0,003	0,005
0 – 3	0,004	0,005	0,002	0°00'07,77"	0°00'03,21"	0°00'03,63"	0,009	0,003	0,008
0 – 4	0,005	0,005	0,003	0°00'10,45"	0°00'02,42"	0°00'02,97"	0,011	0,004	0,010
0 – 5	0,006	0,008	0,003	0°00'11,17"	0°00'04,33"	0°00'04,90"	0,013	0,005	0,013
0 – 6	0,008	0,008	0,003	0°00'09,95"	0°00'00,39"	0°00'00,13"	0,014	0,009	0,014
0 – 7	0,009	0,009	0,005	0°00'13,36"	0°00'00,73"	0°00'01,40"	0,017	0,008	0,016
0 – 8	0,010	0,010	0,004	0°00'16,04"	0°00'00,06"	0°00'00,70"	0,020	0,010	0,018
0 – 9	0,011	0,012	0,005	0°00'17,98"	0°00'01,90"	0°00'02,72"	0,022	0,011	0,020
2σ	0,001	0,001	0,001	0°00'03,17"	0°00'02,65"	0°00'02,72"	0,002	0,002	0,002

Таблица 12 – Анализ результатов оценки стабильности в пространстве

№ циклов	Результат анализа
0 – 1	Смещение части пунктов в плане, наиболее подвижный пункт: 2. Вектор смещения направлен по оси X .
0 – 2	Смещение части пунктов в пространстве: пункты под влиянием осадки: 2, под влиянием поднятия: 1; 3.
0 – 3	Смещение части пунктов в пространстве: пункты под влиянием поднятия: 1.
0 – 4	Смещение части пунктов в пространстве: пункты под влиянием осадки: 2.
0 – 5	Смещение части пунктов в пространстве: пункты под влиянием поднятия: 1.
0 – 6	Смещение части пунктов в пространстве: пункты под влиянием осадки: 2.
0 – 7	Смещение части пунктов в пространстве: пункты под влиянием осадки: 2.
0 – 8	Смещение части пунктов в пространстве: пункты под влиянием осадки: 2.
0 – 9	Смещение части пунктов в пространстве: пункты под влиянием осадки: 2.

Метод оценки стабильности в пространстве показал хорошие результаты: лишь в 2 случаях из 9 был неверно выявлен нестабильный опорный пункт. В остальных случаях был верно определён не только нестабильный опорный пункт, но и характер его смещения.

Аналогичным образом был проведён анализ для других модельных сетей, в которых изменялось количество опорных пунктов, расстояние между ними, СКП измерений, количество смещающихся опорных пунктов, а также величина их смещения.

На основании проведённого анализа можно сделать вывод, что метод оценки стабильности в пространстве работает сопоставимо с классическими методами оценки стабильности в плане и по высоте. Стоит отметить, что метод последовательного анализа для оценки стабильности в плане очень чувствителен к точности наблюдений, а также к количеству опорных пунктов в сети: при минимально необходимом количестве опорных пунктов (3 или 4) возникает большое количество ошибок в определении наиболее стабильного направления, что может быть связано с распределением ошибок внутри сети при уравнивании на смежные стороны. Кроме того, методы отлично показывают себя при большом количестве опорных пунктов (5 и более), но в случае, если смещается более чем 1 опорный пункт, а также вектор смещений разнонаправленный (в особенности для оценки стабильности по высоте), возникает большое количество неверно определённых опорных пунктов и направлений. Метод оценки стабильности в пространстве при таких условиях показал более качественные результаты.

В то же время математический аппарат метода оценки стабильности в пространстве проще: для оценки стабильности в плане и по высоте необходимо многократно отдельно уравнивать сеть, выбирая в качестве исходных различные опорные пункты и пары опорных пунктов для исходного направления, что усложняет вычисления. Для оценки стабильности в пространстве достаточно лишь однократно уравнивать сеть и аппроксимировать плоскость в каждом из циклов, после чего станет возможным оценить смещения её характерных элементов между циклами.

Проведённые расчёты показывают, что метод оценки стабильности в пространстве может быть способом анализа устойчивости опорных пунктов наравне с методами отдельной оценки в плане и по высоте.

В связи с тем, что исходными данными для оценки стабильности пространственной опорной сети являются пространственные координаты опорных пунктов, а также СКП их определения подлежат рассмотрению следующие вопросы:

- способы закрепления пространственных опорных пунктов на местности;
- конфигурация пространственной опорной сети: варианты расположения опорных пунктов относительно объекта – оползневого склона, необходимое количество опорных пунктов;
- способ определения пространственного положения опорных пунктов геодезическими методами.

Закрепление опорных сетей следует осуществлять пунктами долговременного или постоянного закрепления согласно п. 5.1.11 СП 317. Конструкцию опорных пунктов, при этом следует обосновывать в программе с учётом глубины сезонного промерзания или глубины оттаивания для районов распространения многолетнемерзлых грунтов и других свойств грунтов. Тип закрепления и внешнее оформление пунктов опорных геодезических сетей должны

обеспечивать удобство их использования, защищённость от повреждения и неизменность пространственного положения [109]. Действующие нормативные документы [109] при обосновании конструкции пунктов ссылаются на ГКИНП-07-016-91 Правила закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сетей [16], согласно которой при глубине промерзания грунта до 200 см пункты геодезической сети закрепляют центрами следующих типов: тип 3 оп., 7 оп., 8 оп., 9 оп., 92, 147, 158 оп. знак, 160, 162, 183, а для определения только вертикальных смещений возможно заложение следующих типов реперов: 160, 161, 162, 175, 183 в областях сезонного промерзания грунтов, тип 15 – в районах подвижных песков, 9, 114, 164, 173, 174, 176 – в скальных грунтах.

Опираясь на приведённые выше известные способы закрепления пунктов геодезических сетей, в качестве наиболее удачного способа закрепления опорных пунктов с целью фиксирования его пространственного положения предлагается вариант, представленный на рисунке 2.

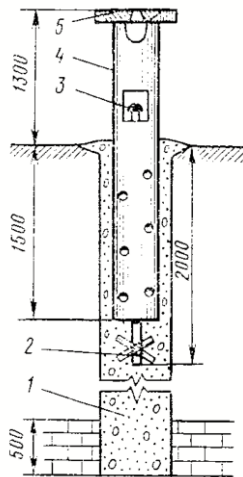


Рисунок 2 – Конструкция опорных пунктов пространственных опорных сетей при наблюдениях за оползневыми деформациями склонов (1 – бетонная свая, 2 – якорь репера, 3 – реперная головка, 4 – наружный знак, 5 – коническое отверстие) [24]

Отверстие в верхней площадке знака по диаметру станového винта позволяет устанавливать на пункт как спутниковое оборудование, так и приборы для линейно-угловых измерений. С помощью реперной головки происходит фиксация пункта по пространственным координатам: в плане и по высоте. Использование опорных пунктов с подобной конструкцией позволит применять спутниковое оборудование при определении пространственных положений, что значительно упростит процесс проведения работ по наблюдениям оползневых деформаций склонов. При продолжительных периодических наблюдениях на объекте возможно предусмотреть использование пунктов принудительного центрирования (ППЦ) в качестве опорных пунктов, так как это значительно повышает точность измерений за счёт исключения

необходимости центрирования над пунктом на штативе и существенно упрощает производство полевых работ.

Рассматривая способы конфигурации опорных сетей при наблюдениях за оползневыми деформациями склонов, стоит отметить, что согласно п. 5.1.5 ГОСТ «Грунты» располагать опорные пункты при наблюдениях за деформациями следует вне зоны осадочных явлений, оползневых склонов, нестабилизированных насыпей, торфяных болот, подземных выработок, карстовых образований и других неблагоприятных инженерно-геологических и гидрогеологических условий. Согласно своду правил 126.13330.2017 «Геодезические работы в строительстве» (СП 126) удаление опорных пунктов от объекта работ должно быть не менее 150 м с целью исключения влияния на них деформаций [105]. При этом исследование [133] показывает, что данная величина в действительности отражает картину НДС грунтового массива при отсутствии зон тектонических нарушений на объекте работ. В случае наличия зон тектонических нарушений зона влияния может увеличиваться в 2 и более раз от нормативных значений в зависимости от нагрузки на основание и свойств грунтового массива. Основываясь на данных выводах, оптимальным удалением опорных пунктов от оползневого склона стоит принять величину не менее 150 м. В случаях, когда на объекте работ возможно наличие зон тектонических нарушений, возможно выполнение математического моделирования (например, с применением МКЭ, МГЭ или МКР) в программных продуктах (Plaxis [239], Ansys [144] и др.) для расчёта зоны влияния на конкретном объекте с дальнейшим закреплением опорных пунктов за её пределами.

Количество опорных пунктов будет зависеть от вида наблюдаемых перемещений: при наблюдении вертикальных перемещений, согласно п. 5.1.4 ГОСТ «Грунты», а также п. 9.6 СП 126 [105], внешняя исходная основа должна закрепляться кустом реперов, число которых должно быть не менее трёх. При наблюдении горизонтальных перемещений, согласно п. 5.1.3 и 5.1.5 СП 317, число опорных пунктов должно быть не менее четырёх, а при одновременном наблюдении вертикальных и горизонтальных перемещений – не менее пяти.

В случае применения метода оценки стабильности по пространственным координатам на основе аппроксимации координат плоскостью минимальное количество пунктов для пространственной оценки стабильности составляет 3 единицы. Стоит учесть, что часть опорных пунктов может быть утрачена ввиду деформаций, вандализма или других причин. В таком случае преимущество данных об оценке стабильности между циклами может быть утрачено на период повторной закладки новых опорных пунктов, потребуется повторное уравнивание опорной сети. Для исключения подобных случаев с точки зрения экономической эффективности и сохранения надёжности опорной сети оптимальным количеством будет 4 опорных пункта на объект. Утрата одного из опорных пунктов позволит выполнить оценку стабильности сети в текущем цикле по

3 опорным пунктам. В дальнейших циклах возможно заложение новых опорных пунктов и определение их координат относительно сохранившихся, что обеспечивает преемственность наблюдений между циклами.

В связи с этим наиболее оптимальной конфигурацией при использовании пространственных методов определения будет закрепление не менее четырёх пунктов опорной сети с равномерным их расположением по периметру наблюдаемого объекта, вне зоны влияния оползня. Удаление опорных пунктов от объекта следует принимать не менее 150 м, а в случае возможного наличия зон технических нарушений – на расчётную величину, полученную по результатам моделирования НДС грунтового массива.

От качества наблюдений опорных пунктов, в свою очередь, зависит точность определения деформаций склона, в связи с чем вопрос точности определения опорных пунктов является важным [73, 74]. Действующая нормативная документация рассматривает методы спутниковых геодезических определений как один из вариантов создания опорной сети. Данный метод удобен тем, что при наблюдении в режиме «статика» возможно достичь высокой точности определения положения опорных пунктов, так как отсутствует необходимость в наличии взаимной видимости между опорными пунктами, а также выполняется одновременное определение плановых координат и высот опорных пунктов. Нормативная документация [17, 18, 109] обозначает технологию спутникового позиционирования как один из приоритетных способов создания опорных сетей. В методике наблюдений оползневых склонов геодезическими методами предлагается выполнять определение положения пунктов опорной сети с применением технологии спутникового позиционирования в режиме «статика». Порядок выполнения наблюдений в начальном цикле наблюдений:

1. Выполнение наблюдений закреплённых опорных пунктов в режиме «статика» с длительностью сеанса наблюдений не менее 2 часов на каждом опорном пункте. Количество сеансов определяется по формуле (26):

$$N = \frac{S - O}{R - O}, \quad (26)$$

где S – количество опорных пунктов, ед,

O – количество совместно используемых опорных пунктов в двух смежных сеансах, ед,

R – количество используемых приёмников, ед.

2. Предварительная обработка, которая заключается в разрешении неоднозначности фазовых измерений и вычислении векторов базовых линий. По результатам предобработки для всех векторов определяются фиксированные или плавающие решения, при необходимости выполняется отбраковка некачественных периодов наблюдений.

3. Оценка точности измерений технологией спутникового позиционирования в режиме «статика». Допустимая невязка рассчитывается по формуле (27):

$$W_{f, \text{доп}} = \sqrt{(m_{1, \text{доп}})^2 + (m_{2, \text{доп}})^2 + (m_{3, \text{доп}})^2}, \quad (27)$$

где $m_{i, \text{доп}}$ – допустимые значения СКП по сторонам треугольника, мм.

Допустимая СКП длины (в мм) для линий длиной менее 5 км, согласно нормативному документу [17], рассчитывается по формуле (28):

$$m_{\text{доп}} = (5 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot D), \quad (28)$$

где D – измеряемое расстояние, мм.

Допустимая СКП длины (в мм) для линий длиной более 5 км, согласно нормативному документу [17], рассчитывается по формуле (29):

$$m_{\text{доп}} = (5 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot D). \quad (29)$$

Современные ГНСС-приёмники позволяют выполнять наблюдения в режиме «статика» с высокой точностью, превышающую значения, указанные в формулах 28 – 29. Также различается точность для измерений в плане и по высоте, что не отражено в приведённых выше формулах. Предлагается определять допустимую СКП длины (в мм) для линий по формуле (30) точности из технических характеристик ГНСС-оборудования:

$$m_{\text{доп}} = (a + b \cdot 10^{-6} \cdot D), \quad (30)$$

где a – параметр, характеризующий составляющие СКП измерения, не зависящие от расстояния, мм,

b – параметр, характеризующий составляющие СКП, зависящие от расстояния, мм.

Использование формулы 30 позволяет установить более строгий допуск на СКП измерения длин линий, основываясь на точности применяемого ГНСС-оборудования, что является более показательным критерием. Также в характеристиках ГНСС-оборудования указывается точность определения в плане и по высоте, что позволяет оценивать величину СКП отдельно по двум составляющим. Как правило, точность определения длин линий по высоте ниже, чем в плане, в связи с чем установка различных критериев допуска в плане и по высоте будет более явно характеризовать точность спутниковых наблюдений при её оценке.

Фактическая невязка приращений координат рассчитывается по формуле (31):

$$W_f = \sqrt{(W_{\Delta X})^2 + (W_{\Delta Y})^2 + (W_{\Delta Z})^2}, \quad (31)$$

где $W_{\Delta X}$, $W_{\Delta Y}$, $W_{\Delta Z}$ – невязки по осям координат, мм [17].

4. Свободное уравнивание, при котором все опорные пункты являются определяемыми, без указания исходных пунктов. В результате свободного уравнивания определяются плановые координаты и высоты опорных пунктов с СКП определения их положения. В проекте

применяются параметры условной системы координат: вид проекции, значение начальной широты, осевого меридиана, величина смещения на север, на восток, масштаб, а также параметры геоида. Параметры условной системы координат задаются и сохраняются на дальнейшие периоды наблюдений.

5. Выбор опорного пункта по наименьшим СКП определения его положения из результатов свободного уравнивания.

6. Ограниченное уравнивание: в качестве исходного пункта используется выбранный в п. 5 опорный пункт с его плановыми координатами и высотой из свободного уравнивания.

В последующих циклах наблюдений:

1. Предварительная обработка аналогично пунктам 1 – 3 алгоритма действий по обработке начальных циклов наблюдений.

2. Ограниченное уравнивание: в качестве исходного пункта используется опорный пункт с наименьшими СКП определения его положения из ограниченного уравнивания в предыдущем цикле. Плановые координаты и высота исходного опорного пункта принимаются из предыдущего цикла наблюдений.

По результатам выполненных действий в цикле наблюдений будут получены плановые координаты и высоты опорных пунктов с СКП их определения.

Таким образом, на основе применения технологии спутникового позиционирования представляется возможным выполнять наблюдения опорной сети в пространстве с дальнейшей оценкой её стабильности, что является обязательным условием при наблюдениях за деформациями склонов. Предлагаемый метод, в свою очередь, позволяет анализировать стабильность пунктов в пространстве, обеспечивает получение более детальной информации, что повышает качество наблюдений за деформациями склонов.

2.2 Разработка способа выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений

Наблюдения за оползнями предполагают многолетние наблюдения за движениями земной поверхности, по результатам анализа которых возможно отследить тенденцию на рост или спад скоростей смещений [262]. Важной особенностью оползневых процессов является их несистематичность: оползневые процессы могут протекать самое разное количество времени – от нескольких минут до нескольких десятилетий. В зависимости от таких характеристик, как скорость оползневого процесса, величина смещений, объём смещающихся грунтов представляется возможным делать выводы о целесообразности принятия мер по защите населения, осуществлению эвакуационных мероприятий при сохранении опасности,

строительству защитных сооружений при возможности остановить смещения либо продолжать наблюдения с периодичностью, основываясь на условиях протекания оползневого процесса.

Обширный спектр доступных в настоящее время методов и приборов для измерений обуславливает необходимость их оптимального подбора в зависимости от выполняемых работ. С точки зрения наблюдений за оползневыми смещениями важным вопросом, требующим рассмотрения, остаётся вопрос выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений, так как при различных величинах оползневых смещений за промежутки времени между циклами наблюдений при наблюдениях методом и прибором, СКП определения смещений которого будут недостаточно низкими для данной скорости смещений, смещение может быть не распознано. Справедливо и обратное: при больших скоростях смещений не всегда экономически целесообразно использование дорогого высокоточного оборудования. В связи с этим требуется разработка алгоритмов, позволяющих подобрать необходимый метод и оборудование, основываясь на скоростях оползневых смещений.

Требование к точности инженерно-геодезических изысканий при наблюдении смещений оползневых процессов регламентируется величиной СКП определения смещения деформационного знака относительно опорных, которая не должна превышать 20 мм для горизонтальных смещений и 10 мм для вертикальных. Дальнейшие циклы наблюдений предлагается уточнять за счёт корректировки предельно допустимой СКП на величину, равную 0,2 от величины минимально фиксируемого смещения. Учитывая специфику развития оползневых процессов, следует отметить, что для выполнения работ по наблюдениям за оползневыми смещениями предельно допустимая СКП смещения должна быть соотнесена со скоростью оползневых смещений и периодичностью наблюдений. В зависимости от скорости оползневых смещений, при одном и том же значении СКП определения смещения—между циклами наблюдений можно не распознать наличия смещения, что приведёт к неверной интерпретации сведений о протекании оползневого процесса. Отсюда следует необходимость сопоставления таких параметров, как СКП определения смещения, скорость смещения и периодичность наблюдения смещения.

В работах [114, 116] предлагаются расчёты точности геодезических методов в случае, когда заранее известна СКП определения положения деформационных пунктов на оползне. По заданным СКП определения положения деформационных пунктов вычисляются допустимые СКП измерения углов и расстояний для определения смещений. При этом значения СКП определения положения деформационных пунктов не сопоставляются с предельными скоростями оползневых смещений. В СП 420 представлена классификация оползней по скорости оползневых процессов (таблица 13), а также даны рекомендации по допустимой точности наблюдений на начальном этапе, которые выражаются в величинах предельной СКП

определения оползневых смещений относительно опорных знаков: для горизонтальных смещений численно равной 20 мм, а для вертикальных – 10 мм. В последующих циклах наблюдений значение СКП определения оползневых смещений $m_{смещ}$ принимается равным 0,2 от минимального фиксируемого оползневого смещения в предыдущем цикле наблюдений согласно формуле (32):

$$m_{смещ} = 0,2 S_{\min}, \quad (32)$$

где $S_{\min}$ – минимальное фиксируемое оползневое смещение, м.

Таблица 13 – Классификация оползней по скорости оползневых процессов

Наименование оползня по скорости смещения	Типичная скорость
Экстремально медленный	Менее 16 мм/г
Очень медленный	16 мм/г – 1,6 м/г
Медленный	1,6 м/г – 13 м/месяц
Умеренный	13 м/месяц – 1,8 м/ч
Быстрый	1,8 м/ч – 3 м/мин
Очень быстрый	3 м/мин – 5 м/с
Экстремально быстрый	Более 5 м/с

Нормативный документ СП 420 не регламентирует выбор того или иного геодезического метода наблюдения в зависимости от скорости оползневых смещений. При этом зафиксировать оползневые смещения не всегда представится возможным. Если рассматривать оползни с небольшой скоростью оползневых смещений (от экстремально медленного до медленного), ошибочно оползневые смещения могут быть отнесены к СКП определения оползневых смещений. Зависимость СКП определения оползневых смещений и величины оползневых смещений будет определяться в одномерном пространстве для вертикальных смещений по формуле (33), в двумерном пространстве для горизонтальных смещений по формуле (34) и трёхмерном пространстве для пространственных смещений по формуле (35) [24]:

$$mS_H \leq \frac{S_{H_{\min}}}{z_q}, \quad (33)$$

$$mS_{XY} \leq \frac{S_{XY_{\min}}}{z_q \sqrt{2}}, \quad (34)$$

$$mS_{XYH} \leq \frac{S_{XYH_{\min}}}{z_q \sqrt{3}}, \quad (35)$$

где $S_{H_{\min}}$ – минимальное фиксируемое вертикальное смещение, мм,

$S_{XY_{\min}}$ – минимальное фиксируемое горизонтальное смещение, мм,

$S_{XYH_{\min}}$ – минимальное фиксируемое пространственное смещение, мм,

z_q – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности: для вероятности 0,95, численно равный 1,96, а для вероятности 0,99 – 2,58, ед.

Так, при пространственном оползневом смещении $S_{XYH_{min}}$, равном 0,24 м/год или 20 мм/мес и принятом коэффициенте $z_q = 1,96$ для доверительной вероятности 0,95, СКП определения пространственных оползневых смещений mS_{XYH} должна быть не больше 5,9 мм, в то время как, согласно СП 420, она должна быть не больше 20 мм для горизонтальных смещений и не более 10 мм для вертикальных смещений.

Если оползневые смещения близки к СКП определения оползневых смещений, фактическое изменение положения между двумя последовательными циклами наблюдений может быть не зафиксировано, и полученные данные в ходе всех последующих циклов наблюдений будут недостоверными. На рисунке 3 показан пример, в котором при одинаковой величине СКП определения положения деформационного пункта, но при разных скоростях смещения оползня, смещение может быть не распознано даже при трёх последовательно проведённых циклах наблюдений (рисунок 3, а), но может быть распознано при большей величине смещения за период (рисунок 3, б).

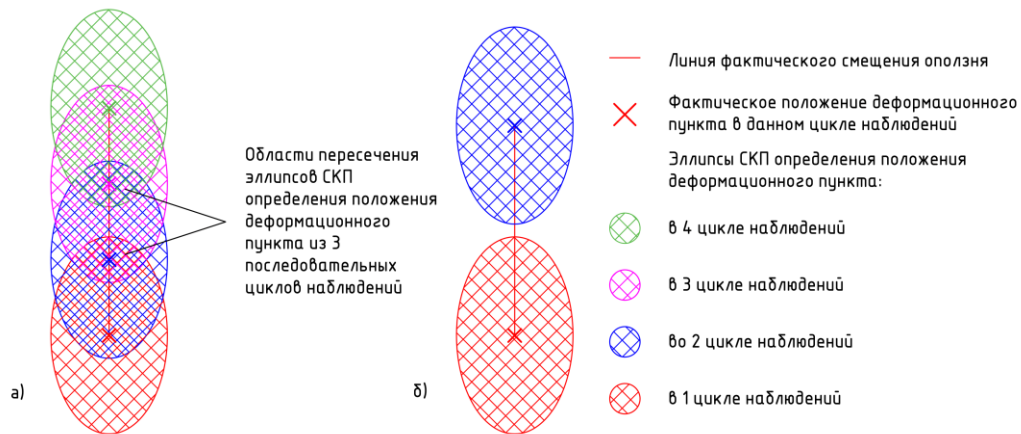


Рисунок 3 – Эллипсы СКП определения положения деформационных пунктов по циклам наблюдений (а) величина СКП определения положения деформационного пункта превышает величину смещений, б) величина смещений превышает величину СКП определения положения деформационного пункта)

Исходя из этого, необходимость оценки скорости оползневых смещений остаётся важным вопросом, от геодезического обеспечения которого зависит правильность расчётов движения оползня.

Для корректной и более точной оценки скорости оползневых смещений предлагается сопоставлять определяемым скоростям оползневых смещений геодезический метод с заданным набором параметров, к которым относят характеристики приборов, применяемых для наблюдений, конфигурацию сети и другие факторы, влияющие на точность определения скоростей оползневых смещений.

Наблюдение небольших по размерам оползней может осуществляться непосредственно с опорных пунктов, расположенных вне зоны его влияния. В таком случае СКП определения

пространственного положения деформационного пункта, закреплённого в теле оползня, с опорных пунктов будет определяться по формуле (36). Плановые координаты X , Y при этом определяются методами засечек, а высота H – методом тригонометрического нивелирования.

$$m_{XYH} = \sqrt{m_P^2 + m_{TH}^2}, \quad (36)$$

где m_P – СКП определения плановых координат X , Y деформационного пункта методом засечки, мм,

m_{TH} – СКП определения высоты H деформационного пункта методом тригонометрического нивелирования, мм.

Формулы для вычисления СКП m_P для различных методов и для вычисления СКП m_{TH} деформационных пунктов ранее перечисленными методами представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Формулы СКП определения положения деформационных пунктов для различных геодезических методов [29]

Метод измерения	Формула СКП определения положения деформационных пунктов
Прямая угловая засечка	$m_{P_{ПЗ}} = \sqrt{\frac{m_\beta^2}{\rho^2} \cdot \frac{S_1^2 + S_2^2}{\sin^2 \gamma}}$
Линейная засечка	$m_{P_{ЛЗ}} = \sqrt{\frac{m_{S_1}^2 + m_{S_2}^2}{\sin^2 \gamma}}$
Полярная засечка	$m_{P_{ПЗ}} = \sqrt{m_S^2 + \frac{S^2 \cdot m_\beta^2}{\rho^2}}$
Тригонометрическое нивелирование	$m_{TH} = \sqrt{\left(\frac{m_v}{\rho} \cdot S \cdot \cos v\right)^2 + (m_S \cdot \sin v)^2 + m_i^2 + m_V^2}$

где m_β – СКП измерения горизонтальных углов, угловые секунды,

ρ – величина, равная одному радиану, угловые секунды,

S_1 и S_2 – измеренные наклонные расстояния, м,

γ – угол засечки при деформационном пункте, угловые секунды,

m_{S_1} и m_{S_2} – СКП измерения расстояний S_1 и S_2 , м,

m_v – СКП измерения вертикальных углов наклона, угловые секунды,

v – измеренный вертикальный угол наклона, угловые секунды,

m_i – СКП измерения высоты инструмента, м,

m_V – СКП измерения высоты отражателя, м.

В случае если наблюдаются большие по площади оползни и расположение опорных пунктов не позволяет вести с них наблюдение, деформационная сеть должна содержать рабочие (промежуточные) пункты. Их плановые координаты X , Y могут определяться проложением полигонометрического хода по трёхштативной системе с одновременным определением высот H методом тригонометрического нивелирования. Высоты инструмента и высоты отражателя также определяются при помощи рулетки [84]. СКП определения пространственного положения рабочего пункта будет определяться по формуле (37).

$$m_{PI} = \sqrt{m_{POL}^2 + m_{TH}^2}, \quad (37)$$

где m_{POL} – СКП определения плановых координат X , Y рабочего пункта методом полигонометрии, вычисляемая по формуле (38), мм,

m_{TH} – СКП определения высоты H рабочего пункта методом тригонометрического нивелирования, мм.

$$m_{POL} = \sqrt{[m_S^2] + [S_{0,i}^2] \cdot \frac{m_\beta^2}{\rho^2}}, \quad (38)$$

где m_S – СКП измерения расстояний, м,

$S_{0,i}$ – расстояние от каждой вершины до центра тяжести хода, м.

СКП определения пространственного положения деформационного пункта, закреплённого в теле оползня, с рабочих пунктов будет определяться по формуле (39).

$$m_{XYH_{PI}} = \sqrt{m_{XYH}^2 + m_{PI}^2}, \quad (39)$$

где m_{XYH} – СКП определения пространственного положения деформационного пункта, закреплённого в теле оползня, мм,

m_{PI} – СКП определения пространственного положения рабочего пункта, мм.

Далее, имея в качестве исходных данных СКП определения положения деформационных пунктов, по формулам (40) – (42) представляется возможным определять минимально фиксируемое оползневое смещение, что будет являться скоростью оползневых смещений между циклами наблюдений, которую возможно распознать при заданной точности измерений:

$$S_{H_{\min}} = mS_H \cdot z_q, \quad (40)$$

$$S_{XY_{\min}} = mS_{XY} \cdot z_q \sqrt{2}, \quad (41)$$

$$S_{XYH_{\min}} = mS_{XYH} \cdot z_q \sqrt{3}. \quad (42)$$

Если заранее известна скорость оползневых смещений, то на основе соотношений (33) – (35) возможно определить предельную СКП определения положения

деформационных пунктов, с которой следует определить их положение. На основе соотношений (33) – (35) и (40) – (42) представляется возможным разработать классификацию методов и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений [45, 49, 54, 127].

2.3 Разработка метода определения положения деформационных пунктов технологией RTK с увеличенным периодом наблюдений

Специфика наблюдений за оползневыми склонами предполагает периодические наблюдения опорных и деформационных пунктов. При этом нередко подобные виды работ сталкиваются с трудностями финансирования: весомый объём работ по наблюдениям оползневых процессов требует соответствующих материально-технических затрат, на которые не всегда готовы пойти заказчики работ. Применение электронных тахеометров сопровождается высокой точностью определения положения деформационных пунктов, однако при больших скоростях оползневых смещений высокая точность не всегда необходима для обнаружения смещений. При этом такие наблюдения трудоёмки, требуют наличия взаимной видимости между опорными и деформационными пунктами, что усложняет процесс выполнения наблюдений, замедляет процесс измерений, что непосредственно влияет на экономическую составляющую проекта. Решением подобных проблем могло бы стать применение технологии RTK при наблюдениях за оползневыми деформациями.

Технология RTK обладает рядом преимуществ: оперативное получение плановых координат и высот опорных и деформационных пунктов, отсутствие необходимости в наличии взаимной видимости между опорными и деформационными пунктами, а также минимальные трудозатраты в обработке результатов измерений выделяют данную технологию для применения при наблюдении оползней. В то же время считается, что точность позиционирования технологией RTK невысокая и находится в диапазоне нескольких сантиметров. Однако получаемая точность зависит от множества факторов. Соблюдение определённых параметров наблюдений, в теории, могло бы повысить точность наблюдений технологией RTK, что позволило бы применять её при наблюдениях за оползнями. Кроме того, применение технологии RTK могло бы стать обоснованным при определённой скорости оползневых смещений, при которой точности позиционирования было бы достаточно для распознавания наличия смещений.

Одной из проблем применения технологии RTK является трудность обоснования получаемой точности наблюдений: в нормативных документах технология спутникового позиционирования упоминается как один из способов определения оползневых смещений, но в то же время отсутствует описание требуемых параметров наблюдений, которые должны быть сопоставлены оползням с определёнными характеристиками. В случае наблюдений технологией

РТК возникают вопросы о таких параметрах как режим наблюдений: режим подключения к базовой станции (одиночная базовая станция или сетевой режим), в случае применения сетевого режима – технология подключения (MAX/i-MAX, VRS/VBS, FKP, WARTK и другие), в случае подключения к одиночной базовой станции – максимальное удаление от неё, минимальное количество общих наблюдаемых спутников ровера с базовой станцией, максимальные значения коэффициентов понижения точности «dilution of precision» (DOP, в переводе с англ. – «снижение точности»), различают «horizontal dilution of precision» (HDOP, в переводе с англ. – «снижение точности в горизонтальной плоскости»), «vertical dilution of precision», (VDOP, в переводе с англ. – «снижение точности в вертикальной плоскости»), «position dilution of precision» (PDOP, в переводе с англ. – «снижение точности по местоположению»), «time dilution of precision» (TDOP, в переводе с англ. – «снижение точности по времени»), «geometric dilution of precision» (GDOP, в переводе с англ. – «суммарное геометрическое снижение точности по местоположению и времени»), необходимая частота измерений, количество эпох, величина маски возвышения в зависимости от положения на склоне, минимальное количество ГНСС-систем и многие другие факторы, влияющие на получаемую точность наблюдений. В настоящее время при проектировании работ по наблюдениям технологией спутникового позиционирования исполнители могут лишь руководствоваться априорной точностью, указанной в характеристиках оборудования, что далеко не всегда отражает действительный ход вещей, так как испытания оборудования для определения параметров происходят в лабораторных условиях, далёких от реальных объектов наблюдений. Сопоставление параметров наблюдения с применяемой методикой и характеристик оползневого склона с подготовкой соответствующих классификаций могло бы сильно упростить задачу по выполнению наблюдений за оползневыми смещениями, что могло бы положительно сказаться на экономической составляющей проекта, оказать влияние на периодичность и качество выполняемых работ, что в совокупности и является единой целью в ключе повышения качества геодезических наблюдений за оползневыми склонами.

Существуют различные способы оценки точности измерений, получаемых технологией спутникового позиционирования. Наиболее распространённым считается выполнение измерений с использованием калибровочных полигонов [63, 246]. При подборе соответствующего обозначенной категории работ геодезического оборудования встаёт вопрос о необходимой и достаточной точности наблюдений на объекте. В настоящее время производитель ГНСС-оборудования предоставляет пользователю с точки зрения точности получения данных при наблюдениях ГНСС-приёмником формулу расчёта априорной точности, состоящую из постоянной величины и изменяемой, которая варьируется в зависимости от удаления ГНСС-приёмника от базовой станции. При этом предоставляемые производителем сведения могут недостаточно точно характеризовать получаемую точность определения положения

деформационных пунктов технологией спутникового позиционирования ввиду того, что на получаемую точность влияет гораздо большее количество факторов, помимо удаления ровера от базовой станции [5].

Предлагается метод определения положения деформационных пунктов технологией RTK с увеличенным периодом наблюдений. Открытыми вопросами, требующими рассмотрения, остаются порядок проведения работ при использовании данной технологии: такие параметры, как количество эпох, интервал времени между фиксируемыми эпохами, величина DOP, количество видимых спутников, количество используемых ГНСС-систем, удаление ровера от базовой станции, а также режим измерения – от одиночной базовой станции либо сетевой режим. В совокупности и по отдельности перечисленные параметры могут влиять на получаемый результат, именно поэтому задача исследования направлена на сопоставление этих параметров с требованиями нормативной документации к точности наблюдений за смещениями деформационных пунктов на оползнях.

Для установки возможных параметров наблюдений оползневых склонов технологией RTK предлагается выполнить исследование, направленное на оценку точности определения смещений данной технологией. В покрытии через различные интервалы расстояний на разную глубину погружения устанавливаются дюбели, имитируя таким образом горизонтальные и вертикальные смещения деформационного пункта в теле оползня (рисунок 4).

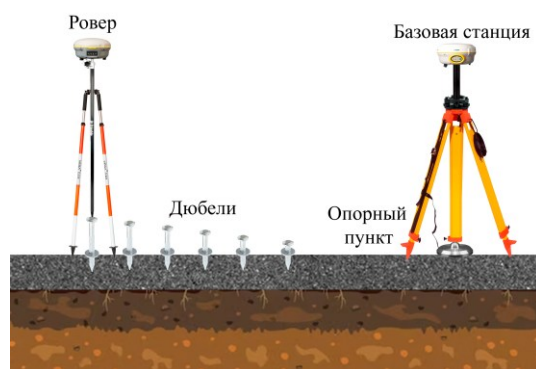


Рисунок 4 – Схема закрепления дюбелей в твёрдом покрытии с целью моделирования смещений деформационного пункта в теле оползня и дальнейшего исследования технологии RTK

Расстояния и превышения между дюбелями предлагается определять более точными методами, чем определение положения технологией RTK. Так, расстояния между дюбелями могут быть получены измерениями с применением штангенциркуля, а превышения – методом геометрического нивелирования с применением цифрового нивелира. СКП определения расстояния штангенциркулем будет меньше, чем СКП определения расстояния по разностям плановых координат дюбелей, полученных технологией RTK, а при коротких плечах СКП определения превышения на станции также будет значительно меньше, чем СКП определения

превышения по разностям высот дюбелей, полученных технологией RTK, что позволит использовать полученные штангенциркулем и геометрическим нивелированием значения расстояний и превышений как эталонные. Эталонные превышения измеряются многократно, СКП их определения вычисляется по формуле (43)

$$m_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n-1}}, \quad (43)$$

где x_i – измеренное расстояние/превышение в данной итерации, мм,

x_0 – среднее из всех значений измеренных расстояний/превышений, мм,

n – количество измерений, ед.

Далее полученные значения расстояний и превышений между дюбелями принимаются за смещения деформационного пункта во времени. Определение положения дюбелей выполняется с применением технологии RTK при различных условиях и параметрах наблюдений.

По разности полученных плановых координат и высот дюбелей вычисляются расстояния и превышения между дюбелями, которые принимаются за горизонтальные и вертикальные смещения деформационного пункта в теле оползня. По формуле (44) выполняется оценка точности технологии RTK при заданных условиях и параметрах наблюдений.

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n}}, \quad (44)$$

где x_i – измеренное расстояние/превышение в данной серии измерений, мм,

x – эталонное расстояние/превышение, мм,

n – количество серий измерений, ед.

Предложенным способом представляется возможность оценить точность применения технологии RTK при различных условиях и параметрах наблюдений, таких как количество эпох наблюдений при заданной частоте наблюдений, удалении ровера от базовой станции, величинах DOP, устанавливаемой в миссии маски (угла отсечки спутников), количестве ГНСС-систем и других параметрах [48, 52].

2.4 Разработка метода определения положения деформационных пунктов линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения

При наблюдениях за смещениями деформационных пунктов на оползне технология спутникового позиционирования имеет преимущества над другими методами. К таковым, например, относят одновременное определение горизонтальных и вертикальных смещений деформационных пунктов, оперативность применения метода. Но, помимо преимуществ, метод

обладает некоторыми ограничениями: требуется наличие видимости небосвода, необходимость в установке ГНСС-приёмника на расстоянии от стен зданий, высоких деревьев и других высотных преград для устранения многопутности, а также наличие удалённости от источников радиоволн, которые могут снизить качество ГНСС-сигналов: «Jamming» (в переводе с англ. – «глушение») или «Spoofing» (в переводе с англ. – «подмена сигнала»). При наблюдениях за смещениями деформационных пунктов на оползне подобного рода ограничения не оказывают существенного влияния, но возможно отсутствие видимости небосвода при определении смещений деформационных пунктов, расположенных в теле оползня у его подошвы или на крутом протяжённом склоне. Избежать влияния подобного фактора возможно закреплением промежуточных рабочих пунктов и их наблюдением технологией спутникового позиционирования в месте, где видимости небосвода не создаётся препятствий, с дальнейшим определением положения деформационных пунктов линейно-угловыми измерениями.

В случае невозможности применения на оползневом склоне технологий спутникового позиционирования ввиду того, что небосвод может быть закрыт для радиовидимости, применяют линейно-угловые измерения. При применении электронных тахеометров для линейно-угловых измерений плановые координаты деформационного пункта определяются методом полярной засечки, а высота – по формулам тригонометрического нивелирования. Электронный тахеометр может быть установлен на штатив над опорным пунктом-либо на ППЦ. При этом выбор цели для визирования играет важную роль, так как оказывает существенное влияние на получаемую точность наблюдений [77, 207]. Призмный отражатель может быть закреплён непосредственно на деформационном пункте (например, в случае использования сферических отражателей), в подставку на штатив или вежу. СКП центрирования и измерения высоты призмного отражателя в подставке оцениваются на уровне 1 – 2 мм, но при большом количестве деформационных пунктов требуется значительное время на приведение штатива и подставки в рабочее положение, в связи с чем наиболее распространённым способом является установка призмного отражателя отвесно над деформационным пунктом на веже, при этом в память электронного тахеометра вносятся сведения о высоте цели. Если вежа с призмным отражателем в процессе измерений не будет отвесна, плановые координаты и высота деформационного пункта будут получены со смещениями в плане и по высоте, которые можно рассчитать по формулам (45) – (46):

$$m_{XY} = \sin v \cdot V, \quad (45)$$

$$m_H = V \cdot (1 - \cos v), \quad (46)$$

где v – угол наклона вежи, градусы,

V – высота установки призмного отражателя, м.

Например, при цене деления круглого уровня 10', высоте вежи 2 м получим СКП за неотвесное положение в плане, равную 5,8 мм, а для уровней с ценой деления 20' СКП составит

уже 11,6 мм. СКП по высоте при этом будет ничтожно малой и не окажет влияния на результат при обозначенных углах наклона вехи.

Кроме того, при отвесном положении вехи видимость между прибором и призмным отражателем может отсутствовать в последующих циклах наблюдений ввиду значительного смещения деформационного пункта вследствие оползневой деформации, вновь появившейся растительности и т.д. Проектирование новых опорных и деформационных пунктов не позволит сохранить преемственность сведений, полученных в результате предыдущих циклов наблюдений оползня, а также несёт дополнительные финансовые расходы.

Чтобы исключить необходимость в наблюдении на призмный отражатель при отвесном положении вехи, предлагается определять плановые координаты и высоту узловой точки призмного отражателя (съёмочного пикета) при наклоне вехи в нескольких её положениях без проецирования высотной отметки вниз на величину высоты вехи (рисунок 5). Полученные съёмочные пикеты с плановыми координатами X_i , Y_i и высотами H_i (4 и более) 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 острья вехи, которое, в свою очередь, будет совпадать с положением деформационного пункта.

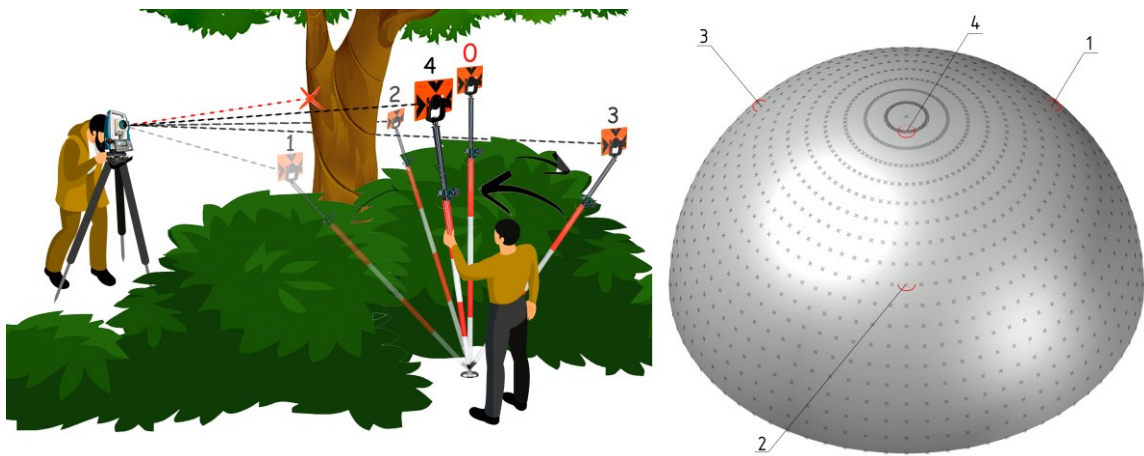


Рисунок 5 – Схема расположения вехи при наблюдении методом по определению плановых координат и высоты деформационного пункта линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения (0 – отвесное положение, 1 – первое положение вехи при наклоне 45° , 2 – второе 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 – четвёртое положение вехи при наклоне 10°)

Следовательно, путём определения плановых координат и высоты центра сферы одновременно выполняется определение плановых координат и высоты деформационного

пункта, на котором была установлена веха. Радиус сферы при этом будет совпадать с высотой вехи.

При наблюдениях предварительно выполняют установку станции в тахеометре: вносят сведения о плановых координатах и высоте опорного пункта, над которым установлен тахеометр, ориентируют тахеометр на смежный опорный пункт, после чего плановые координаты и высота съёмочных пикетов при наклонах вехи вычисляются по формулам (47) – (49):

$$X_k = X_0 + S \cdot \cos v \cdot \cos \alpha, \quad (47)$$

$$Y_k = Y_0 + S \cdot \cos v \cdot \sin \alpha, \quad (48)$$

$$H_k = H_0 + S \cdot \sin v + i, \quad (49)$$

где k – порядковый номер съёмочного пикета в интервале [1;4], ед,

X_0, Y_0 – плановые координаты опорного пункта, над которым установлен тахеометр, м,

H_0 – высота опорного пункта, над которым установлен тахеометр, м,

S – измеренное тахеометром наклонное расстояние, м,

v – измеренный угол наклона направления на съёмочный пикет, градусы,

α – дирекционный угол направления на съёмочный пикет, градусы,

i – высота прибора, м.

Математически алгоритм аппроксимации четырёх съёмочных пикетов сферой можно представить как поиск центра сферы, описанной около тетраэдра. При количестве съёмочных пикетов, равном 4, плановые координаты X_C, Y_C и высота H_C центра сферы вычисляются по формулам (50) – (52):

$$X_C = \frac{D_X}{2A}, \quad (50)$$

$$Y_C = \frac{D_Y}{2A}, \quad (51)$$

$$H_C = \frac{D_H}{2A}, \quad (52)$$

где D_X, D_Y, D_H – определители матрицы, вычисляемые по формулам (53) – (55) соответственно, ед,

A – определитель матрицы, вычисляемый по формуле (56), ед:

$$D_X = \begin{vmatrix} X_1^2 + Y_1^2 + H_1^2 & Y_1 & H_1 & 1 \\ X_2^2 + Y_2^2 + H_2^2 & Y_2 & H_2 & 1 \\ X_3^2 + Y_3^2 + H_3^2 & Y_3 & H_3 & 1 \\ X_4^2 + Y_4^2 + H_4^2 & Y_4 & H_4 & 1 \end{vmatrix}, \quad (53)$$

$$D_Y = \begin{vmatrix} X_1^2 + Y_1^2 + H_1^2 & X_1 & H_1 & 1 \\ X_2^2 + Y_2^2 + H_2^2 & X_2 & H_2 & 1 \\ X_3^2 + Y_3^2 + H_3^2 & X_3 & H_3 & 1 \\ X_4^2 + Y_4^2 + H_4^2 & X_4 & H_4 & 1 \end{vmatrix}, \quad (54)$$

$$D_H = \begin{vmatrix} X_1^2 + Y_1^2 + H_1^2 & X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2^2 + Y_2^2 + H_2^2 & X_2 & Y_2 & 1 \\ X_3^2 + Y_3^2 + H_3^2 & X_3 & Y_3 & 1 \\ X_4^2 + Y_4^2 + H_4^2 & X_4 & Y_4 & 1 \end{vmatrix}, \quad (55)$$

$$A = \begin{vmatrix} X_1 & Y_1 & H_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & H_2 & 1 \\ X_3 & Y_3 & H_3 & 1 \\ X_4 & Y_4 & H_4 & 1 \end{vmatrix}. \quad (56)$$

Радиус R сферы вычисляется по формуле (57):

$$R = \sqrt{\frac{D_X^2 + D_Y^2 + D_H^2 - 4AC}{2|A|}}, \quad (57)$$

где C – определитель матрицы, вычисляемый по формуле (58), ед:

$$C = \begin{vmatrix} X_1^2 + Y_1^2 + H_1^2 & X_1 & Y_1 & H_1 \\ X_2^2 + Y_2^2 + H_2^2 & X_2 & Y_2 & H_2 \\ X_3^2 + Y_3^2 + H_3^2 & X_3 & Y_3 & H_3 \\ X_4^2 + Y_4^2 + H_4^2 & X_4 & Y_4 & H_4 \end{vmatrix}. \quad (58)$$

Опираясь на то, что полученный по результатам аппроксимации радиус сферы должен совпадать с высотой вехи, оценить точность определения положения центра сферы можно путём расчёта СКП определения радиуса сферы по формуле (59):

$$m_R = \sqrt{\frac{\sum (R_S - R_0)^2}{n}}, \quad (59)$$

где R_S – вычисленный по результатам аппроксимации радиус сферы, м,

R_0 – высота вехи, м,

n – количество итераций определения радиуса сферы, ед.

При количестве съёмочных пикетов 5 и более плановые координаты, высоту центра сферы и её радиус можно вычислить многократно выборкой по 4 съёмочных пикета из набора, а наиболее подходящее решение отобрать по наименьшему значению m_R .

Представленный алгоритм определения плановых координат, высоты центра сферы и её радиуса реализован в программном продукте на языке программирования Python (приложение Г) [103].

2.5 Разработка метода прогнозирования величин оползневых смещений линейной аппроксимацией с дальнейшей корректировкой функции

Важность прогнозирования оползневых процессов обусловлена тем, что своевременно принятые решения могут исключить не только экономические потери, но и сохранить жизни и здоровье людей, проживающих или находящихся в оползневых регионах. Существует весомое количество способов прогнозирования величин оползневых смещений, в которых учитывается множество параметров оползневого склона, таких как свойства грунтов, размеры оползня, уровень грунтовых вод и другие параметры. В то же время актуальным вопросом остаётся интерпретация геодезических данных, заключающаяся в определении величин оползневых смещений между циклами наблюдений и дальнейшем прогнозировании величин смещений по данным предыдущих циклов наблюдений. Разработка прогнозных моделей для оползней различных типов, полученных геодезическими методами, позволила бы внедрить геодезические наблюдения в процесс наблюдения оползней в полной мере, начиная со сбора данных и заканчивая конечной интерпретацией полученных данных на предстоящие периоды времени.

Одним из решений в прогнозировании величин оползневых смещений также может быть аппроксимация величин оползневых смещений различными функциями: линейной с уравнением $y = kx + b$ в случаях, когда оползневые смещения характеризуются низкой скоростью в течение продолжительного времени (оползни типа «крип»), степенной $y = kx^a$ или экспоненциальной $y = e^x$ при резких увеличениях скорости оползневых смещений, логарифмической $y = \ln(x)$ в случае стабилизирующихся оползней, а также функцией полинома высоких степеней при нерегулярных скачкообразных подвижках. Для оползней с ярко-выраженной сезонностью может быть применима аппроксимация рядами Фурье.

В случае, когда скорость оползневых смещений постоянна, по геодезическим данным можно спрогнозировать дальнейшие величины оползневых смещений. При равномерных оползневых подвижках наиболее точным для прогнозирования будет метод линейной аппроксимации величин оползневых смещений, достоинством которого является отсутствие необходимости наличия большого количества данных для выполнения прогноза. Тогда для получения прогнозных величин оползневых смещений возможно выполнение линейной аппроксимации имеющихся данных, уравнение прямой при этом будет определяться формулой (60).

$$y = kx + b, \quad (60)$$

где y – величина смещения, мм,

k – угловой коэффициент, численно равный тангенсу угла наклона полученной прямой с положительным направлением оси абсцисс, ед,

x – номер цикла наблюдений, ед,

b – свободный член, численно равный величине отрезка, отсекаемого прямой от оси ординат, считая от начала системы координат, ед.

Путём аппроксимации величин оползневых смещений по МНК определяются коэффициенты k и b уравнения (60), в результате чего по полученному уравнению можно выполнить прогноз величин оползневых смещений на дальнейшие периоды. Однако в случае, если скорость оползневых смещений резко изменялась в период наблюдений, прогноз таким методом не будет точным. Предлагается определять моменты наступления таких событий по изменению Δk и Δb коэффициентов k и b уравнения прямой, полученной путём линейной аппроксимации величин смещений оползневого склона, а также исключать из аппроксимации данные, предшествующие моменту увеличения скорости оползневых смещений с целью уточнения прогноза.

На характер изменения Δk и Δb влияют величина изменения скорости оползневых смещений в последнем цикле наблюдений Δv и количество циклов наблюдений n . Для определения этих зависимостей в качестве примера смоделируем равномерные оползневые подвижки в течение 12 циклов наблюдений, а в последнем 13 цикле наблюдений предположим, что произошло изменение скорости оползневых смещений на разные величины: от 0 до 10 мм/цикл, и проанализируем, на какие величины изменятся коэффициенты k и b при таких значениях (рисунок 6).

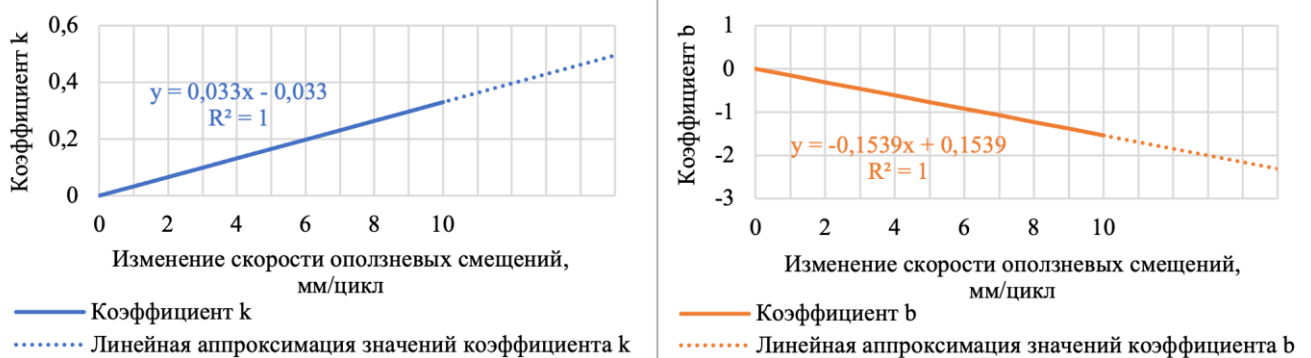


Рисунок 6 – График зависимости коэффициента k (слева) и коэффициента b (справа) от изменения скорости смещения оползня Δv в последнем цикле наблюдений при количестве циклов наблюдений n , равном 13

На примере значений изменения скорости оползневых смещений Δv от 0 до 10 мм/цикл в последнем 13 цикле наблюдений были получены зависимости (61) и (62) значения коэффициентов k и b от изменения скорости оползневых смещений Δv при количестве циклов

наблюдений n , равном 13. Коэффициенты корреляции, полученные в ходе определения зависимостей (61) – (62) методом аппроксимации значений коэффициентов k и b , равны 1, что говорит о том, что полученные соотношения будут справедливы для любых значений изменения скорости оползневых смещений Δv :

$$k = k_1(\Delta v + 1) + b_1, \quad (61)$$

$$b = k_2(\Delta v + 1) + b_2, \quad (62)$$

где k_1, b_1 – коэффициенты уравнения прямой, полученной путём линейной аппроксимации значений коэффициента k в зависимости от изменения скорости оползневых смещений Δv , ед, k_2, b_2 – коэффициенты уравнения прямой, полученной путём линейной аппроксимации значений коэффициента b в зависимости от изменения скорости оползневых смещений Δv , ед, Δv – изменение скорости оползневых смещений, мм/цикл.

В свою очередь, значения коэффициентов k_1 и k_2 будут зависеть от количества циклов наблюдений n . Для определения этих зависимостей рассмотрим в смоделированном примере значения n от 3 до 13. При таких значениях коэффициент k_1 будет иметь степенную зависимость от количества циклов наблюдений (соотношение (63)), а k_2 – логарифмическую зависимость (соотношение (64)). Коэффициенты b_1 и b_2 при этом будут равны коэффициентам k_1 и k_2 с обратным знаком (рисунок 7).

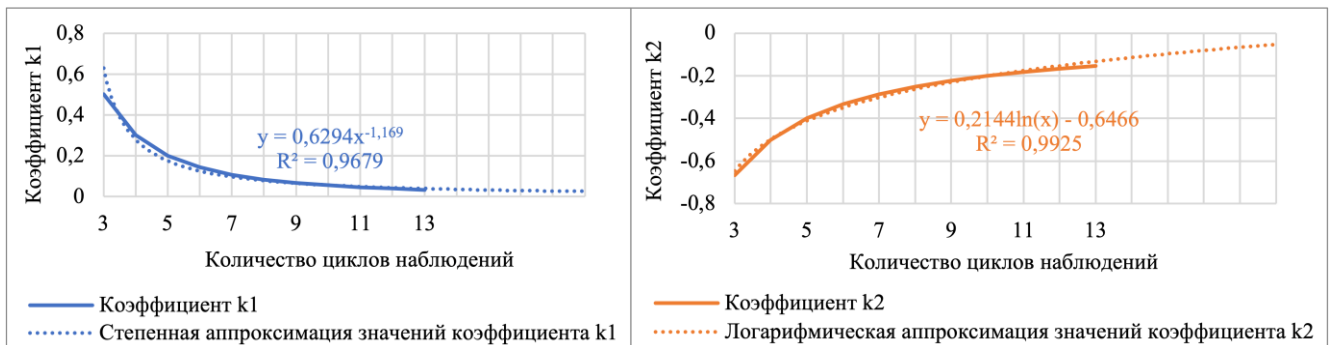


Рисунок 7 – График зависимости коэффициента k_1 уравнения (61) (слева) и коэффициента k_2 уравнения (62) (справа) от количества циклов наблюдений

$$k_1 = 0,6294(n - 2)^{-1,169}, \quad (63)$$

$$k_2 = 0,2144 \ln(n - 2) - 0,6466, \quad (64)$$

где n – количество циклов наблюдений, ед.

В ходе определения зависимостей (63) – (64) методом аппроксимации значений коэффициентов k_1 и k_2 были получены значения коэффициентов корреляции, близкие к 1. Это говорит о том, что данные соотношения будут справедливы для любого количества циклов наблюдений, а СКП аппроксимации не повлияет на итоговый результат в определении значений коэффициентов k_1 и k_2 . На основе выражений (61) – (64) формула для вычисления максимально допустимого изменения $\Delta k_{\max}$ коэффициента k при заданном количестве наблюдаемых циклов

наблюдений n и изменении скорости оползневых смещений в последнем цикле наблюдений Δv представлена в выражении (65), для максимально допустимого изменения $\Delta b_{\max}$ коэффициента b в выражении (66).

$$\Delta k_{\max} = \Delta v(0,6294(n-2)^{-1,169}), \quad (65)$$

$$\Delta b_{\max} = \Delta v(0,2144 \ln(n-2) - 0,6466). \quad (66)$$

На основании выражений (65) – (66) предлагается выполнять расчёт максимально допустимых значений изменений $\Delta k_{\max}$ и $\Delta b_{\max}$ коэффициентов k и b при заданных параметрах: предельном значении изменения скорости смещения оползня Δv и количестве циклов наблюдений n . По имеющимся за предыдущие циклы наблюдений плановым координатам и высотам деформационных пунктов выполняется линейная аппроксимация величин горизонтальных и вертикальных оползневых смещений и определяются значения коэффициентов k и b . Далее, учитывая точность измерений и иные факторы, способные оказать влияние на изменение скорости оползневых смещений (сезонное повышение влажности [176, 185, 210], сейсмическая активность [255, 206] и т.д.), устанавливается критерий: предельное значение изменения скорости оползневых смещений в следующем цикле наблюдений Δv , после чего выполняется цикл наблюдений с повторной аппроксимацией данных. В качестве значения критерия Δv также может быть выбрана СКП скоростей оползневых смещений с предположением о том, что скорость оползневых смещений не должна превышать одну, две или три величины СКП (соответствует уровню доверия 0,68, 0,95 или 0,99). После этого оценивается величина изменения Δk и Δb коэффициентов k и b до и после добавления в выборку данных о смещениях оползня в последнем цикле наблюдений и выполняется сравнение с величинами $\Delta k_{\max}$ и $\Delta b_{\max}$. Превышение полученных по результатам аппроксимации значений коэффициентов k и b расчётных предельных значений $\Delta k_{\max}$ и $\Delta b_{\max}$ по формулам (65) – (66) говорит о резком увеличении скорости оползневых смещений в последнем цикле наблюдений и служит сигналом для принятия решений об увеличении частоты проведения циклов наблюдений либо проведении защитных мер по снижению роста скорости оползневых смещений. Также подобный анализ может служить сигналом к предшествующему обрушению склона и говорить о необходимости проведения эвакуации людей.

Дальнейший прогноз предлагается осуществлять путём линейной аппроксимации смещений с включением в обработку циклов наблюдений, следующих за обнаруженным резким увеличением скорости оползневых смещений. Данные, предшествующие сильному скачку скорости оползневых смещений, будут искажать дальнейший прогноз, поэтому исключение из обработки таких циклов наблюдений и аппроксимация только по данным циклов наблюдений, следующих за моментом искажения, повысит точность прогноза.

Достоинством предлагаемой методики прогноза является учёт данных за все имеющиеся периоды наблюдений, что реализуется путём линейной аппроксимации величин оползневых смещений и позволяет исключить ложные предположения о грядущем обрушении склона, обусловленные несистематичными увеличениями скорости оползневых смещений. Анализ коэффициентов аппроксимации позволяет сделать заключение, основываясь на показателях, отражающих систематичность к изменению скорости оползневых смещений вместо анализа значений каждого конкретного цикла наблюдений без учёта зависимости с другими циклами наблюдений [53].

На основании рассмотренных выше методов предлагаемая в исследовании методика наблюдений оползневых склонов геодезическими методами состоит из трёх этапов (рисунок 8) [46, 47, 136].

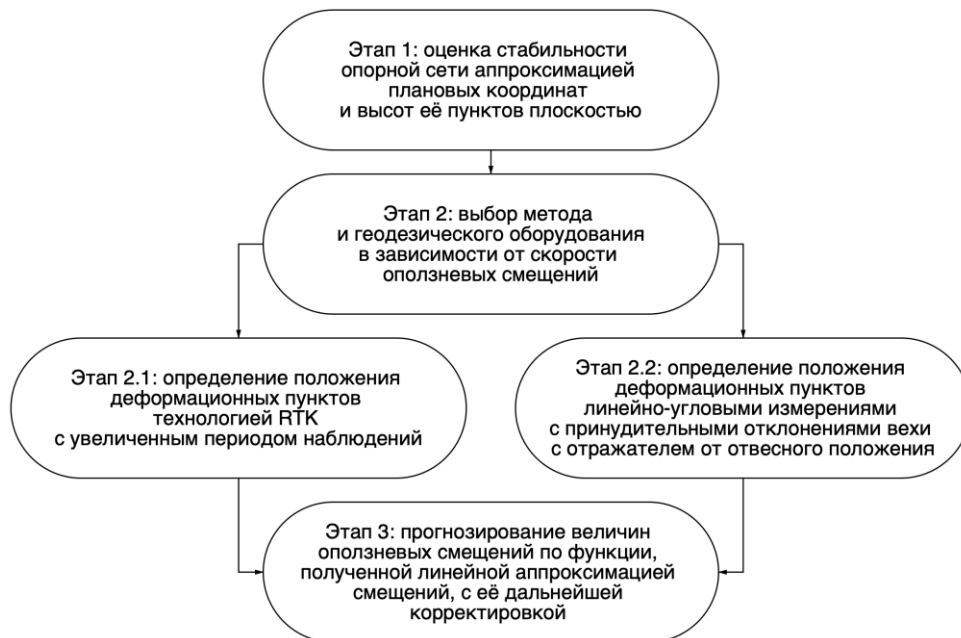


Рисунок 8 – Этапы методики наблюдений оползневых склонов геодезическими методами

2.6 Выводы по главе 2

1. Предложена новая методика выполнения наблюдений оползневых склонов геодезическими методами, которая состоит из нескольких этапов: закрепления и определения положения опорных и деформационных пунктов в теле оползня, оценки стабильности опорных пунктов, наблюдения деформационных пунктов технологиями спутникового позиционирования, а в случае невозможности – линейно-угловыми измерениями, а также интерпретации полученных результатов прогнозированием величин оползневых смещений.

2. Оценку стабильности опорных пунктов предлагается выполнять путём аппроксимации плановых координат и высот её пунктов плоскостью. В ходе аппроксимации определяются характерные элементы плоскости: центроид плоскости, нормаль к плоскости и точка на нормали

к плоскости, по смещениям которых можно определять, стабильна ли сеть, а также в случае потери стабильности определять опорные пункты, которые сместились.

3. Наблюдение деформационных пунктов в теле оползня предлагается выполнять геодезическими методами и оборудованием, основываясь на скорости оползневых смещений. Это позволяет экономически целесообразно подходить к вопросу выбора оборудования в зависимости от его стоимости и необходимой, но в то же время достаточной точности определения смещений.

4. В качестве наиболее удобного геодезического метода определения оползневых смещений предлагается технология RTK. За счёт оперативности получения данных, а также отсутствия необходимости в выполнении постобработки полученных данных технология RTK позволяет в кратчайшие сроки получать сведения об оползневых смещениях, что уменьшает продолжительность работ, увеличивает их производительность и, в теории, может повысить качество наблюдений за оползневыми процессами за счёт сокращения интервалов между циклами наблюдений, которые, как правило, остаются большими ввиду значительной трудоёмкости иных геодезических методов по определению оползневых смещений. Открытыми вопросами остаётся точность технологии в зависимости от параметров наблюдений, в связи с чем предлагается метод оценки точности определения смещений деформационных пунктов технологией RTK.

5. В случае отсутствия возможности выполнять наблюдения технологией спутникового позиционирования, например, ввиду густой растительности на объекте, наличия помех радиосигнала предлагается выполнять наблюдения деформационных пунктов линейно-угловыми измерениями. При этом в случае наблюдения на отражатель, расположенный в отвесном положении над деформационным пунктом, возможна потеря видимости между опорным и деформационным пунктом, в том числе вследствие оползневых процессов. Предлагается наблюдать такие деформационные пункты линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения и дальнейшей аппроксимацией полученных съёмочных пикетов сферой, центр которой геометрически будет совпадать с положением деформационного пункта.

6. Интерпретацию полученных величин смещений предлагается выполнять путём линейной аппроксимации с дальнейшей корректировкой функции. За счёт выполнения прогнозирования по данным, следующим после резких изменений скорости оползневых смещений, предлагается повысить качество прогноза.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

3.1 Исследование метода оценки стабильности опорных сетей аппроксимацией плановых координат и высот их пунктов плоскостью

3.1.1 Исследование метода на примере модельных сетей

Для проверки возможности применения метода оценки стабильности опорных сетей аппроксимацией плановых координат и высот её пунктов плоскостью смоделируем процесс нестабильности опорных пунктов по примерам конфигурации опорных сетей, представленных на рисунке 1. Рассмотрим 3 случая смещения опорных пунктов: смещение в пространстве всех опорных пунктов (см. рисунок 1, а), горизонтальное смещение части опорных пунктов (см. рисунок 1, б), вертикальное смещение части опорных пунктов (см. рисунок 1, в). В каждом из случаев данные будут состоять из 5 циклов наблюдений. Смещение будет составлять величину 1 – 3 мм/цикл. СКП определения положения опорных пунктов в каждом из циклов наблюдений будет находиться в диапазоне 1 – 3 мм. Критерий стабильности каждого из характерных элементов плоскости был вычислен по данным из 1-го цикла наблюдений на основе СКП определения положения опорных пунктов в 1-м цикле наблюдений, полученных по результатам уравнивания сети. Результаты оценки стабильности по смоделированным данным представлены в таблицах 15 – 17.

Таблица 15 – Величины моделирования смещений характерных элементов плоскости и критерии их стабильности для случая 1 (R^2 – доверительная вероятность)

№ циклов наблюдений	ΔX_C , м	ΔY_C , м	ΔH_C , м	α	β	γ	ΔX_N , м	ΔY_N , м	ΔH_N , м
1 – 2	0,003	0,001	0,005	0°00'05,12"	0°00'02,30"	0°00'02,34"	0,007	0,001	0,004
2 – 3	0,003	0,002	0,004	0°00'03,35"	0°00'00,86"	0°00'00,89"	0,006	0,002	0,007
3 – 4	0,006	0,005	0,006	0°00'03,35"	0°00'07,97"	0°00'08,00"	0,008	0,001	0,006
4 – 5	0,007	0,005	0,010	0°00'01,79"	0°00'08,72"	0°00'08,71"	0,006	0,001	0,012
Критерий стабильности ($R^2 = 0,99$)	0,003	0,003	0,004	0°00'07,25"	0°00'08,77"	0°00'08,80"	0,006	0,007	0,006

Таблица 16 – Величины моделирования смещений характерных элементов плоскости и критерии их стабильности для случая 2 (R^2 – доверительная вероятность)

№ циклов наблюдений	ΔX_C , м	ΔY_C , м	ΔH_C , м	α	β	γ	ΔX_N , м	ΔY_N , м	ΔH_N , м
1 – 2	0,000	0,003	0,001	0°00'01,10"	0°00'00,52"	0°00'00,08"	0,001	0,003	0,001
2 – 3	0,003	0,002	0,002	0°00'00,30"	0°00'01,47"	0°00'01,48"	0,003	0,000	0,004

Продолжение таблицы 16

3 – 4	0,004	0,002	0,001	0°00'02,49"	0°00'00,59"	0°00'00,36"	0,007	0,003	0,007
4 – 5	0,006	0,005	0,001	0°00'01,20"	0°00'01,41"	0°00'01,75"	0,005	0,007	0,004
Критерий стабильности ($R^2 = 0,99$)	0,003	0,002	0,002	0°00'02,89"	0°00'03,19"	0°00'03,28"	0,004	0,004	0,005

Таблица 17 – Величины моделирования смещений характерных элементов плоскости и критерии их стабильности для случая 3 (R^2 – доверительная вероятность)

№ циклов наблюдений	ΔX_C , м	ΔY_C , м	ΔH_C , м	α	β	γ	ΔX_N , м	ΔY_N , м	ΔH_N , м
1 – 2	0,001	0,001	0,002	0°00'04,46"	0°00'01,86"	0°00'04,80"	0,003	0,003	0,003
2 – 3	0,000	0,001	0,004	0°00'02,07"	0°00'05,19"	0°00'03,42"	0,002	0,006	0,007
3 – 4	0,001	0,003	0,002	0°00'02,39"	0°00'03,86"	0°00'03,36"	0,001	0,006	0,003
4 – 5	0,001	0,002	0,006	0°00'02,23"	0°00'05,06"	0°00'00,76"	0,003	0,007	0,009
Критерий стабильности ($R^2 = 0,99$)	0,003	0,004	0,004	0°00'06,22"	0°00'04,39"	0°00'05,94"	0,007	0,006	0,006

Анализируя полученные результаты вычислений, можно сделать следующие выводы: в случае 1 (при смещении всех опорных пунктов в пространстве) на этапе 2 было обнаружено, что некоторые характерные элементы изменили своё положение начиная с 1 цикла наблюдений: $\Delta H_C > mH_C$, $\Delta X_N > mX_N$. На третьем этапе при анализе смещений с 1 по 5 циклы наблюдений ни одно из значений изменения углов наклона $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$ нормали к плоскости не превысило значения своего критерия стабильности $m\alpha$, $m\beta$, $m\gamma$, что говорит о неизменном положении нормали к плоскости в течение всего периода наблюдений. Соотношения $\Delta X_C/\Delta X_k$, $\Delta Y_C/\Delta Y_k$, $\Delta H_C/\Delta H_k$, $\Delta X_N/\Delta X_k$, $\Delta Y_N/\Delta Y_k$, $\Delta H_N/\Delta H_k$ равны 1 в пределах СКП определения плановых координат и высот опорных пунктов, в связи с чем можно сделать вывод об однонаправленных пространственных смещениях опорных пунктов: центроид плоскости C и точка на нормали к плоскости N изменяли своё положение в плане X , Y и по высоте H .

В случае 2 (при горизонтальном смещении части опорных пунктов) аналогично первому случаю нормаль оставалась стабильной: $\Delta\alpha < m\alpha$, $\Delta\beta < m\beta$ и $\Delta\gamma < m\gamma$ в каждом из циклов наблюдений. Однако на этапе 3.1 значения соотношений $\Delta X_C/\Delta X_k$, $\Delta Y_C/\Delta Y_k$, $\Delta H_C/\Delta H_k$, $\Delta X_N/\Delta X_k$, $\Delta Y_N/\Delta Y_k$, $\Delta H_N/\Delta H_k$ для 3 из 5 опорных пунктов оказались меньше 1 на величину, большую чем СКП определения плановых координат и высот опорных пунктов, в связи с чем можно сделать вывод о наличии у данных опорных пунктов горизонтальных смещений.

В случае 3 (при вертикальном смещении части опорных пунктов) на этапе 3 для 2 цикла наблюдений можно обнаружить, что $\Delta\beta > m\beta$. Это говорит об изменении положения нормали к плоскости между циклами наблюдений. Центроид плоскости при этом не имеет превышения

критерия стабильности по осям X и Y : и $\Delta X_C < mX_C$ и $\Delta Y_C < mY_C$, что говорит об отсутствии у него горизонтальных смещений. По наклону нормали в сторону положительного направления оси Y можно сделать вывод об осадке одного из опорных пунктов, в сторону которого отклонилась нормаль.

3.1.1 Исследование метода по данным наблюдений сети ГЕОСПАЙДЕР

Апробация метода также была выполнена на примере пунктов СДГС ГЕОСПАЙДЕР. При наблюдениях за оползневыми деформациями склонов предполагается закрепление опорных пунктов грунтовыми типами центров, в таком случае наблюдения выполняются путём установки над центром ГНСС-оборудования на штативе. Пункты СДГС ГЕОСПАЙДЕР в данном случае будут выступать прототипом установленных ГНСС-приёмников над центрами опорных пунктов при наблюдениях оползневого склона. На пунктах СДГС ГЕОСПАЙДЕР в непрерывном режиме работают ГНСС-приёмники, выполняющие сеансы наблюдений в режиме «статика», данные наблюдений которых предоставляются пользователям на коммерческой основе. Сеть широко развита в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, что позволяет выполнить оценку стабильности сети по нескольким пунктам СДГС в пределах территории города. В качестве исходных данных были получены RINEX-файлы наблюдений 4 пунктов СДГС (BLNS, BNTA, GU29, ORLV) на 5 дат: 12.04.2021 г., 23.06.2021 г., 07.07.2021 г., 01.04.2022 г. и 11.04.2022 г. с продолжительностями сеансов наблюдений от 2 до 24 часов. Пункты СДГС рассматривались как опорные пункты, а СДГС как опорная сеть. Выбранные пункты СДГС расположены в пределах территории города, что по расстояниям между ними сопоставимо с наблюдениями оползневых деформаций на склонах. Схема сети наблюдений представлена на рисунке 9.

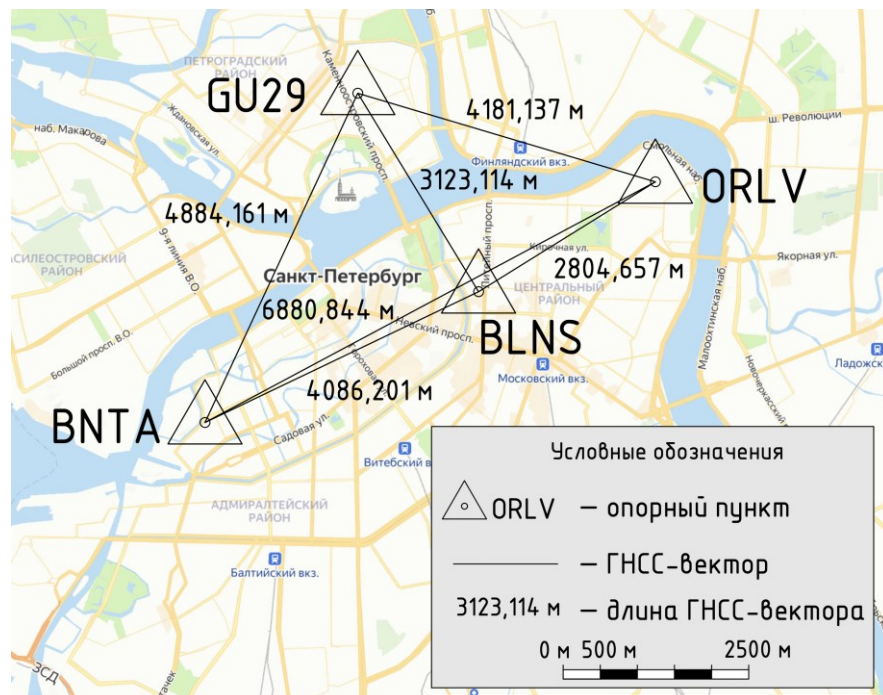


Рисунок 9 – Схема сети СДГС ГЕОСПАЙДЕР

Обработка исходных данных, полученных технологией спутникового позиционирования в режиме «статика», заключалась в получении уравненных плановых координат и высот опорных пунктов, а также СКП их положения с помощью программного обеспечения Topcon Tools. Обработка исходных данных и оценка стабильности опорной сети в 1 цикле наблюдений осуществлялась по следующей схеме:

1. Предварительная обработка исходных данных, которая заключалась в разрешении неоднозначности фазовых измерений и вычислении векторов базовых линий. По результатам предварительной обработки для всех векторов были получены фиксированные решения, а также определены точности наблюдения векторов в плане и по высоте. В проекте были применены параметры условной системы координат на эллипсоиде WGS84: поперечная проекция Меркатора, начальная широта 59° , осевой меридиан 30° , смещение на север 0 м, смещение на восток 0 м, масштаб 1, а также применены параметры геоида EGM 2008 для участка в пределах диапазона долгот $27^\circ - 45^\circ$.

2. Свободное уравнивание, при котором все опорные пункты являлись определяемыми, без указания исходных пунктов. В результате были получены плановые координаты и высоты опорных пунктов с СКП определения их положения, которые находились в диапазоне 1 – 2 мм в плане и по высоте.

3. Определение наиболее надёжного опорного пункта по результатам свободного уравнивания: для опорного пункта BLNS при свободном уравнивании СКП определения положения были наименьшими: $m_{X_k} = m_{Y_k} = m_{H_k} = 1$ мм, в связи с чем данный опорный пункт был выбран как наиболее надёжный.

4. Ограниченное уравнивание: опорный пункт BLNS использовался как исходный при ограниченном уравнивании сети с его плановыми координатами 104559,744 м, 19433,300 м и высотой 29,831 м, полученными из свободного уравнивания. В результате ограниченного уравнивания были получены плановые координаты и высоты всех 4 опорных пунктов с СКП определения их положения в текущем цикле наблюдений.

5. Определение критериев стабильности сети на основе данных о положениях опорных пунктов и СКП определения их положения, полученных из ограниченного уравнивания. Предельные СКП определения положения опорных пунктов приняты равными 20 мм по осям X , Y и 10 мм по высоте H согласно СП 420, так как подразумевается, что опорная сеть будет использована для последующих наблюдений оползневых склонов. На основе предельных значений СКП определения положения опорных пунктов были рассчитаны критерии стабильности каждого из характерных элементов плоскости.

6. Определение положения характерных элементов плоскости (центроида плоскости, нормали к плоскости и точки на нормали к плоскости) в текущем цикле наблюдений.

Для второго и последующих циклов наблюдений обработка осуществлялась по следующей схеме:

1. Предварительная обработка исходных данных аналогично пункту 1 в 1 цикле наблюдений.

2. Ограниченное уравнивание: наиболее надёжный опорный пункт BLNS из предыдущего цикла наблюдений использовался как исходный при ограниченном уравнивании сети с его плановыми координатами 104559,744 м, 19433,300 м и высотой 29,831 м, полученными из результатов ограниченного уравнивания в предыдущем цикле наблюдений. В результате ограниченного уравнивания были получены плановые координаты и высоты всех 4 опорных пунктов с СКП определения их положения в текущем цикле наблюдений.

3. Определение положения характерных элементов плоскости (центроида плоскости, нормали к плоскости и точки на нормали к плоскости) в текущем цикле наблюдений и оценка величин их смещений относительно 1 цикла наблюдений.

4. Анализ стабильности сети: стабильность сети подтверждается в ходе анализа смещений характерных элементов плоскости, опорный пункт BLNS принимается как самый надёжный опорный пункт в текущем цикле наблюдений.

Плановые координаты и высоты опорных пунктов в каждом из циклов наблюдений, а также СКП определения их положения представлены в таблице 18. Результаты оценки стабильности опорной сети аппроксимацией плановых координат и высот её пунктов плоскостью представлены в таблице 19.

Таблица 18 – Исходные данные для оценки стабильности опорной сети на основе пунктов СДГС ГЕОСПАЙДЕР

№ цикла наблюдений и дата его проведения	Опорный пункт	X_k , м	Y_k , м	H_k , м	mX_k , м	mY_k , м	mH_k , м
1 (12.04.2021 г.)	BLNS	104559,744	19433,300	29,831	0,000	0,000	0,000
	BNTA	102797,151	15746,796	21,873	0,001	0,001	0,003
	GU29	107225,742	17806,556	28,127	0,001	0,001	0,003
	ORLV	106039,432	21815,867	29,623	0,001	0,001	0,002
2 (23.06.2021 г.)	BLNS	104559,744	19433,300	29,831	0,000	0,000	0,000
	BNTA	102797,147	15746,792	21,870	0,002	0,001	0,003
	GU29	107225,732	17806,550	28,122	0,001	0,001	0,002
	ORLV	106039,428	21815,866	29,624	0,001	0,001	0,002
3 (07.07.2021 г.)	BLNS	104559,744	19433,300	29,831	0,000	0,000	0,000
	BNTA	102797,150	15746,794	21,873	0,001	0,001	0,002
	GU29	107225,736	17806,551	28,127	0,001	0,001	0,002
	ORLV	106039,429	21815,863	29,617	0,001	0,001	0,002
4 (01.04.2022 г.)	BLNS	104559,744	19433,300	29,831	0,000	0,000	0,000
	BNTA	102797,156	15746,808	21,869	0,002	0,001	0,004
	GU29	107225,730	17806,558	28,131	0,002	0,001	0,004

Продолжение таблицы 18

	ORLV	106039,425	21815,865	29,617	0,001	0,001	0,003
5 (11.04.2022 г.)	BLNS	104559,744	19433,300	29,831	0,000	0,000	0,000
	BNTA	102797,159	15746,797	21,910	0,002	0,002	0,018
	GU29	107225,746	17806,558	28,155	0,002	0,002	0,018
	ORLV	106039,433	21815,866	29,619	0,001	0,001	0,010

Таблица 19 – Величины смещений характерных элементов плоскости и критерии их стабильности для СДГС ГЕОСПАЙДЕР (R^2 – доверительная вероятность)

№ циклов наблюдений	ΔX_C , м	ΔY_C , м	ΔH_C , м	α	β	γ	ΔX_N , м	ΔY_N , м	ΔH_N , м
1 – 2	0,004	0,003	0,002	0°00'00,22"	0°00'00,25"	0°00'00,07"	0,001	0,007	0,000
2 – 3	0,003	0,003	0,002	0°00'00,04"	0°00'00,21"	0°00'00,14"	0,003	0,001	0,003
3 – 4	0,004	0,003	0,002	0°00'00,41"	0°00'00,26"	0°00'00,04"	0,010	0,007	0,011
4 – 5	0,003	0,001	0,015	0°00'00,56"	0°00'01,74"	0°00'01,06"	0,006	0,030	0,013
Критерий стабильности ($R^2 = 0,99$)	0,018	0,018	0,016	0°00'02,05"	0°00'01,75"	0°00'01,29"	0,039	0,031	0,032

По результатам оценки стабильности можно отметить, что значение изменения положения ни одного из характерных элементов плоскости не превысило значения своего критерия стабильности. На основании этого можно сделать вывод о стабильности опорных пунктов в данных циклах наблюдений.

В ходе проведённого исследования был разработан метод оценки стабильности опорных сетей аппроксимацией плановых координат и высот их пунктов плоскостью. Предлагаемый метод позволяет анализировать характер смещения опорных пунктов, а по величинам изменения положения характерных элементов плоскости: центраида плоскости, нормали к плоскости и точки на нормали к плоскости, делать вывод о наличии или об отсутствии смещения опорных пунктов сети. На основе моделирования возможных положений плоскости в начальном цикле наблюдений определяется критерий стабильности каждого из характерных элементов, на основе которого в дальнейшем делается заключение об изменении положения между циклами наблюдений характерного элемента плоскости. На примере моделирования трёх вариантов смещений опорных пунктов показана работа метода, приведён математический аппарат, позволяющий выполнить реализацию метода.

К основным достоинствам применения данного метода стоит отнести возможность анализировать наличие смещений опорных пунктов не только по вертикальным смещениям, но и по горизонтальным, и по пространственным. Кроме того, в отличие от предложенных ранее методов, в данном методе предлагается построение плоскости по любому количеству опорных пунктов в любой их конфигурации. На основе предлагаемого способа определения критериев стабильности для каждого из характерных элементов возможно определение этих критериев при

любой конфигурации расположения опорных пунктов и при любом их количестве, что делает метод универсальным в применении. Разработанный алгоритм определения характера смещений по анализу смещений характерных элементов плоскости позволяет не только определить характер смещений опорных пунктов при потере стабильности, но и выявить конкретные опорные пункты, которые потеряли стабильность.

Применение данного метода позволяет повысить качество выполнения работ по наблюдениям за деформациями, в том числе оползневыми и других видов работ, где требуется закрепление опорных пунктов с целью дальнейшего определения смещений деформационных пунктов [51].

3.2 Исследование способа выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений

Для определения СКП оползневых смещений в зависимости от их скорости выполним расчёты на примере оползня вблизи Миатлинской гидроэлектростанции (ГЭС) на берегах Миатлинского водохранилища (рисунок 10).

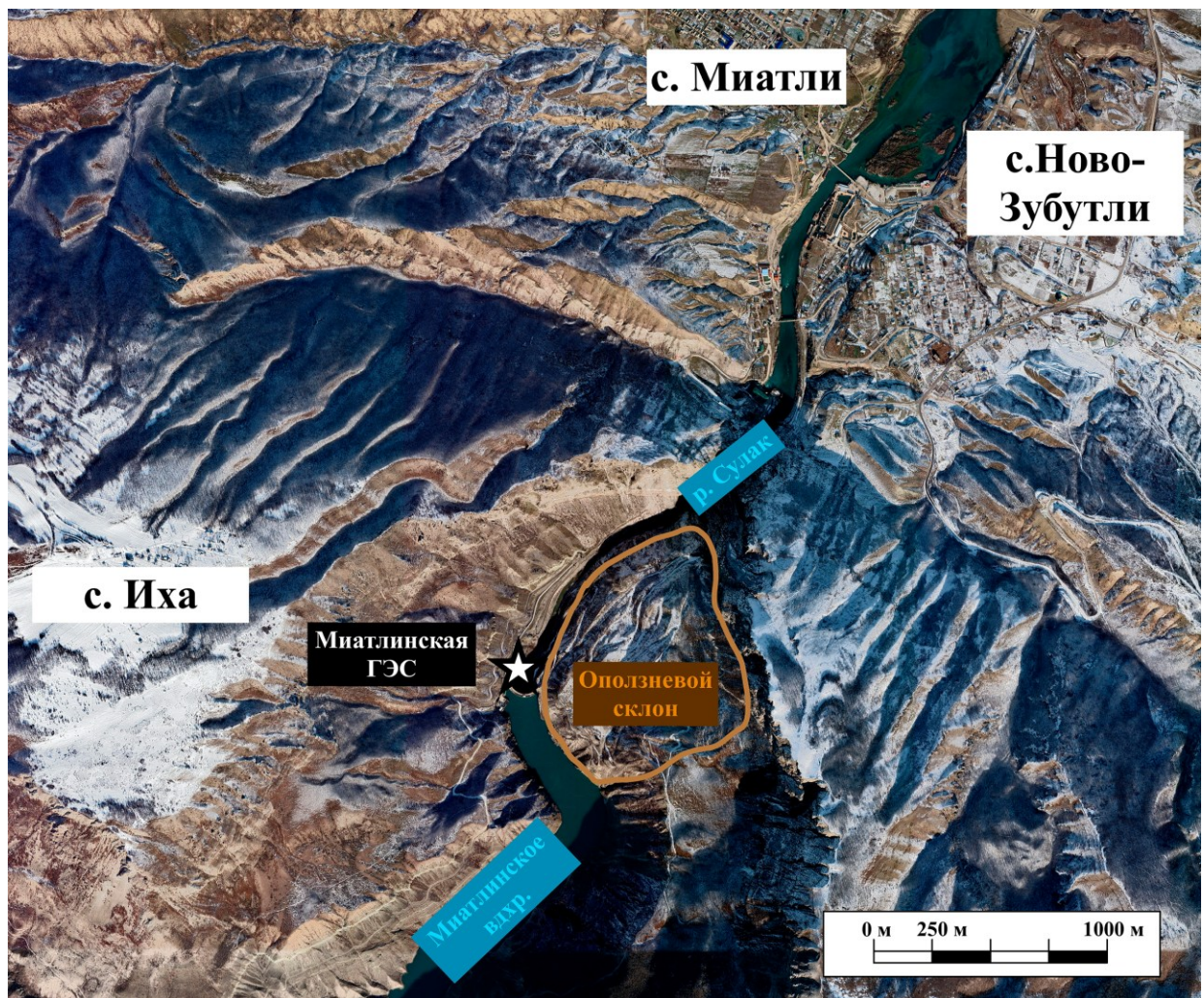


Рисунок 10 – Схема расположения оползневого склона вблизи Миатлинской ГЭС

3.2.1 Характеристика оползня вблизи Миатлинской ГЭС

Водохранилище Миатлинской ГЭС расположено в горном районе Республики Дагестан на реке Сулак. Площадь водосбора составляет порядка 13 тыс. км². При строительстве ГЭС были выявлены оползневые смещения на прилегающем к водохранилищу склоне, вследствие чего проводились геологические и геодезические наблюдения за склоном. В районе головного узла гидроузла, на правом берегу, над плотиной были выявлены оползневые смещения геодезической службой в начале строительства (конец 1975 г.). В феврале 1977 г. произошла активизация оползневых процессов со срывом массы грунта объёмом 1,5 млн м³. Размеры оползневого склона составляют порядка 2,7 км в длину и 1,9 км в ширину с углом наклона у участков выше гребня плотины порядка 30 – 45°. Активизация оползня была вызвана подрезкой склона, нарушением естественного растительного покрова, воздействием промышленной сейсмичности и повышенной инфильтрацией атмосферных осадков через толщу глыбово-щебенистых грунтов. Оползневой склон находился в стабильном состоянии до момента подрезки склона и нарушения его растительного покрова при строительстве ГЭС, что вызвало повышенную инфильтрацию атмосферных осадков через глыбово-щебенистые грунты.

Азимут падения пород в пределах водохранилища составляет 350°, угол 0 – 5°, в районе створа плотины 5 – 15°, угол 5 – 10°. Породы, составляющие склон, прочные, трещиноватые и слаботрещиноватые. Четвертичные отложения склона представлены элювиально-делювиальными, коллювиально-делювиальными, делювиально-пролювиальными образованиями и аллювиальными отложениями надпойменных террас и русла. Коллювиально-делювиальные отложения представлены глыбово-щебенистыми грунтами. Они широко развиты на склонах каньона в виде осыпей и шлифов, часто со следами оползневых подвижек. Глыбово-щебенистые грунты переслаиваются с чёрными суглинками элювиально-делювиального происхождения. Мощность элювиально-делювиальных отложений достигает на участке оползня более 100 м, на участке водохранилища – до 45 м. Мощность элювиально-делювиальных суглинков изменяется в зависимости от характера залегания. Непосредственно на коренных породах либо на аллювиальных отложениях – от 0,3 до 50 м, образуя прослои в глыбово-щебенистых грунтах мощностью до 10 м. К чёрным суглинкам приурочены ПСО старших и новых оползней как на участке примыкания плотины, так и на участках водохранилища. Делювиально-пролювиальные отложения представлены щебнем с суглинистым, супесчаным и песчаным заполнителем с включением глыб и глыбово-щебенистого материала без заполнителя. Они широко распространены на левом склоне долины: начинаются в 0,2 км ниже по течению реки от села Инча, шлейфом спускаясь к реке, и распространяются в направлении к плотине. Мощность пород достигает от 10 до 35 м. Аллювиальные отложения террас и русла представлены гравийно-галечниковыми грунтами с песчаным, реже супесчаным заполнителем, с валунами и

глыбами (в русле). Мощность русловых отложений достигает 5 – 10 м. Аллювиальные отложения террас прослеживаются в основном в виде маломощных (до 5 м) пятен на склонах долины.

Наличие тектонических трещин в районе Миатлинского гидроузла связано с процессами складкообразования. Из трещин не связанных с тектоническими процессами следует выделить трещины напластования и бортовой разгрузки. Трещины бортовой разгрузки развиваются по тектоническим трещинам, простирающимся параллельно крутым склонам долины реки. В головной части водохранилища они отсекают крупные блоки и массивы верхнеюрских доломитов. Существенного влияния на устойчивость склонов тектонические трещины в процессе строительства не оказывали. Однако, группируясь, трещины образуют зоны повышенной тектонической трещиноватости шириной до нескольких метров. В сочетании с трещинами напластования они образуют потенциально-неустойчивые и неустойчивые блоки.

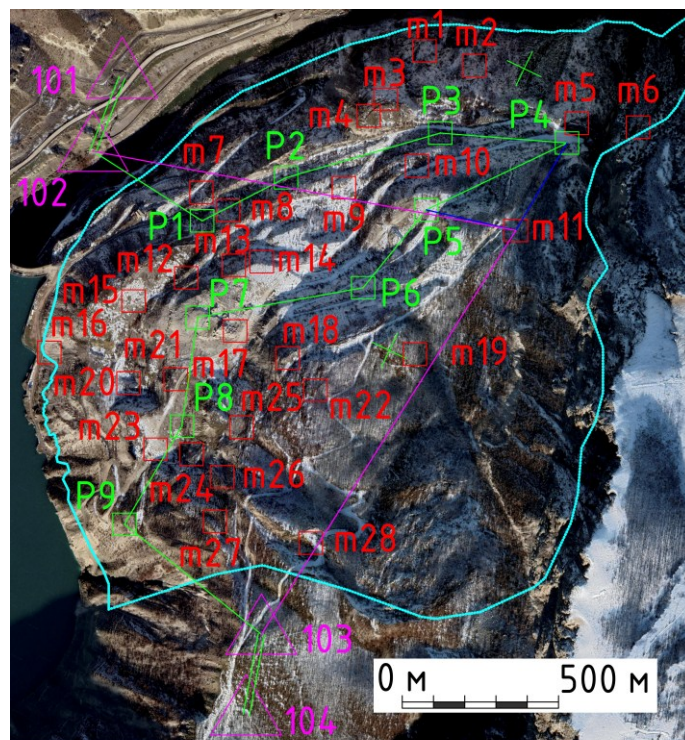
В районе расположения гидротехнического сооружения выявлен карст, возможны горные обвалы. В процессе инженерно-геологических изысканий в районе гидроузла были выявлены древние, старые и современные оползни. Новых оползней до начала строительных работ не наблюдалось. Не отмечались видимые изменения в устойчивости склонов также после землетрясений силой 7 – 8 баллов.

С точки зрения гидрогеологических условий, в склоновых четвертичных отложениях единого водоносного горизонта не образуется, а формируются локальные потоки, приуроченные к понижениям кровли чёрных суглинков. Удельное водопоглощение валанжин-титонских пород составляет от 7 до 30 л/мин. Наиболее водопроницаемыми породами являются аллювиальные отложения русла с коэффициентом фильтрации до 150 м³/сут. Грунтовые воды безнапорные, пресные, гидрокарбонатные и сульфатные (сульфатной агрессивностью не обладают). Наибольшей водопроницаемостью из пород нижнего мела обладают сильнотрещиноватые известняки [11].

В качестве противооползневых мероприятий выполнено перераспределение земляных масс по правобережному склону, гидроизоляция поверхности части склона, где был разрушен естественный водоупор (слой суглинка), произведён отвод поверхностных вод. В качестве упорных сооружений вдоль цоколя нижней террасы устроен контрбанкет объёмом 1 млн м³ из щебенисто-дресвяных и скальных пород. Для предупреждения оползания покровной толщи делювия в верхнем бьефе на правом берегу построена подпорная стенка длиной 350 м и облицовка бортов. За подпорной стенкой и облицовкой устроена цемзавеса, а по поверхности скалы проложен трубчатый дренаж. Кроме активных мер инженерной защиты берега от оползания грунта, на склоне выполнена общая планировка поверхностей слоем суглинка с посевом трав и поверхностная система водоотвода.

3.2.2 Исследование способа выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений на примере оползня вблизи Миатлинской ГЭС

Выполним оценку точности для двух схем наблюдений – без рабочих пунктов и с рабочими пунктами (рисунок 11): первая схема предполагает наблюдение с опорных пунктов 102 и 103 деформационного пункта m11 засечками в сочетании с тригонометрическим нивелированием при большом удалении опорных пунктов от деформационного пункта. Второй вариант предполагает выполнять наблюдения перечисленными методами с рабочих пунктов P4 и P5, проложенных по телу оползня с определением их положения методом полигонометрии при значительно меньшем удалении станций от деформационного пункта. Ход длиной 4271 м проложен по телу оползня, опирается в своём начале и конце на исходные стороны, находящиеся вне зоны влияния оползня. Оценка выполняется для тахеометров с СКП измерения углов и СКП измерения расстояний, равными 0,5" и 0,6 мм + 1 мм/км (Leica TS60), 1" и 1 мм + 1 мм/км (South N41), 2" и 1 мм + 1,5 мм/км (Leica TS03 R500), 3" и 1,5 мм + 2 мм/км (Sokkia IM-103), 5" и 2 мм + 2 мм/км (Trimble S5).



- △ 101 Опорный пункт
- m1 Деформационный пункт
- P1 Рабочий пункт
- Границы оползневого склона
- Измерение деформационного пункта с опорного пункта
- Измерение деформационного пункта с рабочего пункта

Рисунок 11 – Схема геодезических наблюдений на оползне у берегов водохранилища Миатлинской ГЭС

Результат вычисления СКП определения пространственного положения деформационного пункта m11 с опорных пунктов 102 и 103 $m_{ХУН}$ для методов засечек в сочетании с тригонометрическим нивелированием представлен на рисунке 12.

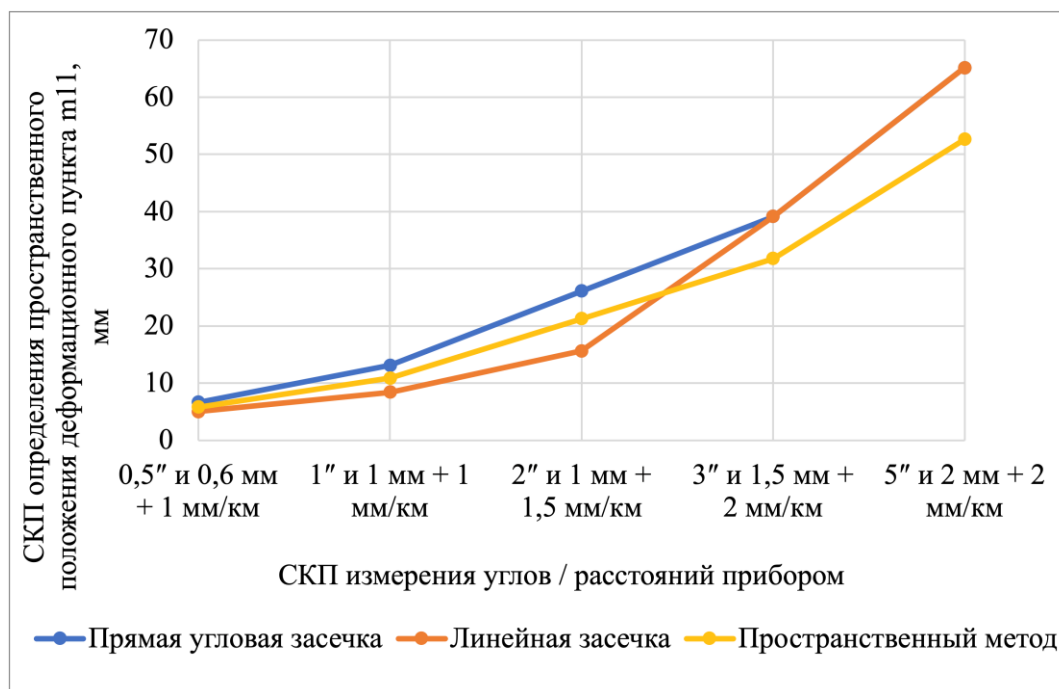


Рисунок 12 – График зависимости величины СКП определения пространственного положения деформационного пункта m11 от выбора метода и геодезического прибора при наблюдении с опорных пунктов 102 / 103

Величины СКП определения пространственного положения рабочих пунктов $m_{РП}$ представлены на рисунке 13.

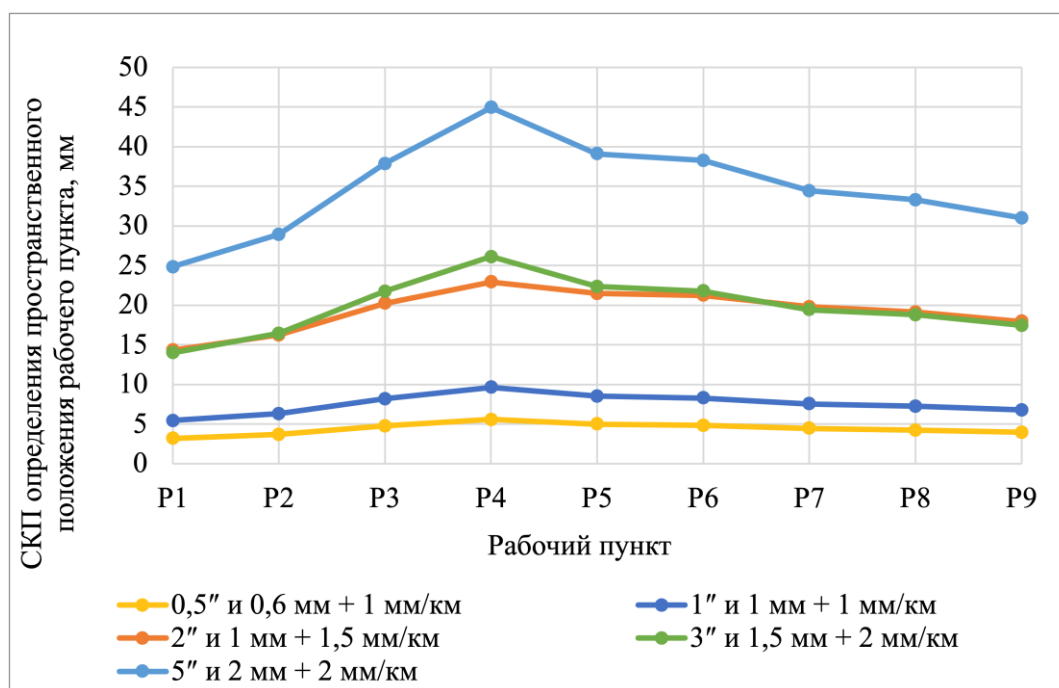


Рисунок 13 – Величины СКП определения пространственного положения рабочих пунктов методом полигонометрии

Рабочий пункт Р4 – наиболее слабый рабочий пункт с наибольшим СКП определения его положения. Удаление деформационного пункта m11 от рабочего пункта Р4 составляет 331,8 м, а от опорного пункта 103 – 1531,7 м.

Результаты вычисления СКП определения пространственного положения деформационного пункта m11 с рабочих пунктов Р4 и Р5 $m_{\text{ХУНП}}$ представлены на рисунке 14.

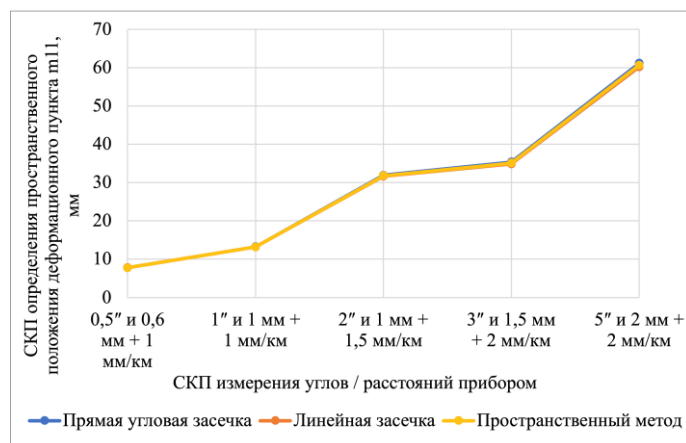


Рисунок 14 – Графики зависимостей СКП определения пространственного положения деформационного пункта m11 с рабочих пунктов Р4 / Р5 от метода измерения и СКП измерения углов/расстояний прибора

В рассмотренной схеме наблюдений на оползне Миатлинской ГЭС для деформационного пункта m11 наименьшая СКП определения его пространственного положения с опорных пунктов 102 и 103 была получена методом линейной засечки в сочетании с тригонометрическим нивелированием при наблюдении тахеометрами с СКП измерения углов, равными 0,5", 1", 2", и расстояний, равными 0,6 мм + 1 мм/км, 1 мм + 1 мм/км, 1 мм + 1,5 мм/км. Для тахеометров с СКП измерения углов 3" и 5", а расстояний – 1,5 мм + 2 мм/км и 2 мм + 2 мм/км наименьшая СКП определения пространственного положения деформационного пункта с опорных пунктов была получена пространственным методом.

Определение пространственного положения деформационного пункта m11 с рабочих пунктов выполнялось с самого слабого рабочего пункта, определённого методом проложения хода полигонометрии – Р4. СКП определения пространственного положения рабочего пункта Р4, с которого велись наблюдения методами засечек и пространственным методом составили от 5,6 мм до 45,0 мм в зависимости от СКП измерения углов и СКП измерения расстояний тахеометра. СКП определения пространственного положения деформационного пункта m11 при этом составила величину от 7,8 мм для пространственного метода и тахеометра с СКП измерения углов 0,5", расстояний – 0,6 мм + 1 мм/км, до 61,1 мм для тахеометра с СКП измерения углов 5", расстояний – 2 мм + 2 мм/км при наблюдении методом прямой угловой засечки в сочетании с тригонометрическим нивелированием.

Наблюдение с опорных пунктов при их больших удалениях от деформационного пункта для методов прямой угловой и линейной засечек в сочетании с тригонометрическим нивелированием оказалось точнее при использовании тахеометров с СКП измерения углов $2''$ и меньше, расстояний – $1 \text{ мм} + 1,5 \text{ мм/км}$ и меньше. При расчётах для этих же методов в случае применения тахеометров с СКП измерения углов $3''$ либо $5''$, и расстояний – $1,5 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км}$ либо $2 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км}$ точнее оказалось наблюдение с рабочих пунктов. Для пространственного метода наблюдение с опорных пунктов оказалось точнее при использовании любого из рассмотренных тахеометров. Наибольшее различие между величинами СКП определения пространственного положения деформационного пункта в зависимости от наблюдения с опорных или рабочих пунктов составило $16,0 \text{ мм}$ для метода линейной засечки в сочетании с тригонометрическим нивелированием при наблюдении тахеометром с СКП измерения углов $2''$ и СКП измерения расстояний $1 \text{ мм} + 1,5 \text{ мм/км}$: здесь точнее оказалось наблюдение с опорных пунктов.

Анализируя графики, можно сделать вывод, что пространственный метод имеет преимущество перед другими перечисленными методами: метод позволяет достичь меньших величин СКП определения оползневых смещений при наблюдении с опорных пунктов, которые располагаются на большом удалении от деформационного пункта. В ряде случаев для тахеометров с СКП измерения расстояний $0,6 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$, $1 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$ и $1 \text{ мм} + 1,5 \text{ мм/км}$ СКП определения пространственного положения деформационного пункта методом линейной засечки в сочетании с методом тригонометрического нивелирования меньше, чем при использовании пространственного метода. Максимальное различие составляет всего $5,6 \text{ мм}$, что является незначительным при учёте, что методика измерения линейной засечкой сложнее в исполнении и предполагает, что угол засечки при деформационном пункте должен находиться в интервале $30 - 150^\circ$. Подобных требований для пространственного метода нет. Также стоит отметить, что в ряде случаев для прямой угловой и линейной засечек в сочетании с тригонометрическим нивелированием применение высокоточных тахеометров при наблюдении с опорных пунктов даёт большую точность, чем построение протяжённых ходов и наблюдение с рабочих пунктов. Наблюдение же пространственным методом для всех рассмотренных тахеометров показало большую точность определения при наблюдениях с опорных пунктов, расположенных на большом расстоянии, чем с рабочих пунктов при их меньшем удалении от деформационных пунктов. Таким образом, пространственный метод является менее трудоёмким, так как не требуется дополнительного построения ходов для наблюдения с рабочих пунктов. Стоит отметить, что при наблюдении на больших расстояниях может потребоваться применение трёхпризменных систем (например, RGK HD34).

Применение технологии RTK, например, ГНСС-приёмником Trimble R8 (СКП определения положения технологией RTK в режиме работы от одиночной базовой станции в плане 8 мм + 1 мм/км, по высоте 15 мм + 1 мм/км) позволит достичь величины СКП определения планового положения деформационного пункта, равной 8,8 мм, высотного положения, равной 15,8 мм, пространственного положения, равной 18,1 мм. При такой величине СКП определения пространственного положения деформационного пункта минимальная фиксируемая скорость будет составлять 61,4 мм/цикл при уровне значимости 0,05. Показанный расчёт точности измерений технологией спутникового позиционирования основан на заявленных паспортных характеристиках ГНСС-оборудования, которые определяются по методике, представленной в нормативной документации [22]. Так, обозначенный стандарт предполагает методику испытаний, состоящую из трёх серий измерений, при этом моменты начала последовательных серий измерений должны быть разделены интервалом не менее 90 минут. При увеличении количества наблюдаемых эпох в цикле наблюдений величины СКП определения положения могут быть меньше, что показано в исследовании [48]. Кроме того, на получаемый результат и скорость выполнения работ может оказать влияние отсутствие видимости спутников, так как при большой крутизне поверхности оползня и наблюдении деформационных пунктов у его подошвы часть небосвода может быть закрыта.

По полученным результатам разработан алгоритм выбора метода и геодезического прибора в зависимости от скорости оползневых смещений (рисунки 15 – 16). Скорости оползневых смещений подобраны на основании минимальных фиксируемых оползневых смещений, которые могут быть выявлены при заданной СКП определения оползневых смещений и рассчитаны по формуле (32).

Метод измерения	С опорных пунктов (О) / рабочих пунктов (Р) (ход полигонометрии до 4 км, до 10 сторон)																
	Пымень	6 мм		10 мм		15 мм		20 мм		30 мм		40 мм		55 мм		66 мм	
	в	О	Р	О	Р	О	Р	О	Р	О	Р	О	Р	О	Р	О	Р
Прямая угловая засечка в сочетании с тригонометрическим нивелированием (длина сторон засечки до 1350 м/250 м, длина базисной стороны до 1650 м/500 м при наблюдении с опорных пунктов / рабочих пунктов)	20,4 мм	—	—														
	33,9 мм	—	—														
	50,9 мм	—	—														
	67,9 мм	—	—														
	101,8 мм	—	—														
	135,8 мм	—	—														
	186,7 мм	—	—														
	224,1 мм	—	—														
Линейная засечка в сочетании с тригонометрическим нивелированием (длина сторон засечки до 1350 м/250 м, длина базисной стороны до 1650 м/500 м при наблюдении с опорных пунктов / рабочих пунктов)	20,4 мм	—	—														
	33,9 мм	—	—														
	50,9 мм	—	—														
	67,9 мм	—	—														
	101,8 мм	—	—														
	135,8 мм	—	—														
	186,7 мм	—	—														
	224,1 мм	—	—														
Легенда		СКП измерения углов								СКП измерения расстояний							
		0,5"								0,6 мм + 1 мм/км							
		1"								1 мм + 1 мм/км							
		2"								1 мм + 1,5 мм/км							
		3"								1,5 мм + 2 мм/км							
		5"								2 мм + 2 мм/км							
в		Скорость смещения в период															
Пымень		СКП определения оползневых смещений															

Рисунок 15 – Выбор метода и геодезического прибора в зависимости от скорости оползневых смещений для методов прямой угловой и линейной засечек в сочетании с тригонометрическим нивелированием

Метод измерения	С опорных пунктов (О) / рабочих пунктов (Р) (ход полигонометрии до 4 км, до 10 сторон)																
	т _{смещ}	6 мм		10 мм		15 мм		20 мм		30 мм		40 мм		55 мм		66 мм	
	υ	О	Р	О	Р	О	Р	О	Р	О	Р	О	Р	О	Р	О	Р
Пространственный метод (длина линии измерения засечки до 1500 м/300 м, длина базисной стороны до 1650 м/500 м при наблюдении с опорных пунктов / рабочих пунктов)	20,4 мм		—														
	33,9 мм		—														
	50,9 мм		—														
	67,9 мм		—														
	101,8 мм		—														
	135,8 мм		—														
	186,7 мм		—														
	224,1 мм		—														
Легенда	СКП измерения углов								СКП измерения расстояний								
	0,5"								0,6 мм + 1 мм/км								
	1"								1 мм + 1 мм/км								
	2"								1 мм + 1,5 мм/км								
	3"								1,5 мм + 2 мм/км								
	5"								2 мм + 2 мм/км								
υ	Скорость смещения в период																
т _{смещ}	СКП определения оползневых смещений																

Рисунок 16 – Выбор метода и геодезического прибора в зависимости от скорости оползневых смещений для пространственного метода

Алгоритм выбора метода и геодезических приборов в зависимости от скорости оползневых смещений позволяет оценивать точность, получаемую при определении скорости оползневых смещений, что является необходимым в тех случаях, когда оползневой процесс находится в стабилизированном состоянии. В таких случаях оползни смещаются на миллиметровые величины. Руководствуясь при этом СП 420, где допустимая СКП определения оползневых смещений ограничена 20 мм для горизонтальных смещений и 10 мм для вертикальных, за величиной СКП есть большая вероятность не зарегистрировать оползневые смещения, при этом к моменту измерений в следующем цикле наблюдений скорость может уже существенно возрасти, вплоть до опасной. Представленный алгоритм направлен на уточнение необходимых параметров, которые смогут повлиять на точность определения скорости оползневых смещений за счёт правильно выбранного по точности измерения оборудования и правильно сконфигурированным параметрам сети.

При высоких скоростях движения оползня, характеризующихся сантиметровыми значениями оползневых смещений за период наблюдения, уместно применение не наземных, а дистанционных методов с целью обеспечения безопасности проведения работ, среди которых методы воздушного лазерного сканирования с использованием беспилотных воздушных судов, методы дистанционного зондирования Земли и аэрофотосъёмки. Точность данных методов позволит применять их для наблюдения подобных оползневых смещений, однако важно, чтобы погодные условия позволяли производить полёты в случае применения методов аэрофотосъёмки и воздушного лазерного сканирования. Также для методов дистанционного зондирования Земли, аэрофотосъёмки и воздушного лазерного сканирования важно отсутствие на оползневом склоне

густого растительного покрова, который может усложнить постобработку полученных в ходе измерений данных [45, 49, 54, 127].

3.3 Исследование метода определения положения деформационных пунктов технологией РТК с увеличенным периодом наблюдений

Цель проведения экспериментов заключалась в получении величин СКП определения смещений деформационных пунктов технологией РТК при различных количествах эпох, интервалах времени между фиксируемыми эпохами, используемых ГНСС-систем, а также при различных удалениях ГНСС-приёмника от одиночной базовой станции. Для этого при помощи дюбелей, закреплённых в твёрдом покрытии, был смоделирован деформационный процесс: 6 дюбелей были установлены в створе друг относительно друга через различные расстояния с различной высотой, за счёт чего был симитирован процесс смещений деформационного пункта во времени между циклами наблюдений (рисунок 17). Предполагается, что деформационный пункт имеет смещения между циклами наблюдений, которые представлены дюбелями, расположенными через расстояния, в плане от 76 до 405 мм, по высоте от 3 до 29 мм. Многократно наблюдая различные интервалы расстояний и превышений между парами дюбелей при различных параметрах наблюдений, представляется возможным оценить наличие зависимости параметров наблюдения смещений от точности их определения.



Рисунок 17 – Закреплённые в твёрдом покрытии дюбели с целью моделирования смещений деформационного пункта в теле оползня

Расстояния между дюбелями были измерены штангенциркулем МИ-1115 (СКП измерения: 0,3 мм, номер в госреестре федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений: 24653-03, номер записи: 107454, дата опубликования: 08.05.2018). Расстояния измерялись между внешними краями стержней дюбелей, после чего из значения расстояния вычиталось значение одного диаметра стержня дюбеля для получения расстояния между центрами дюбелей. Превышение между дюбелями было измерено при помощи цифрового нивелира Sokkia SDL50 в комплекте с фиброглассовыми рейками BGS40 (СКП измерения превышений: 1,5 мм на 1 км двойного хода) методом геометрического нивелирования. Полученные расстояния и превышения были приняты в качестве эталонных. Эталонные расстояния и превышения измерялись многократно, впоследствии для каждого интервала было принято среднее значение из всех измерений. Для вычисленных эталонных превышений и расстояний были рассчитаны СКП их определения по формуле (43).

Расстояния и превышения были определены между всеми комбинациями пар дюбелей. Значения эталонных расстояний и превышений между дюбелями и СКП их определения представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Значения эталонных расстояний и превышений между дюбелями и СКП их определения (S – эталонное расстояние, мм, m_s – СКП определения эталонного расстояния, мм, h – эталонное превышение, мм, m_h – СКП определения эталонного превышения, мм)

Интервал	S	m_s	h	m_h
Дюбель 1 – Дюбель 2	80	0,14	7	0,50
Дюбель 1 – Дюбель 3	156	0,22	9	0,58
Дюбель 1 – Дюбель 4	232	0,14	14	0,00
Дюбель 1 – Дюбель 5	314	0,32	20	0,00
Дюбель 1 – Дюбель 6	405	0,20	29	0,50
Дюбель 2 – Дюбель 3	76	0,16	3	0,50
Дюбель 2 – Дюбель 4	125	0,18	7	0,50
Дюбель 2 – Дюбель 5	234	0,34	13	0,50
Дюбель 2 – Дюбель 6	325	0,29	23	0,58
Дюбель 3 – Дюбель 4	76	0,14	5	0,58
Дюбель 3 – Дюбель 5	158	0,22	11	0,58
Дюбель 3 – Дюбель 6	249	0,24	20	0,50
Дюбель 4 – Дюбель 5	82	0,26	6	0,00
Дюбель 4 – Дюбель 6	173	0,18	15	0,50
Дюбель 5 – Дюбель 6	91	0,18	9	0,50

Пространственное положение всех 6 дюбелей были получено с помощью технологии RTK с применением следующего ГНСС-оборудования: ГНСС-приёмник EFT M4 (СКП определения положения технологией RTK в плане: 5 мм + 0,5 мм/км, по высоте: 10 мм + 0,8 мм/км, номер в госреестре: 82541-21, номер записи: 183954, дата опубликования: 31.08.2021), ГНСС-приёмник Trimble R8 (СКП определения положения технологией RTK в плане: 8 мм + 1 мм/км, по высоте: 15 мм + 1 мм/км, номер в госреестре: 33967-07, номер записи: 120317, дата опубликования:

08.05.2018), ГНСС-приёмник Topcon Hiper V (СКП определения положения технологией RTK в плане: 10 мм + 1 мм/км, по высоте: 15 мм + 1 мм/км, номер в госреестре: 64260-16). Измерения производились с применением карбоно-алюминиевой вехи Trimble Standard Telescopic Rod 2,6 m и бипода RGK GM-2A, ГНСС-приёмник был установлен при высоте вехи 2 метра (рисунок 18).



Рисунок 18 – Процесс определения положения дюбелей технологией RTK

Подключение с применением технологии RTK осуществлялось при режиме передачи RTCM-поправок (RTCM – Radio Technical Commission for Maritime Services, в переводе с англ. – «радиотехническая комиссия морских сервисов») от одиночной базовой станции через сеть Интернет посредством технологии «Networked Transport of RTCM via Internet Protocol» (NTRIP, в переводе с англ. – «сетевая передача RTCM через Интернет-протокол»). В настоящее время распространены интернет-сервисы, предоставляющие на коммерческой основе функционал кастера, необходимого для обеспечения передачи поправок по технологии NTRIP. В качестве базовой станции использовался ГНСС-приёмник EFT M4. Базовая станция перемещалась относительно тест-объекта так, что удаление ровера от базовой станции составляло 1007 м, 1987 м, 5011 м и 10020 м. Привязка к местной системе координат не осуществлялась, работа выполнялась в условной системе координат, так как в рамках выполнения эксперимента целью было не определение положения дюбелей в определённой системе координат, а определение величин смещений. Базовая станция устанавливалась на открытых для видимости небосвода местах. Также для сравнения режимов работы одна серия экспериментов была выполнена в режиме работы с применением сетевого решения по технологии VRS. Подключение осуществлялось к пунктам СДГС ГЕОСПАЙДЕР. Результаты, получаемые с применением данной технологии передачи поправок, априори должны быть выше

по точности, чем наблюдение при подключении к одиночной базовой станции. В то же время, количество пунктов СДГС не всегда способно обеспечить район работ возможностью применения технологии сетевого решения, вследствие чего этот метод не рассматривался в исследовании в качестве приоритетного.

В качестве режима измерений был выбран непрерывный режим наблюдений, при котором каждая из эпох фиксируется в памяти контроллера и для каждой эпохи вычисляются плановые координаты и высота наблюдаемого дубеля. Для каждого из ГНСС-приёмников наблюдения выполнялись при различном количестве эпох: 10, 30, 60, 90, 120 и 180 с частотой измерений 1 Гц. Маска возвышения была установлена со значением 10° . Для каждой серии наблюдения были выполнены в разное время суток: в полуденное и вечернее время. Для сеансов, наблюдаемых ГНСС-приёмником EFT M4, измерения выполнялись в 4 системах: GPS, ГЛОНАСС, Galileo и Beidou. Дополнительно ГНСС-приёмник EFT M4 оснащён встроенным электронным уровнем с инерциальным датчиком коррекции наклона, не требующим калибровки, который был отключён на время эксперимента для более корректного сравнения результатов с другими ГНСС-приёмниками. В сериях, которые наблюдались ГНСС-приёмниками Trimble R8 и Topcon Hiper V, использовались две системы: GPS и ГЛОНАСС. При наблюдении в качестве ровера ГНСС-приёмником EFT M4 количество общих наблюдаемых спутников между базовой станцией и ровером составило от 23 до 34, величина PDOP варьировалась от 0,9 до 1,1. Для серий измерений ГНСС-приёмником Trimble R8 количество общих наблюдаемых спутников между базовой станцией и ровером составило от 9 до 13, величина PDOP в период измерений была в диапазоне от 1,3 до 2,1. Для серий измерений ГНСС-приёмником Topcon Hiper V количество общих наблюдаемых спутников между базовой станцией и ровером составило от 10 до 12, величина PDOP в период измерений находилась в диапазоне от 1,9 до 2,4.

По разностям плановых координат и высот, полученных с применением технологии RTK, были вычислены расстояния и превышения между дубелями и сравнены с эталонными расстояниями и превышениями.

На основании обработки результатов измерений представлены величины СКП определения горизонтальных и вертикальных смещений деформационных пунктов, отображающие величины отклонений результатов, полученных при наблюдениях технологией RTK от эталонных значений. По многократным определениям смещений были рассчитаны СКП определения смещений по формуле (44).

Наилучшие результаты были получены при использовании ГНСС-приёмника EFT M4 при наблюдениях технологией RTK с количеством эпох, равным 180, а также при удалении от одиночной базовой станции на величину 1007 м. Результаты данной серии эксперимента представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Величины СКП определения горизонтальных и вертикальных смещений деформационных пунктов технологией RTK при удалении от одиночной базовой станции на величину 1007 м для различных ГНСС-приёмников и различного количества наблюдаемых эпох (mS_{XY} – СКП определения горизонтальных смещений, мм, mS_H – СКП определения вертикальных смещений, мм)

Количество эпох (частота измерения 1 Гц)	СКП определения смещений					
	EFT M4		Trimble R8		Topcon Hiper V	
	mS_{XY}	mS_H	mS_{XY}	mS_H	mS_{XY}	mS_H
10	13	25	7	18	10	28
30	6	12	10	16	13	25
60	6	10	10	20	14	30
90	8	11	10	20	14	30
120	8	9	10	16	14	24
180	7	9	9	16	13	25
240	7	9	9	16	13	25

На основе данных из этой серии измерений для ГНСС-приёмника EFT M4 был построен график зависимости величины СКП определения горизонтальных и вертикальных смещений деформационных пунктов технологией RTK от количества наблюдаемых эпох (рисунок 19).

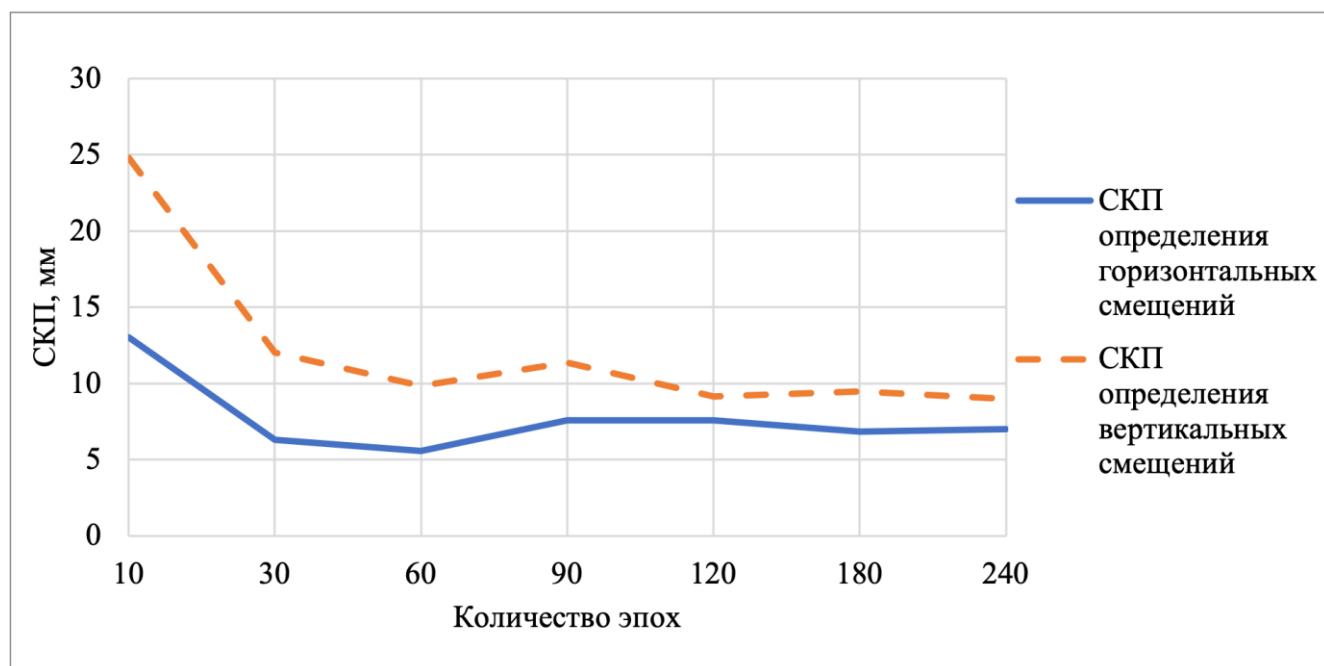


Рисунок 19 – График зависимости величины СКП определения горизонтальных и вертикальных смещений деформационных пунктов технологией RTK для ГНСС-приёмника EFT M4 от количества наблюдаемых эпох при удалении от одиночной базовой станции на 1007 м

Результаты серии эксперимента, в которой величины СКП определения смещений деформационных пунктов определялись технологией RTK при различных удалениях от базовой станции, при использовании режима подключения к одиночной базовой станции, при наблюдении количеством эпох, равным 180, представлены таблице 22.

Таблица 22 – Величины СКП определения смещений деформационных пунктов технологией RTK при наблюдении 180 эпохами с подключением к одиночной базовой станции и различными величинами удаления ровера от неё для различных моделей ГНСС-приёмников ($m_{S_{XY}}$ – СКП определения горизонтальных смещений, мм, m_{S_H} – СКП определения вертикальных смещений, мм)

Удаление от базовой станции, м	СКП определения смещений					
	EFT M4		Trimble R8		Topcon Hiper V	
	$m_{S_{XY}}$	m_{S_H}	$m_{S_{XY}}$	m_{S_H}	$m_{S_{XY}}$	m_{S_H}
1007	7	9	9	16	13	25
1987	7	10	10	17	14	26
5011	9	12	13	20	18	31
10020	12	16	19	25	23	39

Технология RTK с применением сетевого решения при подключении к пункту СДГС BNTA при удалении от тест-объекта на 2071 м показал следующие результаты: для ГНСС-приёмника EFT M4 СКП определения положения горизонтальных смещений при наблюдении 180 эпохами составила 6 мм, вертикальных смещений – 9 мм, для Trimble R8 – 9 мм для горизонтальных смещений и 16 мм для вертикальных, для Topcon Hiper V – 13 мм для горизонтальных смещений и 25 мм для вертикальных.

Согласно полученным в ходе проведения эксперимента результатам, можно сделать вывод о том, что путём повышения количества наблюдаемых эпох возможно повысить точность наблюдений. Наилучшие результаты были получены при наблюдении ГНСС-приёмником EFT M4 с количеством эпох, равным 180, при удалении ровера от одиночной базовой станции на расстояние 1007 м. При минимальном количестве эпох, равном 10, удалении ровера от одиночной базовой станции на величину 1007 м, СКП определения горизонтальных смещений составила 13 мм, а вертикальных – 25 мм, что не удовлетворяет значению предельной СКП определения вертикальных смещений при наблюдениях за оползневыми смещениями. Наблюдение этим же ГНСС-приёмником при количестве эпох, равном 120, позволило достичь величины СКП определения вертикальных смещений, равной 9 мм, условиях что удовлетворяет допустимому значению согласно СП 420.

Применение всех рассмотренных ГНСС-приёмников позволило достичь необходимой точности при определении горизонтальных смещений деформационных пунктов даже при минимальном количестве эпох, равном 10, и удалении от базовой станции не более чем на 5011 м. При удалении от базовой станции на величину 10020 м рекомендуется наблюдать не менее 30 эпохами и применять ГНСС-приёмник с точностью определения положения в плане не хуже 8 мм + 1 мм/км, по высоте – 15 мм + 1 мм/км.

Проведённый эксперимент позволяет сделать заключение о том, что технологией RTK возможно выполнять работы по наблюдению за оползневыми смещениями. Обзор нормативной

документации позволяет сделать вывод о том, что на данный момент нормативной документацией регламентируется величина СКП определения горизонтальных и вертикальных смещений деформационных пунктов в самом слабом месте относительно опорных пунктов, численно равная 20 мм и 10 мм соответственно. Стоит отметить, что допуск на СКП определения вертикальных смещений деформационных пунктов более строгий, чем на СКП определения его горизонтальных смещений, что накладывает ряд ограничений на некоторые геодезические методы определения смещений. К одному из таких методов относится технология спутникового позиционирования, в которой высотное положение определяется с большей СКП, чем положение в плане. Тем не менее, несмотря на наличие данного допуска, при использовании соответствующего ГНСС-оборудования и условий наблюдения (использование не менее 4 ГНСС-систем и наблюдение при количестве эпох не менее 120 при удалении от одиночной базовой станции не более чем на 1987 м) технологией RTK возможно достичь необходимой точности. В рамках данного эксперимента условия наблюдений были далеки от лабораторных: здания, расположенные вокруг места проведения эксперимента, могли препятствовать получению более качественных результатов, что позволяет говорить о вероятной близости полученных результатов к тем, которые могут быть получены при работах по наблюдениям за смещениями деформационных пунктов на оползне, в которых не всегда видимость небосвода может быть идеальной. В случае, когда в месте нахождения деформационных пунктов отсутствует видимость небосвода на оползневом склоне, также возможно закрепление промежуточных рабочих пунктов и определение их положения технологией спутникового позиционирования, а дальнейшее наблюдение деформационных пунктов может быть выполнено путём линейно-угловых измерений с применением геодезических засечек от рабочих пунктов.

Применение сетевого решения при наблюдениях технологией RTK показало более качественные результаты по сравнению с наблюдениями от одиночной базовой станции, однако спецификация работ по наблюдениям за оползнями предполагает наблюдения при удалении от населённых пунктов, где плотность пунктов СДГС может быть низкой, вследствие чего применение данного способа может не представляться возможным.

На основании проведённого исследования, предлагается классификация условий и параметров наблюдений за смещениями деформационных пунктов на оползне технологией RTK согласно 5 классам, каждый из которых характеризует точности определения смещений (таблица 23). Точность определения смещений в каждом классе характеризуется предельной СКП определения смещений, которая была определена по результатам серий опытов в данном исследовании.

Таблица 23 – Классификация условий и параметров наблюдений по получаемой точности определения смещений деформационных пунктов в теле оползня технологией RTK (m_{XY} – СКП определения горизонтальных смещений, мм, m_{SH} – СКП определения вертикальных смещений, мм, m_{XY} – априорная точность определения плановых координат, мм + мм/км, m_H – априорная точность определения высоты, мм + мм/км, 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_{XY} : 7 m_{SH} : 9	m_{XY} : 8 m_{SH} : 9	m_{XY} : 8 m_{SH} : 10	m_{XY} : 19 m_{SH} : 38	m_{XY} : 20 m_{SH} : 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 базовая станция/Сетевой режим	Одиночная базовая станция/Сетевой режим	Одиночная базовая станция/Сетевой режим	Одиночная базовая станция/Сетевой режим	Одиночная базовая станция/Сетевой режим
Удаление от базовой станции, м	1007	1007	1987	5011	10020
Количество наблюдаемых эпох, ед	180	120	120	10	10

Продолжение таблицы 23

Способ наблюдения за смещениями деформационных пунктов	XY, H	XY, H	XY, H	XY	XY
Способ наблюдения за смещениями относительно рабочих пунктов	XY, H	XY, H	XY	XY	—

На основании подготовленной классификации условий и параметров наблюдений по получаемой точности определения смещений деформационных пунктов в теле оползня технологией RTK (таблица 23) алгоритм выбора и метода геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений был разработан для применения технологии RTK (рисунок 20).

Метод измерения	Наблюдение деформационных пунктов, база установлена на опорном пункте								
	$m_{\text{смещ}}, \text{мм}$	11,5	12,5	15	20	30	40	55	66
	v								
Технология спутникового позиционирования в режиме реального времени (RTK)	20,4 мм								
	33,9 мм								
	50,9 мм								
	67,9 мм								
	101,8 мм								
	135,8 мм								
	186,7 мм								
	224,1 мм								
Легенда	Класс								
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
v	Скорость смещения в период								
$m_{\text{смещ}}$	СКП определения оползневых смещений, мм								

Рисунок 20 – Выбор метода и геодезического прибора в зависимости от скорости оползневых смещений для технологии RTK

Таким образом, на основании проведенного эксперимента стоит сделать вывод о том, что предлагаемая методика по наблюдению технологией RTK за смещениями деформационных пунктов, закреплённых в теле оползня, предполагает использование ГНСС-приёмников, поддерживающих получение сигнала в 4 системах, удаление от базовой станции не более чем на 1987 м при использовании одиночной базовой станции, а также более длительные сеансы наблюдений технологией RTK (порядка 2-х минут при частоте измерений 1 Гц) в случае

необходимости определения вертикальных смещений деформационных пунктов в теле оползня. При необходимости анализа только горизонтальных смещений деформационных пунктов, достаточно 10 эпох (порядка 10 секунд при частоте измерений 1 Гц) с целью получения необходимой точности наблюдений при удалении на 5011 м от одиночной базовой станции и использовании ГНСС-приёмника с точностью определения положения в плане не хуже $10 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$ и по высоте – $15 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$ либо при удалении на 10020 м от одиночной базовой станции, но при использовании ГНСС-приёмника с точностью определения положения в плане не хуже $8 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$ и по высоте – $15 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$ [48, 52].

3.4 Исследование метода определения положения деформационных пунктов линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения

При наблюдениях методом линейно-угловых измерений с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения можно выделить три вида СКП:

- СКП определения плановых координат съёмочных пикетов методом полярной засечки и их высоты методом тригонометрического нивелирования;
- СКП за смещение узловой точки отражателя при его вращении;
- СКП аппроксимации съёмочных пикетов сферой. Кроме того, увеличение данных СКП возможно из-за колебаний отражателя, возникающих при нестабильном удержании вехи, или при несовмещении острия вехи и центра деформационного пункта. Влияние СКП из-за колебаний отражателя, в свою очередь, можно снизить применением роботизированных тахеометров с функцией автонаведения.

СКП определения плановых координат и высоты съёмочного пикета можно оценить по формулам (67) – (68). Так, при измерении цели электронным тахеометром с СКП измерения углов $3''$, СКП измерения расстояний на призму – $2 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км}$, расстоянии до цели 50 м, СКП измерения высоты прибора и отражателя 2 мм и угле наклона визирного луча 10° , величина СКП определения плановых координат съёмочного пикета по формулам (67) – (68) составит 2,1 мм, а высоты – 2,9 мм.

$$m_{XY} = \sqrt{m_S^2 + \frac{S^2 \cdot m_\beta^2}{\rho^2}}, \quad (67)$$

$$m_H = \sqrt{\left(\frac{m_v}{\rho} \cdot S \cdot \cos v\right)^2 + (m_S \cdot \sin v)^2 + m_i^2 + m_v^2}, \quad (68)$$

где m_S – СКП измерения расстояний, м,

S – измеренное наклонное расстояние, м

m_β – СКП измерения горизонтальных углов, угловые секунды,

ρ – величина, равная одному радиану, угловые секунды,

m_v – СКП измерения вертикальных углов наклона, угловые секунды,

v – измеренный вертикальный угол наклона, угловые секунды,

m_i – СКП измерения высоты прибора, м,

m_v – СКП измерения высоты отражателя, м.

Другим видом СКП является смещение узловой точки отражателя при его вращении вокруг вертикальной и горизонтальной осей: узловая точка отражателя изменяет своё положение, описывая дугу, при этом величина смещения узловой точки отражателя напрямую зависит от её удаления от оси вращения отражателя [61] (рисунок 21):

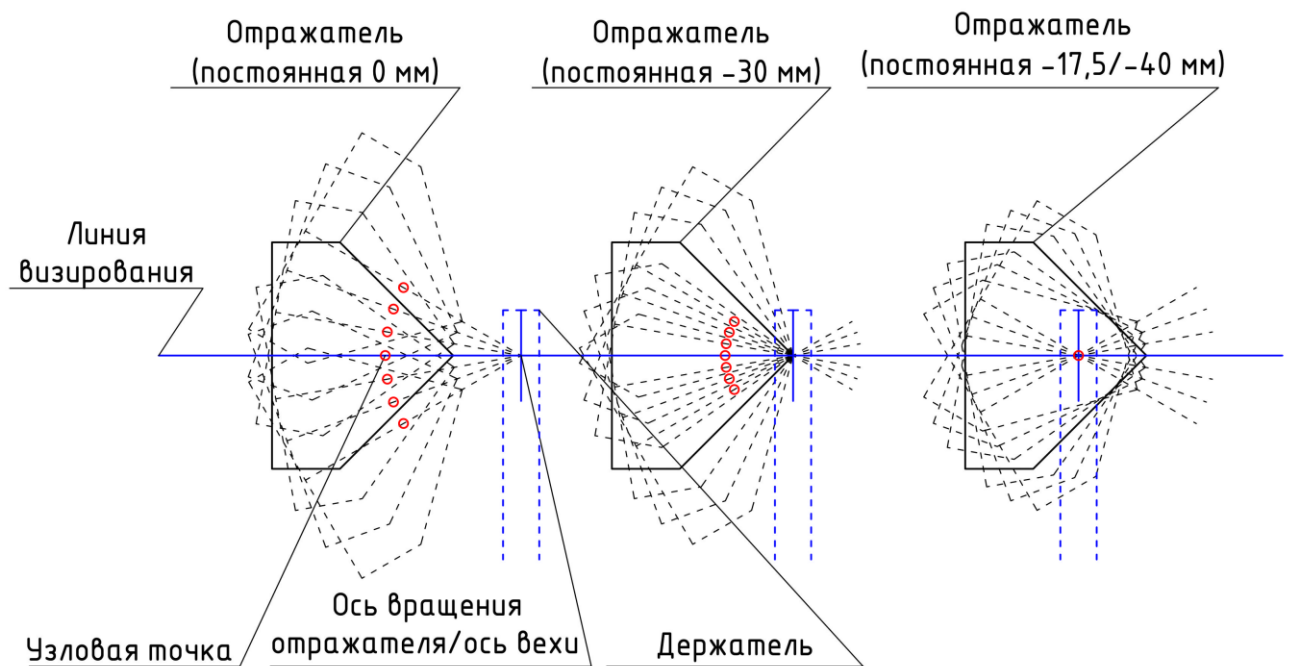


Рисунок 21 – Положения узловой точки отражателя при его вращениях

В рамках исследования был проведён эксперимент, позволивший определить влияние величины смещения узловой точки отражателя на точность определения положения отражателя. На одном ППЦ устанавливался электронный тахеометр Sokkia CX-103 (СКП измерения углов – 3", СКП измерения расстояний на отражатель – 2 мм + 2 мм/км), на другом ППЦ поочерёдно устанавливались 4 отражателя: Vega SP02T (постоянная отражателя –30 мм), Sokkia PPS-3050 (постоянная отражателя –30 мм), Sokkia PPS-3050 (постоянная отражателя 0 мм) и Leica GMP111 (постоянная отражателя +17,5 мм при работе с тахеометрами Leica, –16,9 мм при работе с тахеометрами других производителей). Расстояние между двумя ППЦ составило 6,07 м, отражатель и тахеометр располагались на одной высоте. Тахеометр был приведён в рабочее положение и сориентирован на отражатель, установленный под прямым углом к линии визирования. Таким образом, ось X системы координат была направлена вдоль визирной линии через узловую точку отражателя, ось Y была направлена перпендикулярно визирной линии, ось

Z дополняла систему координат до левой. Полученные в результате повторных многократных наблюдений плановые координаты и высота принимались за эталонные. Далее, отражатель вращался в азимутальном и зенитном направлениях на предельную величину, при которых возможно было выполнить наведение на узловую точку отражателя (приблизительно на 40° в каждом направлении). Максимальные величины смещения узловой точки отражателя при вращении отражателей различных типов представлены на рисунке 22.

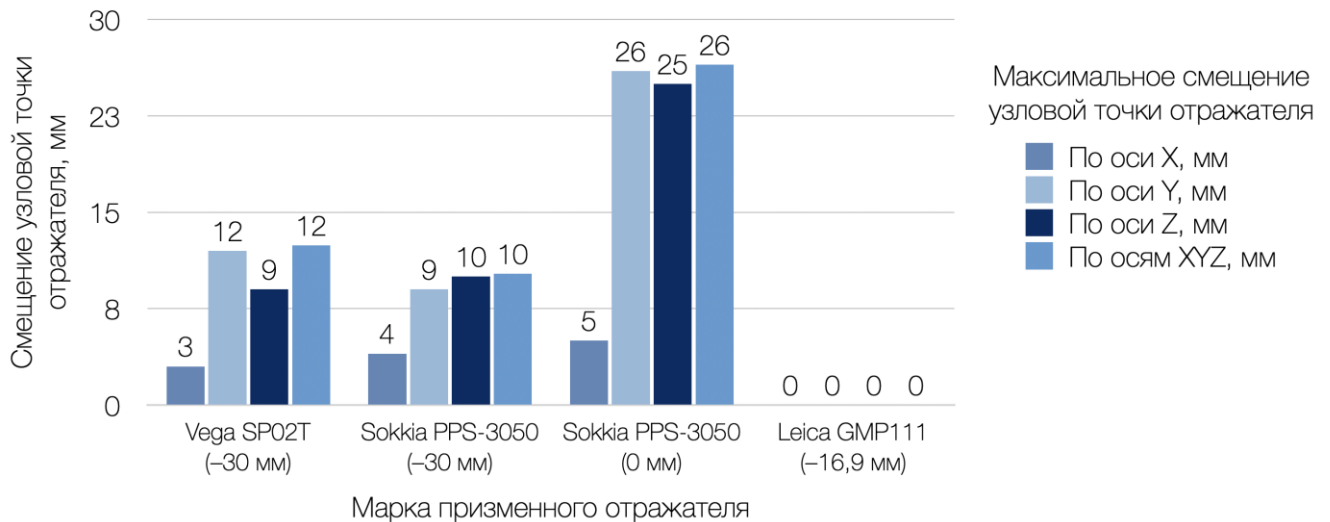


Рисунок 22 – Гистограмма максимальных величин смещения узловой точки отражателя при вращении отражателей различных типов

Согласно результатам, величина расстояния до узловой точки отражателя при поворотах отражателя изменялась на величину 3 – 5 мм, высота узловой точки отражателя изменялась на величину 9 – 25 мм, смещение узловой точки отражателя в перпендикулярном визирной линии направлении составило величину 9 – 26 мм. Наибольшее смещение узловой точки отражателя было зафиксировано для отражателя Sokkia PPS-3050 с постоянной отражателя 0 мм, а в случае применения минипризмы Leica GMP111 с постоянной отражателя –16,9 мм смещения по всем осям были равны нулю. Проведённый эксперимент наглядно показывает, что использование отражателей, в которых конструкция предполагает нахождение узловой точки отражателя на месте пересечения оси вращения отражателя и оси вехи, исключает наличие СКП за смещение узловой точки отражателя. С целью исключения подобной СКП рекомендуется использовать отражатели с постоянными –17,5 мм (для призм диаметром 25 мм) или –40 мм (для призм диаметром 62 мм). Отражатели фирмы Leica с постоянной отражателя +17,5 мм можно использовать наравне с отражателями других производителей, у которых постоянная отражателя равна –17,5 мм, так как конструктивно различия в них минимальны.

Примеры отражателей:

– минипризмы диаметром 25 мм с постоянной отражателя –17,5 мм (SECO 5910-11), +17,5 мм (Leica GMP101, Leica GMP111) и другие;

– призмы диаметром 62 мм с постоянной отражателя –40 мм: SECO Nodal Point Prism Assembly, Sokkia AP01, South TK27T и другие.

Третьим видом является СКП аппроксимации съёмочных пикетов сферой, на величину которой влияет конфигурация съёмочных пикетов на сфере при наклонах вехи. Путём моделирования была выполнена проверка различных вариантов конфигураций съёмочных пикетов на сфере, выполнен расчёт СКП определения плановых координат m_{XY} , высоты m_H , пространственного положения m_{XYH} центра сферы, а также радиуса сферы m_R в зависимости от расположения отражателя по формулам (69) – (72):

$$m_{XY} = \sqrt{\frac{\sum (X_{S_i} - X_{S_0})^2 + \sum (Y_{S_i} - Y_{S_0})^2}{n}}, \quad (69)$$

$$m_H = \sqrt{\frac{\sum (H_{S_i} - H_{S_0})^2}{n}}, \quad (70)$$

$$m_{XYH} = \sqrt{\frac{\sum (X_{S_i} - X_{S_0})^2 + \sum (Y_{S_i} - Y_{S_0})^2 + \sum (H_{S_i} - H_{S_0})^2}{n}}, \quad (71)$$

$$m_R = \sqrt{\frac{\sum (R_{S_i} - R_{S_0})^2}{n}}, \quad (72)$$

где $X_{S_i}, Y_{S_i}, H_{S_i}$ – плановые координаты и высота центра сферы, полученной путём аппроксимации съёмочных пикетов, м,

$X_{S_0}, Y_{S_0}, H_{S_0}$ – эталонные плановые координаты и высота центра сферы, полученной путём аппроксимации съёмочных пикетов, м,

R_{S_i} – радиус сферы, полученной путём аппроксимации съёмочных пикетов, м,

R_{S_0} – эталонный радиус сферы, полученной путём аппроксимации съёмочных пикетов, м,

n – количество итераций определения центра и радиуса сферы, ед.

За эталонный радиус сферы была принята высота вехи, равная 2 м. По результатам моделирования было выявлено, что в частном случае, когда веха с отражателем во всех 4 положениях отклонена от полюса сферы на одинаковый угол (съёмочные пикеты расположены на одной горизонтальной плоскости), тетраэдр при решении задачи вырождается, что приводит к грубым ошибкам в определении высоты и радиуса сферы. СКП определения высоты и радиуса сферы математически стремятся к нулю лишь при наклоне вехи $85 - 90^\circ$, то есть в случае, когда веха почти лежит на земле, что делает невозможным применение метода на практике при наблюдениях за оползнями. СКП определения плановых координат, при этом, равна нулю при любых значениях угла наклона вехи от отвесного положения (рисунок 23).

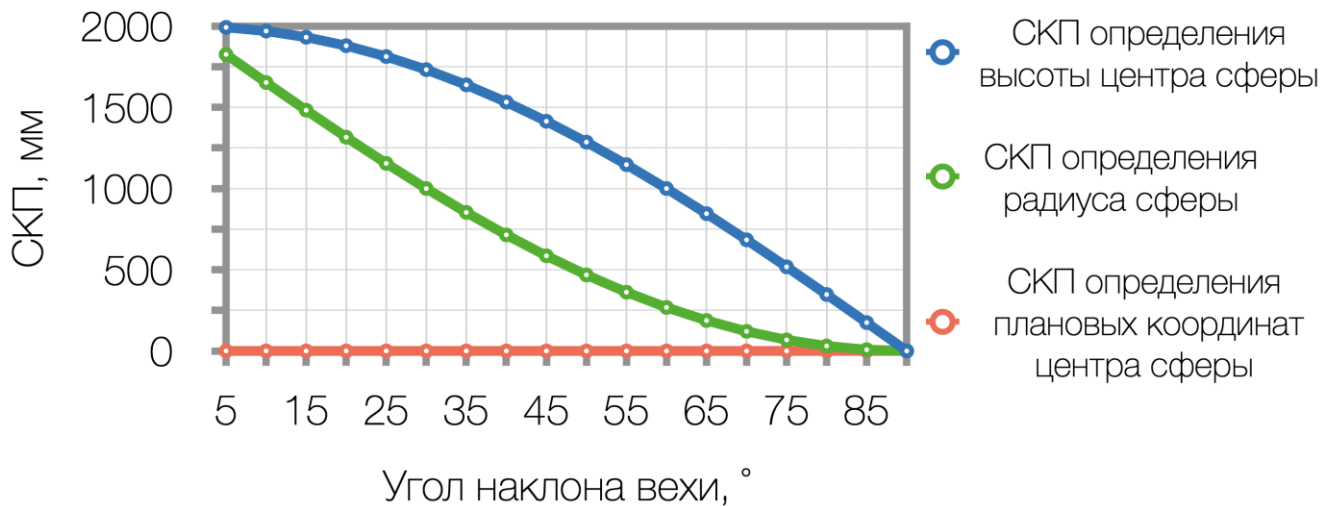


Рисунок 23 – График зависимости величины СКП аппроксимации съёмочных пикетов сферой от угла наклона вехи от отвесного положения

Согласно СП 420, регламентирующему порядок работ при геодезических наблюдениях за оползневыми склонами, СКП определения оползневых смещений не должна превышать 20 мм в плане и 10 мм по высоте. Полученные величины СКП определения высоты центра сферы не удовлетворяют требованиям СП 420. Из этого следует вывод, что в случае, когда все 4 съёмочных пикета располагаются на одной горизонтальной плоскости или вблизи её, задача определения высоты центра сферы и её радиуса не имеет однозначного решения: тетраэдр вырождается, через 4 съёмочных пикета можно провести бесконечное количество сфер с различными радиусами. В то же время, если считать радиус сферы известным, её положение можно определить однозначно. Следует также отметить, что подобный случай установки вехи с отражателем является сугубо теоретическим, так как на практике невозможно четыре раза отклонить веху от отвесного положения строго на одинаковый угол.

Минимальных величин СКП аппроксимации съёмочных точек сферой при моделировании удалось достичь комбинацией положений отражателя при большом и малом углах наклона вехи от отвесного положения, при расположении отражателя на сфере, согласно схеме на рисунке 5. При подобном расположении отражателя на сфере, СКП определения плановых координат, высоты центра сферы и её радиуса по данным моделирования составили величину менее 0,01 мм. Таким образом, плановые координаты, высоту центра сферы и её радиус с целью исключения влияния СКП аппроксимации съёмочных пикетов сферой рекомендуется определять, руководствуясь следующей схемой:

1. Установить первое положение вехи с отражателем (рисунок 5, 1) при котором веха отклонена от отвесного положения на величину 45° и выполнить линейно-угловые измерения.
2. Установить второе положение вехи с отражателем (рисунок 5, 2) путём поворота вехи на 120° относительно предыдущего положения вехи по дуге вокруг деформационного пункта без

изменения величины угла наклона вехи от отвесного положения и выполнить линейно-угловые измерения.

3. Установить третье положение вехи с отражателем (рисунок 5, 3) путём поворота вехи на 120° относительно предыдущего положения вехи по дуге вокруг деформационного пункта без изменения величины угла наклона вехи от отвесного положения и выполнить линейно-угловые измерения.

4. Установить четвёртое положение вехи с отражателем (рисунок 5, 4), при котором веха отклонена от отвесного положения на величину 10° и выполнить линейно-угловые измерения.

На представленную схему наблюдений получен патент (приложение Б) [91].

Для проверки разработанного метода проведено 8 серий измерений с различными условиями наблюдения. В каждой серии многократно (5 раз) по схеме, описанной ранее и представленной на рисунке 5, при количестве съёмочных пикетов, равном 4, определялось положение контрольных точек, полученных в результате кернения головок жёстко закреплённых в конструкциях болтов. Отбраковки съёмочных пикетов по формуле (59) не осуществлялось, так как каждая итерация определения положения деформационного пункта по 4 съёмочным пикетам рассматривалась как отдельное наблюдение, избыточность наблюдений деформационного пункта достигалась за счёт повторных наблюдений одного и того же деформационного пункта при 4 съёмочных пикетах. В наклонных положениях вехи при отсутствии видимости узловой точки отражателя выполнялось вращение отражателя относительно его горизонтальной оси по направлению к линии визирования. В сериях эксперимента применялся электронный тахеометр Sokkia CX-103. Эталонные значения плановых координат и высот контрольных точек были определены многократно (10 раз) с применением минипризмы Leica GMP111 (постоянная отражателя –16,9 мм, высота цели 0,1 м) и бипода для устранения колебаний вехи от отвесного положения. Предварительно перед экспериментом была проведена проверка круглого уровня вехи.

Условия наблюдений в сериях эксперимента представлены в таблице 24. Результаты серий эксперимента в лабораторных и полевых условиях представлены на рисунке 24. СКП определения плановых координат, высоты центра сферы и её радиуса определены по формулам (69) – (72). За эталонный радиус сферы принималась высота вехи в данной серии наблюдений. В серии 5 были смоделированы затруднённые условия наблюдений, в ходе которых не представлялось возможным выполнить поворот вехи на 120° вокруг контрольной точки. В данной серии поворот вехи вокруг контрольной точки осуществлялся на величину 60° .

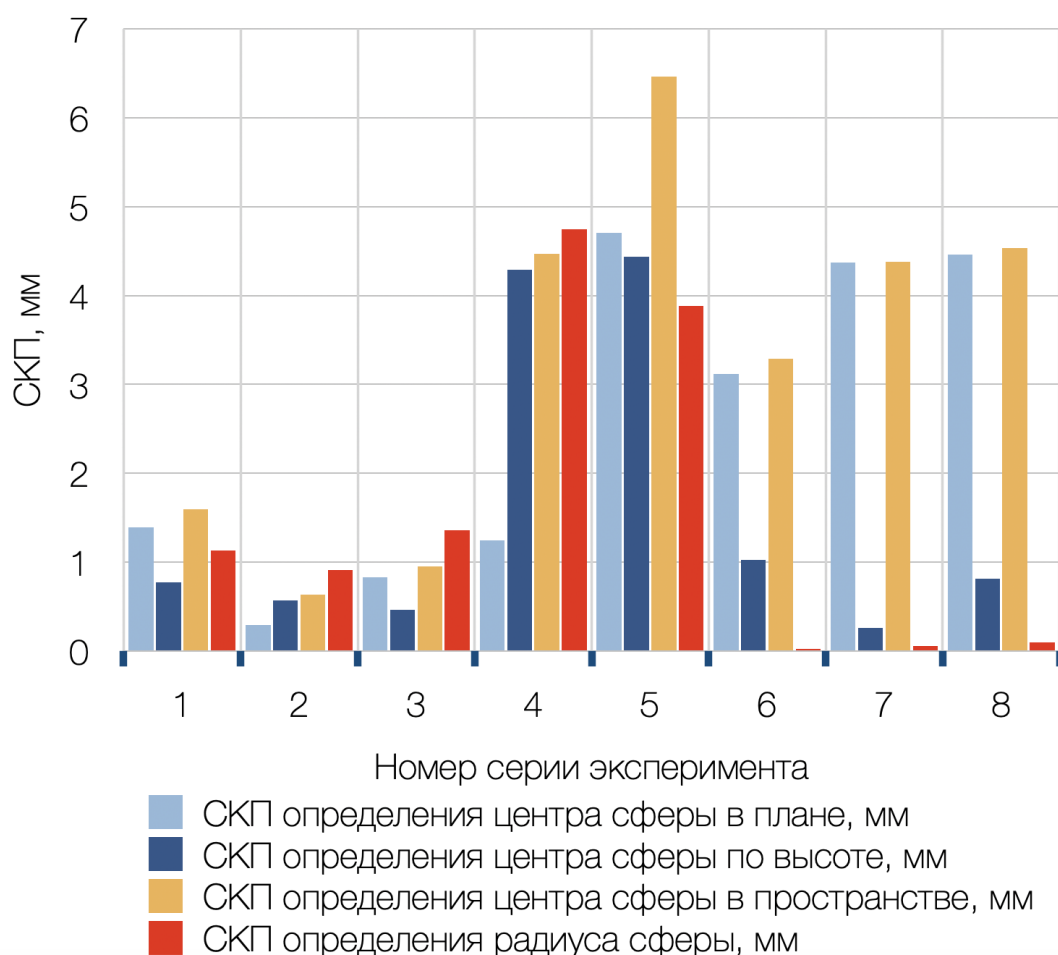


Рисунок 24 – Гистограмма величин СКП определения плановых координат, высоты центра сферы и её радиуса линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения при различных условиях наблюдений

Таблица 24 – Условия наблюдений в сериях эксперимента по определению плановых координат, высоты центра сферы и её радиуса линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения (T – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$, P – атмосферное давление, мм рт. ст., V – высота вехи, м, S – удаление контрольных точек от тахеометра, м)

№ серии	Место выполнения	Условия наблюдения	Отражатель	V	S
1	Лаборатория	Прибор установлен на ППЦ, цель – контрольная точка в стальной конструкции, применение бипода	Sokkia PPS-3050 (–30 мм)	2	8,7
2			Leica GMP 111 (–16,9 мм)	1	13,9
3					
4					
					21,3

Продолжение таблицы 24

5		Прибор установлен на ППЦ, цель – контрольная точка в стальной конструкции, применение бипода, поворот вехи вокруг контрольной точки на 60° вместо 120°.			
6	Улица	$T = 24^{\circ}C$, $P = 762$ мм. рт. ст., прибор и отражатель в тени, прибор установлен на бетонном основании, цель – контрольная точка в бетоне	Vega SP02T (–30 мм)	2	9,3
7		$T = 24^{\circ}C$, $P = 762$ мм. рт. ст., прибор в тени, отражатель на солнце, прибор установлен на бетонном основании, цель – контрольная точка в бетоне			29,5
8		$T = 24^{\circ}C$, $P = 762$ мм. рт. ст., прибор и отражатель на солнце, рефракция, прибор установлен на грунтовом основании, цель – контрольная точка в железной конструкции			54,7

В 1 – 4 сериях эксперимента при лабораторных условиях СКП определения плановых координат и высоты центра сферы составили величину от 1 до 6,5 мм в зависимости от типа отражателя и расстояния до цели, что подтверждает возможность применения предлагаемого метода. Наименьшие величины СКП были получены при наблюдениях, согласно предлагаемой схеме и использовании отражателя Leica GMP111 с постоянной отражателя –16,9 мм. В 5 серии эксперимента с поворотом вехи вокруг контрольной точки на 60° вместо 120°, СКП оказалась наибольшей и составила 6,5 мм, что подтверждает зависимость точности аппроксимации съёмочных точек сферой от их конфигурации.

В полевых условиях с использованием отражателя Vega SP02T (постоянная отражателя –30 мм) СКП определения плановых координат и высоты центра сферы предлагаемым методом оказались несколько больше (около 5 мм), но в допустимых пределах, согласно СП 420. СКП определения плановых координат и высоты центра сферы при использовании отражателя с постоянной –30 мм в полевых условиях оказалась меньше, чем СКП определения координат и высоты узловой точки отражателя при максимальном его вращении (рисунок 22). Это можно объяснить тем, что отражатель во время наблюдений вращался вокруг своих осей в минимальном диапазоне (не более 20°). В то же время для получения минимальных величин СКП, рекомендуется использовать отражатели с постоянной –17,5 мм либо –40 мм.

СКП определения радиуса сферы находится в диапазонах значений, сопоставимых с СКП определения плановых координат центра сферы и её высоты, что говорит о возможности выполнения отбраковки результатов измерений по отклонению радиуса от величины высоты вехи при избыточном количестве съёмочных пикетов (более 4).

Дополнительно был проведён ряд экспериментов с роботизированным тахеометром Trimble VX с активной функцией автонаведения и захвата цели в режиме непрерывных измерений (трекинга) (СКП измерения углов – 1", СКП измерения расстояний на призму в режиме трекинга – 4 мм + 2 мм/км) (таблица 25). Целью эксперимента было получение величин СКП и сравнение их с полученными ранее для оценки влияния функции автонаведения и захвата цели на конечный результат. В качестве призмённого отражателя использовался отражатель Vega SP02T (постоянная отражателя – 30 мм), закреплённый на вехе с различной её высотой (1,6 м, 1,8 м и 2,0 м). Тахеометр был установлен на ППЦ, приведён в рабочее положение и сориентирован на отражатель, установленный под прямым углом к линии визирования. Таким образом, ось X системы координат была направлена вдоль визирной линии через узловую точку отражателя, ось Y была направлена перпендикулярно визирной линии, ось Z дополняла систему координат до левой. Деформационными пунктами являлись контрольные точки в стальной конструкции. Положение контрольных точек было определено многократными измерениями при отвесном положении вехи: всего было получено от 10 до 19 значений плановых координат и высот контрольных точек при отвесном положении вехи в каждой из серий. Далее, в режиме непрерывных измерений с частотой 0,2 Гц и включённой функцией автонаведения и захвата цели были выполнены линейно-угловые измерения с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения. Веха при наблюдениях многократно устанавливалась в положения 1 – 4 согласно схеме наблюдений (рисунок 5). Данные были получены с избыточностью, количество съёмочных пикетов составляло от 14 до 28 для каждой контрольной точки. При обработке отбраковка по формуле 59 осуществлялась с критерием отклонения вычисленного радиуса сферы от высоты вехи не более чем на 0,005 м.

Таблица 25 – Результаты серий экспериментов линейно-угловых измерений с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения с применением роботизированного тахеометра с функцией автонаведения (S – удаление контрольных точек от тахеометра, м, n_0 – количество итераций определения положения контрольной точки при отвесном положении вехи, ед, n_p – количество съёмочных пикетов, ед, V – высота вехи, м, m_X – СКП определения координаты X центра сферы, мм, m_Y – СКП определения координаты Y центра сферы, мм, m_Z – СКП определения координаты Z центра сферы, мм)

№ серии	S	n_0	n_p	V	m_X	m_Y	m_Z
1	3,2	15	20	1,6	0,8	4,4	0,1
2	4,0	10	28	1,8	0,1	5,0	5,1
3	7,3	19	20	2	2,0	5,1	0,7
4	7,3	10	14	1,6	3,4	9,8	0,5

Проведённое исследование показывает, что предлагаемый метод по определению плановых координат и высоты деформационного пункта линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения обладает рядом

достоинств, главное из которых – отсутствие необходимости в установке вехи с отражателем в отвесное положение. На точность определения плановых координат и высоты деформационного пункта предложенным методом влияют такие факторы, как точность определения съёмочных пикетов при наклонах вехи, конструкция отражателя и его постоянная, а также конфигурация съёмочных пикетов при наклоне вехи. Наименьшие величины СКП достигнуты при использовании отражателей с постоянной $-17,5$ мм или -40 мм, так как их конструкция предполагает отсутствие СКП за смещение узловой точки отражателя при его вращении. Возможно применение отражателей с постоянной -30 мм, однако следует максимально ограничить их вращение вокруг своих осей в азимутальном и зенитальном направлениях. Определение плановых координат и высоты деформационного пункта при наклонах вехи должно осуществляться путём определения плановых координат и высоты отражателя не менее чем в 4 положениях с наблюдением по схеме, представленной на рисунке 5. Увеличение количества наблюдаемых съёмочных пикетов повысит точность определения плановых координат и высоты деформационного пункта за счёт возможности отбраковки комбинаций съёмочных пикетов с неудачной конфигурацией, при которых решение приводит к неудовлетворительным результатам.

Применение роботизированного тахеометра с функцией автозахвата цели позволило получить сопоставимые величины СКП в сравнении с ручным наведением на узловую точку отражателя. Применение функции автонаведения ускоряет процесс измерений, позволяет выполнять наблюдения одному человеку, уменьшает влияние СКП за колебания вехи при наклонах, однако, точность измерения расстояний в режиме трекинга сильно ниже, чем при однократном измерении (для Trimble VX постоянная СКП дальномера в режиме трекинга на 2 мм больше, чем при точном однократном измерении), что приводит к увеличению СКП определения плановых координат центра сферы.

Метод может применяться не только для наблюдений за оползневыми деформациями, но и при решении других геодезических задач при отсутствии прямой видимости между тахеометром и призмённым отражателем [50].

3.5 Исследование метода прогнозирования величин оползневых смещений линейной аппроксимацией с дальнейшей корректировкой функции

Рассмотрим метод на примере оползневых смещений типа «крип» вблизи водохранилища Миатлинской ГЭС в горном районе республики Дагестан на реке Сулак, а также на примере оползня Кой-Таш-верх в городе Майлуу-Суу в Кыргызстане.

3.5.1 Характеристика оползня Кой-Таш-верх в городе Майлуу-Суу в Кыргызстане

Долина Майлуу-Суу (высотная отметка 700 – 4000 м, площадь водосбора 530 км², полувасушливые условия) расположена в тектонически и сейсмически активных горах Тянь-Шаня – кайнозойского орогенного пояса в Центральной Азии с бассейновой и хребтовой структурой, возникшей в результате постколлизийного сближения Индии и Азии. Главной тектонической особенностью Тянь-Шаня является активный Талас-Ферганский разлом, пересекающий горный пояс с северо-запада на юг.

В XX веке в киргизской части Тянь-Шаня произошло несколько сильных землетрясений: Кеминское землетрясение с магнитудой 8,2 в 1911 году, Чаткальское землетрясение с магнитудой 7,6 в 1946 году и Суусамырское землетрясение с магнитудой 7,3 в 1992 году. Район Майлуу-Суу характеризуется умеренной или высокой сейсмической опасностью. Последнее сильное землетрясение с магнитудой 6,2 произошло 15 мая 1992 году и находилось примерно в 30 км к юго-востоку от г. Майлуу-Суу.

Другая тектонически активная зона, район Арсланбоб, расположена на севере целевого региона в центральной части Майлуу-Сууйской долины, где рельеф поднимается к Ферганскому хребту. Ферганский хребет частично сложен палеозойскими породами и ограничен с востока Таласско-Ферганским разломом. К югу от Майлуу-Суу плавные холмы, сложенные третичными отложениями и четвертичными террасами, опускаются в сторону Ферганской, которая является крупнейшей внутригорной котловиной Тянь-Шаня.

Меловые (и местами юрские) породы, в основном алевролиты и песчаники, образуют ядро открытых антиклиналей, таких как центральная антиклиналь с более крутыми северными границами. Они перекрыты чередующимися глинистыми и известняковыми породами палеогена и неогена. Несколько четвертичных террас расположены по обе стороны реки Майлуу-Суу.

Сообщения об активных обвалах склонов появились в начале 1950-х годов, спустя всего несколько лет после начала эксплуатации и переработки урановых месторождений (в основном в палеогеновых известняках) в 1946 году. До окончания добычи в 1968 году экологическая ситуация в долине становилась ещё более критической из-за образования большого количества ядерных отходов, частично ввозимых из Восточной Германии (Эрцгебирге), Чехословакии (Яхимов), Болгарии (Бухово) и Таджикистана (Табошар, Адрас-ман). В настоящее время по берегам реки Майлуу-Суу расположено 23 хвостохранилища и 13 могильников ядерных отходов с общим объёмом радиоактивных материалов около 3×10^6 м³. Основная проблема, связанная с заброшенными хвостохранилищами, заключается в том, что эрозия сводит к минимуму пользу от противооползневых мер, среди которых применение дренажных систем и гравийных покрытий [189].

3.5.2 Исследование метода прогнозирования величин оползневых смещений по геодезическим данным на примере оползневого склона вблизи Миатлинской ГЭС и оползня Кой-Таш-верх в городе Майлуу-Суу в Кыргызстане

Проанализируем возможность прогнозирования величин оползневых смещений по геодезическим данным о смещениях оползневого склона вблизи Миатлинской ГЭС и оползня Кой-Таш-верх в городе Майлуу-Суу в Кыргызстане. Схема оползня вблизи водохранилища Миатлинской ГЭС представлена на рисунке 25.

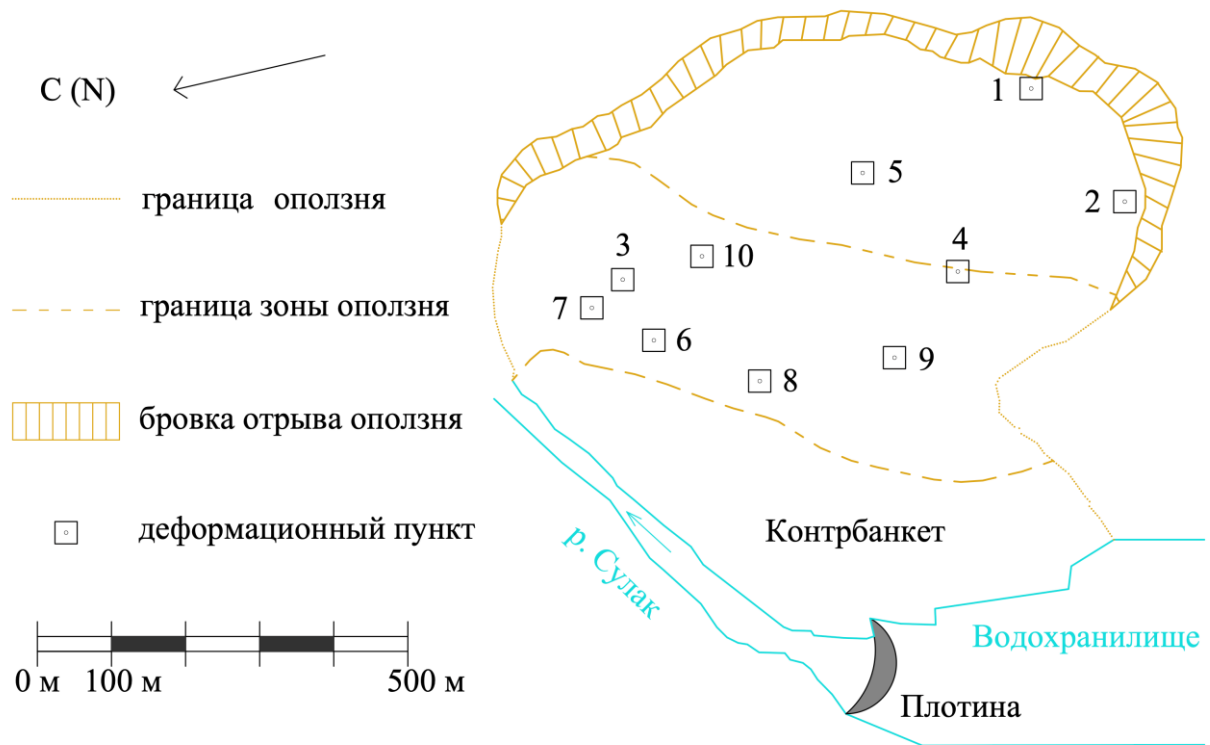


Рисунок 25 – Схема оползня вблизи водохранилища Миатлинской ГЭС (по данным [11, 95])

Строение оползня вблизи Миатлинской ГЭС – блочное, каждый из блоков имел различную скорость оползневых смещений, всего можно выделить 3 блока, основываясь на геологическом строении склона. Оползневой склон характеризуется равномерными скоростями смещений с периодическими резкими повышениями за счёт отрыва некоторых из блоков. На основе данных о многолетних наблюдениях за смещениями имеются сведения о горизонтальных и вертикальных смещениях деформационных пунктов, закреплённых в теле оползня. Высотное положение каждого из деформационных пунктов определялось по программе нивелирования II класса ежегодно, положение деформационных пунктов в плане определялось способом угловых и линейно-угловых засечек с применением электронного тахеометра с СКП измерения углов, равной 5", СКП измерения расстояний, равной 2 мм + 2 мм/км 1 раз в 2 месяца, имеются данные по 29 циклам наблюдений определения горизонтальных и 10 циклам наблюдений определения вертикальных оползневых смещений.

По имеющимся данным выполнен обратный расчёт точности прогноза горизонтальных и вертикальных величин оползневых смещений по следующей схеме: для каждого из деформационных пунктов были составлены временные ряды их горизонтальных и вертикальных смещений (рисунок 26). Далее, из временного ряда исключалась часть данных, по оставшейся части выполнялся прогноз на исключённые периоды, после чего оценивалась величина различия полученных в ходе прогноза смещений относительно имеющихся данных.

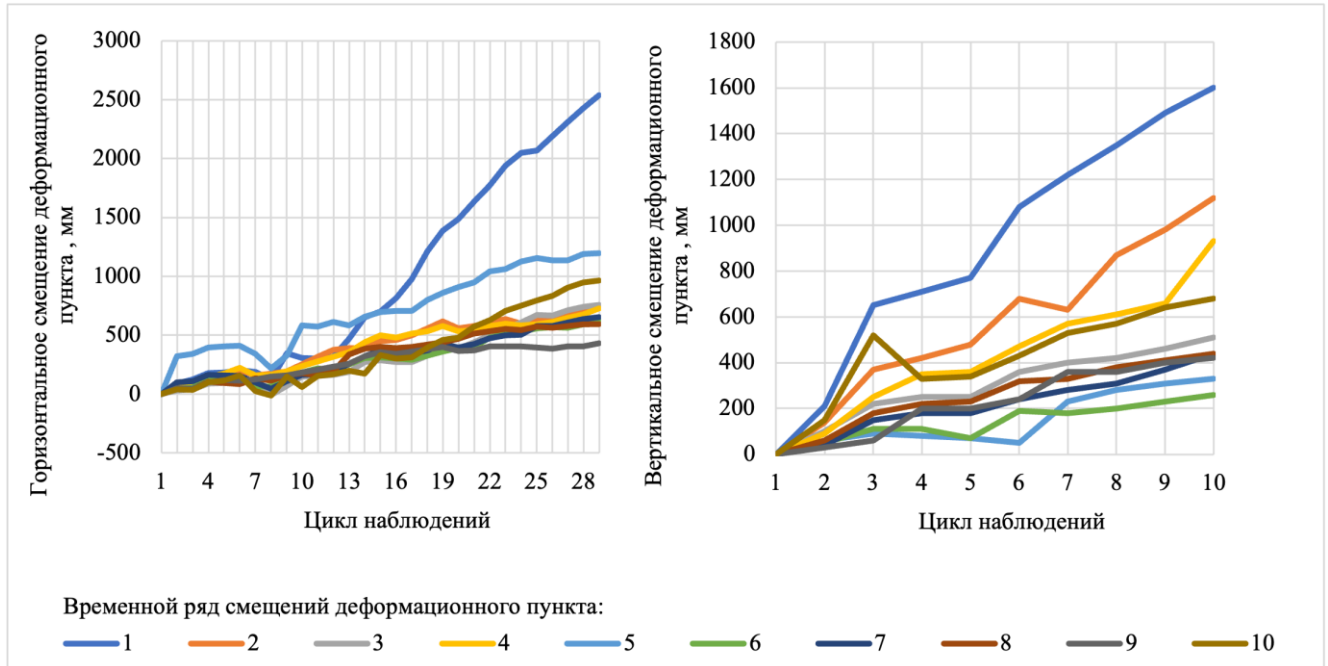


Рисунок 26 – Временные ряды горизонтальных (слева) и вертикальных (справа) смещений деформационных пунктов, закреплённых в теле оползня, за многолетний период (R^2 – коэффициент корреляции) (по данным [11, 95])

Рассмотрим работу метода на примере горизонтальных смещений деформационного пункта 1. Исключим из временного ряда горизонтальных смещений деформационного пункта данные 29 цикла наблюдений, выполним прогнозирование величины горизонтальных оползневых смещений на этот цикл наблюдений и сравним данные прогноза с фактическими значениями (рисунок 27). В качестве критерия, обозначающего предельное значение изменения скорости оползневых смещений в следующем цикле наблюдений Δv , примем значение трёх величин СКП скоростей оползневых смещений ($3\Delta v$) для горизонтальных и Δv для вертикальных оползневых смещений, рассчитываемое по формуле (73):

$$\Delta v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n-1}}, \quad (73)$$

где x_i – скорость оползневых смещений в данном цикле наблюдений, мм/цикл,

x – среднее значение скорости оползневых смещений по всем циклам наблюдений, мм/цикл.

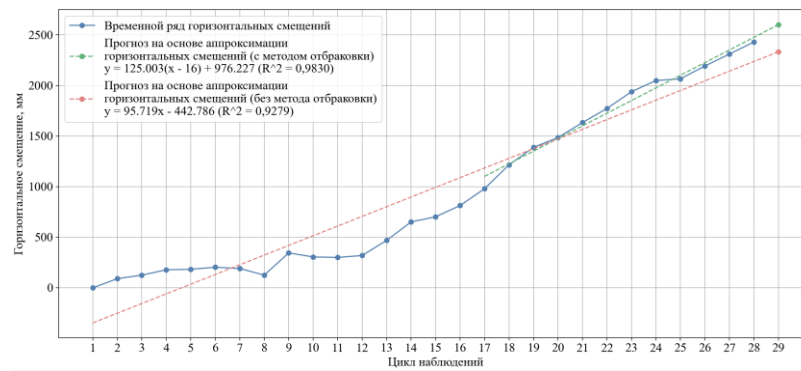


Рисунок 27 – Пример прогноза горизонтальных смещений деформационного пункта 1 в теле оползня с применением метода анализа коэффициентов прямой, построенной путём линейной аппроксимации величин оползневых смещений и без его использования (R^2 – коэффициент корреляции) (по данным [11, 95])

На графике горизонтальных смещений деформационного пункта 1 процесс можно разделить на этапы: с 1 по 7 цикл наблюдений происходит процесс равномерных оползневых смещений, в 8 цикле наблюдений происходит резкое увеличение скорости оползневых смещений. Далее, с 9 по 17 цикл наблюдений идёт постепенное нарастание скорости оползневых смещений с небольшой её стабилизацией в 14 – 15 циклах наблюдений, и с 18 цикла наблюдений по последний 29 цикл наблюдений происходит стабилизация скорости оползневых смещений. Таким образом, путём расчётов коэффициентов уравнения прямой, можно выделить 8 и 18 циклы наблюдений, которым свойственны нехарактерные изменения скорости оползневых смещений: коэффициенты k и b превышают максимально допустимые $\Delta k_{\max}$ и $\Delta b_{\max}$ (таблица 26).

Таблица 26 – Результаты расчёта изменения Δk и Δb , максимально допустимого изменения $\Delta k_{\max}$ и $\Delta b_{\max}$ коэффициентов k и b прямой, полученной путём линейной аппроксимации величин оползневых смещений

№ цикла наблюдений	Уравнение прямой	Δk	Δb	$\Delta k_{\max}$	$\Delta b_{\max}$	Δv , мм /цикл
1	—	—	—	—	—	—
2	$y = 90,000x - 90,000$	—	—	—	—	—
3	$y = 62,500x - 53,333$	27,500	36,667	73,434	75,441	117
4	$y = 56,900x - 44,000$	5,600	9,333	23,548	41,893	84
5	$y = 45,400x - 21,000$	11,500	23,000	18,572	43,812	107
6	$y = 38,486x - 4,867$	6,914	16,133	12,269	34,434	99
7	$y = 30,607x + 16,143$	7,879	21,010	9,097	28,603	95
8	$y = 19,274x + 50,143$	11,333	34,000	7,215	24,435	93
9	$y = 77,000(x - 6) + 66,333$	143,000	190,667	205,614	211,233	327
10	$y = 56,200(x - 6) + 101,000$	20,800	34,667	81,698	145,348	292
11	$y = 39,800(x - 6) + 133,800$	16,400	32,800	49,584	116,969	285
12	$y = 32,143(x - 6) + 151,667$	7,657	17,867	32,472	91,137	261
13	$y = 42,036(x - 6) + 125,286$	9,893	26,381	24,268	76,305	253
14	$y = 57,821(x - 6) + 77,929$	15,786	47,357	19,890	67,362	257
15	$y = 64,733(x - 6) + 54,889$	6,912	23,040	15,705	55,670	243

Продолжение таблицы 26

16	$y = 70,776(x - 6) + 32,733$	6,042	22,156	12,613	45,741	228
17	$y = 78,445(x - 6) + 2,055$	7,670	30,679	10,891	39,623	226
18	$y = 88,930(x - 6) - 43,379$	10,485	45,433	10,513	37,695	246
19	$y = 204,000(x - 16) + 786,667$	32,000	42,667	85,450	87,785	136
20	$y = 169,000(x - 16) + 845,000$	35,000	58,333	57,993	103,174	207
21	$y = 157,800(x - 16) + 867,400$	11,200	22,400	29,967	70,694	172
22	$y = 151,914(x - 16) + 881,133$	5,886	13,733	18,987	53,288	152
23	$y = 151,321(x - 16) + 882,714$	0,593	1,581	13,112	41,226	137
24	$y = 147,631(x - 16) + 893,786$	3,690	11,071	10,617	35,956	137
25	$y = 137,200(x - 16) + 928,556$	10,431	34,770	12,416	44,012	192
26	$y = 131,333(x - 16) + 950,067$	5,867	21,511	9,947	36,074	180
27	$y = 127,527(x - 16) + 965,291$	3,806	15,224	8,208	29,864	170
28	$y = 125,003(x - 16) + 976,227$	2,524	10,936	6,906	24,762	162

Следовательно, находясь на этапе 17 цикла наблюдений и выполнив наблюдения в 18 цикле наблюдений, было обнаружено, что произошло существенное изменение скорости оползневых смещений в последнем цикле наблюдений, после чего была выполнена повторная аппроксимация только по двум последним циклам наблюдений. В дальнейших наблюдениях таких изменений обнаружено не было, поэтому новые данные добавлялись к уже имеющимся, начиная с 17 цикла наблюдений.

Выполнив подобный анализ для всех имеющихся деформационных пунктов в теле оползня для горизонтальных и вертикальных смещений, получим, что значения смещений в 29 цикле наблюдений были спрогнозированы методом обратного расчёта точнее в случае применения метода анализа коэффициентов k и b прямой, полученной путём линейной аппроксимации величин оползневых смещений (таблица 27).

Таблица 27 – Значения повышения точности прогноза величин оползневых смещений по данным 28 циклов наблюдений на 29 цикл наблюдений в случае применения метода анализа коэффициентов k и b прямой, полученной путём линейной аппроксимации величин оползневых смещений

№ деформационного пункта	Повышение точности прогноза величин горизонтальных оползневых смещений, %	Повышение точности прогноза величин вертикальных оползневых смещений, %
1	6	7
2	2	1
3	3	5
4	5	9
5	3	3
6	2	1
7	1	4
8	4	11
9	10	8
10	9	1
Среднее	5	5

Аналогичным образом по плановым координатам и высотам всех деформационных пунктов, полученных на оползне у Миатлинской ГЭС, было выполнено несколько вариантов прогноза с разными длинами исходного временного ряда, при горизонте прогноза не более $\frac{1}{4}$ длины исходного временного ряда. Наибольшие значения повышения точности прогноза были отмечены в циклах наблюдений, следующих сразу за резким увеличением скорости оползневых смещений: для деформационного пункта 1 повышение точности прогноза горизонтальных смещений по данным 18 циклов наблюдений на 1 цикл наблюдений вперёд составило 27 %, для вертикальных смещений по данным 4 циклов наблюдений прогноз смещений на 1 цикл наблюдений вперёд оказался точнее на 34 %.

По полученным прогнозным уравнениям величин оползневых смещений на Миатлинской ГЭС представляется возможным с помощью анализа коэффициентов k и b определить предельную величину оползневых смещений, при которых возможен сход оползня: для самого подвижного деформационного пункта горизонтальное смещение в 28 цикле наблюдений составило 2430 мм, вертикальное смещение составило 1490 мм относительно 0 цикла наблюдений, скорость горизонтальных смещений относительно предыдущего цикла наблюдений составляла 119 мм/2 мес, вертикальных смещений – 140 мм/год. Согласно прогнозу, горизонтальные смещения оползня в 29 цикле наблюдений 2760 мм, вертикальные смещения 1733 мм относительно 0 цикла наблюдений и более, или увеличение скорости горизонтальных оползневых смещений до 330 мм/2 мес, вертикальных смещений до 243 мм/год говорило бы о нехарактерном увеличении скорости оползневого процесса, что могло бы сигнализировать о возможном сходе оползня и потребовало бы сокращения интервала между циклами наблюдений, а также выполнения противооползневых и, возможно, эвакуационных мероприятий. Фактические величины в последнем цикле наблюдений не превысили максимально допустимые расчётные, в связи с этим можно сделать заключение о том, что оползень движется равномерно и прогноз методом линейной аппроксимации будет точным.

Методика была проверена на данных геодезических наблюдений на различных оползнях. Наилучшие показатели были достигнуты для оползней с равномерными многолетними движениями типа «крип», у которых наблюдались одиночные резкие скачки скорости оползневых смещений в течение периода наблюдений. Так, для оползня Кой-Таш-верх в городе Майлуу-Суу в Кыргызстане [121, 189] по представленной методике был выполнен обратный расчёт точности прогноза, согласно которому было получено прогнозное значение смещения оползня в последнем цикле наблюдений на 2 % точнее, чем без её применения, а по данным наблюдений с 25.11.1996 г. по 25.04.1999 г. прогнозное значение величин оползневых смещений на 03.05.2004 г. было получено точнее на 31 % за счёт применения метода.

На основании проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

– линейная аппроксимация величины оползневых смещений имеет высокую точность прогнозирования скорости и величин оползневых смещений в случае равномерных оползневых смещений (типа «крип»), при которых скорость оползневых смещений остаётся величиной постоянной или колеблется относительно некой средней величины.

– на точность прогноза величин оползневых смещений (оползни типа «крип») существенно влияют резкие изменения скорости оползневых смещений, которые следует распознавать и учитывать при обработке данных, а также учитывать, что подобные увеличения могут служить сигналом к приближающемуся моменту схода оползня.

– в ходе исследования были определены и подтверждены экспериментально зависимости коэффициентов k и b уравнения прямой, полученной путём линейной аппроксимации величин оползневых смещений от изменения скорости оползневых смещений в последнем цикле наблюдений и от количества циклов наблюдений. Для зависимостей были получены соотношения, по которым можно выполнить расчёт предельной величины изменения коэффициентов при заданных значениях количества циклов наблюдений и ожидаемого максимального изменения скорости смещения оползня типа «крип» в прогнозируемом цикле наблюдений.

– представленный метод прогнозирования величин оползневых смещений на основе анализа временных рядов оползневых смещений по изменениям коэффициентов k и b уравнения прямой, полученной путём линейной аппроксимации величин оползневых смещений, позволяет выделить критерий, по которому можно сделать заключение о том, является ли изменение скорости оползневых смещений критичным и требующим внесения корректировок в прогноз или его можно отнести к сезонным (погодным) колебаниям, колебаниям связанным с СКП измерений или иными колебаниями, не влияющими на дальнейший прогноз величин оползневых смещений. Кроме того, определённые в качестве критичных скорости величины оползневых смещений по данной методике могут быть сигналом к возможному приближающемуся обрушению оползневого склона, что позволяет прогнозировать приближающийся момент обрушения оползня на раннем этапе и позволит принять превентивные меры.

– представленный метод позволил рассчитать вероятные значения оползневых смещений и скорости оползневых смещений, при которых возможен сход оползня. Также путём применения данной методики-удалось по ограниченной части данных временного ряда получить прогнозное значение величин горизонтальных и вертикальных оползневых смещений точнее в среднем на 5 %, а в ряде случаев для циклов наблюдений, следующих за моментами резких изменений скоростей оползневых смещений, на 27 % для горизонтальных оползневых смещений, на 34 % для вертикальных оползневых смещений [53].

3.6 Выводы по главе 3

1. Исследование метода оценки стабильности опорных сетей аппроксимацией плановых координат и высот её пунктов плоскостью выполнено по ряду модельных сетей, а также по данным наблюдений пунктов СДГС ГЕОСПАЙДЕР. Были получены результаты оценки стабильности, аналогичные параметрам, заданным при моделировании. В ходе оценки стабильности пунктов СДГС ГЕОСПАЙДЕР подтверждена их стабильность.

2. На примере оползня вблизи Миатлинской ГЭС было выполнено проектирование сети наблюдений, а также разработана классификация выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений.

3. Проведено исследование технологии РТК при наблюдениях за смещениями деформационных пунктов моделированием смещений деформационного пункта. По данным исследования, наблюдение деформационных пунктов технологией РТК с точностью, регламентируемой СП 420, возможно в случае применения ГНСС-оборудования с точностью определения положения в плане не хуже $5 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм/км}$, по высоте не хуже $10 \text{ мм} + 0,8 \text{ мм/км}$, при наблюдениях деформационного пункта 180 эпохами с частотой измерений 1 Гц, удалением от одиночной базовой станции не более 1 км, а также при использовании не менее 4 ГНСС-систем. По представленному исследованию подготовлена классификация условий и параметров наблюдений оползневых смещений технологией РТК.

4. Выполнено исследование метода определения положения недоступных для видимости деформационных пунктов линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения. Рассмотрены виды СКП, влияющие на точность метода. В результате оценки точности метода были получены СКП определения пространственного положения деформационного пункта в лабораторных условиях менее 1 мм, в полевых условиях при ограниченной видимости максимальная СКП составила 6,5 мм.

5. Возможность применения метода прогноза по линейной функции, полученной аппроксимацией величин смещений, доказана на примере обратного прогнозирования по данным о смещениях оползня вблизи Миатлинской ГЭС, располагающейся на р. Сулак Республики Дагестан, Российская Федерация, а также по данным о смещениях оползня Кой-Таш-верх в городе Майлуу-Суу в Кыргызстане. Путём применения данной методики, удалось по ограниченной части данных временного ряда получить прогнозное значение горизонтальных и вертикальных оползневых смещений точнее в среднем на 5 %, а в ряде случаев для циклов наблюдений, следующих за моментами резких изменений скоростей оползневых смещений, на 27 % для горизонтальных оползневых смещений, на 34 % для вертикальных оползневых смещений.

Данные выводы позволяют сформулировать следующие защищаемые положения:

1. Оценку стабильности пространственной опорной сети целесообразно выполнять по отклонениям от аппроксимирующей плоскости, представляющей собой систему «центрoид – 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.

ГЛАВА 4 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

4.1 Применение методики наблюдений оползневых склонов геодезическими методами при определении величин смещений оползневого склона левого берега реки Тосны

В целях апробации предлагаемой методики наблюдений оползневых склонов геодезическими методами был выбран оползневой склон левого берега реки Тосны, простирающейся в районе города Никольское в Ленинградской области РФ (рисунок 28).



Рисунок 28 – Схема расположения оползневого склона левого берега реки Тосны

Данный склон был выбран в качестве исследуемого по ряду причин, среди которых можно отметить явно выраженные оползневые смещения (рисунок 29), что представляет интерес для изучения на предмет фиксирования их величин геодезическими методами. Кроме того, оползневой склон имеет открытые участки, а также участки, покрытые густой растительностью, что позволяет применить методику наблюдений в полной мере.



Рисунок 29 – Покосившиеся вследствие оползневых процессов деревья на склоне

Всего на оползневом склоне левого берега реки Тосны было проведено 4 цикла геодезических наблюдений (таблица 28).

Таблица 28 – Даты проведения циклов наблюдений оползневого склона левого берега реки Тосны геодезическими методами

№ цикла	Дата проведения
0 цикл	15.07.2023 г.
1 цикл	07.10.2023 г.
2 цикл	27.04.2024 г.
3 цикл	28.07.2024 г.

4.1.1 Характеристика оползневого склона левого берега реки Тосны

Оползень скольжения, крип, детрузивный, асеквентный, циркуобразный, крупный по площади, неглубокий, средний по объёму, очень медленный. Согласно геологическим исследованиям, посвящённым изучению прочностных свойств кембрийских глин, оползневой

склон в геоморфологическом отношении приурочен к Предглинтовой низменности. На оползневом склоне распространены глинистые отложения, представленные нижнекембрийскими глинами (Є1) лонтоваского горизонта, которые перекрыты верхнечетвертичными озёрно-ледниковыми отложениями (lgIII), представленными суглинками. В ходе геологических исследований было отмечено, что она основании имеющихся смещений, мощность четвертичных отложений участка оползневого склона левого берега реки Тосны составляет порядка 5 м.

ПСО приурочена к ослабленному контакту четвертичных суглинков и лонтоваских синих глин. Согласно классификации Ф.П. Саваренского, оползень относится преимущественно к консеквентному типу с наклонной ПСО, которая обусловлена строением склона, и существующими поверхностями ослабления. По классификации, предложенной В.Д. Ломтадзе, оползень относится к структурно пластическим оползням.

Таким образом, склон реки представлен двумя инженерно-геологическими элементами (ИГЭ):

1. Четвертичная система – Q, озёрно-ледниковые отложения – lgIII, залегают под почвенно-растительным слоем и представлены ИГЭ-1: суглинки лёгкие пылеватые тугопластичные с прослоями песка ожелезнённые коричневатые-серые, естественная влажность грунтов – 0,23 д. ед., число пластичности – 0,09, показатель текучести – 0,41 д. ед.

2. Кембрийская система – Є, залегают под верхнечетвертичными отложениями и представлены ИГЭ-2: глина лёгкая пылеватая тугопластичная с прослоями песка серо-голубая, естественная влажность грунтов – 0,34 д. ед., число пластичности – 0,22, показатель текучести – 0,33 д. ед.

Физико-механические свойства грунтов, слагающих оползневой склон, представлены в таблице 29.

Таблица 29 – Физико-механические свойства инженерно-геологических элементов (по данным [99])

Характеристика грунта	ИГЭ-1	ИГЭ-2
Модуль общей деформации (E)	10,0 МПа	6,5 МПа
Коэффициент Пуассона (ν)	0,35	0,35
Удельное сцепление грунта (C)	28 кПа	11 кПа
Угол внутреннего трения (ϕ)	21°	10°
Удельный вес (γ)	18,0 кН/м ³	18,5 кН/м ³

Инженерно-геологический разрез изучаемого склона представлен на рисунке 30. За отметку 0 м принят уровень грунтовых вод (УГВ).

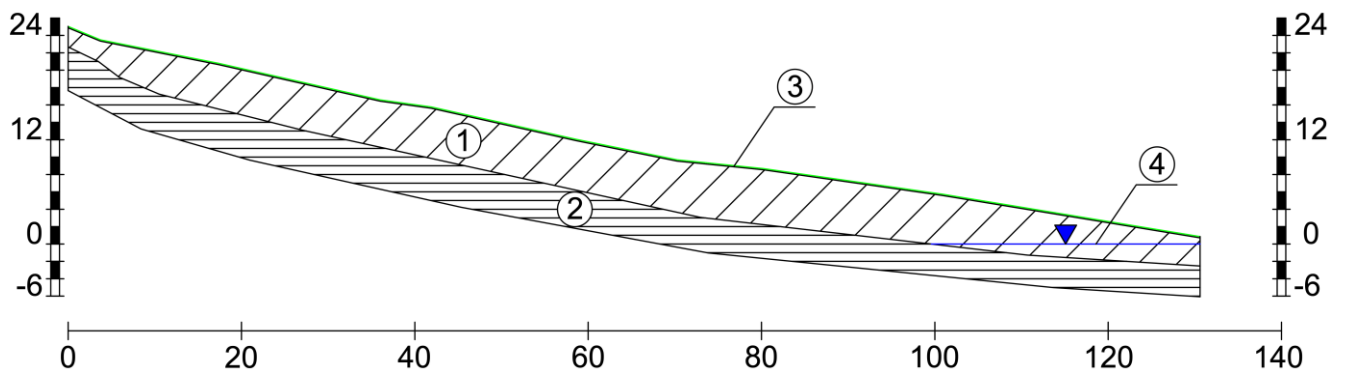


Рисунок 30 – Инженерно-геологический разрез оползневого склона левого берега реки Тосны (1 – ИГЭ-1, 2 – ИГЭ-2, 3 – почвенно-растительный слой, 4 – УГВ) (по данным [99])

Геологические исследования склона показывают, что изучаемый оползневой склон левого берега реки Тосны сложен нижнекембрийскими глинами (Є1), перекрытыми верхнечетвертичными озёрно-ледниковыми суглинками (lgIII). Изучаемые глины характеризуются повышенной влажностью (33 – 36 %) и пониженной плотностью (1,79 – 1,91 т/м³), что свидетельствует о высокой степени разуплотнения. Пониженные показатели сопротивления сдвигу позволяют судить о потере прочности и разрушении структурных связей глин в приповерхностной части ПСО.

В ходе геологических исследований образцов грунта ИГЭ-1 и ИГЭ-2 было установлено, что увеличение влажности исследуемых глин приводит к уменьшению сцепления C и угла внутреннего трения φ вследствие перехода грунта от тугопластичного к текучепластичному состоянию. При изменении влажности от 30 до 44 %, сцепление грунта снижается от 14,4 до 4,9 кПа, угол внутреннего трения уменьшается от 11,8° до 3,8°. Анализ материалов исследования показал, что ПСО приурочена к границе между четвертичными отложениями и нижнекембрийскими глинами. Исходя из выбранной поверхности при использовании метода расчёта устойчивости оползневых склонов, имеющих наклонную ПСО (метод Г. М. Шахунянца), был выполнен расчёт коэффициента устойчивости с учётом изменения влажности глин, слагающих зону ослабления, от 30 до 44 %. Результат вычислений показал, что при достижении влажности глин в районе ПСО 38 % оползневой склон достигает состояния предельного равновесия ($\eta = 1$) [99].

Из этого следует, что на устойчивость оползневого склона существенно влияет увеличение влажности грунтов, слагающих склон. На основании этого было принято решение определять величины смещений оползневого склона геодезическими методами два раз в год: летом после весеннего периода оттаивания снегов и осенью в периоды обильных дождевых осадков.

4.1.2 Закрепление опорной и деформационной сетей для наблюдений оползневого склона левого берега реки Тосны

Для наблюдений за смещениями оползня на этапе 0 цикла наблюдений был закреплён ряд опорных пунктов за пределами тела оползня и ряд рабочих и деформационных пунктов по периметру оползня. В качестве опорных, рабочих и деформационных пунктов использовалась арматура диаметром 18 мм длиной 1,8 м (рисунок 31).



Рисунок 31 – Процесс закрепления деформационного пункта на оползневом склоне левого берега реки Тосны

По ходу работ было закреплено 4 опорных пункта: ОР1 – ОР4. Три опорных пункта закреплены на левом берегу реки Тосны на расстоянии от бровки срыва оползня не менее чем 15 м, один опорный пункт закреплён на правом берегу реки Тосны. В теле оползня закреплено 58 деформационных пунктов Ln1 – Ln58. Деформационные пункты Ln13, Ln26 и Ln39 использовались одновременно в качестве деформационных пунктов и в качестве станций установки тахеометра для выполнения линейно-угловых измерений на деформационные пункты Ln6 – Ln12, Ln27 – Ln35 и Ln40 – Ln47, которые расположены в недоступных для ГНСС-наблюдений оползневых участках. Положение деформационных пунктов Ln13, Ln26 и Ln39 определялось обратной засечкой относительно рабочих пунктов Т1 – Т9. Расположение рабочих

пунктов выбрано исходя из возможности определения их положения технологией спутникового позиционирования, а также исходя из наличия взаимной видимости между как минимум тремя рабочими пунктами и деформационным пунктом, совмещённым со станцией тахеометра. Опорные, рабочие и деформационные пункты OP1 – OP4, Ln1 – Ln58, T1 – T9 были закреплены на этапе 0 цикла наблюдений, перед процессом измерений. Схема расположения опорных, рабочих и деформационных пунктов представлена на рисунке 32

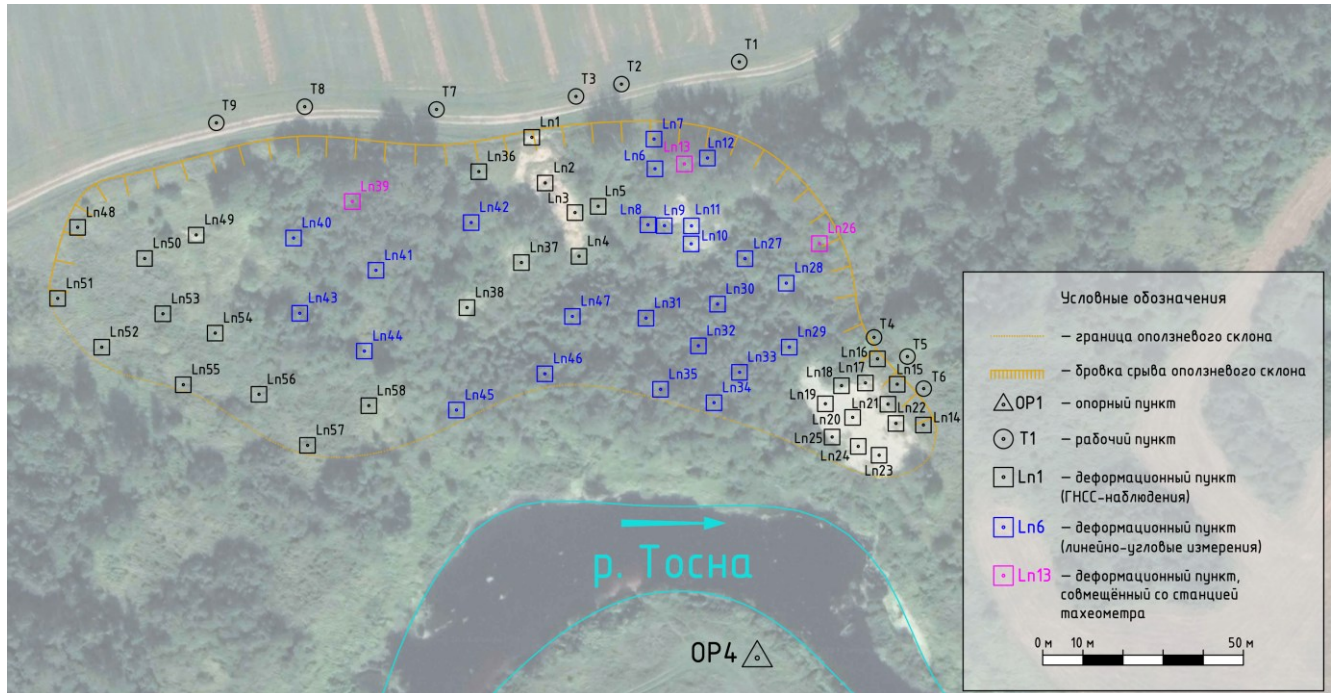


Рисунок 32 – Схема расположения опорных, рабочих и деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны

4.1.3 Определение положения опорных пунктов технологией спутникового позиционирования в режиме «статика»

Для определения положения опорных пунктов использовались ГНСС-приёмники EFT M4 (точность в режиме «статика» в плане: 2,5 мм + 0,5 мм/км, по высоте: 5,0 мм + 0,5 мм/км). Наблюдения выполнялись технологией спутникового позиционирования в режиме «статика» одновременно тремя ГНСС-приёмниками с длительностью наблюдений не менее 2 часов.

Таким образом, в каждом из опорных пунктов по результатам наблюдений технологией спутникового позиционирования сходилось не менее 3 векторов. Схема наблюдений опорной сети технологией спутникового позиционирования в режиме «статика» представлена на рисунке 33.

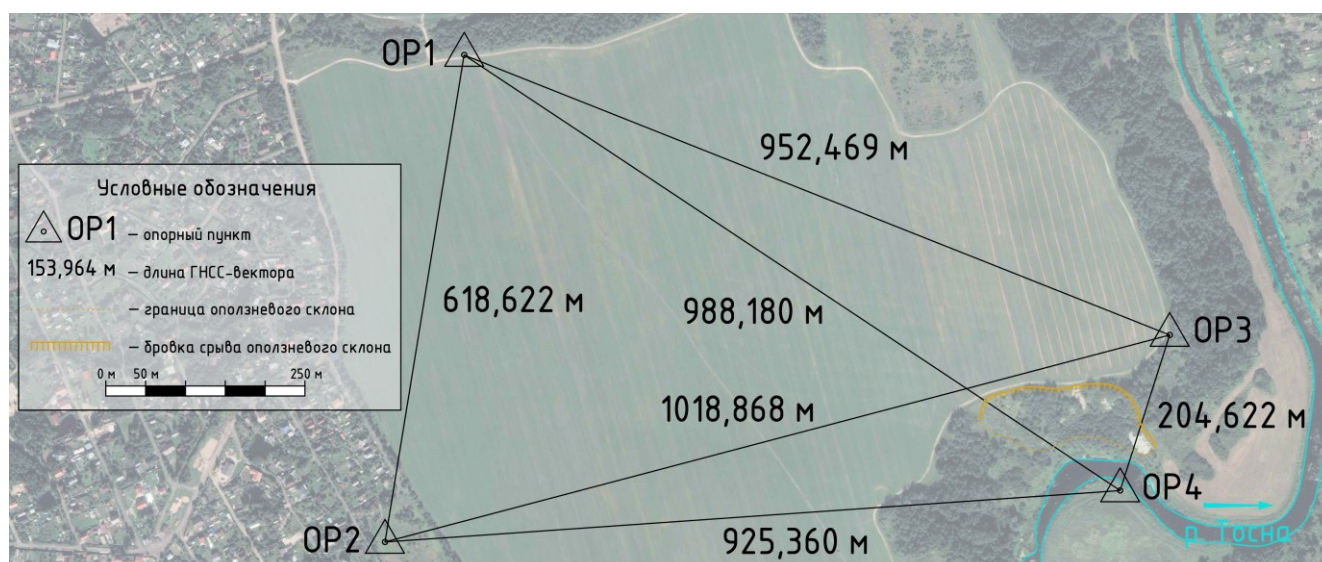


Рисунок 33 – Схема наблюдений опорной сети технологий спутникового позиционирования в режиме «статика» на оползневом склоне левого берега реки Тосны

По результатам наблюдений технологией спутникового позиционирования выполнялся контроль внутренней сходимости – анализ незамыкания полигонов, который в каждом из циклов наблюдений не превышал своего допустимого значения. Оценка точности наблюдений технологией спутникового позиционирования в режиме «статика» выполнялась по формулам (27), (30) – (31). Значения допустимых величин СКП определения векторов представлены в таблице 30.

Таблица 30 – Значения допустимых величин СКП определения векторов

Вектор	Допустимая СКП, мм	
	В плане	По высоте
ОР1 – ОР2	2,8	5,3
ОР1 – ОР3	3,0	5,5
ОР1 – ОР4	3,0	5,5
ОР2 – ОР3	3,0	5,5
ОР2 – ОР4	3,0	5,5
ОР3 – ОР4	2,6	5,1

Значения допустимых величин невязок в полигонах представлены в таблице 31.

Таблица 31 – Значения допустимых величин невязок в полигонах

Полигон	Допустимая невязка, мм	
	В плане	По высоте
ОР1 – ОР2 – ОР3	5,1	9,4
ОР1 – ОР2 – ОР4	5,1	9,4
ОР1 – ОР3 – ОР4	5,0	9,3
ОР2 – ОР3 – ОР4	5,0	9,3

Значения фактических величин СКП определения векторов представлены в таблице 32.

Таблица 32 – Значения фактических величин СКП определения векторов

Вектор	Фактическая СКП, мм							
	0 цикл (15.07.2023 г.)		1 цикл (07.10.2023 г.)		2 цикл (27.04.2024 г.)		3 цикл (28.07.2024 г.)	
	В плане	По высоте	В плане	По высоте	В плане	По высоте	В плане	По высоте
OP1 – OP2	2,7	5,2	2,7	4,8	2,2	5,2	2,3	5,2
OP1 – OP3	2,3	4,6	2,8	4,2	2,8	4,8	2,6	4,0
OP1 – OP4	2,4	5,4	2,9	4,2	2,7	4,1	2,9	4,8
OP2 – OP3	2,8	4,1	2,4	5,1	2,3	5,1	2,6	4,0
OP2 – OP4	2,8	4,9	2,2	4,8	2,2	4,4	2,9	4,0
OP3 – OP4	2,4	4,5	2,1	4,3	2,0	4,9	2,1	4,6

Значения фактических невязок в полигонах в разных циклах наблюдений представлены в таблице 33.

Таблица 33 – Значения фактических невязок в полигонах в разных циклах наблюдений

Полигон	Фактическая невязка, мм							
	0 цикл (15.07.2023 г.)		1 цикл (07.10.2023 г.)		2 цикл (27.04.2024 г.)		3 цикл (28.07.2024 г.)	
	В плане	По высоте	В плане	По высоте	В плане	По высоте	В плане	По высоте
OP1 – OP2 – OP3	4,5	8,1	4,6	8,2	4,2	8,8	4,4	7,7
OP1 – OP2 – OP4	4,6	9,0	4,6	8,0	4,1	8,0	4,7	8,1
OP1 – OP3 – OP4	4,1	8,4	4,5	7,3	4,4	8,0	4,5	7,8
OP2 – OP3 – OP4	4,6	7,8	3,9	8,2	3,8	8,3	4,4	7,3

Значения невязок и СКП находятся в допустимых пределах.

Далее, сеть уравнивалась как свободная, СКП определения положения опорных пунктов по результатам уравнивания в каждом из 4 выполненных циклов наблюдений не превышали значения 3 мм в плане и 4 мм по высоте. По результатам уравнивания в каждом из 4 выполненных циклов наблюдений были определены плановые координаты и высот опорных пунктов (таблица 34). Координаты приведены в местной системе координат «МСК-47 зона 2».

Таблица 34 – Плановые координаты и высоты опорных пунктов в местной системе координат «МСК-47 зона 2» в 4 циклах наблюдений (mX , mY – СКП определения плановых координат X , Y опорного пункта, mH – СКП определения высоты H опорного пункта)

№ цикла наблюдений и дата его проведения	Название опорного пункта	X , м	mX , м	Y , м	mY , м	H , м	mH , м
0 (15.07.2023 г.)	OP1	407760,025	0,003	2239897,129	0,001	33,156	0,003
	OP2	407149,450	0,002	2239797,715	0,002	36,124	0,003
	OP3	407408,976	0,001	2240782,530	0,002	27,926	0,002
	OP4	407214,033	0,002	2240720,343	0,002	6,501	0,003
1 (07.10.2023 г.)	OP1	407760,024	0,002	2239897,128	0,002	33,154	0,004
	OP2	407149,450	0,002	2239797,715	0,002	36,116	0,003
	OP3	407408,978	0,002	2240782,531	0,002	27,927	0,002
	OP4	407214,034	0,002	2240720,342	0,001	6,504	0,003

Продолжение таблицы 34

2 (27.04.2024 г.)	OP1	407760,026	0,003	2239897,127	0,002	33,163	0,003
	OP2	407149,452	0,003	2239797,709	0,001	36,126	0,003
	OP3	407408,977	0,002	2240782,530	0,002	27,926	0,002
	OP4	407214,030	0,002	2240720,341	0,002	6,501	0,002
3 (28.07.2024 г.)	OP1	407760,026	0,002	2239897,127	0,002	33,156	0,004
	OP2	407149,449	0,003	2239797,717	0,002	36,128	0,003
	OP3	407408,977	0,002	2240782,530	0,002	27,864	0,003
	OP4	407214,035	0,002	2240720,342	0,002	6,496	0,003

4.1.4 Оценка стабильности опорной сети аппроксимацией плановых координат и высот её пунктов плоскостью

По данным, полученным в ходе наблюдений технологией спутникового позиционирования в режиме «статика» на опорных пунктах, а именно – плановым координатам, высотам опорных пунктов и СКП их положения, полученным по результатам уравнивания, выполнялась оценка стабильности опорной сети аппроксимацией плановых координат и высот её пунктов плоскостью на этапе каждого цикла наблюдений.

По результатам наблюдений в каждом цикле определялись положения характерных элементов плоскости (центроида плоскости, нормали к плоскости и точки на нормали к плоскости). Результаты определения положения характерных элементов плоскости в каждом цикле наблюдений представлены в таблице 35.

Таблица 35 – Результаты определения положения характерных элементов плоскости, полученной путём аппроксимации плановых координат и высот опорных пунктов плоскостью в циклах наблюдений за смещениями оползневого склона левого берега реки Тосны

№ цикла наблюдений и дата его проведения	0 (15.07.2023 г.)	1 (07.10.2023 г.)	2 (27.04.2024 г.)	3 (28.07.2024 г.)
X_C , м	407383,121	407383,122	407383,121	407383,122
Y_C , м	2240299,429	2240299,429	2240299,427	2240299,429
H_C , м	25,927	25,925	25,929	25,911
α	90°27'02,59"	90°27'04,01"	90°27'04,35"	90°26'58,46"
β	88°58'31,53"	88°58'33,36"	88°58'30,80"	88°58'22,83"
γ	1°07'09,66"	1°07'08,56"	1°07'11,03"	1°07'15,97"
X_N , м	407379,375	407379,372	407379,371	407379,385
Y_N , м	2240307,945	2240307,940	2240307,944	2240307,965
H_N , м	502,070	502,069	502,074	502,056

Величины смещений характерных элементов плоскости между циклами наблюдений представлены в таблице 36.

Таблица 36 – Величины смещений характерных элементов плоскости, полученной путём аппроксимации плановых координат и высот опорных пунктов плоскостью между циклами наблюдений за смещениями оползневого склона левого берега реки Тосны

№ циклов наблюдений и даты их проведения	0 – 1 (15.07.2023 г. – 07.10.2023 г.)	0 – 2 (15.07.2023 г. – 27.04.2024 г.)	0 – 3 (15.07.2023 г. – 28.07.2024 г.)
ΔX_C , м	0,000	0,000	0,001
ΔY_C , м	0,000	0,003	0,000
ΔH_C , м	0,002	0,002	0,016
$\Delta \alpha$	0°00'01,42"	0°00'01,76"	0°00'04,13"
$\Delta \beta$	0°00'01,83"	0°00'00,73"	0°00'08,71"
$\Delta \gamma$	0°00'01,10"	0°00'01,38"	0°00'06,31"
ΔX_N , м	0,003	0,004	0,010
ΔY_N , м	0,004	0,001	0,020
ΔH_N , м	0,001	0,003	0,015

В 0 цикле наблюдений по плановым координатам и высотам опорных пунктов был определён критерий стабильности сети. Критерий стабильности сети рассчитывался на основе моделирования возможных смещений характерных элементов плоскости при условии, что опорные пункты имели смещение не более чем единичное, двойное или тройное значение СКП их определения (соответствует доверительному интервалу 68,7 %, 95,4 % или 99,7 %). При моделировании была составлена выборка из 1000 возможных положений плоскости по данным 0 цикла наблюдений, рассчитаны максимальные смещения характерных элементов плоскости между смоделированными положениями. Полученные максимальные значения смещений характерных элементов плоскости были приняты в качестве критериев стабильности каждого из характерных элементов (таблица 37).

Таблица 37 – Критерии стабильности характерных элементов плоскости, полученной путём аппроксимации плановых координат и высот опорных пунктов плоскостью в циклах наблюдений оползневого склона левого берега реки Тосны (σ – множитель доверительного интервала)

Критерий стабильности	1 σ (68,7%)	2 σ (95,4%)	3 σ (99,7%)
mX_C , м	0,001	0,002	0,003
mY_C , м	0,001	0,002	0,003
mH_C , м	0,002	0,004	0,006
$m\alpha$	0°00'01,79"	0°00'03,58"	0°00'05,37"
$m\beta$	0°00'00,93"	0°00'01,85"	0°00'02,78"
$m\gamma$	0°00'01,00"	0°00'01,99"	0°00'02,99"
mX_N , м	0,004	0,009	0,013
mY_N , м	0,002	0,005	0,007
mH_N , м	0,002	0,005	0,007

В 0 цикле наблюдений в качестве наиболее стабильного был выбран опорный пункт ОР3 по наименьшим СКП определения его положения. Далее, перед каждым циклом наблюдений оценивалась стабильность опорной сети и в случае, если стабильность сети сохранялась,

выбранный в 0 цикле наблюдений опорный пункт остаётся принятым как наиболее стабильный. Если выбранный опорный пункт теряет стабильность в одном из циклов наблюдений, выбирается другой опорный пункт в качестве наиболее стабильного по наименьшим СКП определения его положения.

В периоды с 0 по 2 циклы наблюдений опорная сеть оставалась стабильной, ни один из параметров характерных элементов плоскости не превышал пороговое значение своего критерия стабильности с доверительной вероятностью 99 %. В 3 цикле наблюдений параметры ΔH_C ($0,016 > 0,006$), $\Delta \beta$ ($0^\circ 00' 08,71'' > 0^\circ 00' 02,78''$), $\Delta \gamma$ ($0^\circ 00' 06,31'' > 0^\circ 00' 02,99''$), ΔY_N ($0,020 > 0,007$) и ΔH_N ($0,015 > 0,007$) превысили свои пороговые значения для доверительной вероятности 99 %. Смещение центроида плоскости и точки на нормали к плоскости по высоте, а также наклон нормали в восточном направлении вдоль оси Y (уменьшение значения угла β) говорит о возможной осадке опорных пунктов ОР3 и ОР4.

Для однозначного определения опорных пунктов, утративших стабильность, выполнено поочерёдное исключение из обработки опорных пунктов ОР3 и ОР4, после чего оценка стабильности выполнялась повторно для 0 и 3 циклов наблюдений. Результаты определения положения характерных элементов плоскости, полученной путём аппроксимации плановых координат и высот опорных пунктов плоскостью в циклах наблюдений оползневого склона левого берега реки Тосны при исключении опорных пунктов, вероятно утративших стабильность (ОР3 и ОР4) представлены в таблицах 38 – 39.

Таблица 38 – Результаты определения положения характерных элементов плоскости, полученной путём аппроксимации плановых координат и высот опорных пунктов плоскостью в циклах наблюдений оползневого склона левого берега реки Тосны при исключении опорного пункта ОР3 (Δ – изменение параметра характерного элемента плоскости в период с 0 по 3 цикл наблюдений)

№ цикла наблюдений и дата его проведения	0 (15.07.2023 г.)	3 (28.07.2024 г.)	Δ	Критерий стабильности параметра 3σ (99%)
X_C , м	407374,503	407374,503	0,001	0,003
Y_C , м	2240138,396	2240138,395	0,000	0,003
H_C , м	25,260	25,260	0,000	0,007
α	$90^\circ 01' 16,47''$	$90^\circ 01' 15,40''$	$0^\circ 00' 01,08''$	$0^\circ 00' 05,59''$
β	$88^\circ 09' 34,34''$	$88^\circ 09' 32,38''$	$0^\circ 00' 01,96''$	$0^\circ 00' 03,66''$
γ	$1^\circ 50' 26,10''$	$1^\circ 50' 28,05''$	$0^\circ 00' 01,94''$	$0^\circ 00' 03,64''$
X_N , м	407374,319	407374,323	0,003	0,014
Y_N , м	2240154,264	2240154,269	0,004	0,009
H_N , м	519,095	519,095	0,000	0,008

Таблица 39 – Результаты определения положения характерных элементов плоскости, полученной путём аппроксимации плановых координат и высот опорных пунктов плоскостью в циклах наблюдений оползневого склона левого берега реки Тосны при исключении опорного пункта ОР4 (Δ – изменение параметра характерного элемента плоскости в период с 0 по 3 цикл наблюдений)

№ цикла наблюдений и дата его проведения	0 (15.07.2023 г.)	3 (28.07.2024 г.)	Δ	Критерий стабильности параметра 3σ (99%)
X_C , м	407439,484	407439,484	0,000	0,004
Y_C , м	2240159,125	2240159,125	0,000	0,003
H_C , м	32,402	32,383	0,019	0,007
α	89°47'24,52"	89°47'25,46"	0°00'00,93"	0°00'05,69"
β	89°34'42,10"	89°34'28,03"	0°00'14,07"	0°00'03,23"
γ	0°28'15,52"	0°28'27,71"	0°00'12,20"	0°00'03,78"
X_N , м	407441,349	407441,347	0,002	0,014
Y_N , м	2240162,872	2240162,907	0,035	0,009
H_N , м	541,620	541,600	0,020	0,008

При исключении из расчётов опорного пункта ОР3 ни один из параметров характерных элементов плоскостей не превышает своего порогового значения, определённого критерием стабильности, что означает стабильность сети. В то же время при исключении из расчётов опорного пункта ОР4 можно отметить смещение центраида плоскости по высоте ΔH_C ($0,019 > 0,007$), смещение точки на нормали к плоскости по оси Y ΔY_N ($0,035 > 0,009$) и высоте H ΔH_N ($0,020 > 0,008$), а также наклон нормали в сторону опорного пункта ОР3: $\Delta\beta$ ($0°00'14,07'' > 0°00'03,23''$), $\Delta\gamma$ ($0°00'12,20'' > 0°00'03,78''$). По результатам анализа можно сделать вывод: в 3 цикле наблюдений опорный пункт ОР3 утратил свою стабильность и произошла его осадка. В качестве наиболее стабильного выбирается опорный пункт ОР4, так как его положение определено с наименьшими СКП без учёта опорного пункта ОР3. Наиболее стабильные опорные пункты в каждом из циклов наблюдений представлены в таблице 40.

Таблица 40 – Наиболее стабильные опорные пункты в каждом из циклов наблюдений, их плановые координаты, высоты и СКП их определения

Цикл наблюдений и дата его проведения	Название опорного пункта	X , м	Y , м	H , м	mX , м	mY , м	mH , м
0 (15.07.2023 г.)	ОР3	407408,976	2240782,530	27,926	0,001	0,002	0,002
1 (07.10.2023 г.)	ОР3	407408,978	2240782,531	27,927	0,002	0,002	0,002
2 (27.04.2024 г.)	ОР3	407408,977	2240782,530	27,926	0,002	0,002	0,002
3 (28.07.2024 г.)	ОР4	407214,035	2240720,342	6,496	0,002	0,002	0,003

4.1.5 Определение положения деформационных пунктов технологиями RTK с увеличенным периодом наблюдений

Определение положения деформационных пунктов оползневого склона левого берега реки Тосны осуществлялось с помощью технологии RTK с применением двух ГНСС-приёмников EFT M4 в качестве базовой станции и ровера. Измерения производились с применением карбоно-алюминиевой вехи Trimble Standard Telescopic Rod 2,6 m и бипода RGK GM-2A, ГНСС-приёмник был установлен при высоте вехи 2 метра. Подключение с применением технологии RTK осуществлялось при режиме передачи RTCM-поправок от одиночной базовой станции через сеть Интернет посредством технологии NTRIP. В качестве базовой станции ГНСС-приёмник устанавливался над опорным пунктом, который был определён как наиболее стабильный в данном цикле наблюдений (таблица 40).

Съёмка выполнялась в условной системе координат. Далее, полученные координаты деформационных пунктов были вычислены в местной системе координат «МСК-47 зона 2» на основе параметров перехода. Каждый деформационный пункт наблюдался при количестве эпох, равном 180. При настройках параметров наблюдений был установлен режим осреднения эпох: в память контроллера записывались осреднённые из 180 эпох значения плановых координат и высот каждого из наблюдаемых деформационных пунктов. Частота измерений при наблюдениях составляла 1 Гц. Маска возвышения устанавливалась со значением 10° в 0 цикле наблюдений, со значением 15° в 1 – 3 циклах наблюдений. Измерения выполнялись в 2 ГНСС-системах: GPS и ГЛОНАСС. Условия наблюдений в каждом из циклов наблюдений представлены в таблице 41. Таблица 41 – Условия наблюдений при определении смещений оползневого склона левого берега реки Тосны технологией RTK

Цикл наблюдений		0 (15.07.2023 г.)	1 (07.10.2023 г.)	2 (27.04.2024 г.)	3 (28.07.2024 г.)
Количество общих спутников между базовой станцией и ровером	Среднее	12	12	11	11
	Минимум	8	9	8	7
	Максимум	16	16	15	14
PDOP	Среднее	2,1	1,9	2,2	2,0
	Минимум	1,4	1,6	1,5	1,3
	Максимум	6,2	5,9	5,5	5,3
HDOP	Среднее	1,1	1,2	1,1	1,0
	Минимум	0,6	0,7	0,6	0,8
	Максимум	3,4	3,6	1,7	1,8
VDOP	Среднее	1,8	1,7	1,8	1,8
	Минимум	1,1	1,0	1,0	1,0
	Максимум	5,2	5,0	5,0	4,9

С применением технологии RTK было определено положение деформационных пунктов Ln1 – Ln5, Ln14 – Ln25, Ln36 – Ln38, Ln48 – Ln58. Плановые координаты и высоты деформационных пунктов представлены в приложении Ж.

4.1.6 Определение положения деформационных пунктов линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения

Для деформационных пунктов Ln6 – Ln13, Ln26 – Ln35 и Ln39 – Ln47 получить фиксированного решения при наблюдениях технологией RTK не удалось ввиду затруднённых условий: данные участки оползневого склона покрыты густой растительностью, что делает невозможным выполнение качественных наблюдений технологией спутникового позиционирования, а также усложняет процесс наблюдений линейно-угловыми измерениями на отражателе при его отвесном положении над деформационным пунктом. В связи с этим, наблюдение таких деформационных пунктов осуществлялось с применением метода определения положения деформационного пункта в теле оползня линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения.

Для линейно-угловых измерений использовался электронный тахеометр Sokkia CX-103, призменный отражатель Vega SP02T, установленный на карбоно-алюминиевой вехе Trimble Standard Telescopic Rod 2,6 m. Веха в наклонах при наблюдениях устанавливалась согласно схеме, предложенной в методе, при 4 положениях в наклонах. Для более точной установки вехи при определённых углах наклона использовался смартфон с акселерометром, установка вехи в наклонах осуществлялась в пределах 40 – 50° при больших наклонах вехи (положения 1 – 3) и в пределах 5 – 15° при малых наклонах вехи (положение 4).

Положение деформационных пунктов Ln13, Ln26 и Ln39 при их закреплении было выбрано таким образом, чтобы обеспечить взаимную видимость между ними и другими деформационными пунктами, наблюдение которых невозможно выполнить технологией спутникового позиционирования. Таким образом, деформационные пункты Ln13, Ln26 и Ln39 использовались как деформационные пункты, совмещённые со станциями тахеометра. Положение таких деформационных пунктов определялось методом обратной засечки, выполняемой с применением электронного тахеометра, относительно рабочих пунктов (Т1 – Т9), которые, в свою очередь, были закреплены вне зоны влияния оползня в местах, где возможно выполнить определение их положения технологией спутникового позиционирования.

Положение рабочих пунктов Т1 – Т9 определялось ГНСС-приёмником EFT М4 с применением технологии RTK при параметрах наблюдений, аналогичных параметрам наблюдений деформационных пунктов технологией RTK (при количестве эпох, равном 180 и др.). Плановые координаты и высоты рабочих пунктов Т1 – Т9 представлены в приложении И,

плановые координаты и высоты деформационных пунктов, совмещённых со станциями тахеометра Ln13, Ln26 и Ln39 представлены в таблице 42. Плановые координаты и высоты деформационных пунктов, полученных линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения представлены в приложении К.

Таблица 42 – Плановые координаты и высоты деформационных пунктов, совмещённых со станциями тахеометра на оползневом склоне левого берега реки Тосны

Название деформационного пункта, совмещённого со станцией тахеометра	№ цикла наблюдений и дата его проведения	X, м	Y, м	H, м
Ln13	0 (15.07.2023 г.)	407337,208	2240702,190	28,374
	1 (07.10.2023 г.)	407336,976	2240702,129	28,328
	2 (27.04.2024 г.)	407336,635	2240702,060	28,146
	3 (28.07.2024 г.)	407336,436	2240702,008	28,061
Ln26	0 (15.07.2023 г.)	407317,344	2240735,823	20,784
	1 (07.10.2023 г.)	407317,253	2240735,824	20,737
	2 (27.04.2024 г.)	407316,987	2240735,754	20,697
	3 (28.07.2024 г.)	407316,890	2240735,788	20,671
Ln39	0 (15.07.2023 г.)	407327,833	2240619,392	27,514
	1 (07.10.2023 г.)	407327,656	2240619,503	27,475
	2 (27.04.2024 г.)	407327,308	2240619,793	27,417
	3 (28.07.2024 г.)	407327,055	2240619,917	27,365

При вычислении положений деформационных пунктов линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи от отвесного положения также были вычислены радиусы сферы и проведён контроль, заключающийся в вычислении величин СКП определения радиуса сферы по формуле 59. Результаты вычислений представлены в таблице 43.

Таблица 43 – Величины СКП определения радиуса сферы при линейно-угловых измерениях с принудительными отклонениями вехи от отвесного положения в ходе геодезических наблюдений оползневого склона левого берега реки Тосны

Название деформационного пункта	№ цикла наблюдений и дата его проведения							
	0 (15.07.2023 г.)		1 (07.10.2023 г.)		2 (27.04.2024 г.)		3 (28.07.2024 г.)	
	R , м	Δ_R , м	R , м	Δ_R , м	R , м	Δ_R , м	R , м	Δ_R , м
Ln6	2,072	0,004	2,072	0,004	2,076	0,000	2,077	0,001
Ln7	2,075	0,001	2,079	0,003	2,073	0,003	2,078	0,002
Ln8	2,078	0,002	Уничтожен					
Ln9	2,073	0,003	2,075	0,001	Уничтожен			
Ln10	2,077	0,001	2,080	0,004	2,080	0,004	Уничтожен	
Ln11	2,073	0,003	Уничтожен					
Ln12	2,078	0,002	2,078	0,002	2,080	0,004	2,074	0,002
Ln27	2,073	0,003	2,080	0,004	Уничтожен			
Ln28	2,077	0,001	2,074	0,002	2,077	0,001	2,077	0,001
Ln29	2,077	0,001	2,075	0,001	2,073	0,003	2,076	0,000
Ln30	2,072	0,004	2,075	0,001	2,072	0,004	2,078	0,002
Ln31	2,074	0,002	2,080	0,004	2,080	0,004	2,075	0,001
Ln32	2,080	0,004	2,079	0,003	2,071	0,005	2,079	0,003

Продолжение таблицы 43

Ln33	2,078	0,002	2,075	0,001	2,080	0,004	2,072	0,004
Ln34	2,075	0,001	2,078	0,002	2,076	0,000	2,077	0,001
Ln35	2,077	0,001	2,077	0,001	2,080	0,004	2,072	0,004
Ln40	2,078	0,002	2,073	0,003	2,078	0,002	2,079	0,003
Ln41	2,072	0,004	2,079	0,003	2,079	0,003	2,080	0,004
Ln42	2,080	0,004	2,075	0,001	2,080	0,004	2,075	0,001
Ln43	2,076	0,000	2,078	0,002	2,072	0,004	2,079	0,003
Ln44	2,076	0,000	2,080	0,004	2,080	0,004	2,076	0,000
Ln45	2,077	0,001	2,072	0,004	2,079	0,003	2,075	0,001
Ln46	2,078	0,002	2,073	0,003	2,078	0,002	2,073	0,003
Ln47	2,074	0,002	2,072	0,004	2,072	0,004	2,079	0,003

Наибольшая СКП определения радиуса сферы составила 4 мм. Полученные результаты коррелируют с результатами, полученными в лабораторных условиях, что говорит об отсутствии грубых ошибок в определении плановых координат и высот деформационных пунктов данным методом.

4.1.7 Результаты геодезических наблюдений оползневого склона левого берега реки Тосны

В ходе визуального осмотра оползневого склона были отмечены существенные изменения его рельефа склона в области деформационного пункта Ln12 (рисунок 34), что подтверждается результатами геодезических наблюдений.



Рисунок 34 – Деформации оползневого склона левого берега реки Тосны, обнаруженные в ходе визуального осмотра (слева – этап 0 цикла наблюдений (15.07.2023 г.), справа – этап 3 цикла наблюдений (28.07.2024 г.))

В ходе геодезических наблюдений оползневого склона левого берега реки Тосны было выполнено 4 цикла наблюдений с 15.07.2023 г. по 28.07.2024 г. В рамках работ было закреплено 4 опорных пункта, 9 рабочих пунктов и 58 деформационных пунктов, 3 из которых были деформационными пунктами, совмещёнными со станциями тахеометра. В период с 15.07.2023 г. по 07.10.2023 г. между 0 и 1 циклом наблюдений было уничтожено 6 деформационных пунктов, в период с 07.10.2023 г. по 27.04.2024 г. между 1 и 2 циклом наблюдений было уничтожено 8 деформационных пунктов, в период с 27.04.2024 по 28.07.2024 г. между 2 и 3 циклом наблюдений было уничтожено 4 деформационных пункта. За период с 15.07.2023 г. по 28.07.2024 г. (0 – 3 цикл наблюдений) остались действующими 40 деформационных пунктов (69 % от первоначального количества). Количество действующих опорных, рабочих и деформационных пунктов в течение периода наблюдений оставалось достаточным для продолжения наблюдений за смещениями: количество пунктов в 0 цикле наблюдений было запроектировано и установлено с запасом. Вследствие этого, повторное закрепление новых опорных, рабочих и деформационных пунктов не потребовалось.

По результатам геодезических наблюдений были получены величины горизонтальных, вертикальных и пространственных смещений для оползневого склона левого берега реки Тосны за периоды между циклами наблюдений, а также вычислены скорости смещений в месяц (приложение Л). Временные ряды смещений деформационных пунктов в теле оползневого склона левого берега реки Тосны представлены на рисунках 35 – 37.

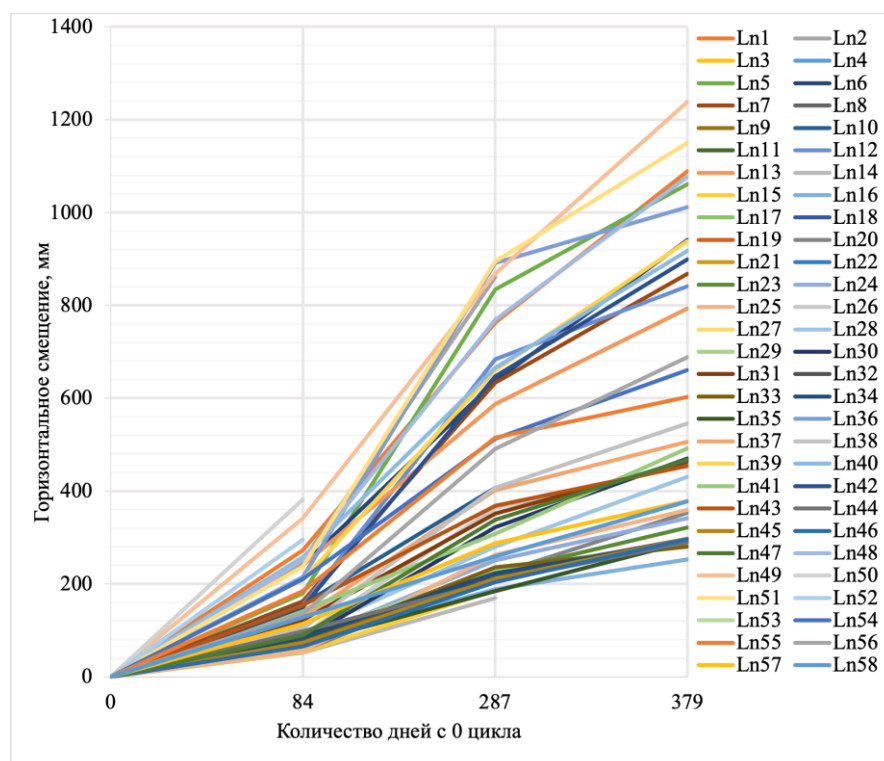


Рисунок 35 – График горизонтальных смещений оползневого склона левого берега реки Тосны

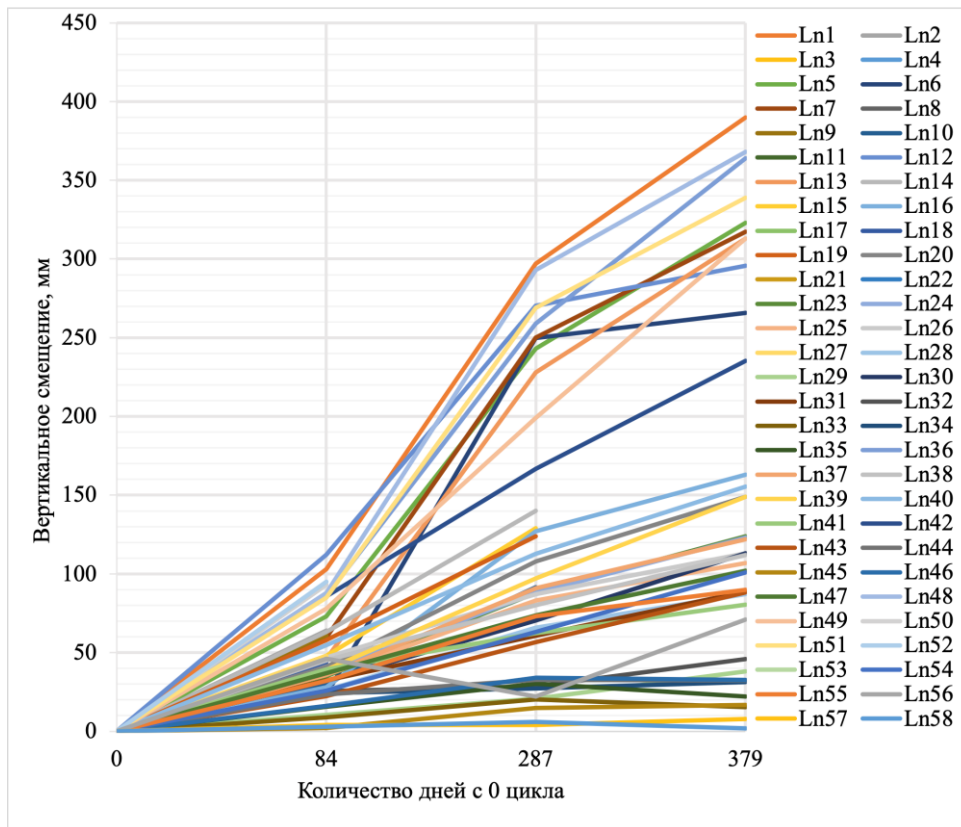


Рисунок 36 – График вертикальных смещений оползневого склона левого берега реки Тосны

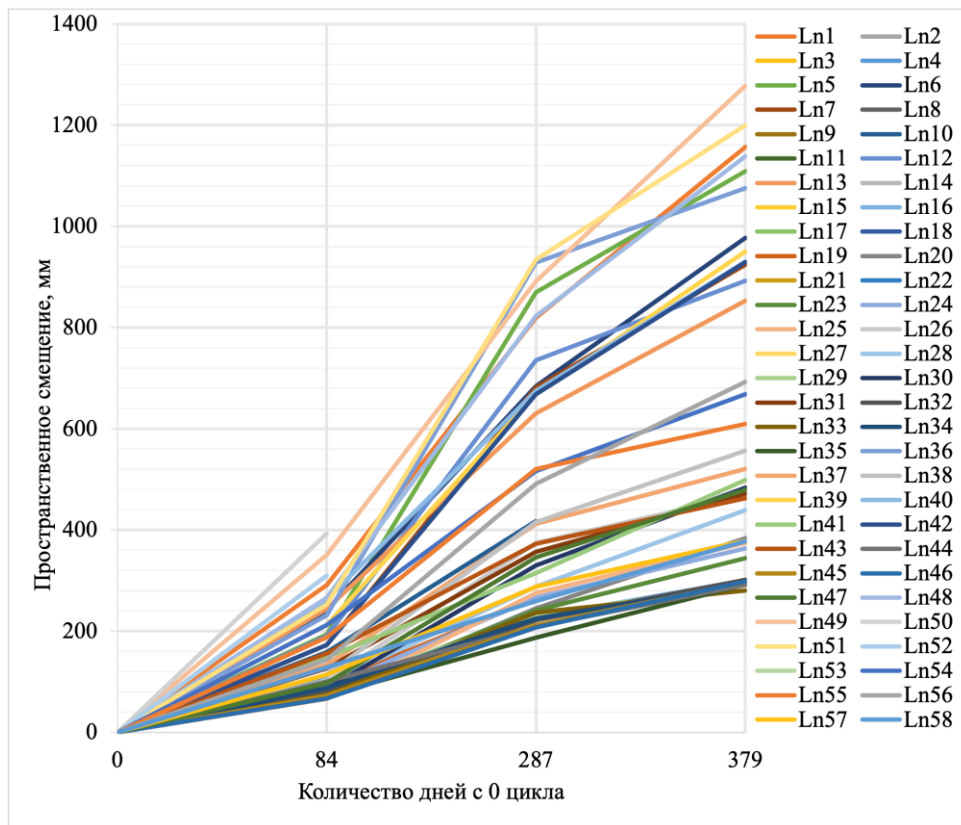


Рисунок 37 – График пространственных смещений оползневого склона левого берега реки Тосны

Используемые методы при наблюдениях показали себя с хорошей стороны, отмечено удобство выполнения полевых работ, высокая скорость работ и простота в обработке полученных результатов. Способ линейно-угловых наблюдений с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения позволил получить величины смещений склона в труднодоступных местах, существенных различий между вычисленными значениями радиуса сферы и высотой вехи зафиксировано не было, СКП определения положения составила не более 4,8 мм. Точности наблюдений технологией RTK с применением ГНСС-приёмника EFT M4 было достаточно для скоростей смещений, свойственных данному склону.

По результатам наблюдений выполнено зонирование оползневого склона по скоростям смещений (рисунок 38).

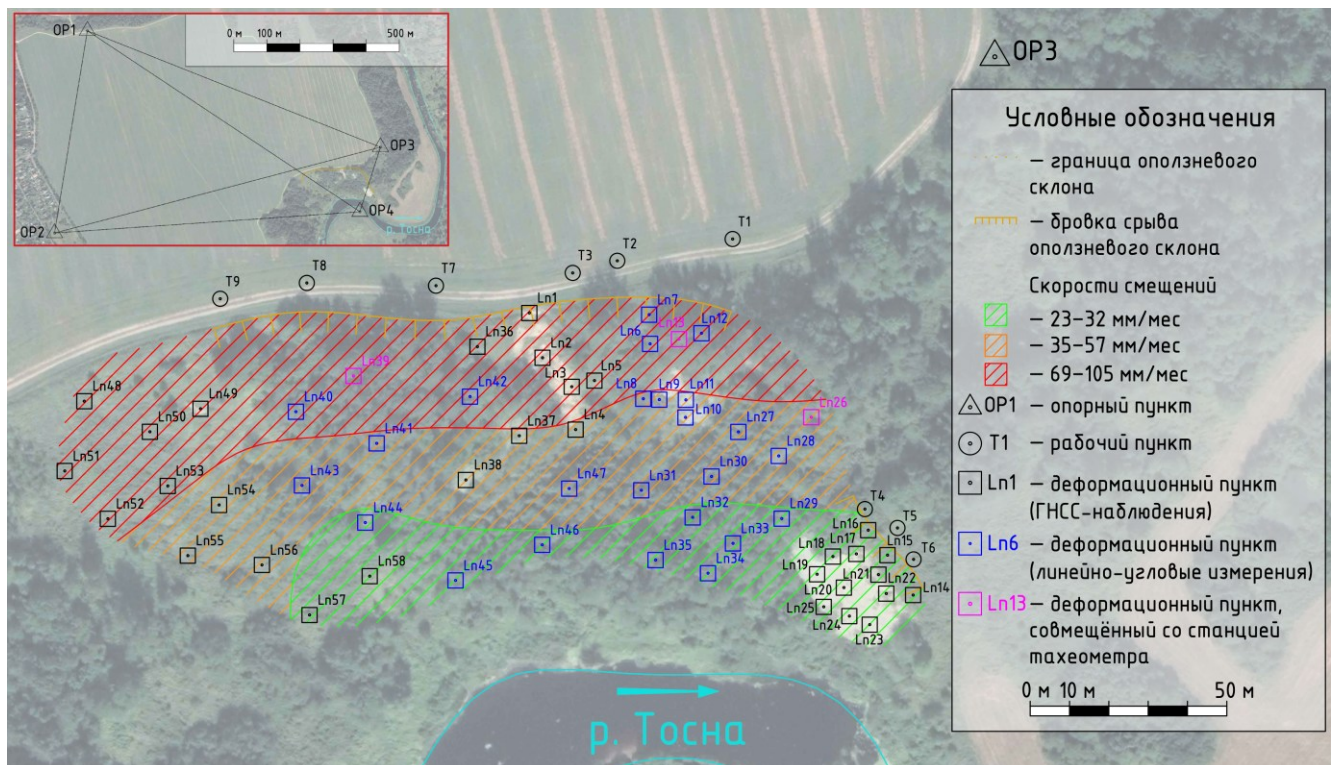


Рисунок 38 – Зоны оползневого склона левого берега реки Тосны по скоростям смещений

4.1.8 Прогнозирование величин оползневых смещений по геодезическим данным

На основе полученных данных о величинах смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов, для каждого из них был построен временной ряд смещений, выполнена линейная аппроксимация значений ряда и получено уравнение прогноза величин смещений. Уравнения прогноза смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов по данным 0 – 1 циклов наблюдений представлены в приложении М. Далее, после завершения этапа 1 цикла наблюдений был сделан прогноз на время 2 цикла наблюдений. После выполнения 2 цикла наблюдений полученные величины смещений были сравнены с прогнозными значениями (приложение Н).

Аналогичным образом после выполнения 2 цикла наблюдений были составлены уравнения прогноза смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов по данным 0 – 2 циклов наблюдений (приложение П) и сделан прогноз на период 3 цикла наблюдений (приложение Р). Сравнение результатов точности прогнозирования представлено в таблице 44. Таблица 44 – Сравнение результатов точности прогнозирования величин смещений оползневого склона левого берега реки Тосны (S_{XY} – горизонтальные смещения, S_H – вертикальные смещения, S_{XYH} – пространственные смещения)

	Прогноз на 2 цикл наблюдений по данным 0 – 1 циклов наблюдений			Прогноз на 3 цикл наблюдений по данным 0 – 2 циклов наблюдений		
	S_{XY}	S_H	S_{XYH}	S_{XY}	S_H	S_{XYH}
Средняя точность прогноза, %	77	50	79	94	84	94
Минимальная точность прогноза, %	32	0	32	82	0	84
Максимальная точность прогноза, %	99	97	100	100	99	100

По сравнению прогнозных и фактических значений оползневых смещений можно сделать следующие выводы: в среднем точность прогноза на 3 цикл наблюдений по данным 0 – 2 циклов наблюдений оказалась выше, чем прогноз на 2 цикл наблюдений по данным 0 – 1 циклов наблюдений на 15 % для горизонтальных оползневых смещений, на 33 % для вертикальных оползневых смещений и на 15 % для пространственных оползневых смещений. Высокая точность прогноза оползневых смещений связана с равномерными смещениями, увеличений скорости смещений оползневого склона за наблюдаемые периоды зафиксировано не было. В то же время, несмотря на равномерные смещения, величины смещений составляют большие значения, особенно в зоне оползневых смещений со скоростями 69 – 105 мм/мес (рисунок 38). Несмотря на то, что деформационные пункты в данной зоне характеризуется наибольшими величинами смещений, увеличения скорости их смещений за период наблюдений зафиксировано не было. Тем не менее, требуется продолжать наблюдения за данным участком оползня, так как сохранение скорости смещений может привести к обрушению данной части оползневого склона.

По данным 0 – 3 циклов наблюдений составлены уравнения прогноза смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов (приложение С), а также сделан прогноз величин смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на 19.07.2025 г. (приложение Т). Точность прогноза можно будет оценить после проведения 4 цикла наблюдений в 2025 году.

4.2 Выводы по главе 4

1. В рамках апробации методики выполнения наблюдений оползневых склонов геодезическими методами был выбран объект, располагающийся в Ленинградской области, вблизи г. Никольское – оползневой склон левого берега реки Тосны. Выбор данного склона в качестве объекта исследования был обусловлен тем, что склон обладал явными оползневыми смещениями, которые можно было отметить в ходе визуального осмотра, что позволило бы выполнить проверку предлагаемых методов на реальном объекте.

2. Для наблюдений оползневого склона геодезическими методами были закреплены опорные, рабочие и деформационные пункты в виде арматуры диаметром 18 мм и длиной 1,8 м. Всего на оползневом склоне было закреплено 4 опорных пункта, 9 рабочих пунктов, необходимых для выполнения обратной засечки при линейно-угловых измерениях, а также 58 деформационных пунктов, 3 из которых являлись деформационными пунктами, совмещёнными со станцией тахеометра.

3. В рамках работ по наблюдениям оползневого склона было выполнено 4 цикла наблюдений 15.07.2023 г., 07.10.2023 г., 27.04.2024 г. и 28.07.2024 г. Геодезические наблюдения выполнялись два раза в год: летом после весеннего периода оттаивания снегов и осенью в периоды обильных дождевых осадков.

4. В каждом из циклов наблюдений перед началом работ выполнялась оценка стабильности опорных пунктов по результатам наблюдений технологией спутникового позиционирования в режиме «статика» с длительностью сеанса наблюдений не менее 2 часов тремя ГНСС-приёмниками EFT M4. Полученными по результатам наблюдений данными являлись плановые координаты и высоты опорных пунктов, а по результатам обработки – СКП определения положения опорных пунктов. По полученным плановым координатам и высотам опорных пунктов выполнялась оценка стабильности опорной сети аппроксимацией плановых координат и высот её плоскостью, в ходе которой было определено, что опорные пункты в 0 – 2 циклах наблюдений сохраняли свою стабильность, а в период 3 цикла наблюдений было определено, что опорный пункт ОР3 утратил стабильность.

5. Наблюдение рабочих и деформационных пунктов осуществлялось технологией RTK двумя ГНСС-приёмниками EFT M4, один из которых был установлен на работу в режиме базовой станции на самом стабильном опорном пункте, а второй установлен на работу в режиме ровера. Для 0 – 2 циклов наблюдений ГНСС-приёмник в режиме базовой станции устанавливался на опорном пункте ОР3, в период 3 цикла наблюдений было обнаружено, что данный опорный пункт утратил стабильность, в связи с чем в 3 цикле наблюдений ГНСС-приёмник в режиме базовой станции был установлен на опорном пункте ОР4. Технологией RTK наблюдения осуществлялись при числе эпох не менее 180 с частотой измерений 1 Гц и удалением от базовой

станции не более чем на 1 км. Результатом наблюдений являлись плановые координаты и высоты деформационных пунктов в теле оползня.

6. Наблюдение деформационных пунктов, положение которых не представлялось возможным определить технологией спутникового позиционирования, осуществлялось линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения электронным тахеометром Sokkia CX-103 в комплекте с карбоно-алюминиевой вехой Trimble Standard Telescopic Rod 2,6 m и призмным отражателем Vega SP02T. В качестве станций тахеометра были выбраны деформационные пункты Ln13, Ln 26 и Ln39. Определение положения станций тахеометра осуществлялось с помощью обратной засечки электронным тахеометром при наблюдениях на рабочие пункты, положение которых определялось технологией RTK при числе эпох не менее 180 с частотой измерений 1 Гц. По результатам наблюдений были получены плановые координаты и высоты деформационных пунктов, скрытых для прямой видимости между опорными пунктами и наблюдение которых не представлялось осуществить технологией спутникового позиционирования.

7. По результатам наблюдений были определены величины смещений оползневого склона левого берега реки Тосны, на основании которых можно сделать вывод, что оползень имеет различную скорость смещений в пределах своего периметра. По данным о скоростях смещений деформационных пунктов в теле оползня составлена схема зон оползня по скоростям смещений. В пределах каждой из зон резких увеличений скорости оползневых смещений зафиксировано не было. По данным 0 – 1 циклов наблюдений был сделан прогноз величин смещений на период 2-го цикла наблюдений с точностью 53 – 79 %, а на период 3-го цикла наблюдений по результатам наблюдений с 0 по 2 цикл наблюдений был сделан прогноз величин смещений с точностью 86 – 94 %. По данным с 0 по 3 цикл наблюдений был сделан прогноз величин оползневых смещений на 19.07.2025 г., точность которого представится возможным оценить по результатам 4-го цикла наблюдений.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдирашитова, Н.А. Оценка напряжённо-деформированного состояния оползнеопасного склона Г. Кок-Жангак методом конечных элементов (в программе PLAXIS) / Н.А. Абдирашитова // Общество. – 2020. – № 2 (17). – С. 25–30. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44033007> (дата обращения: 15.01.2025).
2. Аврунев, Е.И. Анализ стабильности исходных пунктов на основании спутниковых определений в геодезической сети сгущения / Е.И. Аврунев // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2010. – № 2. – С. 1–6. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18075947> (дата обращения: 15.01.2025).
3. Азаров, Б.Ф. Современные методы геодезических наблюдений за деформациями инженерных сооружений / Б.Ф. Азаров // Ползуновский вестник. – 2011. – № 1. – С. 19–29. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16757614> (дата обращения: 15.01.2025).
4. Анисимов, Д.А. Принципы определения основных параметров оползневых процессов при проектировании баз данных / Д.А. Анисимов, Ж.Х. Шогенова // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2018. – № 2. – С. 5–11. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35034348> (дата обращения: 15.01.2025).
5. Антонович, К.М. Контроль качества спутниковых наблюдений / К.М. Антонович, В.В. Яхман // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2006. – № 2. – С. 1–6. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18203729> (дата обращения: 15.01.2025).
6. Аполонский, В.В. Методы расчёта наиболее устойчивых реперов нефтегазодобывающего комплекса / В.В. Аполонский, Е.Н. Купреева // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2019. – № 2 (17). – С. 1–7. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39134536> (дата обращения: 15.01.2025).
7. Афанасьев, В.Ю. Оценка точности решения в режиме PPP Static в программе RTKLIB / В.Ю. Афанасьев // Геопрофи. – 2020. – № 2. – С. 44–47. – URL: <http://www.geoprofi.ru/Services/Doc/3914/1a08cb4a263b4b13b1548594dc431e4e/True> (дата обращения: 15.01.2025).
8. Брынь, М.Я. Уравнивание спутниковых и наземных измерений параметрическим способом в плоских координатах для построения мостовых разбивочных сетей / М.Я. Брынь, А.В. Астапович, П.А. Веселкин, М.Д. Каралис, А.А. Никитчин // Известия ПГУПС. – 2017. – № 1. – С. 135–140. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13860160> (дата обращения: 15.01.2025).
9. Будо, А.Ю. Уравнивание спутниковых геодезических сетей без исходных пунктов методом Lp-оценок / А.Ю. Будо, Н.О. Куприенко, О.О. Усова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. – 2008. – № 6. – С. 192–195. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28313572> (дата обращения: 15.01.2025).

10. Васьков, И.М. К вопросу о некоторых особенностях динамики Мацутинского оползня (Центральный Кавказ) / И.М. Васьков, Ю.И. Караев, Г.С. Дзарахохов, Д.А. Кокоев, М.Р. Тамаева // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2020. – Т. 5. – № 1 (19). – С. 5–18. – URL: <https://doi.org/10.25744/genb.2020.19.1.001> (дата обращения: 15.01.2025).

11. Власенко, В.Н. Мониторинг смещений оползней и грунтовых гидротехнических сооружений по радарным космическим снимкам / В.Н. Власенко, П.С. Иванов, А.Д. Созинов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2017. – Т. 283. – С. 97–104. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30496538> (дата обращения: 15.01.2025).

12. Вшивкова, О.В. Разработка алгоритма реализации комбинированного способа учёта влияния вертикальной рефракции в электронной тахеометрии / О.В. Вшивкова, С.Ю. Решетило // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъёмка». – 2018. – Т. 62. – № 5. – С. 489–494. – URL: <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2018-62-5-489-494> (дата обращения: 15.01.2025).

13. В штате Вайоминг произошло землетрясение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2010/10/25/quake/> (дата обращения: 30.11.2023).

14. Ганьшин, В.Н. Геодезические методы измерения вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / В.Н. Ганьшин, А.Ф. Стороженко, Н.А. Буденков, А.Г. Ильин, В.И. Цюнько. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991. – 190 с.: ил.

15. Гайрабеков, М.Б.И. Математическая модель осадок опорной геодезической основы для контроля НДС энергетических объектов / М.Б.И. Гайрабеков, А.Т. Мишиева, И.Г. Гайрабеков, Э.И. Ибрагимова // Геоэнергетика-2022 : Коллективная монография по материалам V-й Международной научно-практической конференции. Научные редакторы С.В. Алексеенко, М.Ш. Минцаев, И.А. Керимов (2022 г.). – Грозный : Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, 2022. – С. 52–57. – URL: <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2022.87.38.009> (дата обращения: 15.01.2025).

16. ГКИНП-07-016-91 Правила закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сетей. – М.: Картгеоцентр – Геоиздат, 1993 – 104 с.: ил.

17. ГКИНП (ОНТА)-01-271-03 Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. М., ЦНИИГАиК, 2003 с. 182.

18. ГКИНП (ОНТА)-02-262-02 Инструкция по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. М., ЦНИИГАиК, 2002, 124 с.

19. Глазунов, В.В. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учёта данных инженерной геофизики / В.В. Глазунов, С.Б. Бурлуцкий, Р.А. Шувалова, С.В. Жданов // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 771–782. – URL: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.86> (дата обращения: 15.01.2025).

20. Господариков, А.П. Прогноз напряжённо-деформированного состояния массива горных пород при разработке пологих месторождений / А.П. Господариков, М.А. Зацепин // Записки Горного института. – 2010. – Т. 187. – С. 55–58. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15555940> (дата обращения: 15.01.2025).

21. ГОСТ Р 55535-2019. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Общие технические требования к системам геодезического мониторинга. – Утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 августа 2013 г. № 600-ст. – М.: Стандартиформ, 2019. – 15 с.

22. ГОСТ Р ИСО 17123-8-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Оптика и оптические приборы. Методики полевых испытаний геодезических и топографических приборов. Часть 8. Полевые испытания GNSS-аппаратуры в режиме «Кинематика в реальном времени» (RTK). – Утверждён и введён в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2011 г. № 567/ст. – М.: Стандартиформ, 2019. – 24 с.

23. ГОСТ 24846-2019. Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений. – Утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 июля 2020 г. № 409-ст: дата введения 2021-01-01. – М.: Стандартиформ, 2020. – 15 с.

24. Григоренко, А.Г. Измерение смещений оползней. – М.: Недра, 1988. – 144 с.

25. Гусев, В.Н. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съёмки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера / В.Н. Гусев, А.А. Блищенко, А.П. Санникова // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 173–179. – URL: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.35> (дата обращения: 15.01.2025).

26. Долины смерти [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.booksite.ru/localtxt/cat/ast/rofa/30.htm> (дата обращения: 30.11.2023).

27. Дорогова, И.Е. Исследование и моделирование движений земной коры в окрестностях действующего вулкана по результатам повторного высокоточного нивелирования // И.Е. Дорогова, Н.Н. Кобелева // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25. – № 1. – С. 16–27. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-1-16-27> (дата обращения: 15.01.2025).

28. Дорогова, И.Е. Разработка геодинимического программного модуля для оценивания деформаций земной коры по результатам геодезических измерений / И.Е. Дорогова, К.С. Духовников // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27. – № 6. – С. 15–27. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-6-15-27> (дата обращения: 15.01.2025).

29. Дьяков, Б.Н. Геодезия. Общий курс: учеб. пособие для вузов. – Новосибирск: Сибирская государственная геодезическая академия, 2002. – 158 с.

30. Дьяков, Б.Н. Сравнительный анализ способов Костехеля и Марчака / Б.Н. Дьяков // Маркшейдерский вестник. – 2009. – № 6. – С. 43–46. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14314671> (дата обращения: 15.01.2025).

31. Елагин, А.В. Оценка точности определения координат спутниковыми приёмниками EFT M3 GNSS и EFT M4 GNSS в режиме RTK / А.В. Елагин, М.В. Зайцев, Д.А. Прохоров, Н.К. Шендрик // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25. – № 3. – С. 26–33. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-3-26-33> (дата обращения: 15.01.2025).

32. Затраты на ликвидацию последствий ЧС выросли вдвое [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rg.ru/2020/02/19/zatraty-na-likvidaciiu-posledstvij-chs-vyrosli-vdvoe.html> (дата обращения: 30.11.2023).

33. Ислямова, А.А. Моделирование перемещений оползневых склонов по материалам геодезических наблюдений и инженерно-геологических изысканий / А.А. Ислямова, В.С. Хорошилов // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26. – № 2. – С. 5–17. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-2-5-17> (дата обращения: 15.01.2025).

34. Как действовать при оползне и селевом потоке. Сели, оползни, камнепады [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mchs.gov.ru/deyatelnost/bezopasnost-grazhdan/seli-opolzni_1 (дата обращения: 30.11.2023).

35. Каленицкий, А.И. О методологическом аспекте геодезического мониторинга напряжённо-деформированного состояния земной коры при освоении недр Кузбасса / А.И. Каленицкий, А.Н. Соловицкий // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. – № 4. – С. 20–33. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-4-20-33> (дата обращения: 15.01.2025).

36. Калинин, И.С. Анализ устойчивости реперов, используемых для наблюдений за деформациями зданий и сооружений в южной зоне распространения многолетнемерзлых грунтов / И.С. Калинин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 1. – № 3. – С. 155–159. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19410627> (дата обращения: 15.01.2025).

37. Калинин, И.С. Исследование влияния природно-климатических факторов на точность геодезических измерений превышений цифровым нивелиром TrimbleDiNi 12 / И.С. Калинин, А.И. Уваров // Вестник Омского государственного аграрного университета. –

2012. – № 4 (8). – С. 49–53. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22507242> (дата обращения: 15.01.2025).

38. Карев, А.П. К вопросу оценки точности положения геодезических пунктов, определяемых линейно-угловыми засечками / А.П. Карев, А.И. Павлова // ГЕО-Сибирь. – 2008. – Т. 1. – № 1. – С. 177–182. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18103300> (дата обращения: 15.01.2025).

39. Карпик, А.П. Анализ методов и средств изучения динамики перемещений оползневых склонов / А.П. Карпик, В.С. Хорошилов, А.В. Комиссаров // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26. – № 6. – С. 17–32. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-6-17-32> (дата обращения: 15.01.2025).

40. Клепиков, И.В. Априорная оценка точности веерообразного тригонометрического нивелирования коротким лучом / И.В. Клепиков, В.В. Рыльчиков // The scientific heritage. – 2022. – № 83. С. 39–46. – URL: <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2022-83-1-39-46> (дата обращения: 15.01.2025).

41. Князев, А.П. Оползневые процессы юга европейской части России / А.П. Князев // Цифровая наука. – 2020. – № 8. – С. 60–64. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44014129> (дата обращения: 15.01.2025).

42. Корецкий, Д.С. Определение погрешностей координат опознаков с применением спутниковых GPS-технологий / Д.С. Корецкий, Г.А. Корецкая, Е.В. Кузнецов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 3. – С. 58–64. – URL: <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-58-64> (дата обращения: 15.01.2025).

43. Кремнев, А.П. Определение наиболее опасной поверхности скольжения при расчёте устойчивости откосов методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения / А.П. Кремнев, Д.О. Глухов, Н.Н. Вишняков // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2011. – № 8. – С. 37–41. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24814706> (дата обращения: 15.01.2025).

44. Кузин, А.А. Выделение оползнеопасных территорий на основе методов нейронных сетей / А.А. Кузин // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 46–51. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21029051> (дата обращения: 15.01.2025).

45. Кузин, А.А. Геодезические методы наблюдения за оползнеопасными склонами / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов** // Устойчивое развитие земельно-имущественного комплекса муниципального образования: землеустроительное, кадастровое и геодезическое сопровождение : Сборник научных трудов по материалам III национальной научно-практической конференции, Омск, 24 ноября 2022 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени

П.А. Столыпина, 2022. – С. 33–38. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50248830> (дата обращения: 15.01.2025).

46. Кузин, А.А. Геодезическое обеспечение мониторинга оползней / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов** // Сборник материалов XX Международной выставки и научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», Новосибирск, 15–17 мая 2024 года. – Новосибирск: СГУГиТ, 2024. – Т. 1. – С. 187–193. – URL: <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2024-1-187-193> (дата обращения: 15.01.2025).

47. Кузин, А.А. Геодезическое обеспечение наблюдений за оползневыми склонами / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов** // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Инновации в науке, образовании и производстве: Материалы V Всероссийской науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 31 октября–1 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2024. – С. 68–74. – URL: https://geoca-conference.ru/files/!ГЕОКА_2024.pdf (дата обращения: 23.02.2025).

48. 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> (дата обращения: 01.04.2025).

49. Кузин, А.А. Координатный метод при наблюдениях за оползнеопасными склонами: оценка влияния угловых и линейных точностей измерения прибором / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов** // Сборник материалов XI Форума вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства «Технологическая интеграция», Минск, 12–16 декабря 2022 года. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 238–240. – URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/126709> (дата обращения: 23.02.2025).

50. 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> (дата обращения: 15.01.2025).

51. 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> (дата обращения: 15.01.2024).

52. Кузин, А.А. Применение метода спутникового позиционирования в режиме реального времени (RTK) для наблюдения за оползнеопасными склонами / А.А. Кузин, **В.Г. Филиппов** // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2023. – Т. 2. – С. 57–61. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55169992> (дата обращения: 15.01.2025).

53. 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> (дата обращения: 15.01.2025).
54. 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> (дата обращения: 15.01.2025).
55. Кузнецов, А.Г. Геоморфологические особенности Марьинского оползня в окрестностях Симферополя (предгорный Крым) / А.Г. Кузнецов, Н.Г. Пашкова, В.А. Алимаев // Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2015. – Т. 1 (67). – № 3. – С. 85–91. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25794643> (дата обращения: 15.01.2025).
56. Кузнецов, А.П. Разработка метода определения поверхности скольжения оползня по данным геодезического мониторинга: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 25.00.32 / А.П. Кузнецов. – М.: МИИГАиК, 2013. – 25 с.
57. Лагутина, Е.К. Апробация методики включения сети постоянно действующих базовой станции Новосибирской области в государственную геодезическую сеть / Е.К. Лагутина // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 3 (35). – С. 35–42. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28284928> (дата обращения: 15.01.2025).
58. Лапытов, А.И. Моделирование развития оползневых процессов для прогноза оползневой опасности на территории горнолыжного комплекса «Казань» и г. Иннополис / А.И. Лапытов, Н.И. Жаркова, И.С. Нуриев, Г.А. Черныйук // Учёные записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2014. – Т. 156. – № 1. – с. 148–162. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21710718> (дата обращения: 15.01.2025).
59. Максимова, М.В. Из опыта геодезического мониторинга оползневых процессов на участке трассы нефтепровода «Сахалин-2» / М.В. Максимова // Вектор ГеоНаук. – 2018. – Т. 1. – № 1. – С. 62–73. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35138836> (дата обращения: 15.01.2025).
60. Малков, А.Г. Об оценке точности измерения превышений на станции геометрического нивелирования / А.Г. Малков // Гео-Сибирь. – 2009. – Т. 1. – № 1. – С. 82–84. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18083087> (дата обращения: 15.01.2025).
61. Маркович, К.И. Исследование особенностей визирования и измерения линий с использованием геодезических отражателей / К.И. Маркович, А.В. Валюшкин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 181–185. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25896198> (дата обращения: 15.01.2025).

62. Маркович, К.И. Влияние конфигурации конечных элементов на точность определения компонентов деформации / К.И. Маркович // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 37–51. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-3-37-51> (дата обращения: 15.01.2025).

63. Мирмахмудов, Э.Р. Об анализе точности элементов ковариационной матрицы в GNSS измерениях на геодинимическом полигоне «Таваксай» / Э.Р. Мирмахмудов // Universum: технические науки. – 2022. – № 7 (100). – С. 1–7. – URL: <https://doi.org/10.32743/UniTech.2022.100.7.14096> (дата обращения: 15.01.2025).

64. Михалев, А.В. Оценка возможности использования тригонометрического нивелирования для производства высокоточных измерений / А.В. Михалев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – Т. 12. – № 8. – С. 136–144. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21769754> (дата обращения: 15.01.2025).

65. Модели грунтов в Plaxis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.plaxis.ru/articles/modeli-gruntov-v-plaxis/> (дата обращения: 13.12.2023).

66. Мустафин, М.Г. Анализ точности построения цифровых моделей рельефа на основе данных периодического воздушного лазерного сканирования горнопромышленного объекта / М.Г. Мустафин, А.А. Кологривко, Б.Ю. Васильев // Горный журнал. – 2023. – № 2. – С. 56–62. – URL: <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.02.09> (дата обращения: 15.01.2025).

67. Мустафин, М.Г. Использование методики спутникового нивелирования при создании высотной сети на территории Ливана / М.Г. Мустафин, Х.И. Мусса, М.Р. Аббуд, А.Х. Джаллул // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28. – № 3. – С. 23–32. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-3-23-32> (дата обращения: 15.01.2025).

68. Мустафин, М.Г. Оценка вертикальных смещений оснований зданий и сооружений на основе анализа элементов деформационной сети / М.Г. Мустафин, Х.В. Нгуен // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 3. – С. 11–19. – URL: <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-945-3-11-19> (дата обращения: 15.01.2025).

69. На берегу Каспийского моря разглядели крупнейший оползень Земли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2021/06/01/caspian-landslide> (дата обращения: 30.11.2023).

70. На Памире образовалось Сарезское озеро [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://denvistorii.ru/18-fevralya/na-pamire-obrazovalos-sarezskoe-ozero.html> (дата обращения: 30.11.2023).

71. Нгуен, Х.В. Вопросы оценки результатов геодезических наблюдений за деформационными процессами / Х.В. Нгуен // Международный научно-исследовательский

журнал. – 2017. – № 1 (55). – С. 60–64. – URL: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.55.014> (дата обращения: 15.01.2025).

72. Нгуен, Х.В. Разработка методики оценки вертикальных смещений оснований зданий и сооружений на основе анализа элементов модели деформационной сети: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 25.00.32 / Х.В. Нгуен. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», 2018. – 19 с.

73. Неволин, А.Г. Влияние ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров крупногабаритного технологического оборудования / А.Г. Неволин, Т.М. Медведская // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 1. – № 1. – С. 13–19. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25956096> (дата обращения: 15.01.2025).

74. Неволин, А.Г. К вопросу о влиянии ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров технологического оборудования / А.Г. Неволин, Т.М. Медведская // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 16–27. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-1-16-27> (дата обращения: 15.01.2025).

75. Нетребина, Ю.С. К вопросу размещения исходных реперов при геодезическом мониторинге / Ю.С. Нетребина, В.С. Хоменко, Т.В. Ульянова // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 79-6. – С. 147–152. – URL: <https://doi.org/10.18411/trnio-11-2021-277> (дата обращения: 15.01.2025).

76. Никонов, А.В. Исследование точности измерения превышений электронным тахеометром высокой точности в полевых условиях / А.В. Никонов, М.Е. Рахымбердина // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2013. – № 1 (21). – С. 16–26. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19058042> (дата обращения: 15.01.2025).

77. Никонов, А.В. Исследование точности измерения расстояний электронными тахеометрами в безотражательном режиме / А.В. Никонов // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2015. – № 1 (29). – С. 43–53. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24216307> (дата обращения: 15.01.2025).

78. Никонов, А.В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины при визировании над разными подстилающими поверхностями / А.В. Никонов // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2013. – № 3 (23). – С. 28–33. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20369680> (дата обращения: 15.01.2025).

79. Никонов, А.В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины с применением электронных тахеометров / А.В. Никонов // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2013. – № 2 (22). – С. 26–35. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19419206> (дата обращения: 15.01.2025).

80. Никонов, А.В. Исследование тригонометрического нивелирования в полевых условиях / А.В. Никонов, С.А. Бабасов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013 – Т. 1. – № 1. – С. 71–77. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19410530> (дата обращения: 15.01.2025).

81. Никонов, А.В. Конструкция визирной цели для выполнения высокоточного тригонометрического нивелирования / А.В. Никонов // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2014. – № 2 (26). – С. 19–26. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21918300> (дата обращения: 15.01.2025).

82. Никонов, А.В. Определение средней квадратической ошибки измерения превышения на станции цифровым нивелиром / А.В. Никонов, Е.Л. Соболева, Н.М. Рябова, Т.М. Медведская // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 77–84. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23574469> (дата обращения: 15.01.2025).

83. Никонов, А.В. Опыт применения тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров для наблюдения за осадками сооружений / А.В. Никонов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 78–86. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19410531> (дата обращения: 15.01.2025).

84. Никонов, А.В. О точности построения планово-высотной геодезической разбивочной основы наземными методами / А.В. Никонов, И.Н. Чешева // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 1. – № 1. – С. 130–143. – URL: <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-1-1-130-143> (дата обращения: 15.01.2025).

85. Никонов, А.В. Проблема актуализации СП 126.13330.2017 «Геодезические работы в строительстве» / А.В. Никонов // Геодезия и картография. – 2019. – № 4 (946). – С. 9–19. – URL: <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-946-4-9-19> (дата обращения: 15.01.2025).

86. Олзоев, Б.Н. Обзор геодезических методов наблюдений за оползневыми процессами с целью устойчивого развития территорий / Б.Н. Олзоев, О.В. Данченко // XXI век. Техносферная безопасность. – 2016. – Т. 1. – № 4. – С. 30–38. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27466783> (дата обращения: 15.01.2025).

87. Осипов, В.И. Обоснование выбора критериев оползневой опасности в системе автоматизированного мониторинга оползневого процесса на береговых склонах р. Мзымты / В.И. Осипов, Г.П. Постоев, А.И. Казеев // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2015. – № 2. – С. 133–146. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23398654> (дата обращения: 15.01.2025).

88. ОТКОС 2.1: Программные продукты и технологии КРЕДО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://credo-dialogue.ru/produkty/korobochnye-produkty/1493-otkos_naznachenie.html (дата обращения: 10.12.2023).

89. Павловская, О.Г. Анализ и оценка по геодезическим данным динамики оползней в условиях проведения взрывных работ и разгрузки склонов: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 25.00.32 / О.Г. Павловская. – Новосибирск: ФГБОУ ВПО «СГГА», 2012. – 24 с.

90. Пайшанбиев, С.А. Основные преимущества и недостатки метода конечных элементов при решении задач инженерной геодинамики / С.А. Пайшанбиев, Э.В. Калинин // Инженерные изыскания в строительстве : Материалы второй Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов, Москва, 27 апреля 2018 года / Под ред. Н.А. Журавлевой, К.С. Висхаджиевой. – Москва: Геомаркетинг. – 2018. – С. 199–205. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36882643> (дата обращения: 15.01.2025).

91. 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> (дата обращения: 15.01.2025).

92. Пеллинен, В.А. Принципы создания классификации оползней: краткий обзор / В.А. Пеллинен // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 8 (67). – С. 52–55. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17900395> (дата обращения: 15.01.2025).

93. Петина, В.И. Формирование и развитие оползневых процессов на территории Белгородской области / В.И. Петина, Н.И. Гайворонская, Л.И. Белоусова // Региональные геосистемы. – 2009. – № 11 (66). С. 126–132. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15193549> (дата обращения: 15.01.2025).

94. Программа для геотехнических расчётов midas GTS NX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://midasoft.ru/products/midas-gts-nx/> (дата обращения: 12.10.2023).

95. Разумов, В.В. Оценка масштабов распространения и опасности активизации оползневых процессов в Дагестане / В.В. Разумов, М.И. Богданов, Н.Д. Богданова, Н.В. Разумова, Н.О. Гусейнова // Юг России: экология, развитие. – 2019. – Т. 14. – № 4. – С. 56–77. – URL: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-4-56-77> (дата обращения: 15.01.2025).

96. Рекомендации по выбору методов расчёта коэффициента устойчивости склона и оползневого давления: министерство монтажных и специальных строительных работ УССР УКРГЛАВСПЕЦСТРОЙ УКРСПЕЦСТРОЙПРОЕКТ. Центральное бюро научно-технической информации. – М., 1986.

97. Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития оползней: производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям

в строительстве Госстроя СССР. Государственный институт по проектированию оснований и фундаментов Министерства монтажных и специальных строительных работ СССР. – М., 1969.

98. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов / ПНИИС. – М.: Стройиздат, 1984. – 80 с.

99. Савина, И.В. Анализ влияния природных факторов на изменение параметров прочностных свойств нижнекембрийских глин в Ленинградской области: вып. квалиф. работа 05.04.01 / Савина Ивилина Вячеславовна. – СПб., 2018. – 120 с.

100. Сальников, В.Г. Совершенствование методики выполнения измерений по программе общего створа / В.Г. Сальников // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 66–75. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-2-66-75> (дата обращения: 15.01.2025).

101. Сarezское озеро [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Сarezское_озеро#Усойский_завал (дата обращения: 30.11.2023).

102. Сахаровский, А.В. Определение устойчивости оползневого склона при проектировании моста через р. Пошнарку в Чувашии / А.В. Сахаровский, Л.А. Строкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 125–134. – URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2454> (дата обращения: 15.01.2025).

103. 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> (дата обращения: 15.01.2025).

104. 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> (дата обращения: 15.01.2025).

105. Свод правил. Геодезические работы в строительстве. СНиП 3.01.03-84: (СП 126.13330.2017): издание официальное: утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 октября 2017 г. № 1469/пр: введён в действие с 25.04.18 г. – М., 2017. – 71 с.

106. Свод правил. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве: (СП 305.1325800.2017): утверждён Приказом Министерства

строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 17 октября 2017 г. № 1435/пр: введён в действие с 18 апреля 2018 г. – М.: Стандартиформ, 2017. – 61 с.

107. Свод правил. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003: (СП 116.13330.2012): утверждён Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. № 274 и введён в действие с 1 января 2013 г.: дата введения 2013-01-01. – М., 2018. – 65 с.

108. Свод правил. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов. Правила проектирования: (СП 436.1325800.2018): утверждён Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 5 декабря 2018 г. № 787/пр и введён в действие с 6 июня 2019 г.: дата введения 2019-06-06. – М.: Стандартиформ, 2019. – 50 с.

109. Свод правил. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ: (СП 317.1325800.2017): утверждён Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 22 декабря 2017 г. N 1702/пр и введён в действие с 23 июня 2018 г.: дата введения 2018-06-23. – М.: Стандартиформ, 2018. – 74 с.

110. Свод правил. Инженерно-геодезические изыскания для строительства (СП 11-104-97): одобрен Департаментом развития научно-технической политики и проектно-изыскательских работ Госстроя России (письмо от 14 октября 1997 г. № 9-4/116), принят и введён в действие с 01.01.1998 г. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 76 с.

111. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов. Общие требования: (СП 420.1325800.2018): утверждён Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 21 декабря 2018 г. № 844/пр и введён в действие с 22 июня 2019 г. – М.: Стандартиформ, 2019. – 42 с.

112. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения: (СП 47.13330.2016): утверждён и введён в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 30 декабря 2016 г. N 1033/пр и введён в действие с 1 июля 2017 г.: дата введения 2017-07-01. – М.: Стандартиформ, 2017. – 162 с.

113. Свойства грунтов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sprosigeologa.ru/inzhenernye-izyskaniya/svoystva-gruntov/> (дата обращения: 11.12.2023).

114. Симонян, В.В. Изучение оползневых процессов геодезическими методами [Текст]: Монография / В.В. Симонян. – М.: МГСУ, 2011. – 172 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21413520> (дата обращения: 15.01.2025).
115. Симонян, В.В. Исследование оползневого процесса методом корреляционного анализа с использованием случайных функций // В.В. Симонян, Г.А. Николаева // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12. – № 8 (107). С. 846–853. – URL: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.8.846-853> (дата обращения: 15.01.2025).
116. Симонян, В.В. Методология геодезического обеспечения мониторинга деформационных процессов застроенных склоновых систем: дисс. ... доктора техн. наук. – М.: НИУ МГСУ, 2021. – 340 с.
117. Скрипников, В.А. Опыт применения цифрового нивелира DiNi03 при выполнении повторного высокоточного гидротехнического нивелирования / В.А. Скрипников, М.А. Скрипникова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – № 3. – С. 1–4. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19410633> (дата обращения: 15.01.2025).
118. Смелова, С.С. Геоморфология «Протопоповского» оползня в долине реки Оки (на территории города Коломны Московской области) / С.С. Смелова, Ю.Ю. Захарченко // Экология и строительство. – 2018. – № 4. – С. 11–17. – URL: <https://doi.org/10.24411/2413-8452-2018-10015> (дата обращения: 15.01.2025).
119. Терещенко, В.Е. Сравнение относительных смещений пунктов сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области, полученных с использованием различных онлайн-сервисов обработки спутниковых измерений / В.Е. Терещенко, Е.К. Лагутина // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 76–94. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-2-76-94> (дата обращения: 15.01.2025).
120. Тимофеев, В.Ю. О сравнении результатов определения координат и скоростей смещения пунктов с помощью двухчастотных приёмников космической геодезии / В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков, А.В. Тимофеев, Е.В. Бойко, М.Г. Валитов, Ю.Ф. Стусь, И.С. Сизиков, Д.А. Носов, Е.Н. Калиш // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25. – № 2. – С. 63–77. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-2-63-77> (дата обращения: 15.01.2025).
121. Торгоев, И.А. Система мониторинга оползней в Кыргызстане / И.А. Торгоев // Технологии гражданской безопасности. – 2013. – Т. 10. – № 4. – С. 68–71. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20818869> (дата обращения: 15.01.2025).
122. Уставич, Г.А. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом / Г.А. Уставич, М.Е. Рахымбердина, А.В. Никонов, С.А. Бабасов // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 17–22. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21599992> (дата обращения: 15.01.2025).

123. Уставич, Г.А. Совершенствование методики веерообразного тригонометрического нивелирования / Г.А. Уставич, А.В. Никонов, И.А. Мезенцев, Е.А. Олейникова // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 33–47. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-6-33-47> (дата обращения: 15.01.2025).

124. Уставич, Г.А. Совершенствование программ створных измерений координатным способом / Г.А. Уставич, В.Г. Сальников, В.А. Скрипников, Н.М. Рябова, Е.Л. Соболева // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25. – № 2. – С. 78–97. – URL: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-2-78-97> (дата обращения: 15.01.2025).

125. Учёный назвал оползень под Хабаровском одним из крупнейших в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rg.ru/2018/12/25/reg-dfo/uchenyj-nazval-opolzen-pod-habarovskom-odnim-iz-krupnejshih-v-rossii.html> (дата обращения: 30.11.2023).

126. Федоренко, Е.В. Метод расчёта устойчивости путём снижения прочностных характеристик / Е.В. Федоренко [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dwg.ru/pub/185> (дата обращения: 13.12.2023).

127. Филиппов, В.Г. Оценка точности геодезических методов определения деформаций оползневых склонов / **В.Г. Филиппов**, А.А. Кузин // Перспективы развития горно-металлургической отрасли : Материалы XXIII Всероссийской научно-практической конференции «Игошинские чтения», Иркутск, 30 ноября – 01 декабря 2023 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – С. 103–109. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=60279200> (дата обращения: 15.01.2025).

128. Фисенко, Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов [Текст] / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1965. – 380 с.

129. Хорошилов, В.С. Особенности математического моделирования по геодезическим данным динамики оползней / В.С. Хорошилов, О.Г. Павловская // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – № 7. – С. 1–7. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19410500> (дата обращения: 15.01.2025).

130. Царёва, О.С. Оценка точности определения координат деформационных марок и расстояний между ними / О.С. Царёва // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2019. – № 2. – С. 49–56. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38485699> (дата обращения: 15.01.2025).

131. Цыцорин, И.А. Методы оценки напряжённо-деформированного состояния массива горных пород / И.А. Цыцорин // Малышевские чтения : Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Старый Оскол, 28 марта 2019 года. – Старый Оскол: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2019. – С. 82–87. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39389101> (дата обращения: 15.01.2025).

132. Чалкова, Ю.С. Оползневые процессы, их прогнозирование и борьба с ними / Ю.С. Чалкова, Б.М. Черепанов // Ползуновский вестник. – 2007. – № 1-2. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13028072> (дата обращения: 15.01.2025).

133. Чан Мань Хунг. Геодезические наблюдения за деформациями зданий и сооружений с учётом зон тектонических нарушений: дисс. ... кандидата техн. наук. – СПб.: СПбГУ, 2019. – 109 с.

134. Черноморец, С.С. Численное моделирование катастрофических селей, обвалов и оползней с применением трёхмерной дискретной модели / С.С. Черноморец, В.О. Михайлов // Геориск. – 2012. – № 1. – С. 16–27. – URL: https://www.researchgate.net/publication/294206229_Cislennoe_modelirovanie_katastroficeskih_selej_obvalov_i_opolznei_s_primeneniem_trehmernoj_diskretnoj_modeli (дата обращения: 15.01.2025).

135. Чунуев, И.К. Определение технологических параметров призмы обрушения уступов, отвалов и дорог / И.К. Чунуев, Ю.М. Левкин, Ж. Болотбеков // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 31–41. – URL: <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-31-41> (дата обращения: 15.01.2025).

136. Шабаров, А.Н. Методика маркшейдерско-геодезических наблюдений оползневого процесса 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 (дата обращения: 23.02.2025).

137. Шевченко, Г.Г. Об обработке результатов определения пространственного положения деформационных марок с использованием поискового способа метода наименьших квадратов / Г.Г. Шевченко, Д.А. Гура, Ю.В. Лобанова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2018. – № 4. – С. 653–665. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37156214> (дата обращения: 15.01.2025).

138. Шендрик, Н.К. Об использовании пунктов международной геодинимической сети и системы координат ITRF для геодезического обеспечения территорий / Н.К. Шендрик // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 1. – № 1. – С. 1–7. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17936641> (дата обращения: 15.01.2025).

139. Abad, L. Detecting landslide-dammed lakes on Sentinel-2 imagery and monitoring their spatio-temporal evolution following the Kaikōura earthquake in New Zealand / L. Abad, D. Hölbling, R. Spiekermann, G. Prasicek, Z. Dabiri, A.L. Argentin // Science of The Total Environment. – 2022. – Vol. 820. – pp. 153335. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153335> (дата обращения: 15.01.2025).

140. Acar, M. Deformation analysis with Total Least Squares / M. Acar, M.T. Özlüdemir, O. Akyilmaz, R.N. Çelik, T. Ayan // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2006. – Vol. 6. – № 4. – pp. 663–669. – URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-6-663-2006> (дата обращения: 15.01.2025).
141. Aichinger-Rosenberger, M. MPG-NET: A low-cost, multi-purpose GNSS co-location station network for environmental monitoring / M. Aichinger-Rosenberger, A. Wolf, C. Senn, R. Hohensinn, M.F. Glaner, G. Moeller, B. Soja, M. Rothacher // *Measurement*. – 2023. – Vol. 216. – pp. 112981. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112981> (дата обращения: 15.01.2025).
142. Alevizakou, E.G. A comparative evaluation of various models for prediction of displacements / E.G. Alevizakou, G. Pantazis // *Applied Geomatics*. – 2017. – Vol. 9. – № 2. – pp. 93–103. – URL: <https://doi.org/10.1007/s12518-017-0189-8> (дата обращения: 15.01.2025).
143. Amiri-Simkooei, A. A new method for second order design of geodetic networks: aiming at high reliability / A. Amiri-Simkooei // *Survey Review*. – 2004. – Vol. 37. – № 293. – pp. 552–560. – URL: <https://doi.org/10.1179/sre.2004.37.293.552> (дата обращения: 15.01.2025).
144. Ansys: Engineering Simulation Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com> (дата обращения: 23.01.2025).
145. Artese, S. Monitoring a Landslide with High Accuracy by Total Station: A DTM-Based Model to Correct for the Atmospheric Effects / S. Artese, M. Perrelli // *Geosciences*. – 2018. – Vol. 8. – № 2. – pp. 46. – URL: <https://doi.org/10.3390/geosciences8020046> (дата обращения: 15.01.2025).
146. Bánya, L. Recurrent landsliding of a high bank at Dunaszekcső, Hungary: Geodetic deformation monitoring and finite element modeling / L. Bánya, G. Mentés, G. Újvári, M. Kovács, Z. Czap, K. Gribovszki, G. Papp // *Geomorphology*. – 2014. – Vol. 210. – pp. 1–10. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.11.032> (дата обращения: 15.01.2025).
147. Barla, M. Remote monitoring of the Comba Citrin landslide using discontinuous GBInSAR campaigns / M. Barla, F. Antolini, D. Bertolo, P. Thuegaz, D. D'Aria, G. Amoroso // *Engineering Geology*. – 2017. – Vol. 222. – pp. 111–123. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.019> (дата обращения: 15.01.2025).
148. Baselga, S. Deformation monitoring and the maximum number of stable points method / S. Baselga, L. García-Asenjo, P. Garrigues. // *Measurement*. – 2015. – Vol. 70. – pp. 27–35. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.034> (дата обращения: 15.01.2025).
149. Bayer, B. Using advanced InSAR techniques to monitor landslide deformations induced by tunneling in the Northern Apennines, Italy / B. Bayer, A. Simoni, D. Schmidt, L. Bertello // *Engineering Geology*. – 2017. – Vol. 226. – pp. 20–32. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.026> (дата обращения: 15.01.2025).

150. Benoit, L. Monitoring landslide displacements with the Geocube wireless network of low-cost GPS / L. Benoit, P. Briole, O. Martin, C. Thom, J.P. Malet, P. Ulrich // *Engineering Geology*. – 2015. – Vol. 195. pp. 111–121. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.020> (дата обращения: 15.01.2025).
151. Bovenga, F. Landslide monitoring for risk mitigation by using corner reflector and satellite SAR interferometry: The large landslide of Carlantino (Italy) / F. Bovenga, G. Pasquariello, R. Pellicani, A. Refice, G. Spilotro // *CATENA*. – 2017. – Vol. 151. – pp. 49–62. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.006> (дата обращения: 15.01.2025).
152. Braun, J. Geodetic monitoring methods of landslide-prone regions – application to Rabenov / J. Braun, P. Hájek // *AUC Geographica*. – 2014. – Vol. 49. – № 1. – pp. 5–19. – URL: <https://doi.org/10.14712/23361980.2014.2> (дата обращения: 15.01.2025).
153. Brunner, F.K. On the analysis of geodetic networks for the determination of the incremental strain tensor / F.K. Brunner // *Survey Review*. – 1979. – Vol. 25. – № 192. – pp. 56–67. – URL: <https://doi.org/10.1179/sre.1979.25.192.56> (дата обращения: 15.01.2025).
154. Budetta, P. DinSAR monitoring of the landslide activity affecting a stretch of motorway in the Campania region of Southern Italy / P. Budetta, M. Nappi, S. Santoro, G. Scalese // *Transportation Research Procedia*. – 2020. – Vol. 45. – pp. 285–292. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.018> (дата обращения: 15.01.2025).
155. Cai, J. A new algorithm for landslide dynamic monitoring with high temporal resolution by Kalman filter integration of multiplatform time-series InSAR processing / J. Cai, G. Liu, H. Jia, B. Zhang, R. Wu, Y. Fu, W. Xiang, W. Mao, X. Wang, R. Zhang // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Elsevier. – 2022. – Vol. 110. – pp. 102812. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102812> (дата обращения: 15.01.2025).
156. Carlà, T. Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment / T. Carlà, V. Tofani, L. Lombardi, F. Raspini, S. Bianchini, D. Bertolo, P. Thuegaz, N. Casagli // *Geomorphology*. – 2019. – Vol. 335. – pp. 62–75. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.014> (дата обращения: 15.01.2025).
157. Casagli, N. Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: Examples from the EC-FP7 project SAFER / N. Casagli, F. Cigna, S. Bianchini, D. Hölbling, P. Füreder, G. Righini, S. Del Conte, B. Friedl, S. Schneiderbauer, C. Iasio, J. Vlcko, V. Greif, H. Proske, K. Granica, S. Falco, S. Lozzi, O. Mora, A. Arnaud, F. Novali, M. Bianchi // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. – 2016. – Vol. 4. – pp. 92–108. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.07.001> (дата обращения: 15.01.2025).

158. Chan, L.M. Continuous Deformation Monitoring Using GPS and Robust Method: ISKANDARNET / L.M. Chan, H. Setan, R. Othman // Proceedings of the Joint International Symposium on Deformation Monitoring, 2-4 November, Hong Kong, China. – 2011. – 6 p. – URL: https://www.researchgate.net/publication/351122176_Continuous_Deformation_Monitoring_Using_GPS_and_Robust_Method_ISKANDARNET (дата обращения: 15.01.2025).

159. Cheng, Z. UAV photogrammetry-based remote sensing and preliminary assessment of the behavior of a landslide in Guizhou, China / Z. Cheng, W. Gong, H. Tang, C.H. Juang, Q. Deng, J. Chen, X. Ye // Engineering Geology. – 2021. – Vol. 289. – pp. 106172. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106172> (дата обращения: 15.01.2025).

160. Chen, T.K. Detecting and monitoring long-term landslides in urbanized areas with nighttime light data and multi-seasonal Landsat imagery across Taiwan from 1998 to 2017 / T.K. Chen, A.V. Prishchepov, R. Fensholt, C.E. Sabel // Remote Sensing of Environment. – 2019. – Vol. 225. – pp. 317–327. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.013> (дата обращения: 15.01.2025).

161. Chen, Y.Q. A strategy for the analysis of the stability of reference points in deformation surveys / Y.Q. Chen, A. Chrzanowski, J.M. Secord // CISM journal. – 2019. – Vol. 44. – № 2. – pp. 141–149. – URL: <https://doi.org/10.1139/geomat-1990-0016> (дата обращения: 15.01.2025).

162. Crawford, M.M. Long-term landslide monitoring using soil-water relationships and electrical data to estimate suction stress / M.M. Crawford, L.S. Bryson, E.W. Woolery, Z. Wang // Engineering Geology. – 2019. – Vol. 251. – pp. 146–157. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.02.015> (дата обращения: 15.01.2025).

163. Dabove, P. The usability of GNSS mass-market receivers for cadastral surveys considering RTK and NRTK techniques / P. Dabove // Geodesy and Geodynamics. – 2019. – Vol. 10. – № 4. – pp. 282–289. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.04.006> (дата обращения: 15.01.2025).

164. Dematteis, N. Integration of robotic total station and digital image correlation to assess the three-dimensional surface kinematics of a landslide / N. Dematteis, A. Wrzesniak, P. Allasia, D. Bertolo, D. Giordan // Engineering Geology. – 2022. – Vol. 303. – pp. 106655. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106655> (дата обращения: 15.01.2025).

165. Denli, H.H. Stable point research on deformation networks / H.H. Denli // Survey Review. – 2008. – Vol. 40. – № 307. – pp. 74–82. – URL: <https://doi.org/10.1179/003962608X253501> (дата обращения: 15.01.2025).

166. Dong, J. Improved correction of seasonal tropospheric delay in InSAR observations for landslide deformation monitoring / J. Dong, L. Zhang, M. Liao, J. Gong // Remote Sensing of Environment. – 2019. – Vol. 233. – pp. 111370. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111370> (дата обращения: 15.01.2025).

167. Duchnowski, R. Robustness of Msplit(q) estimation: A theoretical approach / R. Duchnowski, Z. Wiśniewski // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 2019. – Vol. 63. – pp. 390–417. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000144](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000144) (дата обращения: 15.01.2025).
168. Duchnowski, R. Robustness of squared Msplit(q) estimation: Empirical analyses / R. Duchnowski, Z. Wiśniewski // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 2020. – Vol. 64. – pp. 153–171. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11200-019-0356-y> (дата обращения: 15.01.2025).
169. Du, J.C. 3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation / J.C. Du, H.C. Teng // *Automation in Construction*. Elsevier. – 2007. – Vol. 16. – № 5. – pp. 657–663. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.11.002> (дата обращения: 15.01.2025).
170. Elmoulat, M. Edge Computing and Artificial Intelligence for Landslides Monitoring / M. Elmoulat, O. Debauche, S. Mahmoudi, S.A. Mahmoudi, P. Manneback, F. Lebeau. – *Procedia Computer Science*. – 2020. – Vol. 177. – pp. 480–487. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.066> (дата обращения: 15.01.2025).
171. Escayo, J. Geodetic Study of the 2006–2010 Ground Deformation in La Palma (Canary Islands): Observational Results / J. Escayo, J. Fernández, J.F. Prieto, A.G. Camacho, M. Palano, A. Aparicio, G. Rodríguez-Velasco, E. Ancochea // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12. – № 16. – pp. 2566. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs12162566> (дата обращения: 15.01.2025).
172. Eshagh, M. A strategy for optimum designing of the geodetic networks from the cost, reliability and precision views. / M. Eshagh, R. Kiamehr // *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. – 2007. – Vol. 42. – pp. 297–308. – URL: <https://doi.org/10.1556/AGeod.42.2007.3.4> (дата обращения: 15.01.2025).
173. Fang, C. Routing UAVs in landslides Monitoring: A neural network heuristic for team orienteering with mandatory visits / C. Fang, Z. Han, W. Wang, E. Zio // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2023. – Vol. 175. – pp. 103172. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103172> (дата обращения: 15.01.2025).
174. Filipiak-Kowszyk, D. Determination of vertical displacements in relative monitoring networks / D. Filipiak-Kowszyk, W. Kamiński // *Archives of Civil Engineering*. – 2020. – Vol. 66. – № 1. – pp. 309–326. – URL: <https://doi.org/10.24425/ace.2020.131790> (дата обращения: 15.01.2025).
175. Fiolleau, S. Understanding slow-moving landslide triggering processes using low-cost passive seismic and inclinometer monitoring / S. Fiolleau, S. Uhlemann, S. Wielandt, B. Dafflon // *Journal of Applied Geophysics*. – 2023. – Vol. 215. – pp. 105090. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105090> (дата обращения: 15.01.2025).
176. Fustos, I. Rainfall-induced landslide identification using numerical modelling: A southern Chile case / I. Fustos, R. Abarca-del-Río, M. Mardones, L. González, L.R. Araya // *Journal of South*

American Earth Sciences. – 2020. – Vol. 101. – pp. 102587. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102587> (дата обращения: 15.01.2025).

177. Fys, M. Modeling of 3-D objects using geodetic and cartographic data and determining their volumes with an accuracy assessment / M. Fys, M. Yurkiv, V. Lozynskyi // Remote Sensing Applications: Society and Environment. – 2021. – Vol. 22. – pp. 100506. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100506> (дата обращения: 15.01.2025).

178. Ganesh, B. Machine learning based landslide susceptibility mapping models and GB-SAR based landslide deformation monitoring systems: Growth and evolution / B. Ganesh, S. Vincent, S. Pathan, S. Raquel G. Benitez // Remote Sensing Applications: Society and Environment. – 2023. – Vol. 29. – pp. 100905. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100905> (дата обращения: 15.01.2025).

179. Garrido-Carretero, M.S. Low-cost GNSS receiver in RTK positioning under the standard ISO-17123-8: A feasible option in geomatics / M.S. Garrido-Carretero, M.C. de Lacy-Pérez de los Cobos, M.J. Borque-Arancón, A.M. Ruiz-Armenteros, R. Moreno-Guerrero, A.J. Gil-Cruz // Measurement. – 2019. – Vol. 137. – pp. 168–178. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.045> (дата обращения: 15.01.2025).

180. Geostab. Расчёт устойчивости склонов и откосов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://malininsoft.ru/GeoStab> (дата обращения: 12.10.2023) (дата обращения: 15.01.2025).

181. GEO5: программы для геотехнических расчётов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.finesoftware.ru/geotekhnicheskikh-raschetov/> (дата обращения: 10.12.2023).

182. Gigli, G. A method for full three-dimensional kinematic analysis of steep rock walls based on high-resolution point cloud data / G. Gigli, L. Lombardi, T. Carlà, T. Beni, N. Casagli // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Pergamon. – 2022. – Vol. 157. – pp. 105178. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105178> (дата обращения: 15.01.2025).

183. Girishbai, D. An integrated approach on satellite geodesy data to delineate morphotectonic and neotectonic activities in the West Coast off Kerala, Southern India / D. Girishbai. A. Bhadrar // Russian Journal of Earth Sciences. – 2018. – Vol. 18. – № ES2003. – URL: <https://doi.org/10.2205/2018ES000617> (дата обращения: 15.01.2025).

184. Grundig, L. Detection and localization of geometrical movements / L. Grundig, M. Neureither, J. Bahndorf // Journal of Surveying Engineering. – 1985. – Vol. 111. – № 2. – pp. 118–132. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(1985\)111:2\(118\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(1985)111:2(118)) (дата обращения: 15.01.2025).

185. Guedes, V. Influence of rainfall in a short-term seismic velocity monitoring at an urban landslide site in Minas Gerais, Brazil / V. Guedes, G. Prosdocimi, F.J. Miranda, S. Maciel, M.P. Rocha

// Journal of Applied Geophysics. – 2023. – Vol. 214. – pp. 105071. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105071> (дата обращения: 15.01.2025).

186. Gümüş, K. Evaluation of NRTK GNSS positioning methods for displacement detection by a newly designed displacement monitoring system / K. Gümüş, M.O. Selbesoğlu // Measurement. – 2019. – Vol. 142. – pp. 131–137. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.041> (дата обращения: 15.01.2025).

187. Han, W. Research on the Influence of Atmospheric Vertical Refraction on Trigonometric Leveling Survey in Qinling Mountains / W. Han, S. Han // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 826. – pp. 012039. – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/826/1/012039> (дата обращения: 15.01.2025).

188. Hastaoğlu, K.Ö. Monitoring 3D areal displacements by a new methodology and software using UAV photogrammetry / K.Ö. Hastaoğlu, Y. Gül, F. Poyraz, B.C. Kara // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2019. – Vol. 83. – pp. 101916. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101916> (дата обращения: 15.01.2025).

189. Havenith, H.B. Landslides in the Mailuu-Suu Valley, Kyrgyzstan – Hazards and Impacts / H.B. Havenith, I. Torgoev, A. Meleshko, Y. Alioshin, A. Torgoev, G. Danneels // Landslides. – 2006. – Vol. 3. – pp. 137–147. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0035-2> (дата обращения: 15.01.2025).

190. Hekimoglu, S. Detecting Configuration Weaknesses in Geodetic Networks / S. Hekimoglu, R.C. Erenoglu, D.U. Sanli, B. Erdogan // Survey Review. – 2011. – Vol. 43. – № 323. – pp. 713–730. – URL: <https://doi.org/10.1179/003962611X13117748892632> (дата обращения: 15.01.2025).

191. Hekimoglu, S. New Median Approach to Define Configuration Weakness of Deformation Networks / S. Hekimoglu, B. Erdogan // Journal of Surveying Engineering. – 2012. – Vol. 138. – № 3. – pp. 101–108. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000008](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000008) (дата обращения: 15.01.2025).

192. Herrera, G. Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees) / G. Herrera, F. Gutiérrez, J.C. García-Davalillo, J. Guerrero, D. Notti, J.P. Galve, J.A. Fernández-Merodo, G. Cooksley // Remote Sensing of Environment. – 2013. – Vol. 128. – pp. 31–43. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.020> (дата обращения: 15.01.2025).

193. Hu, X. Internal kinematics of the Slumgullion landslide (USA) from high-resolution UAVSAR InSAR data / X. Hu, R. Bürgmann, E.J. Fielding, H. Lee // Remote Sensing of Environment. – 2020. – Vol. 251. – pp. 112057. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112057> (дата обращения: 15.01.2025).

194. Intrieri, E. Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: A literature review / E. Intrieri, T. Carlà, G. Gigli // *Earth-Science Reviews*/ – 2019. – Vol. 193. – pp. 333–349. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.019> (дата обращения: 15.01.2025).
195. Ivandro, K. A new relationship between the quality criteria for geodetic networks / K. Ivandro, M.T. Matsuoka, M.P. Guzzato, F.G. Nievinski, M.R. Veronez, V.F. Rofatto // *Journal of Geodesy*. – 2019. – Vol. 93. – № 4. – pp. 529-544. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1181-8> (дата обращения: 15.01.2025).
196. Jabrane, O. Contribution of Python-based BERT software for landslide monitoring using Electrical Resistivity Tomography datasets. A case study in Tghat-Fez (Morocco) / O. Jabrane, D.E. Azzab, P. Martínez-Pagán, M.A. Martínez-Segura, H. Mahjoub, M. Charroud // *Data in Brief*. – 2023. – Vol. 46. – pp. 108763. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108763> (дата обращения: 15.01.2025).
197. Janicka, J. Application of the Msplit Estimation Method in the Detection and Dimensioning of the Displacement of Adjacent Planes / J. Janicka, J. Rapiński, W. Błaszczak-Bąk, C. Suchocki // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12. – № 19. – pp. 3203. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs12193203> (дата обращения: 15.01.2025).
198. Janos, D. Evaluation of low-cost RTK GNSS receiver in motion under demanding conditions / D. Janos, P. Kuras, Ł. Ortyl // *Measurement*. – 2022. – Vol. 201. – pp. 111647. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111647> (дата обращения: 15.01.2025).
199. Javadi, P. Detecting the Unstable Points in Deformation Monitoring Geodetic Networks in Analysis Method of Subnetwork / P. Javadi // *Modern Applied Science*. – 2017. – Vol. 11. – № 3. – pp. 61–75. – URL: <https://doi.org/10.5539/mas.v11n3p61> (дата обращения: 15.01.2025).
200. Jia, D. Vertical and horizontal displacements of a reservoir slope due to slope aging effect, rainfall, and reservoir water / D. Jia, Y. Zhou, X. He, N. Xu, Z. Yang, M. Song // *Geodesy and Geodynamics*. – 2021. – Vol. 12. – № 4. – pp. 266–278. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.06.004> (дата обращения: 15.01.2025).
201. Kaczor, P. The analysis of atmospheric factors affecting the value of vertical refraction angle with the assessment of the importance of introduction of the atmospheric amendment / P. Kaczor // *E3S Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 71. – pp. 00019. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187100019> (дата обращения: 15.01.2025).
202. Kang, Y. InSAR monitoring of creeping landslides in mountainous regions: A case study in Eldorado National Forest, California / Y. Kang, Z. Lu, C. Zhao, Y. Xu, J. Kim, A.J. Gallegos // *Remote Sensing of Environment*. – 2021. – Vol. 258. – pp. 112400. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112400> (дата обращения: 15.01.2025).

203. Klein, I. On evaluation of different methods for quality control of correlated observations / I. Klein, M.T. Matsuoka, M.P. Guzzatto, S.F. de Souza, M.R. Veronez // *Survey Review*. – 2015. – Vol. 47. – № 340. – pp. 28–35. – URL: <https://doi.org/10.1179/1752270614Y.00000000089> (дата обращения: 15.01.2025).
204. Kluga, A. Multiple Frequencies Precise GNSS RTK System Research in Dynamic Mode / A. Kluga, J. Kluga, A. Bricis, I. Mitrofanovs // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2013. – Vol. 46. – № 28. – pp. 95–98. – URL: <https://doi.org/10.3182/20130925-3-CZ-3023.00029> (дата обращения: 15.01.2025).
205. Kobryń, A. Modelling of the refraction in trigonometric levelling using polynomial transition curves / A. Kobryń // *Measurement*. – 2021. – Vol. 181. – pp. 109392. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109392> (дата обращения: 15.01.2025).
206. Kohler, M. Case study of an active landslide at the flank of a water reservoir and its response during earthquakes / M. Kohler, D. Hodel, L. Keller, A. Molinari, A.M. Puzrin // *Engineering Geology*. – 2023. – Vol. 323. – pp. 107243. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107243> (дата обращения: 15.01.2025).
207. Kontogianni, V. Monitoring with Electronic Total Stations: Performance and Accuracy of Prismatic and Non-Prismatic Reflectors / V. Kontogianni, S. Kornarou, S. Stiros // *Geotechnical Instrumentation News*. – Vol. 50. – pp. 30–33. – URL: https://www.researchgate.net/publication/289036995_Monitoring_with_electronic_total_stations_Performance_and_accuracy_of_prismatic_and_non-prismatic_reflectors (дата обращения: 15.01.2025).
208. Kovačič, B. Applicability and Analysis of the Results of Non-Contact Methods in Determining the Vertical Displacements of Timber Beams / B. Kovačič, L. Štraus, M. Držeknik, Z. Pučko // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. – № 19. – p. 8936. – URL: <https://doi.org/10.3390/app11198936> (дата обращения: 15.01.2025).
209. Krasnoperov, R. Earth crust motion and deformation analysis based on space geodesy methods / R. Krasnoperov // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2009. – № 1. – pp. 1–3. – URL: <https://doi.org/10.2205/2009ES000394> (дата обращения: 15.01.2025).
210. Kumar Thakur, M. Exploring the rainfall data from satellites to monitor rainfall induced landslides – A case study / M. Kumar Thakur, S. Desamsetti, A.N. Rajesh, K.K. Rao, M.S. Narayanan, T.V. Kumar // *Advances in Space Research*. – 2020. – Vol. 66. – № 4. – pp. 887–894. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.015> (дата обращения: 15.01.2025).
211. Kuras, P. The geodetic detection of the variable load impact on the earth-filled structure / P. Kuras, Ł. Ortyl, T. Owerko, A. Borecka // *Applied Geomatics*. – 2021. – Vol. 13. – № 1. – pp. 19–35. – URL: <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00324-5> (дата обращения: 15.01.2025).

212. Kuzin, A.A. Coordinate method for determining position in geodetic monitoring of cracks / A.A. Kuzin, P.O. Palkin / *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1728. – № 1. – pp. 012010. – URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1728/1/012010> (дата обращения: 15.01.2025).

213. Le Breton, M. Landslide monitoring using seismic ambient noise correlation: challenges and applications / M. Le Breton, N. Bontemps, A. Guillemot, L. Baillet, É Larose // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – Vol. 216. – pp. 103518. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103518> (дата обращения: 15.01.2025).

214. Lehmann, R. Congruence analysis of geodetic networks – hypothesis tests versus model selection by information criteria / R. Lehmann, M. Lösler // *Journal of Applied Geodesy*. – 2017. – Vol. 11. – № 4. – pp. 271–283. – URL: <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0049> (дата обращения: 15.01.2025).

215. Lehmann, R. On the formulation of the alternative hypothesis for geodetic outlier detection / R. Lehmann // *Journal of Geodesy*. – 2013. – Vol. 87. – pp. 373–386. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0607-y> (дата обращения: 15.01.2025).

216. Li, B. Monitoring and analysis of Woda landslide (China) using InSAR and Sentinel-1 data / B. Li, W. Jiang, Y. Li, Y. Luo, Q. Jiao, Q. Zhang // *Advances in Space Research*. – 2023. – Vol. 72. – № 5. – pp. 1789–1802. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.04.055> (дата обращения: 15.01.2025).

217. Liu, X. Three-dimensional and long-term landslide displacement estimation by fusing C- and L-band SAR observations: A case study in Gongjue County, Tibet, China / X. Liu, C. Zhao, Q. Zhang, Y. Yin, Z. Lu, S. Samsonov, C. Yang, M. Wang, R. Tomás // *Remote Sensing of Environment*. – 2021. – Vol. 267. – pp. 112745. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112745> (дата обращения: 15.01.2025).

218. Liu, Z. Monitoring landslide associated with reservoir impoundment using synthetic aperture radar interferometry: A case study of the Yalong reservoir / Z. Liu, B. Xu, Q. Wang, W. Yu, Z. Miao // *Geodesy and Geodynamics*. – 2022. – Vol. 13. – № 2. – pp. 138–150. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.12.001> (дата обращения: 15.01.2025).

219. Lobanowa, Y. Determining the Refraction Coefficient Based on the Differences of the Measured and Known Zenith Distances in Short-Distance Trigonometric Leveling / Y. Lobanowa, M. Bryn, E. Svintsov // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*. – 2020. – Vol. 2. – pp. 209–214. – URL: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_22 (дата обращения: 15.01.2025).

220. Lobkovsky, L.I. Numerical simulation of the 7 February 1963 tsunami in the Bay of Corinth, Greece / L.I. Lobkovsky, R.Kh. Mazova, I.A. Garagash, L.Yu. Kataeva // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2006. – Vol. 8. – pp. ES5003. – URL: <https://doi.org/10.2205/2006ES000210> (дата обращения: 15.01.2025).

221. Lowry, B. High resolution displacement monitoring of a slow velocity landslide using ground based radar interferometry / B. Lowry, F. Gomez, W. Zhou, M.A. Mooney, B. Held, J. Grasmick // *Engineering Geology*. – 2013. – Vol. 166. – № 8. – pp. 160–169. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.07.007> (дата обращения: 15.01.2025).

222. Lubej, S. A Comparative Study of Signal Processing Methods for Contactless Geodetic Monitoring / S. Lubej, B. Kovačič // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. – № 23. – pp. 11276. – URL: <https://doi.org/10.3390/app112311276> (дата обращения: 15.01.2025).

223. Li, L. On low-cost GNSS observables under different grades of antennas: Receiver-related biases and RTK results / L. Li, Y. Yuan, P. Zhang // *Measurement*. – 2023. – Vol. 214. – pp. 112771. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112771> (дата обращения: 15.01.2025).

224. Magalhães Valente, D.S. Accuracy and precision evaluation of two low-cost RTK global navigation satellite systems / D.S. Magalhães Valente, A. Momin, T. Grift, A. Hansen // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2020. – Vol. 168. – pp. 105142. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105142> (дата обращения: 15.01.2025).

225. Manconi, A. How phase aliasing limits systematic space-borne DInSAR monitoring and failure forecast of alpine landslides / A. Manconi // *Engineering Geology*. – 2021. – Vol. 287. – pp. 106094. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106094> (дата обращения: 15.01.2025).

226. Mantovani, M. Coupling long-term GNSS monitoring and numerical modelling of lateral spreading for hazard assessment purposes / M. Mantovani, G. Bossi, A.P. Dykes, A. Pasuto, M. Soldati, S. Devoto // *Engineering Geology*. Elsevier. – 2022. – Vol. 296. – pp. 106466. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106466> (дата обращения: 15.01.2025).

227. Matsuoka, M.T. Control Points Selection Based on Maximum External Reliability for Designing Geodetic Networks / M.T. Matsuoka, V.F. Rofatto, I. Klein, M.R. Veronez, L.G. da Silveira Jr., J.B. da Silva Neto, A.C. Ramos Alves // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10. – № 2. – pp. 687. – URL: <https://doi.org/10.3390/app10020687> (дата обращения: 15.01.2025).

228. Mayr, A. 3D point errors and change detection accuracy of unmanned aerial vehicle laser scanning data / A. Mayr, M. Bremer, M. Rutzinger // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2020. – Vol. V-2-2020. – pp. 765–772. – URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-765-2020> (дата обращения: 15.01.2025).

229. Mittermayer, E. A generalisation of the least-squares method for the adjustment of free networks / E. Mittermayer // *Bulletin Geodesique*. – 1972. – Vol. 104. – pp. 139–157. – URL: <https://doi.org/10.1007/BF02530298> (дата обращения: 15.01.2025).

230. Mondini, A.C. Landslide failures detection and mapping using Synthetic Aperture Radar: Past, present and future / A.C. Mondini, F. Guzzetti, K.T. Chang, O. Monserrat, T.R. Martha,

A. Manconi // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – Vol. 216. – pp. 103574. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103574> (дата обращения: 15.01.2025).

231. Murray, J.B. Basement sliding and the formation of fault systems on Mt. Etna volcano / J.B. Murray, B. van Wyk de Vries // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2022. – Vol. 428. – pp. 107573. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107573> (дата обращения: 15.01.2025).

232. Nappo, N. Slow-moving landslides interacting with the road network: Analysis of damage using ancillary data, in situ surveys and multi-source monitoring data / N. Nappo, D. Peduto, O. Mavrouli, C.J. van Westen, G. Gullà // *Engineering Geology*. – 2019. – Vol. 260. – pp. 105244. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105244> (дата обращения: 15.01.2025).

233. Nikulishyn, V. Applying of geodetic methods for monitoring the effects of waste-slide at Lviv municipal solid waste landfill / V. Nikulishyn, I. Savchyn, O. Lompas, V. Lozynskyi // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. Elsevier. – 2020. – Vol. 13. – pp. 100291. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100291> (дата обращения: 15.01.2025).

234. Nowel, K. Robust M-Estimation in Analysis of Control Network Deformations: Classical and New Method / K. Nowel // *Journal of Surveying Engineering*. – 2015. – Vol. 141. – № 4. – pp. 04015002. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000144](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000144) (дата обращения: 15.01.2025).

235. Odziemczyk, W. Application of Optimization Algorithms for Identification of Reference Points in a Monitoring Network / W. Odziemczyk // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – № 5. – pp. 1739. – URL: <https://doi.org/10.3390/s21051739> (дата обращения: 15.01.2025).

236. Osipov, V.I. Living with risk of natural disasters / V.I. Osipov, N.A. Rumyantseva, O.N. Eremina // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 19. – pp. ES6011. – URL: <https://doi.org/10.2205/2019ES000673> (дата обращения: 15.01.2025).

237. Owczarz, K. A review of geodetic and remote sensing methods used for detecting surface displacements caused by mining / K. Owczarz // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Vol. 609. – № 1. – pp. 012076. – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012076> (дата обращения: 15.01.2025).

238. Perelmutter, A. Adjustment of free networks / A. Perelmutter // *Bulletin Géodésique*. – 1979. – Vol. 53. – pp. 291–295. – URL: <https://doi.org/10.1007/BF02522272> (дата обращения: 15.01.2025).

239. Plaxis: геотехнические решения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.plaxis.ru> (дата обращения: 12.10.2023).

240. Postek, P. New Computer Simulation Method for First-Order Design of Geodetic Network: Aiming for Low Cost / P. Postek // *Journal of Surveying Engineering*. – 2021. – Vol. 147. – № 1. – pp.

04020020. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000334](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000334) (дата обращения: 15.01.2025).

241. Přecechtělová, H. Tree ring based estimation of landslide block displacement: Evaluation of a new experimental approach / H. Přecechtělová, K. Šilhán // *Geomorphology*. – 2019. – Vol. 339. – pp. 104–113. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.031> (дата обращения: 15.01.2025).

242. Prószyński, W. Analytic tools for investigating the structure of network reliability measures with regard to observation correlations / W. Prószyński, M. Kwaśniak // *Journal of Geodesy*. – 2018. – Vol. 92. – pp. 321–332. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1064-4> (дата обращения: 15.01.2025).

243. Reiterer, A. A 3D optical deformation measurement system supported by knowledge-based and learning techniques / A. Reiterer, M. Lehmann, M. Miljanovic, H. Ali, G. Paar, U. Egly, T. Eiter, H. Kahmen // *Journal of Applied Geodesy*. – 2009. – Vol. 3. – № 1. – pp. 1–13. – URL: <https://doi.org/10.1515/JAG.2009.001> (дата обращения: 15.01.2025).

244. Rofatto, V.F. Design of geodetic networks based on outlier identification criteria: an example applied to the leveling network / V.F. Rofatto, M.T. Matsuoka, I. Klein // *Bulletin of Geodetic Sciences*. – 2018. – Vol. 24. – № 2. – pp. 152–170. – URL: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702018000200011> (дата обращения: 15.01.2025).

245. Rogozhin, E.A. A strong earthquake of 2003 in Gornyi Altai / E.A. Rogozhin, A.N. Ovsyuchenko, A.R. Geodakov, S.G. Platonova // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2003. – № 6. – pp. 439–454. – URL: <https://doi.org/10.2205/2003ES000141> (дата обращения: 15.01.2025).

246. Saadati, S. Geodetic calibration network for total stations and GNSS receivers in sub-kilometer distances with sub-millimeter precision / S. Saadati, M. Abbasi, S. Abbasy, A. Amiri-Simkooei // *Measurement*. – 2019. – Vol. 141. – pp. 258–266. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.044> (дата обращения: 15.01.2025).

247. Sarychikhina, O. Application of satellite SAR interferometry for the detection and monitoring of landslides along the Tijuana - Ensenada Scenic Highway, Baja California, Mexico / O. Sarychikhina, D.G. Palacios, L.A. Delgado-Argote, A.G. Ortega // *J South Am Earth Sci. Pergamon*. – 2021. – Vol. 107. – pp. 103030. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103030> (дата обращения: 15.01.2025).

248. Seemkooei, A.A. Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks / A.A. Seemkooei // *Journal of Geodesy*. – 2001. – Vol. 75. – pp. 227–233. – URL: <https://doi.org/10.1007/s001900100170> (дата обращения: 15.01.2025).

249. Seemkooei, A.A. Strategy for Designing Geodetic Network with High Reliability and Geometrical Strength / A.A. Seemkooei // *Journal of Surveying Engineering*. – 2001. – Vol. 127. – №

3. – pp. 104–117. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2001\)127:3\(104\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2001)127:3(104)) (дата обращения: 15.01.2025).

250. Shen, N. Displacement detection based on Bayesian inference from GNSS kinematic positioning for deformation monitoring / N. Shen, L. Chen, R. Chen // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2022. – Vol. 167(B). – pp. 108570. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108570> (дата обращения: 15.01.2025).

251. Shen, Y. Inversion Method of Atmospheric Refraction Coefficient based on Trigonometric Leveling Network / Y. Shen, T. Huang, X. Guo, Q. Zang, M. Herrero-Huerta // *Journal of Surveying Engineering*. – 2016. – Vol. 143. – № 1. – pp. 06016002. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000199](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000199) (дата обращения: 15.01.2025).

252. Shu, B. Real-time high-precision landslide displacement monitoring based on a GNSS CORS network / B. Shu, Y. He, L. Wang, Q. Zhang, X. Li, X. Qu, G. Huang, W. Qu // *Measurement*. – 2023. – Vol. 217. – pp. 113056. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113056> (дата обращения: 15.01.2025).

253. Šilhán, K. Anatomical growth response of *Fagus sylvatica* L. to landslide movements / K. Šilhán, J. Balek, F. Hartvich, J. Klimeš, J. Blahůt, F. Hampel // *Science of The Total Environment*. – 2023. – Vol. 867. – pp. 161554. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161554> (дата обращения: 15.01.2025).

254. Simeoni, L. Redundancy and coherence of multi-method displacement monitoring data as key issues for the analysis of extremely slow landslides (Isarco valley, Eastern Alps, Italy) / L. Simeoni, F. Ronchetti, C. Costa, P. Joris, A. Corsini // *Engineering Geology*. – 2020. – Vol. 267. – pp. 105504. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105504> (дата обращения: 15.01.2025).

255. Stemberk, J. Strain monitoring of active faults in the central Apennines (Italy) during the period 2002–2017 / J. Stemberk, G. Dal Moro, J. Stemberk, J. Blahůt, M. Coubal, B. Košťák, M. Zambrano, E. Tondi // *Tectonophysics*. – 2019. – Vol. 750. – pp. 22–35. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.033> (дата обращения: 15.01.2025).

256. Sun, Q.C. Pursuing Precise Vehicle Movement Trajectory in Urban Residential Area Using Multi-GNSS RTK Tracking / Q.C. Sun, J.C. Xia, J. Foster, T. Falkmer, H. Lee // *Transportation Research Procedia*. – 2017. – Vol. 25. – pp. 2356–2372. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.255> (дата обращения: 15.01.2025).

257. Susic, Z. Geometric deformation analysis in free geodetic networks: case study for Fruska Gora in Serbia / Z. Susic, M. Batilovic, T. Ninkov, V. Bulatovic, I. Aleksic, G. Nikolic // *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. – 2017. – Vol. 14. – № 3. – pp. 187. – URL: <https://doi.org/10.13168/AGG.2017.0017> (дата обращения: 15.01.2025).

258. Tatevian, S.K. Studies of the Earth's center of mass periodical movements / S.K. Tatevian, S.P. Kuzin // Russian Journal of Earth Sciences. – 2009. – Vol. 11. – pp. ES1009. – URL: <https://doi.org/10.2205/2009ES000361> (дата обращения: 15.01.2025).
259. Tatevian, S. On the role of space geodetic measurements for global changes monitoring / S. Tatevian, A. Kluykov, S. Kuzin // Russian Journal of Earth Sciences. – 2012. – Vol. 12. – pp. ES3002. – URL: <https://doi.org/10.2205/2012ES000511> (дата обращения: 15.01.2025).
260. Teo, T.A. Comparison between image- and surface-derived displacement fields for landslide monitoring using an unmanned aerial vehicle / T.A. Teo, Y.J. Fu, K.W. Li, M.C. Weng, C.M. Yang // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2023. – Vol. 116. – pp. 103164. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103164> (дата обращения: 15.01.2025).
261. Tian, X. Monitoring and reinforcement of landslide induced by tunnel excavation: A case study from Xiamaixi tunnel / X. Tian, Z. Song, Y. Zhang // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2021. – Vol. 110. – pp. 103796. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103796> (дата обращения: 15.01.2025).
262. Tseng, C.H. Deformation of landslide revealed by long-term surficial monitoring: A case study of slow movement of a dip slope in northern Taiwan / C.H. Tseng, Y.C. Chan, C.J. Jeng, R.J. Rau, Y.C. Hsieh // Engineering Geology. – 2021. – Vol. 284. – pp. 106020. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106020> (дата обращения: 15.01.2025).
263. Uhlemann, S. Assessment of ground-based monitoring techniques applied to landslide investigations / S. Uhlemann, A. Smith, J. Chambers, N. Dixon, T. Dijkstra, E. Haslam, P. Meldrum, A. Merritt, D. Gunn, J. Mackay // Geomorphology. – 2016. – Vol. 253. – pp. 438–451. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.027> (дата обращения: 15.01.2025).
264. Van Khoa, V. Wireless sensor network in landslide monitoring system with remote data management / V. Van Khoa, S. Takayama // Measurement. – 2018. – Vol. 118. – pp. 214–229. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.002> (дата обращения: 15.01.2025).
265. Vivat, A. A study of devices used for geometric parameter measurement of engineering building construction / A. Vivat, A. Tserklevych, O.M. Smirnova // ISTCGCAP. – 2018. – Vol. 87. – № 87. – pp. 21–29. – URL: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2018.01.021> (дата обращения: 15.01.2025).
266. Vystrechil, M.G. Quality analysis of digital photogrammetric models obtained in low light conditions / M.G. Vystrechil, A.K. Sukhov, S.U. Novozhenin, A.V. Popov, S.A. Guba // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1661. – pp. 012089. – URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012089> (дата обращения: 15.01.2025).
267. Vystrechil, M. Quality analysis of voxel models obtained with remote sensing / M. Vystrechil, A. Sukhov, A. Rybakov, M. Chura, G. Artemova // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 378. – pp. 04002. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337804002> (дата обращения: 15.01.2025).

268. Wang, L. Automatic Deformation Extraction Method of Buildings in Mining Areas Based on TLS Point Clouds / L. Wang, J. Li, C. Jiang, J. Huang // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 10. – pp. 127817–127824. – URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3138081> (дата обращения: 15.01.2025).
269. Wang, P. Performance evaluation of a real-time high-precision landslide displacement detection algorithm based on GNSS virtual reference station technology / P. Wang, H. Liu, G. Nie, Z. Yang, J. Wu, C. Qian, B. Shu // *Measurement*. – 2022. – Vol. 199. – pp. 111457. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111457> (дата обращения: 15.01.2025).
270. Wang, S. Three-dimensional information extraction from GaoFen-1 satellite images for landslide monitoring / S. Wang, B. Yang, Y. Zhou, F. Wang, R. Zhang, Q. Zhao // *Geomorphology*. – 2018. – Vol. 309. – pp. 77–85. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.027> (дата обращения: 15.01.2025).
271. Wang, Y. Refined InSAR tropospheric delay correction for wide-area landslide identification and monitoring / Y. Wang, J. Dong, L. Zhang, L. Zhang, S. Deng, G. Zhang, M. Liao, J. Gong // *Remote Sensing of Environment*. – 2022. – Vol. 275. – pp. 113013. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113013> (дата обращения: 15.01.2025).
272. Whiteley, J.S. Landslide monitoring using seismic refraction tomography – The importance of incorporating topographic variations / J.S. Whiteley, J.E. Chambers, S. Uhlemann, J. Boyd, M.O. Cimpoiasu, J.L. Holmes, C.M. Inauen, A. Watlet, L.R. Hawley-Sibbett, C. Sujitapan, R.T. Swift, J.M. Kendall // *Engineering Geology*. – 2020. – Vol. 268. – pp. 105525. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105525> (дата обращения: 15.01.2025).
273. Whiteley, J.S. Rapid characterisation of landslide heterogeneity using unsupervised classification of electrical resistivity and seismic refraction surveys / J.S. Whiteley, A. Watlet, S. Uhlemann, P. Wilkinson, J.P. Boyd, C. Jordan, J.M. Kendall, J.E. Chambers // *Engineering Geology*. – 2021. – Vol. 290. – pp. 106189. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106189> (дата обращения: 15.01.2025).
274. Wisniewski, Z. Estimation and Prediction of Vertical Deformations of Random Surfaces, Applying the Total Least Squares Collocation Method / Z. Wisniewski, W. Kaminski // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – № 14. – pp. 3913. – URL: <https://doi.org/10.3390/s20143913> (дата обращения: 15.01.2025).
275. Wistuba, M. Establishing regimes of landslide activity – Analysis of landslide triggers over the previous seven decades (Western Carpathians, Poland) / M. Wistuba, I. Malik, E. Gorczyca, A. Ślęzak // *Catena* (Amst). Elsevier. – 2021. – Vol. 196. – pp. 104888. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104888> (дата обращения: 15.01.2025).

276. Wu, W. Derivation of high-quality three-dimensional surface deformation velocities through multi-source point cloud fusion: Application to Kīlauea volcano / W. Wu, J. Hu, J. Liu, Z. Li, J. Zhu, B. Xu, W. Zheng, X. Zhang // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Elsevier. – 2021. – Vol. 95. – pp. 102270. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102270> (дата обращения: 15.01.2025).

277. Xiao, J. Analysis and application of automatic deformation monitoring data for buildings and structures of mining area / J. Xiao, J. Zhang. // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2011. – Vol. 21. – pp. 516–522. – URL: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61634-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61634-3) (дата обращения: 15.01.2025).

278. Xie, M. Landslide evolution assessment based on InSAR and real-time monitoring of a large reactivated landslide, Wenchuan, China / M. Xie, W. Zhao, N. Ju, C. He, H. Huang, Q. Cui // *Engineering Geology*. – 2020. – Vol. 277. – pp. 105781. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105781> (дата обращения: 15.01.2025).

279. Xin, W. Landslide surface horizontal displacement monitoring based on image recognition technology and computer vision / W. Xin, C. Pu, W. Liu, K. Liu // *Geomorphology*. – 2023. – Vol. 431. – pp. 108691. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108691> (дата обращения: 15.01.2025).

280. Xue, C. Feasibility analysis of the performance of low-cost GNSS receivers in monitoring dynamic motion / C. Xue, P.A. Psimoulis, X. Meng // *Measurement*. – 2022. – Vol. 202. – pp. 111819. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111819> (дата обращения: 15.01.2025).

281. Xue, C. Monitoring the dynamic response of a pedestrian bridge by using low-cost GNSS receivers / C. Xue, P.A. Psimoulis // *Engineering Structures*. – 2023. – Vol. 284. – pp. 115993. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115993> (дата обращения: 15.01.2025).

282. Xu, Y. A non-contact vision-based system for multipoint displacement monitoring in a cable-stayed footbridge / Y. Xu, J. Brownjohn, D. Kong // *Structural Control and Health Monitoring*. – 2018. – Vol. 25. – № 5. – pp. e2155. – URL: <https://doi.org/10.1002/stc.2155> (дата обращения: 15.01.2025).

283. Xu, Y. Approach to Minimizing the Influence of Changeable Observational Environment on Long-Distance Sea-Crossing Trigonometric Leveling / Y. Xu, Y. Chen, X. Guan, J. Zhou // *Journal of Surveying Engineering*. – 2020. – Vol. 146. – № 4. – pp. 04020018. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000329](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000329) (дата обращения: 15.01.2025).

284. Yalçinkaya, M. Comparison of static, kinematic and dynamic geodetic deformation models for Kutlugün landslide in Northeastern Turkey / M. Yalçinkaya, T. Bayrak // *Natural Hazards*. – 2005. – Vol. 34. – № 1. – pp. 91–110. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11069-004-1967-2> (дата обращения: 15.01.2025).

285. Yang, C. A graph deep learning method for landslide displacement prediction based on global navigation satellite system positioning / C. Yang, Y. Yin, J. Zhang, P. Ding, J. Liu // *Geoscience Frontiers*. – 2024. – Vol. 15. – № 1. – pp. 101690. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101690> (дата обращения: 15.01.2025).
286. Yang, D. Precise levelling in crossing river over 5 km using total station and GNSS / D. Yang, J. Zou // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – pp. 7492. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86929-1> (дата обращения: 15.01.2025).
287. Yang, Z. Analogue study on the classification and identification of landslide dynamics based on spectral features of slidequake signals / Z. Yang, D. Li, G. Liu, B. Pang, W. Dong // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* – 2023. – Vol. 173. – pp. 108150. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108150> (дата обращения: 15.01.2025).
288. Yu, J. Identification of dynamic displacements and modal frequencies of a medium-span suspension bridge using multimode GNSS processing / J. Yu, X. Meng, X. Shao, B. Yan, L. Yang // *Engineering Structures*. – 2014. – Vol. 81. – pp. 432–443. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.010> (дата обращения: 15.01.2025).
289. Yu, J.J. Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models / J.J. Yu, D.W. Kim, E.J. Lee, S.W. Son // *Drones*. – 2020. – Vol. 4. – № 3. pp. 49. – URL: <https://doi.org/10.3390/drones4030049> (дата обращения: 15.01.2025).
290. Zhang, Y. The Current Crustal Vertical Deformation Features of the Sichuan–Yunnan Region Constrained by Fusing the Leveling Data with the GNSS Data / Y. Zhang, C. Xu, Z. Zheng, H. Liang, S. Zhu // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14. – № 5. – pp. 1139. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs14051139> (дата обращения: 15.01.2025).
291. Zhu, W. Landslide monitoring by combining of CR-InSAR and GPS techniques / W. Zhu, Q. Zhang, X. Ding, C. Zhao, C. Yang, F. Qu, W. Qu // *Advances in Space Research*. – 2014. – Vol. 53. – № 3. – pp. 430–439. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.003> (дата обращения: 15.01.2025).
292. Zou, J. Mobile precise trigonometric levelling system based on land vehicle: an alternative method for precise levelling / J. Zou, Y. Zhu, Y. Xu, Q. Li, L. Meng, H. Li // *Survey Review*. – 2017. – Vol. 49. – № 355. – pp. 249–258. – URL: <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1163877> (дата обращения: 15.01.2025).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «БЕНТА»



190000, Санкт-Петербург, ул. Якубовича, дом 22, пом. 3-Н, литер А
тел./факс : 315-21-57, 315- 70-10, 314-86-28

Утверждаю:
Генеральный директор
Виноградов П.К.

«15» ноября 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Филиппова Владимира Геннадьевича
соискателя учёной степени кандидата технических наук
по специальности 1.6.22. Геодезия



Комиссия в составе:

- председатель: Виноградов П.К.;
- члены комиссии: Виноградов К.П., Наймушина Е.М., Соколов С.М.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Геодезическое обеспечение методов наблюдений за деформациями склонов на основе технологии спутникового позиционирования», представленной на соискание учёной степени кандидата наук, включены в производственную деятельность предприятия при сопровождении комплексных инженерных изысканий для:

— оценки стабильности опорных геодезических сетей на основе метода аппроксимации плановых координат и высот их пунктов плоскостью и анализа смещений её центра и нормали;

— использования метода определения положения деформационных пунктов в теле оползня технологией RTK с увеличенным периодом наблюдений при соблюдении регламента, учитывающего точность ГНСС-приёмника, количество наблюдаемых эпох, удаление ровера от базовой станции;

— использования метода определения положения деформационных пунктов в теле оползня линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения.

Эффективность предложенных алгоритмов проверена при решении прикладных задач на производственных объектах.

Председатель комиссии,

Ген. директор

Члены комиссии:

Зам. ген. директора, к.т.н.

Начальник отдела картографии

Заместитель начальника отдела ИГДИ

/Виноградов П.К./

/Виноградов К.П./

/Наймушина Е.М./

/Соколов С.М./

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на изобретение «Способ определения смещений оползня»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2821434

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СМЕЩЕНИЙ ОПОЛЗНЯ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Кузин Антон Александрович (RU), Филиппов Владимир Геннадьевич (RU)*

Заявка № 2024111107

Приоритет изобретения 23 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 24 июня 2024 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 23 апреля 2044 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0f63853164ba96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа оценки
стабильности геодезических сетей по пространственным координатам»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024610546

Программа оценки стабильности геодезических сетей по
пространственным координатам

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Кузин Антон Александрович (RU), Филиппов
Владимир Геннадьевич (RU)*



Заявка № 2023689408

Дата поступления 27 декабря 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 января 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Документ подписан электронной подписью
Сертификат 429b6a0fe3853164ba96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа
определения положения центра и радиуса сферической поверхности по
пространственным координатам»**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023682111

**Программа определения положения центра и радиуса
сферической поверхности по пространственным
координатам**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Кузин Антон Александрович (RU), Филиппов
Владимир Геннадьевич (RU)*



Заявка № **2023681106**

Дата поступления **13 октября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **23 октября 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164ba96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д**Классификация оползневых процессов****1. По возрасту (И.В. Попов):**

- 1.1.** древние – образовавшиеся при ином базисе эрозии и уровне абразии;
- 1.2.** современные – образовавшиеся при современном базисе эрозии и уровне абразии;
 - 1.2.1.** старые;
 - 1.2.2.** свежие, по фазам развития делятся на:
 - 1.2.2.1.** движущиеся;
 - 1.2.2.2.** приостановившиеся;
 - 1.2.2.3.** остановившиеся;
 - 1.2.2.4.** закончившиеся;

2. По формам развития (А.П. Павлов):

- 2.1.** деляпсивные – начинающие движение с нижней части, которое распространяется вверх по склону за счёт последовательного сдвигания блоков;
- 2.2.** детрузивные – начинающие отрыв с верхней части и дальнейшим распространением вниз по склону, например, из-за образования трещин;

3. По строению склона и положению ПСО (Ф.П. Саваренский):

- 3.1.** асеквентные – возникающие на склонах с однородными грунтами, чаще всего – переувлажнённые глины;
- 3.2.** консеквентные – имеющие явную ПСО в виде границы двух слоёв грунтов или трещины;
- 3.3.** инсеквентные – возникающие в случае, когда ПСО проходит через различные слои горного массива;

4. По механизму смещения и составу горных пород (Г.С. Золотарёв):

- 4.1.** обвальные;
- 4.2.** оползневые;
 - 4.2.1.** сложные (переходные);
 - 4.2.2.** деляпсивные;
 - 4.2.3.** детрузивные;
 - 4.2.4.** консеквентные;
- 4.3.** десерпционно-солюфлюкционные;
- 4.4.** специфические;

5. По форме оползневого тела (Е.П. Емельянова):

- 5.1.** циркообразные;

- 5.2. фронтального типа;
- 5.3. глетчерообразные;
- 5.4. с сужённой горловиной;
- 5.5. ложкообразные;
- 5.6. эллипсоидальной формы;
- 5.7. грушевидной формы;
- 5.8. каплевидной формы – сместившиеся оползневые массы останавливают своё движение на самом теле оползня и не доходят до самого основания;
- 5.9. угловатых очертаний;
- 5.10. без ясных границ;
- 5.11. сложные;

6. По механизму смещения оползневых масс (В.В. Кюнтцель, 1980):

- 6.1. скольжения;
- 6.2. выдавливания
- 6.3. всплывания;
- 6.4. течения;
- 6.5. проседания;
- 6.6. разжижения;

7. По признакам проявления: преобладающему фактору формирования оползневых смещений, форме, характеру трещиноватости, форме стенки срыва и т. п. (Г. В. Постоев):

- 7.1. сжатия-выдавливания – блоковые, относительно глубокие оползни;
- 7.2. сдвига-скольжения;
- 7.3. разжижения-течения;

8. По морфологическому признаку (Н.Н. Маслов):

- 8.1. оползни-сдвиги;
- 8.2. оплывины и сплывы;
- 8.3. оползни-скольжения;
- 8.4. оползни-потоки;
- 8.5. оползни-обвалы

9. По признаку потери устойчивости (Н.В. Родионов):

- 9.1. консистентные;
- 9.2. суффозионные;
- 9.3. структурные;
- 9.4. промежуточные;
- 9.4.1. консистентно-структурные;

9.4.2. суффозионно-консистентные;

9.4.3. суффозионно-структурные;

9.4.4. консистентно-суффозионно-структурные;

10. По характеру смещения, для оползней юга Восточной Сибири (Г.Б. Пальшин, Ю.Б. Тржцинский):

10.1. пластического течения глинистых пород (оползни глубинной ползучести) – ползучесть проявляется неограниченно в течение долгого времени, блоки твёрдых горных пород, отделяясь от коренного массива по системе тектонических трещин, отклоняются в сторону долины, смещаясь по залегающим в основании пластичным глинистым породам, углы наклона пород составляют $12 - 15^\circ$, глубинная ползучесть;

10.2. сдвига и скольжения – пластические деформации сменяются сдвигами и скольжением жёстких блоков, кровля глинистых пород оказывается приподнятой над урезом реки на высоту 30 – 40 м., блок запрокидывается под склон, углы падения пород достигают $40^\circ - 50^\circ$;

10.3. сложного развития – характерное двухъярусное строение, нижний ярус представляет собой крупные коренные блоки, смещение которых обусловлено сдвиговыми деформациями, верхний ярус состоит из щебнисто-глыбового материала мощностью до 10 м и смещается в виде грунтового потока под воздействием сил гравитации, боковой эрозии, дренажа подземных вод, климатических особенностей других факторов;

11. По типу движения горных масс и типу горных пород (Д. Варнс, 1958):

11.1. обвалы и осыпи – встречаются в скальных и обломочных породах или рыхлых грунтах;

11.2. опрокидывания – происходят при оседании, переходящем во вращение с последующим обрушением блока скальных или обломочных горных пород с частичным раскатыванием обвалившихся масс;

11.3. скольжения;

11.3.1. оползни среза с вращением;

11.3.2. консеквентные оползни;

11.4. выдавливания;

11.5. оползни-потоки;

11.5.1. течения – имеют форму селевого потока;

11.5.2. солифлюкционные – имеют механизм, связанный с сезонным промерзанием/оттаиванием грунтов;

11.5.3. выплывания – свойственны склонам, сложенным глинистыми грунтами;

11.6. сложные – следствие сочетания двух и более процессов;

12. По площади (Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития оползней, 1969):

12.1. небольшие – менее 2500 м²;

12.2. средние – от 2500 до 10000 м²;

12.3. крупные – от 10000 до 20000 м²;

12.4. очень крупные – от 20000 до 100000 м²;

12.5. огромные – более 100000 м²;

13. По глубине захвата (Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития оползней, 1969):

13.1. поверхностные – менее 2,5 м;

13.2. мелкие – от 2,5 до 5 м;

13.3. неглубокие – от 5 до 10 м;

13.4. глубокие – от 10 до 20 м;

13.5. очень глубокие – более 20 м;

14. По глубине захвата пород оползневыми деформациями (Свод правил 420.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов. Общие требования»):

14.1. мелкие – менее 5 м;

14.2. глубокие – от 5 м до 20 м;

14.3. очень глубокие – более 20 м;

15. По объёму (Свод правил 420.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов. Общие требования»):

15.1. очень малые – менее 100 м³;

15.2. малые – от 100 до 1000 м³;

15.3. небольшие – от 1001 до 10000 м³;

15.4. средние – от 10001 до 100000 м³;

15.5. крупные – от 100001 до 1000000 м³;

15.6. очень крупные – от 1000001 до 10000000 м³;

15.7. грандиозные – более 10000000 м³;

16. По скорости оползневых процессов (Свод правил 420.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов. Общие требования»):

- 16.1.** экстремально медленные – менее 16 мм/год;
- 16.2.** очень медленные – от 16 мм/год до 1,6 м/год;
- 16.3.** медленные – от 1,6 м/год до 13 м/месяц;
- 16.4.** умеренные – от 13 м/месяц до 1,8 м/ч;
- 16.5.** быстрые – от 1,8 м/ч до 3 м/мин;
- 16.6.** очень быстрые – от 3 м/мин до 5 м/с;
- 16.7.** экстремально быстрые – более 5 м/с.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Блок-схема алгоритма определения нестабильных опорных пунктов и характера их смещений

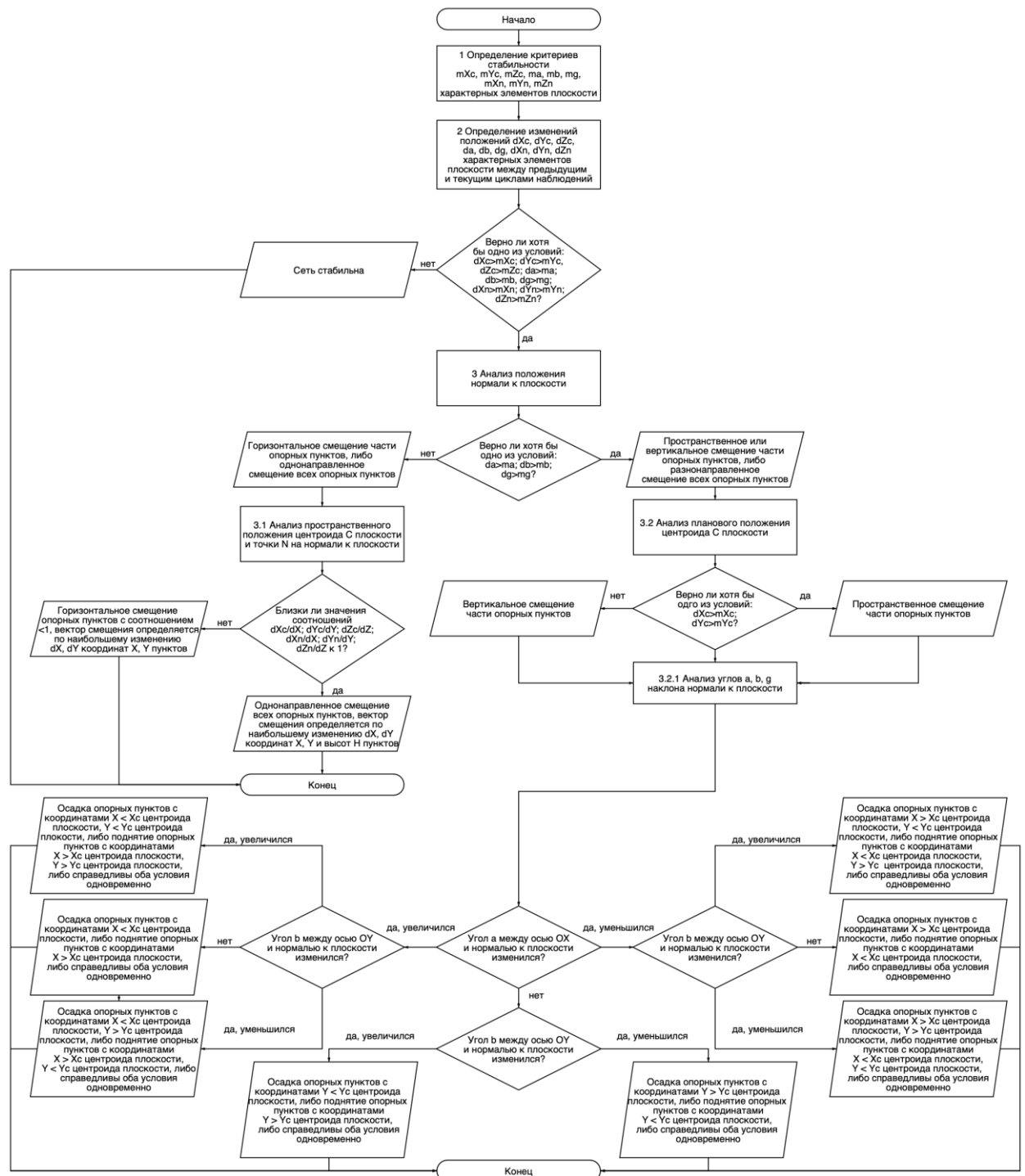


Рисунок Е.1 – Блок-схема алгоритма определения нестабильных опорных пунктов и характера их смещений

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Плановые координаты и высоты деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны, полученные с применением технологии RTK (местная система координат «МСК-47 зона 2»)

Таблица Ж.1 – Плановые координаты и высоты деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны, полученные с применением технологии RTK (местная система координат «МСК-47 зона 2», mS_{XY} – СКП определения горизонтальных смещений, mS_H – СКП определения вертикальных смещений)

Название деформационного пункта	№ цикла наблюдений и дата его проведения	X , м	Y , м	H , м	mS_{XY} , мм	mS_H , мм
Ln1	0 (15.07.2023 г.)	407343,840	2240664,136	26,837	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407343,568	2240664,155	26,734	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407343,077	2240664,121	26,540	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407342,752	2240664,100	26,447	6	9
Ln2	0 (15.07.2023 г.)	407332,449	2240667,487	22,835	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407332,202	2240667,517	22,771	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	Уничтожен				
	3 (28.07.2024 г.)					
Ln3	0 (15.07.2023 г.)	407325,079	2240674,907	18,956	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	Уничтожен				
	2 (27.04.2024 г.)					
	3 (28.07.2024 г.)					
Ln4	0 (15.07.2023 г.)	407314,180	2240675,909	15,403	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407314,077	2240675,887	15,366	7	8
	2 (27.04.2024 г.)	Уничтожен				
	3 (28.07.2024 г.)					
Ln5	0 (15.07.2023 г.)	407326,644	2240680,695	18,940	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407326,466	2240680,720	18,867	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407325,810	2240680,721	18,697	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407325,584	2240680,730	18,617	6	9
Ln14	0 (15.07.2023 г.)	407272,126	2240761,752	14,290	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407272,079	2240761,731	14,227	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407271,984	2240761,659	14,150	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	Уничтожен				
Ln15	0 (15.07.2023 г.)	407282,281	2240755,227	16,175	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407282,251	2240755,183	16,127	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407282,186	2240755,067	16,046	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	Уничтожен				
Ln16	0 (15.07.2023 г.)	407288,628	2240750,314	17,755	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407288,593	2240750,248	17,727	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407288,529	2240750,153	17,628	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407288,481	2240750,109	17,592	6	9
Ln17	0 (15.07.2023 г.)	407282,593	2240747,302	14,699	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	Уничтожен				
	2 (27.04.2024 г.)					

Продолжение таблицы Ж.1

	3 (28.07.2024 г.)					
Ln18	0 (15.07.2023 г.)	407281,920	2240741,332	13,401	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407281,864	2240741,304	13,357	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	Уничтожен				
	3 (28.07.2024 г.)					
Ln19	0 (15.07.2023 г.)	407277,420	2240737,319	10,117	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407277,380	2240737,255	10,059	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407277,278	2240737,134	9,993	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	Уничтожен				
Ln20	0 (15.07.2023 г.)	407274,024	2240744,123	10,065	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407273,978	2240744,090	10,024	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407273,823	2240744,033	9,957	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407273,708	2240743,965	9,916	7	8
Ln21	0 (15.07.2023 г.)	407277,307	2240752,913	13,781	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407277,257	2240752,849	13,746	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	Уничтожен				
	3 (28.07.2024 г.)					
Ln22	0 (15.07.2023 г.)	407272,507	2240754,913	12,092	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	Уничтожен				
	2 (27.04.2024 г.)					
	3 (28.07.2024 г.)					
Ln23	0 (15.07.2023 г.)	407264,595	2240750,711	7,517	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407264,546	2240750,662	7,482	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407264,443	2240750,546	7,429	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407264,374	2240750,478	7,393	7	9
Ln24	0 (15.07.2023 г.)	407266,777	2240745,517	7,326	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407266,719	2240745,464	7,288	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407266,602	2240745,337	7,238	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407266,524	2240745,287	7,203	7	9
Ln25	0 (15.07.2023 г.)	407269,120	2240739,003	6,930	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407269,082	2240738,963	6,894	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407268,970	2240738,788	6,847	6	9
	3 (28.07.2024 г.)	407268,911	2240738,711	6,823	7	8
Ln36	0 (15.07.2023 г.)	407335,281	2240650,929	28,465	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407335,069	2240650,896	28,379	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407334,393	2240651,003	28,206	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407334,277	2240651,053	28,101	7	9
Ln37	0 (15.07.2023 г.)	407312,631	2240661,564	18,342	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407312,508	2240661,601	18,306	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407312,232	2240661,613	18,251	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407312,128	2240661,621	18,220	7	9
Ln38	0 (15.07.2023 г.)	407301,391	2240647,988	17,150	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407301,287	2240647,997	17,105	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407301,000	2240648,102	17,070	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407300,861	2240648,117	17,038	7	9
Ln48	0 (15.07.2023 г.)	407321,399	2240550,928	27,314	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407321,217	2240551,101	27,226	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407320,857	2240551,473	27,021	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407320,678	2240551,728	26,946	7	9

Продолжение таблицы Ж.1

Ln49	0 (15.07.2023 г.)	407319,485	2240580,484	24,205	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407319,245	2240580,727	24,127	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407318,763	2240580,967	24,006	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407318,528	2240581,270	23,892	7	9
Ln50	0 (15.07.2023 г.)	407313,635	2240567,627	24,010	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407313,352	2240567,883	23,917	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	Уничтожен				
	3 (28.07.2024 г.)					
Ln51	0 (15.07.2023 г.)	407303,674	2240545,947	25,035	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407303,472	2240546,072	24,950	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407303,006	2240546,542	24,766	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407302,815	2240546,712	24,696	7	9
Ln52	0 (15.07.2023 г.)	407291,515	2240556,934	21,913	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407291,368	2240557,190	21,818	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	Уничтожен				
	3 (28.07.2024 г.)					
Ln53	0 (15.07.2023 г.)	407299,865	2240572,168	20,432	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	Уничтожен				
	2 (27.04.2024 г.)					
	3 (28.07.2024 г.)					
Ln54	0 (15.07.2023 г.)	407295,031	2240585,206	19,723	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407294,974	2240585,409	19,697	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407294,875	2240585,694	19,660	7	8
	3 (28.07.2024 г.)	407294,755	2240585,806	19,622	6	9
Ln55	0 (15.07.2023 г.)	407282,161	2240577,264	17,617	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407282,074	2240577,427	17,585	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407281,870	2240577,689	17,544	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407281,798	2240577,745	17,527	7	9
Ln56	0 (15.07.2023 г.)	407279,780	2240596,124	15,811	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407279,691	2240596,227	15,765	6	8
	2 (27.04.2024 г.)	407279,460	2240596,496	15,789	6	9
	3 (28.07.2024 г.)	407279,324	2240596,640	15,740	7	9
Ln57	0 (15.07.2023 г.)	407267,051	2240608,230	12,826	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407266,994	2240608,329	12,822	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407266,875	2240608,458	12,822	7	8
	3 (28.07.2024 г.)	407266,817	2240608,528	12,818	7	9
Ln58	0 (15.07.2023 г.)	407276,938	2240623,519	13,622	—	—
	1 (07.10.2023 г.)	407276,848	2240623,610	13,619	7	9
	2 (27.04.2024 г.)	407276,736	2240623,682	13,616	7	9
	3 (28.07.2024 г.)	407276,657	2240623,771	13,620	7	9

ПРИЛОЖЕНИЕ И

**Плановые координаты и высоты рабочих пунктов на оползневом склоне левого берега
реки Тосны, полученные с применением технологии RTK (местная система координат
«МСК-47 зона 2»)**

Таблица И.1 – Плановые координаты и высоты рабочих пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны, полученные с применением технологии RTK (местная система координат «МСК-47 зона 2»)

Название рабочего пункта	№ цикла наблюдений и дата его проведения	X, м	Y, м	H, м
T1	0 (15.07.2023 г.)	407362,648	2240715,838	28,684
	1 (07.10.2023 г.)	407362,648	2240715,841	28,681
	2 (27.04.2024 г.)	407362,649	2240715,835	28,682
	3 (28.07.2024 г.)	407362,646	2240715,835	28,691
T2	0 (15.07.2023 г.)	407357,102	2240686,490	28,623
	1 (07.10.2023 г.)	407357,101	2240686,489	28,625
	2 (27.04.2024 г.)	407357,105	2240686,491	28,618
	3 (28.07.2024 г.)	407357,103	2240686,487	28,625
T3	0 (15.07.2023 г.)	407354,029	2240675,150	28,681
	1 (07.10.2023 г.)	407354,031	2240675,151	28,674
	2 (27.04.2024 г.)	407354,030	2240675,150	28,681
	3 (28.07.2024 г.)	407354,029	2240675,149	28,684
T4	0 (15.07.2023 г.)	407293,959	2240749,464	18,823
	1 (07.10.2023 г.)	407293,959	2240749,464	18,826
	2 (27.04.2024 г.)	407293,963	2240749,461	18,824
	3 (28.07.2024 г.)	407293,957	2240749,466	18,827
T5	0 (15.07.2023 г.)	407289,181	2240757,757	17,564
	1 (07.10.2023 г.)	407289,177	2240757,755	17,555
	2 (27.04.2024 г.)	407289,182	2240757,758	17,567
	3 (28.07.2024 г.)	407289,177	2240757,757	17,553
T6	0 (15.07.2023 г.)	407281,190	2240761,841	15,729
	1 (07.10.2023 г.)	407281,186	2240761,839	15,727
	2 (27.04.2024 г.)	407281,189	2240761,841	15,732
	3 (28.07.2024 г.)	407281,195	2240761,840	15,730
T7	0 (15.07.2023 г.)	407350,779	2240640,385	29,354
	1 (07.10.2023 г.)	407350,779	2240640,385	29,351
	2 (27.04.2024 г.)	407350,779	2240640,383	29,357
	3 (28.07.2024 г.)	407350,780	2240640,383	29,355
T8	0 (15.07.2023 г.)	407351,470	2240607,520	29,514
	1 (07.10.2023 г.)	407351,471	2240607,518	29,517
	2 (27.04.2024 г.)	407351,467	2240607,519	29,510
	3 (28.07.2024 г.)	407351,472	2240607,520	29,511
T9	0 (15.07.2023 г.)	407347,439	2240585,494	29,445
	1 (07.10.2023 г.)	407347,437	2240585,492	29,441
	2 (27.04.2024 г.)	407347,439	2240585,493	29,443
	3 (28.07.2024 г.)	407347,438	2240585,496	29,451

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Плановые координаты и высоты деформационных пунктов, полученных линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения на оползневом склоне левого берега реки Тосны

Таблица К.1 – Плановые координаты и высоты деформационных пунктов, полученных линейно-угловыми измерениями с принудительными отклонениями вехи с отражателем от отвесного положения на оползневом склоне левого берега реки Тосны

Название деформационного пункта	№ цикла наблюдений и дата его проведения	X , м	Y , м	H , м
Ln6	0 (15.07.2023 г.)	407335,990	2240694,847	24,880
	1 (07.10.2023 г.)	407335,758	2240694,911	24,857
	2 (27.04.2024 г.)	407335,355	2240694,901	24,630
	3 (28.07.2024 г.)	407335,061	2240694,996	24,614
Ln7	0 (15.07.2023 г.)	407343,407	2240694,597	28,170
	1 (07.10.2023 г.)	407343,254	2240694,543	28,110
	2 (27.04.2024 г.)	407342,777	2240694,527	27,920
	3 (28.07.2024 г.)	407342,546	2240694,493	27,852
Ln8	0 (15.07.2023 г.)	407322,042	2240693,097	17,627
	1 (07.10.2023 г.)	Уничтожен		
	2 (27.04.2024 г.)			
	3 (28.07.2024 г.)			
Ln9	0 (15.07.2023 г.)	407321,823	2240697,179	18,534
	1 (07.10.2023 г.)	407321,706	2240697,175	18,473
	2 (27.04.2024 г.)	Уничтожен		
	3 (28.07.2024 г.)			
Ln10	0 (15.07.2023 г.)	407317,280	2240703,849	16,515
	1 (07.10.2023 г.)	407317,127	2240703,822	16,484
	2 (27.04.2024 г.)	407316,874	2240703,823	16,423
	3 (28.07.2024 г.)	Уничтожен		
Ln11	0 (15.07.2023 г.)	407321,758	2240703,929	19,009
	1 (07.10.2023 г.)	Уничтожен		
	2 (27.04.2024 г.)			
	3 (28.07.2024 г.)			
Ln12	0 (15.07.2023 г.)	407338,682	2240707,914	28,775
	1 (07.10.2023 г.)	407338,532	2240707,886	28,662
	2 (27.04.2024 г.)	407338,006	2240707,811	28,504
	3 (28.07.2024 г.)	407337,852	2240707,776	28,479
Ln27	0 (15.07.2023 г.)	407313,604	2240717,300	17,790
	1 (07.10.2023 г.)	407313,540	2240717,304	17,742
	2 (27.04.2024 г.)	Уничтожен		
	3 (28.07.2024 г.)			
Ln28	0 (15.07.2023 г.)	407307,489	2240727,560	17,914
	1 (07.10.2023 г.)	407307,404	2240727,520	17,888
	2 (27.04.2024 г.)	407307,227	2240727,462	17,848
	3 (28.07.2024 г.)	407307,090	2240727,398	17,827

Продолжение таблицы К.1

Ln29	0 (15.07.2023 г.)	407291,555	2240728,322	16,646
	1 (07.10.2023 г.)	407291,477	2240728,282	16,635
	2 (27.04.2024 г.)	407291,341	2240728,241	16,625
	3 (28.07.2024 г.)	407291,281	2240728,223	16,607
Ln30	0 (15.07.2023 г.)	407302,261	2240710,454	17,230
	1 (07.10.2023 г.)	407302,183	2240710,434	17,198
	2 (27.04.2024 г.)	407301,944	2240710,395	17,160
	3 (28.07.2024 г.)	407301,796	2240710,383	17,117
Ln31	0 (15.07.2023 г.)	407298,753	2240692,607	15,926
	1 (07.10.2023 г.)	407298,638	2240692,564	15,893
	2 (27.04.2024 г.)	407298,411	2240692,528	15,865
	3 (28.07.2024 г.)	407298,301	2240692,506	15,837
Ln32	0 (15.07.2023 г.)	407291,874	2240705,676	16,009
	1 (07.10.2023 г.)	407291,796	2240705,676	15,983
	2 (27.04.2024 г.)	407291,654	2240705,677	15,980
	3 (28.07.2024 г.)	407291,576	2240705,667	15,963
Ln33	0 (15.07.2023 г.)	407285,262	2240715,936	16,066
	1 (07.10.2023 г.)	407285,190	2240715,920	16,057
	2 (27.04.2024 г.)	407285,041	2240715,855	16,046
	3 (28.07.2024 г.)	407284,994	2240715,853	16,050
Ln34	0 (15.07.2023 г.)	407277,684	2240709,567	14,939
	1 (07.10.2023 г.)	407277,610	2240709,527	14,915
	2 (27.04.2024 г.)	407277,474	2240709,493	14,912
	3 (28.07.2024 г.)	407277,414	2240709,459	14,908
Ln35	0 (15.07.2023 г.)	407281,024	2240696,237	13,304
	1 (07.10.2023 г.)	407280,963	2240696,199	13,288
	2 (27.04.2024 г.)	407280,847	2240696,182	13,274
	3 (28.07.2024 г.)	407280,740	2240696,172	13,282
Ln40	0 (15.07.2023 г.)	407318,738	2240604,758	23,809
	1 (07.10.2023 г.)	407318,504	2240604,865	23,754
	2 (27.04.2024 г.)	407318,179	2240605,119	23,696
	3 (28.07.2024 г.)	407317,961	2240605,245	23,654
Ln41	0 (15.07.2023 г.)	407310,686	2240625,304	22,715
	1 (07.10.2023 г.)	407310,581	2240625,402	22,676
	2 (27.04.2024 г.)	407310,419	2240625,459	22,653
	3 (28.07.2024 г.)	407310,273	2240625,572	22,635
Ln42	0 (15.07.2023 г.)	407322,593	2240649,029	26,017
	1 (07.10.2023 г.)	407322,443	2240649,042	25,932
	2 (27.04.2024 г.)	407321,948	2240649,080	25,851
	3 (28.07.2024 г.)	407321,697	2240649,105	25,782
Ln43	0 (15.07.2023 г.)	407299,983	2240606,297	20,104
	1 (07.10.2023 г.)	407299,869	2240606,401	20,082
	2 (27.04.2024 г.)	407299,730	2240606,565	20,048
	3 (28.07.2024 г.)	407299,658	2240606,614	20,016
Ln44	0 (15.07.2023 г.)	407290,558	2240622,395	17,311
	1 (07.10.2023 г.)	407290,484	2240622,458	17,287
	2 (27.04.2024 г.)	407290,368	2240622,475	17,278
	3 (28.07.2024 г.)	407290,307	2240622,539	17,278
Ln45	0 (15.07.2023 г.)	407275,847	2240645,363	12,522

Продолжение таблицы К.1

	1 (07.10.2023 г.)	407275,781	2240645,394	12,520
	2 (27.04.2024 г.)	407275,647	2240645,430	12,508
	3 (28.07.2024 г.)	407275,567	2240645,461	12,506
Ln46	0 (15.07.2023 г.)	407284,893	2240667,409	14,449
	1 (07.10.2023 г.)	407284,828	2240667,402	14,432
	2 (27.04.2024 г.)	407284,690	2240667,432	14,415
	3 (28.07.2024 г.)	407284,600	2240667,456	14,416
Ln47	0 (15.07.2023 г.)	407299,198	2240674,258	15,575
	1 (07.10.2023 г.)	407299,110	2240674,273	15,538
	2 (27.04.2024 г.)	407298,868	2240674,330	15,501
	3 (28.07.2024 г.)	407298,738	2240674,341	15,473

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

**Скорости смещений деформационных пунктов оползневого склона левого берега реки
Тосны, полученные по результатам геодезических наблюдений с 0 (15.07.2023 г.)
по 3 (28.07.2024 г.) циклы наблюдений**

Таблица Л.1 – Скорости смещений деформационных пунктов оползневого склона левого берега реки Тосны, полученные по результатам геодезических наблюдений с 0 (15.07.2023 г.) по 3 (28.07.2024 г.) циклы наблюдений

Название деформационного пункта	ΔXY в месяц, мм	ΔH в месяц, мм	ΔXYH в месяц, мм
Ln1	89	32	95
Ln2	Уничтожен		
Ln3			
Ln4			
Ln5	87	26	91
Ln6	77	22	80
Ln7	71	26	76
Ln8	Уничтожен		
Ln9			
Ln10			
Ln11			
Ln12	69	24	73
Ln13	65	26	70
Ln14	Уничтожен		
Ln15			
Ln16	21	13	25
Ln17	Уничтожен		
Ln18			
Ln19			
Ln20	29	12	31
Ln21	Уничтожен		
Ln22			
Ln23	26	10	28
Ln24	28	10	30
Ln25	29	9	31
Ln26	37	9	38
Ln27	Уничтожен		
Ln28	35	7	36
Ln29	24	3	24
Ln30	38	9	40
Ln31	38	7	39
Ln32	24	4	25
Ln33	23	1	23
Ln34	24	3	24
Ln35	24	2	24
Ln36	83	30	88
Ln37	41	10	43
Ln38	45	9	46
Ln39	77	12	78

Продолжение таблицы Л.1

Ln40	75	13	76
Ln41	40	7	41
Ln42	74	19	76
Ln43	37	7	38
Ln44	24	3	24
Ln45	24	1	24
Ln46	24	3	24
Ln47	38	8	39
Ln48	88	30	93
Ln49	101	26	104
Ln50	Уничтожен		
Ln51	94	28	98
Ln52	Уничтожен		
Ln53			
Ln54	54	8	55
Ln55	49	7	50
Ln56	56	6	57
Ln57	31	1	31
Ln58	31	0	31

ПРИЛОЖЕНИЕ М

Уравнения прогноза смещений деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны по данным 0 – 1 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 07.10.2023 г.)

Таблица М.1 – Уравнения прогноза смещений деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны по данным 0 – 1 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 07.10.2023 г.)

Название деформационного пункта	Горизонтальные смещения	Вертикальные смещения	Пространственные смещения
Ln1	$y = 3,25x$	$y = 1,226x$	$y = 3,464x$
Ln2	$y = 2,964x$	$y = 0,762x$	$y = 3,06x$
Ln3	Уничтожен		
Ln4	$y = 1,25x$	$y = 0,44x$	$y = 1,333x$
Ln5	$y = 2,143x$	$y = 0,869x$	$y = 2,31x$
Ln6	$y = 2,869x$	$y = 0,274x$	$y = 2,881x$
Ln7	$y = 1,94x$	$y = 0,714x$	$y = 2,06x$
Ln8	Уничтожен		
Ln9	$y = 1,393x$	$y = 0,726x$	$y = 1,571x$
Ln10	$y = 1,857x$	$y = 0,357x$	$y = 1,893x$
Ln11	Уничтожен		
Ln12	$y = 1,821x$	$y = 1,333x$	$y = 2,262x$
Ln13	$y = 2,857x$	$y = 0,548x$	$y = 2,905x$
Ln14	$y = 0,607x$	$y = 0,75x$	$y = 0,964x$
Ln15	$y = 0,631x$	$y = 0,571x$	$y = 0,857x$
Ln16	$y = 0,893x$	$y = 0,333x$	$y = 0,952x$
Ln17	Уничтожен		
Ln18	$y = 0,75x$	$y = 0,524x$	$y = 0,917x$
Ln19	$y = 0,893x$	$y = 0,69x$	$y = 1,131x$
Ln20	$y = 0,679x$	$y = 0,488x$	$y = 0,833x$
Ln21	$y = 0,964x$	$y = 0,417x$	$y = 1,048x$
Ln22	Уничтожен		
Ln23	$y = 0,821x$	$y = 0,417x$	$y = 0,929x$
Ln24	$y = 0,94x$	$v = 0,452x$	$y = 1,036x$
Ln25	$y = 0,655x$	$y = 0,429x$	$y = 0,786x$
Ln26	$y = 1,083x$	$y = 0,56x$	$y = 1,214x$
Ln27	$y = 0,762x$	$y = 0,571x$	$y = 0,952x$
Ln28	$y = 1,119x$	$y = 0,31x$	$y = 1,167x$
Ln29	$y = 1,048x$	$y = 0,119x$	$y = 1,048x$
Ln30	$y = 0,952x$	$y = 0,381x$	$y = 1,024x$
Ln31	$y = 1,452x$	$y = 0,381x$	$y = 1,5x$
Ln32	$y = 0,929x$	$y = 0,31x$	$y = 0,976x$
Ln33	$y = 0,881x$	$y = 0,107x$	$y = 0,881x$
Ln34	$y = 1,012x$	$y = 0,286x$	$y = 1,048x$
Ln35	$y = 0,845x$	$y = 0,19x$	$y = 0,869x$
Ln36	$y = 2,56x$	$y = 1,024x$	$y = 2,75x$
Ln37	$y = 1,524x$	$y = 0,429x$	$y = 1,583x$
Ln38	$y = 1,238x$	$y = 0,536x$	$y = 1,357x$
Ln39	$y = 2,488x$	$y = 0,464x$	$y = 2,536x$
Ln40	$y = 3,06x$	$y = 0,655x$	$y = 3,131x$
Ln41	$y = 1,702x$	$y = 0,464x$	$y = 1,774x$

Продолжение таблицы М.1

Ln42	$y = 1,786x$	$y = 1,024x$	$y = 2,06x$
Ln43	$y = 1,84x$	$y = 0,262x$	$y = 1,857x$
Ln44	$y = 1,167x$	$y = 0,274x$	$y = 1,202x$
Ln45	$y = 0,869x$	$y = 0,024x$	$y = 0,869x$
Ln46	$y = 0,774x$	$y = 0,19x$	$y = 0,798x$
Ln47	$y = 1,071x$	$y = 0,44x$	$y = 1,155x$
Ln48	$y = 2,988x$	$y = 1,048x$	$y = 3,167x$
Ln49	$y = 4,071x$	$y = 0,929x$	$y = 4,167x$
Ln50	$y = 4,548x$	$y = 1,107x$	$y = 4,679x$
Ln51	$y = 2,833x$	$y = 1,012x$	$y = 3x$
Ln52	$y = 3,512x$	$y = 1,131x$	$y = 3,69x$
Ln53	Уничтожен		
Ln54	$y = 2,512x$	$y = 0,31x$	$y = 2,524x$
Ln55	$y = 2,202x$	$y = 0,381x$	$y = 2,238x$
Ln56	$y = 1,619x$	$y = 0,548x$	$y = 1,714x$
Ln57	$y = 1,357x$	$y = 0,048x$	$y = 1,357x$
Ln58	$y = 1,524x$	$y = 0,036x$	$y = 1,524x$

ПРИЛОЖЕНИЕ Н

Прогнозные величины смещений деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны на 27.04.2024 г. по данным 0 – 1 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 07.10.2023 г.)

Таблица Н.1 – Прогнозные величины смещений деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны на 27.04.2024 г. по данным 0 – 1 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 07.10.2023 г.)

Название пункта	Горизонтальные смещения			Вертикальные смещения			Пространственные смещения		
	Прогноз, мм	Факт, мм	Точность прогноза, %	Прогноз, мм	Факт, мм	Точность прогноза, %	Прогноз, мм	Факт, мм	Точность прогноза, %
Ln1	933	763	78	352	297	82	994	819	79
Ln2	851	861	99	219	250	87	878	897	98
Ln3	Уничтожен								
Ln4	359	440	82	126	104	78	383	452	85
Ln5	615	834	74	249	243	97	663	869	76
Ln6	823	637	71	79	250	31	827	684	79
Ln7	557	634	88	205	250	82	591	681	87
Ln8	Уничтожен								
Ln9	400	441	91	208	139	50	451	462	98
Ln10	533	407	69	103	91	88	543	417	70
Ln11	Уничтожен								
Ln12	523	684	76	383	270	58	649	736	88
Ln13	820	588	60	157	228	69	834	630	68
Ln14	174	170	97	215	140	46	277	220	74
Ln15	181	186	97	164	129	73	246	226	91
Ln16	256	189	64	96	127	75	273	228	80
Ln17	Уничтожен								
Ln18	215	243	89	150	136	89	263	278	95
Ln19	256	233	90	198	124	40	325	264	77
Ln20	195	220	88	140	108	70	239	245	98
Ln21	277	220	74	120	124	96	301	253	81
Ln22	Уничтожен								
Ln23	236	224	95	120	88	64	267	241	89
Ln24	270	251	92	130	88	52	297	266	88
Ln25	188	262	72	123	83	52	226	275	82
Ln26	311	364	86	161	87	15	348	374	93
Ln27	219	374	58	164	100	35	273	387	71
Ln28	321	280	85	89	66	65	335	288	84
Ln29	301	229	68	34	21	35	301	230	69
Ln30	273	323	85	109	70	45	294	330	89
Ln31	417	351	81	109	61	19	431	356	79
Ln32	267	220	79	89	29	0	280	222	74
Ln33	253	235	93	31	20	47	253	236	93
Ln34	290	223	70	82	27	0	301	225	66
Ln35	243	185	69	55	30	19	249	187	67
Ln36	735	891	82	294	259	87	789	928	85

Продолжение таблицы Н.1

Ln37	437	402	91	123	91	65	454	412	90
Ln38	355	407	87	154	80	8	389	415	94
Ln39	714	661	92	133	97	63	728	668	91
Ln40	878	665	68	188	113	33	899	675	67
Ln41	489	308	41	133	62	0	509	314	38
Ln42	512	647	79	294	167	24	591	668	89
Ln43	530	368	56	75	57	68	533	372	57
Ln44	335	207	38	79	33	0	345	209	35
Ln45	249	211	82	7	15	46	249	211	82
Ln46	222	204	91	55	34	39	229	207	89
Ln47	308	338	91	126	74	28	331	346	96
Ln48	858	769	88	301	293	97	909	823	90
Ln49	1169	869	65	267	199	66	1196	891	66
Ln50	1305	939	61	318	235	65	1343	968	61
Ln51	813	895	91	290	269	92	861	934	92
Ln52	1008	808	75	325	171	10	1059	826	72
Ln53	Уничтожен								
Ln54	721	512	59	89	63	59	724	516	60
Ln55	632	515	77	109	73	50	642	520	77
Ln56	465	491	95	157	22	0	492	491	100
Ln57	389	288	65	14	4	0	389	288	65
Ln58	437	260	32	10	6	29	437	260	32

ПРИЛОЖЕНИЕ П

**Уравнения прогноза смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на
оползневом склоне левого берега реки Тосны по данным 0 – 2 циклов
наблюдений (15.07.2023 г. – 27.04.2024 г.)**

Таблица П.1 – Уравнения прогноза смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны по данным 0 – 2 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 27.04.2024 г.)

Название деформационного пункта	Горизонтальные смещения	Вертикальные смещения	Пространственные смещения
Ln1	$y = 2,613x + 22,158$	$y = 1,02x + 7,168$	$y = 2,807x + 22,876$
Ln2	Уничтожен		
Ln3			
Ln4			
Ln5	$y = 2,964x - 28,587$	$y = 0,845x + 0,838$	$y = 3,083x - 26,911$
Ln6	$y = 2,17x + 24,333$	$y = 0,917x - 22,375$	$y = 2,345x + 18,644$
Ln7	$y = 2,23x - 10,062$	$y = 0,883x - 5,874$	$y = 2,397x - 11,737$
Ln8	Уничтожен		
Ln9			
Ln10	$y = 1,385x + 16,447$	$y = 0,314x + 1,501$	$y = 1,419x + 16,48$
Ln11	Уничтожен		
Ln12	$y = 2,426x - 21,048$	$y = 0,911x + 14,707$	$y = 2,588x - 11,335$
Ln13	$y = 1,987x + 30,284$	$y = 0,813x - 9,246$	$y = 2,141x + 26,585$
Ln14	$y = 0,591x + 0,555$	$y = 0,468x + 9,823$	$y = 0,751x + 7,408$
Ln15	$y = 0,649x - 0,642$	$y = 0,44x + 4,569$	$y = 0,782x + 2,611$
Ln16	$y = 0,641x + 8,778$	$y = 0,451x - 4,09$	$y = 0,782x + 5,917$
Ln17	Уничтожен		
Ln18			
Ln19	$y = 0,806x + 3,035$	$y = 0,412x + 9,681$	$y = 0,904x + 7,908$
Ln20	$y = 0,773x - 3,296$	$y = 0,368x + 4,188$	$y = 0,855x - 0,761$
Ln21	Уничтожен		
Ln22			
Ln23	$y = 0,777x + 1,534$	$y = 0,298x + 4,123$	$y = 0,833x + 3,329$
Ln24	$y = 0,87x + 2,469$	$y = 0,295x + 5,461$	$y = 0,918x + 4,079$
Ln25	$y = 0,933x - 9,67$	$y = 0,279x + 5,221$	$y = 0,971x - 6,461$
Ln26	$y = 1,282x - 6,929$	$y = 0,284x + 9,605$	$y = 1,31x - 3,329$
Ln27	Уничтожен		
Ln28	$y = 0,965x + 5,374$	$y = 0,224x + 2,98$	$y = 0,991x + 6,113$
Ln29	$y = 0,779x + 9,355$	$y = 0,07x + 1,719$	$y = 0,783x + 9,224$
Ln30	$y = 1,139x - 6,483$	$y = 0,233x + 5,134$	$y = 1,159x - 4,721$
Ln31	$y = 1,205x + 8,593$	$y = 0,2x + 6,309$	$y = 1,221x + 9,725$
Ln32	$y = 0,754x + 6,07$	$y = 0,085x + 7,81$	$y = 0,758x + 7,593$
Ln33	$y = 0,814x + 2,328$	$y = 0,067x + 1,403$	$y = 0,818x + 2,197$
Ln34	$y = 0,759x + 8,8$	$y = 0,079x + 7,179$	$y = 0,764x + 9,877$
Ln35	$y = 0,629x + 7,517$	$y = 0,098x + 3,22$	$y = 0,635x + 8,147$
Ln36	$y = 3,146x - 20,417$	$y = 0,893x + 4,547$	$y = 3,27x - 18,111$
Ln37	$y = 1,391x + 4,612$	$y = 0,309x + 4,177$	$y = 1,424x + 5,537$

Продолжение таблицы П.1

Ln38	$y = 1,432x - 6,744$	$y = 0,259x + 9,627$	$y = 1,453x - 3,329$
Ln39	$y = 2,289x + 6,929$	$y = 0,328x + 4,732$	$y = 2,312x + 7,799$
Ln40	$y = 2,26x + 27,814$	$y = 0,374x + 9,779$	$y = 2,292x + 29,185$
Ln41	$y = 1,025x + 23,572$	$y = 0,197x + 9,3$	$y = 1,042x + 25,465$
Ln42	$y = 2,29x - 17,557$	$y = 0,548x + 16,556$	$y = 2,348x - 10,04$
Ln43	$y = 1,239x + 21,092$	$y = 0,194x + 2,371$	$y = 1,253x + 21,016$
Ln44	$y = 0,687x + 16,686$	$y = 0,103x + 5,95$	$y = 0,692x + 17,763$
Ln45	$y = 0,725x + 5,015$	$y = 0,054x - 1,066$	$y = 0,725x + 5,015$
Ln46	$y = 0,706x + 2,36$	$y = 0,113x + 2,698$	$y = 0,715x + 2,861$
Ln47	$y = 1,186x - 3,981$	$y = 0,244x + 6,842$	$y = 1,209x - 1,904$
Ln48	$y = 2,656x + 11,563$	$y = 1,019x + 1,001$	$y = 2,845x + 11,204$
Ln49	$y = 2,948x + 39,095$	$y = 0,675x + 8,811$	$y = 3,023x + 39,791$
Ln50	Уничтожен		
Ln51	$y = 3,14x - 10,682$	$y = 0,932x + 2,796$	$y = 3,274x - 9,529$
Ln52	Уничтожен		
Ln53			
Ln54	$y = 1,728x + 27,27$	$y = 0,213x + 3,372$	$y = 1,742x + 27,194$
Ln55	$y = 1,763x + 15,283$	$y = 0,245x + 4,743$	$y = 1,779x + 15,968$
Ln56	$y = 1,718x - 3,437$	$y = 0,041x + 17,644$	$y = 1,711x + 0,131$
Ln57	$y = 0,976x + 13,249$	$y = 0,011x + 1,262$	$y = 0,976x + 13,249$
Ln58	$y = 0,859x + 23,148$	$y = 0,02x + 0,555$	$y = 0,859x + 23,148$

ПРИЛОЖЕНИЕ Р

**Прогнозные величины смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на
оползневом склоне левого берега реки Тосны на 28.07.2024 г. по данным 0 – 2 циклов
наблюдений (15.07.2023 г. – 27.04.2024 г.)**

Таблица Р.1 – Прогнозные величины смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны на 28.07.2024 г. по данным 0 – 2 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 27.04.2024 г.)

Название пункта	Горизонтальные смещения			Вертикальные смещения			Пространственные смещения		
	Прогноз, мм	Факт, мм	Точность прогноза, %	Прогноз, мм	Факт, мм	Точность прогноза, %	Прогноз, мм	Факт, мм	Точность прогноза, %
Ln1	1013	1089	93	394	390	99	1087	1156	94
Ln2	Уничтожен								
Ln3									
Ln4									
Ln5	1095	1061	97	321	323	99	1141	1109	97
Ln6	847	940	90	325	266	78	907	977	93
Ln7	835	868	96	329	317	96	897	924	97
Ln8	Уничтожен								
Ln9									
Ln10	541	574	94	121	131	92	554	589	94
Ln11	Уничтожен								
Ln12	899	841	93	360	296	78	969	892	91
Ln13	783	793	99	299	313	96	838	853	98
Ln14	225	225	100	187	173	92	292	284	97
Ln15	245	249	99	171	173	99	299	303	99
Ln16	252	252	100	167	163	98	302	300	99
Ln17	Уничтожен								
Ln18									
Ln19	308	345	89	166	159	96	350	380	92
Ln20	290	353	82	144	149	96	323	383	84
Ln21	Уничтожен								
Ln22									
Ln23	296	321	92	117	124	94	319	344	93
Ln24	332	342	97	117	123	95	352	363	97
Ln25	344	359	96	111	107	96	362	375	97
Ln26	479	455	95	117	113	96	493	469	95
Ln27	Уничтожен								
Ln28	371	430	86	88	87	99	382	439	87
Ln29	305	291	95	28	38	74	306	294	96
Ln30	425	470	90	94	113	83	435	483	90
Ln31	465	463	100	82	89	92	472	472	100
Ln32	292	298	98	40	46	87	295	301	98
Ln33	311	280	89	27	15	26	312	281	89
Ln34	296	291	98	37	31	81	299	292	98
Ln35	246	291	85	40	22	17	249	292	85
Ln36	1172	1012	84	343	364	94	1221	1075	86
Ln37	532	506	95	121	122	99	545	521	95

Продолжение таблицы Р.1

Ln38	536	545	98	108	112	96	547	557	98
Ln39	874	939	93	129	149	87	884	950	93
Ln40	884	917	96	151	155	97	898	930	97
Ln41	412	492	84	84	80	95	420	499	84
Ln42	850	899	95	224	235	95	880	929	95
Ln43	491	454	92	76	88	86	496	462	93
Ln44	277	290	96	45	32	61	280	291	96
Ln45	280	297	94	20	17	84	280	297	94
Ln46	270	297	91	46	33	61	274	298	92
Ln47	445	468	95	99	102	97	456	479	95
Ln48	1018	1077	95	387	368	95	1089	1138	96
Ln49	1156	1238	93	265	313	85	1186	1277	93
Ln50	Уничтожен								
Ln51	1179	1150	97	356	339	95	1231	1199	97
Ln52	Уничтожен								
Ln53									
Ln54	682	660	97	84	101	83	688	668	97
Ln55	684	603	87	97	90	92	690	609	87
Ln56	648	689	94	33	71	47	648	692	94
Ln57	383	379	99	6	8	70	383	379	99
Ln58	349	377	92	8	2	0	349	377	92

ПРИЛОЖЕНИЕ С

**Уравнения прогноза смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на
оползневом склоне левого берега реки Тосны по данным 0 – 3 циклов
наблюдений (15.07.2023 г. – 28.07.2024 г.)**

Таблица С.1 – Уравнения прогноза смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны по данным 0 – 3 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 28.07.2024 г.)

Название деформационного пункта	Горизонтальные смещения	Вертикальные смещения	Пространственные смещения
Ln1	$y = 2,772x + 11,581$	$y = 1,012x + 7,698$	$y = 2,95x + 13,284$
Ln2	Уничтожен		
Ln3			
Ln4			
Ln5	$y = 2,894x - 23,896$	$y = 0,849x + 0,572$	$y = 3,016x - 22,415$
Ln6	$y = 2,363x + 11,417$	$y = 0,794x - 14,197$	$y = 2,489x + 9,02$
Ln7	$y = 2,298x - 14,635$	$y = 0,859x - 4,239$	$y = 2,453x - 15,523$
Ln8	Уничтожен		
Ln9			
Ln10			
Ln11			
Ln12	$y = 2,307x - 13,088$	$y = 0,778x + 23,548$	$y = 2,427x - 0,625$
Ln13	$y = 2,007x + 28,945$	$y = 0,842x - 11,184$	$y = 2,172x + 24,503$
Ln14	Уничтожен		
Ln15			
Ln16	$y = 0,642x + 8,719$	$y = 0,443x - 3,566$	$y = 0,777x + 6,253$
Ln17	Уничтожен		
Ln18			
Ln19			
Ln20	$y = 0,904x - 12,047$	$y = 0,379x + 3,436$	$y = 0,979x - 9,016$
Ln21	Уничтожен		
Ln22			
Ln23	$y = 0,829x - 1,906$	$y = 0,312x + 3,173$	$y = 0,885x - 0,131$
Ln24	$y = 0,89x + 1,087$	$y = 0,307x + 4,691$	$y = 0,941x + 2,583$
Ln25	$y = 0,964x - 11,774$	$y = 0,271x + 5,745$	$y = 0,999x - 8,303$
Ln26	$y = 1,232x - 3,591$	$y = 0,275x + 10,167$	$y = 1,26x + 0,012$
Ln27	Уничтожен		
Ln28	$y = 1,087x - 2,798$	$y = 0,222x + 3,095$	$y = 1,11x - 1,818$
Ln29	$y = 0,751x + 11,226$	$y = 0,09x + 0,351$	$y = 0,758x + 10,859$
Ln30	$y = 1,232x - 12,702$	$y = 0,274x + 2,449$	$y = 1,259x - 11,404$
Ln31	$y = 1,2x + 8,933$	$y = 0,214x + 5,337$	$y = 1,22x + 9,768$
Ln32	$y = 0,767x + 5,225$	$y = 0,097x + 6,988$	$y = 0,771x + 6,745$
Ln33	$y = 0,75x + 6,599$	$y = 0,043x + 3,027$	$y = 0,753x + 6,509$
Ln34	$y = 0,748x + 9,558$	$y = 0,066x + 8,048$	$y = 0,749x + 10,895$
Ln35	$y = 0,722x + 1,288$	$y = 0,06x + 5,759$	$y = 0,724x + 2,165$
Ln36	$y = 2,815x + 1,731$	$y = 0,937x + 1,647$	$y = 2,967x + 2,152$
Ln37	$y = 1,338x + 8,198$	$y = 0,31x + 4,054$	$y = 1,374x + 8,903$

Продолжение таблицы С.1

Ln38	$y = 1,451x - 7,998$	$y = 0,268x + 9,048$	$y = 1,473x - 4,674$
Ln39	$y = 2,423x - 2,006$	$y = 0,369x + 1,986$	$y = 2,449x - 1,351$
Ln40	$y = 2,328x + 23,309$	$y = 0,381x + 9,285$	$y = 2,359x + 24,751$
Ln41	$y = 1,191x + 12,506$	$y = 0,189x + 9,851$	$y = 1,205x + 14,586$
Ln42	$y = 2,391x - 24,279$	$y = 0,57x + 15,071$	$y = 2,45x - 16,842$
Ln43	$y = 1,163x + 26,176$	$y = 0,219x + 0,684$	$y = 1,183x + 25,721$
Ln44	$y = 0,714x + 14,904$	$y = 0,076x + 7,739$	$y = 0,715x + 16,242$
Ln45	$y = 0,761x + 2,63$	$y = 0,049x - 0,711$	$y = 0,761x + 2,63$
Ln46	$y = 0,762x - 1,387$	$y = 0,087x + 4,429$	$y = 0,765x - 0,461$
Ln47	$y = 1,233x - 7,103$	$y = 0,25x + 6,464$	$y = 1,256x - 5,02$
Ln48	$y = 2,778x + 3,413$	$y = 0,979x + 3,651$	$y = 2,945x + 4,47$
Ln49	$y = 3,117x + 27,798$	$y = 0,775x + 2,136$	$y = 3,213x + 27,139$
Ln50	Уничтожен		
Ln51	$y = 3,079x - 6,6$	$y = 0,897x + 5,13$	$y = 3,207x - 5,065$
Ln52	Уничтожен		
Ln53			
Ln54	$y = 1,682x + 30,355$	$y = 0,248x + 1,013$	$y = 1,702x + 29,901$
Ln55	$y = 1,596x + 26,432$	$y = 0,229x + 5,777$	$y = 1,611x + 27,222$
Ln56	$y = 1,804x - 9,166$	$y = 0,119x + 12,389$	$y = 1,801x - 5,902$
Ln57	$y = 0,967x + 13,846$	$y = 0,016x + 0,925$	$y = 0,967x + 13,846$
Ln58	$y = 0,918x + 19,213$	$y = 0,007x + 1,392$	$y = 0,918x + 19,213$

ПРИЛОЖЕНИЕ Т

**Прогнозные величины смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на
оползневом склоне левого берега реки Тосны на 19.07.2025 г. по данным 0 – 3 циклов
наблюдений (15.07.2023 г. – 28.07.2024 г.)**

Таблица Т.1 – Прогнозные величины смещений опорных, рабочих и деформационных пунктов на оползневом склоне левого берега реки Тосны на 19.07.2025 г. по данным 0 – 3 циклов наблюдений (15.07.2023 г. – 28.07.2024 г.)

Название деформационного пункта	Прогноз, мм		
	Горизонтальные смещения	Вертикальные смещения	Пространственные смещения
Ln1	2049	752	1194
Ln2	Уничтожен		
Ln3			
Ln4			
Ln5	2103	625	1000
Ln6	1748	570	1163
Ln7	1674	627	1108
Ln8	Уничтожен		
Ln9			
Ln10			
Ln11			
Ln12	1683	596	583
Ln13	1504	608	578
Ln14	Уничтожен		
Ln15			
Ln16	480	322	713
Ln17	Уничтожен		
Ln18			
Ln19			
Ln20	653	282	650
Ln21	Уничтожен		
Ln22			
Ln23	607	233	926
Ln24	655	230	1014
Ln25	697	205	814
Ln26	902	212	568
Ln27	Уничтожен		
Ln28	796	166	906
Ln29	563	67	573
Ln30	893	204	560
Ln31	891	163	561
Ln32	569	79	535
Ln33	558	34	2183
Ln34	559	57	1019
Ln35	532	50	1078
Ln36	2071	690	1798

Продолжение таблицы Т.1

Ln37	991	232	1758
Ln38	1058	206	900
Ln39	1779	274	1784
Ln40	1734	289	895
Ln41	888	149	542
Ln42	1733	434	562
Ln43	881	162	562
Ln44	540	64	918
Ln45	562	35	2169
Ln46	559	68	2388
Ln47	899	190	2365
Ln48	2045	723	2352
Ln49	2319	572	2297
Ln50	Уничтожен		
Ln51	2257	664	1281
Ln52	Уничтожен		
Ln53			
Ln54	1267	183	725
Ln55	1200	174	694
Ln56	1316	100	1194
Ln57	725	13	2194
Ln58	694	7	1839