


Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



На правах рукописи

ГРИЩЕНКОВА ЕКАТЕРИНА НИКОЛАЕВНА

**ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ
ДЕФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ЗЕМНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Мустафин Мурат Газизович

Санкт-Петербург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	14
1.1 Аналитический обзор технологий инструментального контроля деформаций в рамках мониторинга земной поверхности.....	15
1.2 Анализ средств обработки данных геодезических наблюдений....	25
1.3 Обзор исследований в области прогнозирования деформаций земной поверхности.....	29
1.4 Обзор разработок в области пространственно-временного анали- за сдвига.....	32
Выводы к главе 1.....	37
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ДЕФОРМАЦИ- ОННОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	39
2.1 Спутниковые наблюдения в рамках геодезического мониторинга и оценка точности.....	39
2.2 Математическая модель накопления погрешностей наблюдений с помощью электронных тахеометров.....	41
2.3 Математическая модель накопления погрешностей наблюдений с помощью лазерных сканирующих систем.....	44
2.4 Модель калибровочной функции для корректировки прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности.....	49
2.5 Модель искусственной нейронной сети для корректировки прогноза на основании данных инструментальных наблюдений.....	57
2.6 Создание динамических цифровых моделей рельефа и контроль динамики нарастания деформаций.....	61
Выводы к главе 2.....	67

3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	69
3.1 Программный комплекс моделирования условий наблюдений с помощью электронного тахеометра.....	70
3.2 Программный комплекс моделирования условий наблюдений с помощью лазерной сканирующей системы.....	78
3.3 Инструментарий для корректировки прогноза деформаций посредством калибровочных функций.....	85
3.4 Программный комплекс корректировки прогноза деформаций на основании нейронной сети.....	86
Выводы к главе 3.....	91
4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗРАБОТАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ.....	92
4.1 Анализ результатов моделирования расчетов точности при наблюдениях электронными тахеометрами.....	92
4.2 Анализ результатов моделирования расчетов точности при наблюдениях с помощью ЛСС.....	100
4.3 Анализ результатов расчетов точности при наблюдениях с помощью спутниковых приемников.....	103
4.4 Анализ результатов корректировки прогноза деформаций с помощью калибровочной функции.....	105
4.5 Анализ результатов работы нейронной сети при корректировке прогноза деформаций.....	108
4.6 Внедрение результатов исследования в геодезическую практику мониторинга территорий.....	110
Выводы к главе 4.....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	129

ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	134

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Необходимость проведения геодезического мониторинга деформаций земной поверхности на территориях угольных шахт, а также подрабатываемых объектов закреплена «Инструкцией по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях» [35] и СП 11-104-97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства» [73].

Существующая методика инструментальных наблюдений за деформациями земной поверхности на подрабатываемых территориях, основанная на применении оптико-механического оборудования, обладает высокой точностью, однако вместе с тем представляет собой трудоемкий процесс со значительными временными затратами. При этом, согласно действующей методике, не представляется возможным получить пространственную картину сдвижения земной поверхности и отследить динамику развития данного процесса [23].

Решением вопроса является создание комплексной методики мониторинга на обновленной инструментальной базе (электронные тахеометры, лазерные сканирующие системы, GNSS-приемники). Такая технология, в первую очередь, позволяет значительно повысить скорость измерений и их обработки за счет применения вышеуказанного электронного геодезического оборудования, наглядно визуализировать результаты наблюдений с помощью компьютерных средств, а также дает возможность представления новой методики измерений на основе регулярно обновляемых цифровых моделей местности. Цифровые модели рельефа, создаваемые с помощью вышеуказанных методов наблюдений, используются для анализа динамики нарастания деформаций на подрабатываемых территориях, а также для корректировки существующих методов прогноза деформаций земной поверхности [23].

Значительный вклад в развитие научных представлений о мониторинге деформаций земной поверхности и подрабатываемых объектов внесли со-

трудники ВНИМИ – авторы «Инструкции по наблюдениям за сдвижением...» [35] и «Правил охраны сооружений и природных объектов...» [63], которые и на сегодняшний день являются основными нормативными документами, регламентирующими требования к проведению натурных наблюдений, оценке и прогнозу деформаций, возникающих на территории сдвижения земной поверхности вследствие шахтной подработки.

Нормативная база, регламентирующая геодезические наблюдения на подрабатываемых территориях, разрабатывалась также Научно-исследовательским, проектно-изыскательским и конструкторско-технологическим институтом оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова. Весомый вклад в решение проблемы оценки деформаций земной поверхности на примере контроля освоения подземного пространства в г. Москве внес Институт проблем комплексного освоения недр (ИПКОН). Следует особо отметить ученых, разработки которых позволили существенно продвинуть фронт исследований в области методов наблюдений за деформациями земной поверхности: М.А. Иофис, А.А. Панжин, Х.К. Ямбаев, В.Г. Колмогоров, И.А. Петухов, М.А. Кузнецов, В.Н. Земисев, А.Ф. Стороженко, М.Г. Мустафин, В.Н. Гусев, А.Д. Сашурин, А.Н. Медянцеv, Е.Ю. Тюшевский, В.А. Середович, А.В. Комиссаров, В.И. Волков, В.И. Кафтан и др.

Что касается современной альтернативы классическому оборудованию, то к настоящему времени накоплен достаточный опыт и теоретическая основа по вопросу использования методов геодезических наблюдений за деформациями земной поверхности, в основе которых лежит электронное оборудование – современные тахеометры, лазерные сканирующие системы, спутниковые приемники.

Тем не менее, несмотря на факт повсеместной интеграции современных технологий в производственный процесс в области наблюдений за сдвижением земной поверхности на подрабатываемых территориях, электронное геодезическое оборудование характеризуется небольшой степенью исследован-

ности в вопросах конкретики его применения и интерпретации результатов измерений для формирования цифровых моделей рельефа и контроля динамики развития деформационного процесса.

Научные исследования, изложенные в диссертационной работе, посвящены разработке методики геодезического мониторинга деформационного процесса земной поверхности, включающей проведение высокоточных инструментальных наблюдений для контроля деформаций, корректировки прогноза и формирования динамических цифровых моделей рельефа.

Цель исследований. Разработка методики геодезического мониторинга земной поверхности на подрабатываемых территориях, позволяющей производить прогнозирование и контроль динамики деформационного процесса.

Идея работы заключается в обосновании методики наблюдений за деформациями земной поверхности на подрабатываемых территориях современными геодезическими приборами (электронными тахеометрами, лазерными сканирующими системами, спутниковыми навигационными системами) на основе механизма накопления погрешностей измерений и особенностей нарастания деформаций земной поверхности в процессе ее сдвижения под влиянием подземных горных работ.

Основные задачи исследований:

1. Анализ изученности вопроса геодезического обеспечения наблюдений за сдвижением и деформациями земной поверхности на подрабатываемых территориях.

2. Разработка математических моделей накопления погрешностей геодезических наблюдений на подрабатываемых территориях и оценка точности; разработка программных средств расчета для различных видов наблюдений; анализ результатов разработанных математических моделей и создание рекомендаций к проведению наблюдений; практическое исследование разработанных рекомендаций.

3. Разработка математических моделей калибровочных функций и нейронной сети для корректировки прогноза деформаций земной поверхно-

сти; разработка программных средств для реализации вышеуказанных моделей; проверка качества работы алгоритмов корректировки прогноза.

4. Формирование динамических цифровых моделей рельефа (ДЦМР) на основании результатов наблюдений.

Методы исследования. В работе использованы методы математической обработки геодезических измерений, математического моделирования и статистического анализа, расчета калибровочных функций и искусственной нейронной сети, натурных измерений с применением электронного тахеометра, лазерных сканирующих систем, GNSS-приемников, обработки данных мониторинга с помощью программных средств.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель накопления погрешностей определения координат с помощью электронного тахеометра и лазерной сканирующей системы, определен диапазон ее применения для инструментальных наблюдений на профильных линиях наблюдательных станций на подрабатываемых территориях, разработаны рекомендации по проведению геодезических наблюдений.

2. Предложены и реализованы механизм калибровочных функций и нейронная сеть для корректировки прогноза деформаций земной поверхности с учетом результатов систематических инструментальных наблюдений на профильных линиях наблюдательных станций и динамики процесса сдвижения.

3. Создан алгоритм формирования динамических ЦМР по результатам текущего прогноза деформаций земной поверхности с использованием логической функции нарастания этих деформаций.

4. Обосновано геодезическое обеспечение мониторинга деформаций земной поверхности, позволяющее осуществлять оперативный контроль состояния земной поверхности на подрабатываемых территориях.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Инструментальные наблюдения на профильных линиях подрабатываемых территорий выполняются электронным тахеометром, при этом точность измерений, соответствующая нормативной, определяется на основе разработанных математических моделей накопления погрешностей.

2. Механизм корректировки прогноза нарастания деформаций в процессе сдвижения земной поверхности с учетом результатов инструментальных наблюдений на наблюдательных станциях, реализованный с помощью калибровочных функций и нейронной сети, обеспечивает повышение точности прогноза деформаций более чем вдвое.

3. Геодезическое обеспечение мониторинга деформаций земной поверхности должно быть реализовано путем формирования комплекса динамических ЦМР, основанных на результатах прогноза нарастания деформаций и инструментальных наблюдений в процессе сдвижения земной поверхности и обеспечивающих оперативный контроль состояния подрабатываемых территорий.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается согласованностью теоретических исследований с результатами натуральных наблюдений на наблюдательных станциях в рамках мониторинга земной поверхности, а также результатами прогноза деформаций земной поверхности.

Практическая значимость. Разработана и математически обоснована методика геодезических наблюдений за сдвижением и деформациями земной поверхности с помощью электронного геодезического оборудования (электронных тахеометров, лазерных сканирующих систем, спутниковых приемников). Методика удовлетворяет всем требованиям отраслевых нормативных документов.

На базе созданных математических моделей разработаны программные средства для моделирования наблюдательных станций при наблюдениях за сдвижением земной поверхности с помощью электронного тахеометра (Сви-

детельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017616397) и лазерной сканирующей системы (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017663004).

Разработана методика использования калибровочных функций для корректировки прогноза с учетом инструментальных наблюдений.

Разработан эффективный инструмент корректировки прогноза деформаций с помощью искусственной нейронной сети по результатам периодических инструментальных наблюдений.

На базе разработанной модели искусственной нейронной сети создан программный продукт, предназначенный для прогнозирования координат с учетом результатов инструментальных измерений (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018613553).

Разработана методика формирования динамических ЦМР для оперативного контроля деформаций земной поверхности под влиянием подземных горных работ.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных конференциях, в том числе: Young Persons World Lecture Competition 2017 (г. Перт, Австралия), Международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, Россия), Международных научных симпозиумах «Неделя горняка-2018» и «Неделя горняка-2017» (г. Москва, Россия), Форуме проектов программ Союзного государства (г. Минск, Республика Беларусь), XII ВНК «Новые технологии при природопользовании» (г. Санкт-Петербург, Россия), 9-м Геосимпозиуме молодых ученых «Силезия 2016» (г. Крочице, Польша), 11-м Коллоквиуме молодых ученых (г. Фрайберг, Германия).

Научной лекции на основании проведенных исследований было присуждено I место в конкурсе Young Persons' World Lecture Competition 2017 (Russian Final), по результатам которого автор принял участие в мировом финале в г. Перт, Австралия.

Инновационный проект, находящийся в основе диссертационной работы, был представлен на V Форуме вузов инженерно-технологического профиля (г. Минск, 2016 г.); автор объявлен лауреатом II степени, проекту присуждено звание лучшего инновационного проекта Союзного государства.

Работа заняла III место среди работ молодых ученых на международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.).

Публикации и программы для ЭВМ. Основное содержание работы отражено в 13 публикациях, из них 6 – в журналах, включенных в перечень ведущих научных изданий ВАК Министерство образования и науки Российской Федерации, 2 – в журналах, включенных в базы данных Scopus и Web of Science.

Имеются свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (автор – Грищенко Е.Н.):

- № 2017616397 «Программный комплекс моделирования условий съемки наблюдательных станций методом электронной тахеометрии», дата регистрации 6 июня 2017 г.;
- № 2017663004 «Программа моделирования условий съемки наблюдательных станций методом лазерного сканирования», дата регистрации 23 ноября 2017 г.;
- № 2018613553 «Программа расчета уточненного прогноза деформаций на базе нейронной сети», дата регистрации 16 марта 2018 г.

Внедрение. Представленные методики геодезических наблюдений за сдвижением и деформациями земной поверхности и калибровки прогноза, а также разработанное программное обеспечение внедрены в СП «Краснодонуголь», г. Краснодон (приложение Г), и научно-исследовательском институте РАНИМИ, г. Донецк (приложения Д, Е).

Личный вклад автора. Автор принимал участие во всех этапах диссертационной работы. Лично автором проводились:

- анализ состояния изученности вопросов мониторинга земной поверхности на подрабатываемых территориях;
- разработка методики наблюдений на основании математических моделей накопления погрешностей при наблюдениях с помощью электронного тахеометра, лазерной сканирующей системы, GNSS-оборудования;
- разработка программного комплекса моделирования условий наблюдений и расчета точности;
- статистическая обработка результатов моделирования условий наблюдений;
- практические исследования разработанных рекомендаций к проведению измерений на наблюдательных станциях;
- разработка модели корректировки прогноза с помощью калибровочных функций;
- разработка алгоритма калибровочных функций для корректировки прогноза деформаций земной поверхности;
- разработка искусственной нейронной сети для уточнения результатов прогноза деформаций земной поверхности;
- разработка программного средства корректировки прогноза на основании нейронной сети;
- разработка алгоритма создания динамических ЦМР по результатам наблюдений.

Текст диссертации состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 135 страницах машинописного текста и содержит 33 рисунка, 6 таблиц, список литературы из 107 наименований, 6 приложений.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, профессору кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета, д.т.н. М.Г. Мустафину за помощь на разных этапах подготовки диссертационной работы, а также сотрудникам отдела сдвижения зем-

ной поверхности и защиты подрабатываемых объектов Республиканского академического научно-исследовательского и проектно-конструкторского института горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ) – за ценные замечания и советы при проведении диссертационных исследований.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

С ростом объемов добычи полезных ископаемых повышается и необходимость постоянного мониторинга деформационных процессов на подрабатываемых территориях. Согласно ГОСТ Р 22.1.01-95 «Мониторинг и прогнозирование», система мониторинга предполагает проведение систематических наблюдений за объектом мониторинга, оценку его состояния, анализ происходящих процессов и прогнозирование их изменений [12].

Сдвигения и деформации горных пород и земной поверхности могут стать причиной повреждений и разрушений подрабатываемых объектов (зданий, сооружений, природных объектов). С целью контроля и оценки состояния охраняемых объектов, определения эффективности выбранных мер охраны, организуются наблюдения за сдвижением земной поверхности и горных пород (как визуальные, так и инструментальные), а также за состоянием охраняемых объектов [64]. Организация и проведение наблюдений и обследований выполняются в соответствии с действующими нормативно-методическими документами [35, 51].

Оперативное прогнозирование сдвижений и деформаций земной поверхности позволяет предпринять своевременные меры и снизить негативные последствия ведения горных работ [60]. Существующая методика прогноза деформаций земной поверхности приведена в ряде нормативных источников [26, 63].

В целом же выемка угля из-под сооружений и природных объектов, рациональное размещение новых населенных пунктов и промышленных сооружений на угленосных площадях имеют большое народнохозяйственное значение, в связи с чем возникает потребность в детальном и всестороннем изучении процесса сдвижения горных пород и земной поверхности [35]. Результаты геодезического мониторинга деформационного процесса земной

поверхности являются основанием для исследования динамики сдвижения, характера нарастания деформаций в мульде сдвижения, а также анализа деформационного процесса и его воздействия на объекты, расположенные в зоне влияния подработки.

1.1 Аналитический обзор технологий инструментального контроля деформаций в рамках мониторинга земной поверхности

Инструментальные наблюдения за сдвижением земной поверхности от влияния подземной очистной выемки являются неотъемлемой частью геодезического обеспечения горных работ на угольных шахтах. Такие наблюдения производятся практически на всем протяжении жизненного цикла горного предприятия и преследуют достижение ряда целей. В их числе установление параметров процесса сдвижения земной поверхности, расчет деформаций земной поверхности на всех этапах процесса сдвижения и установление связи между деформациями земной поверхности и возникающими деформациями в объектах, расположенных на подрабатываемой территории [35].

Результаты инструментальных наблюдений необходимы: а) для установления мер охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ; б) для выбора наиболее рациональных способов выемки угольных пластов под охраняемыми объектами на поверхности; в) для совершенствования методов прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности при различных горно-геологических и горнотехнических условиях выемки угля [35].

Нормативный документ СП 11-104-97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства» [73] также регламентирует проведение геодезических работ при выполнении наблюдений по изучению опасных природных и техноприродных процессов, в том числе на подрабатываемых территориях. В рамках таких работ должны производиться геодезические наблюдения за вертикальными смещениями земной поверхности, откуда следует, что

геодезический мониторинг является обязательным мероприятием инженерно-геодезических изысканий, выполняемых в период эксплуатации объектов.

Нормативно-методическими источниками [7, 35, 51] установлен порядок проведения наблюдений за сдвижением земной поверхности, а также за деформациями различных сооружений, вызванными подработкой, что заключается в инструментальном определении на разные даты положения реперов наблюдательных станций с одновременным фиксированием видимых нарушений, а также всех факторов, влияющих на величины и характер сдвижений и деформаций. Их проводят с целью своевременного принятия мер, предотвращающих аварийные ситуации, сравнения ожидаемых и фактических повреждений и деформаций земной поверхности.

Инструментальные наблюдения проводятся на наблюдательных станциях, которые подразделяются на типовые (закладываемые для установления характера распределения сдвижений и деформаций) и специальные (закладываемые для детального изучения сдвижения земной поверхности на участках со сложными горно-геологическими условиями залегания пластов либо для особо важных объектов, охрана которых требует специальных мер защиты и систематического мониторинга процесса сдвижения) [35].

Следует особо отметить, что «Инструкцией по наблюдениям за сдвижением...» [35] предлагается использовать термин «репер» для описания точки (геодезического пункта) на профильной линии: «Рабочий репер – репер профильной линии, предназначенный для определения величин сдвижений земной поверхности, положение которого в пространстве определяется относительно опорных реперов профильной линии».

Перед началом наблюдений производят привязку (определение координат X , Y , Z) опорных реперов наблюдательной станции к ближайшим пунктам опорной маркшейдерско-геодезической сети). Опорные реперы закладывают по два или три на расстояниях соответственно 50 и 100 м или 30, 60 и 90 м от крайних рабочих реперов [35]. Важным аспектом является устойчивость исходных реперов геодезической основы; стабильность сети

обеспечивает высокую точность при определении деформаций земной поверхности в рамках деформационного мониторинга [6].

Полная серия инструментальных наблюдений на станции должна состоять из следующих работ: измерения расстояний между реперами по профильным линиям; нивелирования всех реперов наблюдательной станции; съемки трещин, образовавшихся на земной поверхности под влиянием подземных разработок, с указанием времени их появления и величины раскрытия [35].

В соответствии с «Инструкцией по наблюдениям за сдвижением...» [35] расстояния между реперами наблюдательной станции определяются в зависимости от глубины разработки: для глубин до 100 м расстояния составляют 5 м; для глубин 101-300 м – 10 м; для глубин свыше 300 м – 20 м. В практике редко встречается подработка объектов на малых глубинах, поэтому расстояние в 20 м между реперами является основным. В ряде случаев (выход под наносы тектонических нарушений, особые условия охраны объектов и т.п.) эти расстояния могут быть уменьшены до 5-10 м.

Расстояния между реперами профильных линий измеряют в прямом и обратном направлениях. Расхождение горизонтальных расстояний между крайними реперами прямого и обратного ходов не должно превышать 1:10000 длины профильной линии [35].

Вынос центров реперов осуществляют с помощью жестких отвесов или другими способами, позволяющими обеспечить проектирование центра с точностью 1 мм [35].

Нивелирование ведут в прямом и обратном направлениях. Невязка хода не должна превышать допустимой невязки, вычисляемой по формуле [35]:

$$\Delta h = \pm 15\sqrt{L}, \quad (1.1)$$

где L – длина хода в одном направлении, км.

Ширина раскрытия трещин измеряется рулеткой или линейкой с допустимой точностью 1-2 мм.

Для нивелирования применяют нивелиры любого типа с трубой, имеющей увеличение не менее 30^{\times} , цена деления цилиндрического уровня должна быть не более 15" на 2 мм, контактного – не более 30" на 2 мм, применимы также нивелиры с самоустанавливающейся линией визирования. Рейки применяют со сферическими уровнями трехметровые двусторонние шашечные с минимальным делением по черной стороне 1 см или штриховые трехметровые односторонние с двумя шкалами или двусторонние с минимальными делениями шкал 0,5 см [35].

Наблюдения могут выполняться как оптическим, так и цифровым (электронным) нивелиром. Цифровые нивелиры, кроме механизма автоматической фиксации отсчетов по рейкам, имеют процессор, дающий возможность производить расчет превышений и высот отметок. Благодаря этому практически полностью исключаются ошибки наблюдателя, и снижаются затраты на измерения. Вместе с данным оборудованием применяются штриховые фиброгласовые или инварные рейки.

Расстояния между реперами профильных линий могут быть измерены стальными рулетками, светодальномерами, оптическими дальномерами, лазерными рулетками или другими приборами, обеспечивающими необходимую точность.

При вычислении горизонтальных расстояний между реперами профильной линии, измеренных стальными рулетками, учитывают поправки за температуру, компарирование, провес, наклон, отклонение от створа [35].

На основании результатов инструментальных наблюдений на специальных наблюдательных станциях выполняется расчет сдвижений и деформаций земной поверхности, в частности, величин оседаний, наклонов, кривизны, горизонтальных сдвижений и горизонтальных деформаций [31, 35, 51, 64].

Описанная выше технология измерений характеризуется высокой точностью, но вместе с тем и значительными показателями трудозатрат, большими объемами полевых и камеральных работ. Применение современных

типов используемого оборудования, в частности, цифровых нивелиров, не является эффективным решением проблемы, так как среди всех видов работ на наблюдательной станции наибольшей трудоемкостью обладает процесс измерения длин интервалов между реперами. Использование лазерных рулеток также не приводит к значительному сокращению времени и объема работ, поскольку при работе с ними требуется их установка над каждым репером. Кроме того, по точности измерений лазерные рулетки удовлетворяют требованиям действующих нормативных документов, как правило, для расстояний между реперами не менее 20 м. При использовании традиционной методики измерений на наблюдательных станциях наиболее ощутимые затраты времени отмечаются на шахтах с большим количеством забоев, а также при подработке особо важных объектов (железных дорог, магистральных газопроводов, водоводов), требующих интенсивного мониторинга деформаций земной поверхности.

Решением вопроса совершенствования технологии наблюдений является создание методики на принципиально обновленной инструментальной базе, включающей электронные тахеометры (ЭТ), лазерные сканирующие системы (ЛСС), спутниковые приемники (GNSS-приемники) [23].

Анализ научно-технических публикаций последних лет показал развитие тенденции применения ЭТ, ЛСС и GNSS-приемников для решения различных инженерных задач, в том числе определения деформационных параметров процесса подработки земной поверхности и расположенных на ней объектов.

Значительный вклад в исследование данной тематики сделан рядом современных отечественных исследователей. Так, А.А. Панжиным обосновано применение GNSS-технологий для наблюдения за сдвижением земной поверхности [58], исследования деформационных процессов [66], осуществления пространственно-временного геодинамического мониторинга на горнодобывающих предприятиях [100], исследования геодинамических процессов на подрабатываемых территориях [65]. Ряд его работ посвящен использова-

нию лазерных сканирующих систем в рамках геодинимического мониторинга при разработке месторождений полезных ископаемых [59], что включает в себя наблюдения за состоянием породного массива и подрабатываемых объектов.

Наблюдения за сдвижением земной поверхности с помощью GNSS-наблюдений рассматривались также авторами О.С. Колесатовой и А.Р. Усмановым [41], Е.Ю. Ефремовым [34], О.Г. Бесимбаевой [3], В.И. Кафтаноm [38]. Необходимо отметить вклад Х.К. Ямбаева в области геодезического мониторинга земной поверхности. В статьях [80, 81] им был описан процесс мониторинга с применением спутниковых технологий и отмечена важность проведения геодезических наблюдений за динамикой земной поверхности в зоне строительства крупных инженерных объектов.

Несмотря на вышеописанное применение спутниковых технологий в ходе геодезического мониторинга, следует иметь в виду, что высокая точность, требуемая при наблюдениях за сдвижением, достижима лишь в статическом режиме при использовании двухчастотных GNSS-приемников. При этом практика показывает, что количество реперов профильных линий зачастую превышает 40-50 шт., в связи с чем наблюдаются значительные временные затраты и является нецелесообразным включение спутниковых методов измерений в процесс систематических измерений на профильных линиях.

Объемные исследования в области лазерного сканирования были проведены В.А. Середовичем и А.В. Комиссаровым. В их работах описаны как общие вопросы, характеризующие проблемы и перспективы наземного лазерного сканирования (НЛС) [68, 72], так и частные, связанные с погрешностями результатов наблюдений [43], исследованиями точности измерений [70], а также мониторингом деформаций сооружений методом НЛС [71].

Лазерно-сканирующей съемке было уделено значительное внимание учеными кафедр инженерной геодезии и маркшейдерского дела Санкт-Петербургского горного университета. Так, В.Н. Гусев, М.Г. Выстрчил [32], Ю.Н. Корнилов, В.В. Кулеш [45] среди преимуществ ЛСС представляют

возможность минимизации полевых работ по закладке реперов, получения сдвижений и деформаций в любой точке модели, безопасность ведения мониторинга в зонах провалов, мониторинг недоступных участков и проч. Авторы М.Г. Мустафин, А.В. Ковязин [54] указывают на более точное определение границ зон сдвижений с помощью моделей, полученных с использованием лазерно-сканирующей съемки, в отличие от дискретности данных, получаемых при наблюдениях классическими методами. Е.А. Нестеренко [55] говорит о целесообразности проведения лазерно-сканирующей съемки в случае необходимости подробной картины местности или работе в сжатые сроки, с учетом оптимизации процесса сканирования по числу скан-позиций и за счет выбора режима съемки. В.Н. Гусевым, Е.М. Волоховым, В.А. Головановым и М.Ю. Васильевым представлены актуальные методы и способы проведения измерений с помощью НЛС на карьерах [29]. С целью введения в учебный процесс преподавателями кафедры маркшейдерского дела Горного университета было подготовлено учебное пособие по НЛС [30].

Вклад в развитие тематики геодезического мониторинга на основании наземных лазерных сканирующих систем сделан зарубежными коллегами. Учеными из Словакии и Китая [89, 96] представлены исследования о проведении высокоточного мониторинга деформаций с помощью НЛС и способы повышения точности при обработке результатов наблюдений. В работе [94] описаны преимущества методов геодезического контроля объектов в динамике с использованием поверхностного лазерного сканирования. Кроме того, специалистами рассмотрено применение технологии наземного лазерного сканирования для наблюдений за оползнями [107], а также на карьерах и в зоне шахтной подработки [92, 101]. В работах ученых из Чехии и Египта [88, 104] отражен процесс инструментального мониторинга объектов, претерпевающих деформации, для изучения и оценки повреждений, а также создания трехмерных моделей.

Лазерное сканирование в рамках геодезического мониторинга обрабатываемых территорий может быть представлено в качестве перспективного

способа для создания цифровых моделей мульды сдвижения. Однако для утверждения о возможности включения лазерно-сканирующей съемки в процесс мониторинга и анализа деформаций земной поверхности требуется проведение оценки ее точности для конкретного вида геодезических работ – наблюдений за деформациями подрабатываемых территорий. Подобная проверка может быть произведена лишь на основании соотнесения с требованиями к точности, представленными в «Инструкции по наблюдениям за сдвижением...» [35].

Внедрение лазерно-сканирующих технологий в процесс наблюдений на наблюдательных станциях не исключает необходимости высокоточного контроля деформаций ответственных объектов, что может быть реализовано в виде измерений электронным тахеометром. Авторами М.Г. Мустафиным, А.С. Наумовым [53] описано применение электронного тахеометра для мониторинга деформаций по стенным реперам и деформационным маркам. Е.В. Лебедевой [47] рассмотрена возможность достижения высокой точности в маркшейдерских наблюдениях за деформациями за счет применения электронного тахеометра. А.П. Ворошиловым [4] представлено применение электронных тахеометров для измерения осадок зданий и сооружений, и выполнен расчет точностных характеристик. В работах [93, 106] зарубежных коллег из Канады и Китая представлено применение высокоточных электронных тахеометров для наблюдений за деформациями, а также обоснована актуальность использования роботизированных станций с автоматическим распознаванием целей при мониторинге устойчивости на карьерах [85].

Кроме того, проведение измерений с помощью электронного тахеометра на наблюдательных станциях необходимо при создании планово-высотного обоснования для лазерного сканирования местности. Авторы М.Г. Мустафин, А.В. Ковязин [54] описывают систему мониторинга на основе ЛСС с предварительным созданием планово-высотного обоснования с помощью электронного тахеометра.

Что касается комплексных наблюдений с помощью нескольких видов оборудования, в статье С.В. Усанова, Ю.П. Коноваловой, О.Д. Желтышевой [76] описана система маркшейдерско-геофизического мониторинга, объединяющая измерения с помощью спутниковых приемников и ЛСС. О.С. Колесатова [42] рассматривает иной подход к наблюдениям на станции, основанный на применении методов наблюдений с помощью электронного тахеометра и тригонометрического нивелирования. М.Г. Мустафиным, В.А. Вальковым и А.И. Казанцевым [98] обоснована актуальность контроля деформационных процессов объектов с помощью электронных тахеометров и лазерных сканирующих систем.

На этапе закладки плано-высотного обоснования также может быть использован комбинированный метод, при котором посредством спутниковых наблюдений создается каркасная сеть, а ее сгущение и измерения на профильных линиях производятся с помощью электронного тахеометра [30]. По результатам наблюдений реперы профильных линий могут стать основой для ориентирования цифровых моделей, полученных в результате лазерной съемки.

Сравнительный анализ методов наблюдений был неоднократно представлен зарубежными исследователями в научно-технических публикациях. В частности, в работе фламандских ученых [86] приведено сравнение технологий наблюдений с помощью электронного тахеометра и лазерной сканирующей системы, и сделаны выводы относительно преимуществ и недостатков указанных методов с учетом фактора затрат времени. В труде [99] теми же авторами приведено сравнение процессов мониторинга с помощью лазерных сканеров и роботизированных электронных тахеометров со сканирующей функцией. В работе [87] специалиста из Египта отражен анализ геодезических наблюдений за деформациями объектов с помощью классических теодолитов и электронных тахеометров.

Несмотря на высокую производительность, использование в процессе наблюдений за сдвижением земной поверхности лазерных сканирующих си-

стем и высокоточных электронных тахеометров не гарантирует достижения точности в соответствии с нормативными документами [23, 35, 51]. Поэтому с целью гарантированного получения результатов, удовлетворяющих установленным нормам, наблюдения за деформациями земной поверхности, а также осадками и деформациями зданий и сооружений по-прежнему проводят с помощью аналоговых или цифровых нивелиров, высокоточных теодолитов и рулеток [2, 10].

Основопологающим фактором при принятии решения в пользу того или иного оборудования является предполагаемая точность результатов измерений. Авторами В.Д. Лизуновым, Г.А. Уставичем, В.А. Середовичем, Н.Х. Голыгиным, М.М. Карсунской, Х.К. Ямбаевым и др. исследованы вопросы оценки точности и ее повышения на основании классических методов математической обработки геодезических измерений [37, 48] и с использованием искусственных нейронных сетей [11]. Актуальная задача автоматизации обработки результатов геодезических измерений исследована В.А. Середовичем в работе [69], в которой показана возможность обеспечения требуемой точности измерений для ряда работ с помощью электронных тахеометров, спутниковых геодезических систем и лазерных сканеров.

Подводя итог вышесказанному, следует заметить, что задача расчета точности является одной из ключевых в данном исследовании. Рассмотрение ряда вариантов выбора оборудования для наблюдений за сдвижением земной поверхности предполагает принципиальные различия в схемах проведения измерений на наблюдательных станциях. Классическим и весьма гибким способом оценки точности в таком случае являются функции измеренных величин, находящиеся в прямой зависимости от математического аппарата вычислений искомых величин на наблюдательных станциях [27, 74]. Выбор в пользу того или иного геодезического оборудования для проведения наблюдений может быть сделан лишь на основании анализа погрешностей измерений, возникающих при использовании различных геодезических приборов в ходе мониторинга деформаций.

1.2 Анализ средств обработки данных геодезических наблюдений

Использование современных электронных геодезических приборов (ЭТ, ЛСС, GNSS-приемников) в ходе деформационного мониторинга предполагает переход и к иным методам и средствам обработки результатов наблюдений. При этом возрастает роль автоматизации в геодезических работах. Подобные трансформации по части инструментального контроля в процессе деформационного мониторинга позволяют расширить возможности при сборе и обработке данных и увеличить диапазон решаемых задач.

После проведения наблюдений с помощью ЭТ, ЛСС и GNSS-приемников результаты наблюдений обрабатываются посредством специального программного обеспечения. Чаще всего первичная обработка данных производится в сопутствующем программном обеспечении, таком как Leica Geo Office, Magnet Office Tools (Topcon), Trimble Business Center и т.д.

Вышеуказанные программные средства предоставляют большой выбор опций для работы с результатами геодезических измерений, среди которых комплексная обработка данных, импорт и экспорт, двумерная и трехмерная визуализация, формирование документации, работы по преобразованию координат, постобработка GNSS-измерений, уравнивание сетей, создание трехмерных цифровых моделей рельефа и др.

Весьма распространена практика последующей обработки результатов наблюдений в Microsoft Excel, что дает возможность составлять или настраивать алгоритмы вычислений в соответствии с решаемыми задачами.

Результаты наблюдений, представленные в виде цифровых моделей рельефа («облаков точек»), экспортируются в САД-программы для настройки и реализации визуального представления. Это может быть произведено на базе программного обеспечения системы AutoCAD, которая является одной из наиболее распространенных систем автоматизированного проектирования в мире [83]. AutoCAD содержит ряд эффективных инструментов для специализированного проектирования, представляющих собой мощные графические

пакеты. Последние версии программы позволяют просматривать модели в любых ракурсах и экспортировать модели для обеспечения анимированного отображения.

Другой продукт компании Autodesk – AutoCAD Civil 3D – дает возможность формировать цифровые модели рельефа, производить вычисления различного характера, создавать профили местности, анализировать проекты, автоматизировать расчеты и построения [84]. Для создания анимированного визуального представления может быть использован Autodesk 3ds Max – профессиональный программный пакет для работы с 3D-графикой, содержащий мощный инструментарий для трехмерного моделирования и создания анимации.

Задача визуализации процесса сдвижения земной поверхности может быть успешно решена с помощью вышеописанных программных средств. Для этого по результатам инструментальных наблюдений или прогноза деформаций земной поверхности создается цифровая модель мульды сдвижения на различные этапы времени. Анимированное представление позволяет отследить и проанализировать ход деформирования подрабатываемой территории с высокой степенью достоверности.

Кроме описанного программного обеспечения существуют и геодезические системы автоматизированного проектирования, примером которых является Torosad – специализированная САД-программа для геодезистов, позволяющая импортировать данные из геодезического оборудования, выполнять их обработку, создавать и оформлять топографические планы и карты, создавать трехмерные модели рельефа. Torosad решает также и маркшейдерские задачи, в числе которых создание 3D-моделей выработок, расчеты объемов полезных ископаемых, планирование работ и т.д. [102].

Работа с результатами наблюдений может осуществляться и посредством ГИС-программ, например, таких продуктов компании ESRI, как ArcGIS, QGIS, MapInfo и др. ArcGIS – система для построения ГИС любого уровня, дающая возможность создавать данные, карты и модели в настоль-

ных программных продуктах, публиковать их и использовать в настольных приложениях, в веб-браузерах, через мобильные устройства. Для разработчиков ArcGIS предоставляет все необходимые инструменты для создания собственных приложений [82]. QGIS (Quantum GIS) – свободная геоинформационная система, позволяющая просматривать, создавать, редактировать, экспортировать данные, а также производить исследования благодаря специальным модулям программного обеспечения [103]. MapInfo – географическая информационная система, предназначенная для сбора, хранения, отображения, редактирования и анализа пространственных данных, имеет ряд полезных специализированных модулей и инструментов [97].

Представленные ГИС могут служить и для работы с результатами геодезического мониторинга деформаций земной поверхности ввиду наличия широкого встроенного инструментария для обработки и пространственно-временного анализа цифровых моделей рельефа.

Для обработки данных цифровых моделей и отображения двумерных и трехмерных поверхностей может также быть использовано программное обеспечение Surfer, представляющее собой мощный картографический инструмент для построения контуров, сеток и поверхностей. Основным назначением Surfer является создание карт изолиний, трехмерных, теневых и прочих видов карт, регуляризация и анализ пространственных данных [33].

В качестве примера можно привести работу М.В. Писаренко [60], в которой автор предлагает использовать AutoCAD, Surfer и MS Excel для расчета ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности и визуализации полученных результатов в виде карт изолиний с привязкой к планам горных работ. Согласно материалу статьи, интеграция геоинформационных систем, каждая из которых нацелена на выполнение своей функции, позволяет быстро и эффективно решать задачи геодинамического прогнозирования, и, как следствие, способствовать снижению негативных последствий ведения горных работ.

Безусловно, не всегда представляется возможным решать задачи в готовых продуктах. Для создания собственных приложений может понадобиться знание языков программирования и сред разработки. Одной из наиболее доступных и простых в использовании сред является Microsoft Visual Studio. Visual Studio включает в себя редактор исходного кода, редактор форм для упрощения создания графического интерфейса приложения, веб-редактор, дизайнер классов и дизайнер схемы базы данных [5]. На сегодняшний день наиболее доступной является Visual Studio Community – бесплатная, полнофункциональная и расширяемая интегрированная среда разработки, позволяющая создавать современные приложения для Windows, Android и iOS, а также веб-приложения и облачные службы [105].

Касательно обработки данных мониторинга земной поверхности следует заметить, что применение электронных приборов (ЭТ, ЛСС, GNSS) в процессе наблюдений позволяет получать информацию в виде, необходимом для работы в вышеперечисленных программных комплексах. Значительное сокращение объемов и продолжительности камеральных работ является одним из ключевых преимуществ включения в процесс мониторинга современного геодезического оборудования.

На сегодняшний день не существует коммерческого специализированного программного обеспечения для обработки результатов наблюдений за движением земной поверхности; инструментарий для решения подобных задач зачастую разрабатывается в рамках конкретных проектов или на базе научно-исследовательских объединений. При обработке данных мониторинга чаще всего используют функциональные возможности MS Excel, настраиваемые для производства конкретных вычислений. Однако с учетом обновления инструментальной базы в рамках деформационного мониторинга возникает необходимость разработки целостных программных комплексов, выполняющих не только обработку результатов наблюдений и оценку их точности, но и позволяющих на основании таких расчетов производить модели-

рование условий наблюдений на наблюдательных станциях и планирование предстоящих циклов измерений.

1.3 Обзор исследований в области прогнозирования деформаций земной поверхности

Процессы сдвижения горных пород и земной поверхности под влиянием шахтной разработки угольных пластов, а также основные параметры процесса, факторы, воздействующие на характер сдвижения, геодезические наблюдения и расчет деформаций подробно рассмотрены в ряде нормативно-методических источников, монографий и научно-исследовательских трудов.

Основанием для прогнозирования сдвижений и деформаций земной поверхности является методика расчета, закрепленная «Правилами охраны сооружений и природных объектов...» [63] и методическими указаниями по прогнозу деформаций [52, 64]. Для предприятий, расположенных на территориях угольных месторождений Донбасса (восточная Украина) актуален нормативный документ аналогичного назначения – «Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом» [26]. «Инструкция по наблюдениям за сдвижением...» [35] и методические указания по наблюдениям за сдвижением [51], изданные под руководством Министерства угольной промышленности СССР, имеют статус активного пользования на территории Российской Федерации и стран СНГ.

Профессорско-преподавательским составом ведущих горных университетов России были составлены монографии по тематике сдвижения горных пород и земной поверхности:

- «Сдвижение и деформации горных пород» [31], Санкт-Петербургский горный университет;
- «Сдвижение горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки» [57], Московский государственный горный университет.

Анализ научно-исследовательских трудов позволяет сделать вывод о высокой степени проработанности тематики прогнозирования сдвижения земной поверхности. А.Е. Кирков в работе [40] представляет авторскую методику расчета оседаний с учетом факторов, влияющих на распределение величин вертикальных сдвижений в мульде. В.К. Пискаревым и Я.К. Костиной в статье [61] на основании анализа многолетних наблюдений выявлена зависимость уменьшения скорости оседания поверхности во времени при неизменных параметрах подработки налегающей толщи, позволяющая определить время окончания процесса сдвижения и возможного использования для народнохозяйственных нужд подработанной территории.

Авторы А.Н. Медянец и А.А. Рускол в работе [50] описывают математический аппарат формул для оценки погрешностей расчета деформаций земной поверхности при ведении горных работ на больших глубинах. Преимуществом представленного алгоритма является возможность определения не только погрешности величины, но и погрешности положения, в результате чего полученные погрешности расчетных деформаций характеризуют все особенности сдвижений земной поверхности в условиях конкретной шахты.

Учеными Украинского научно-исследовательского маркшейдерского института г. Донецка (на момент опубликования диссертации – РАНИМИ) сделан значительный вклад в области прогноза сдвижений и деформаций подрабатываемой поверхности. Н.Н. Грищенко, Е.В. Блиникова и В.Р. Шнеер в трудах [13, 15] представляют разработанную математическую модель прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности в условиях мезорельефа.

В последние годы набирает актуальность использование современных средств математической обработки для решения задач прогнозирования. Одним из примеров таких средств являются искусственные нейронные сети, активно используемые в областях информационных технологий, автоматизации производства, горного дела и геологоразведки, энергетики, робототехники, экономики и многих других.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) – математическая модель, а также ее программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма [36].

В качестве примера применения нейронных сетей в области математической обработки геодинамических данных и прогнозирования деформаций можно привести диссертацию Е.А. Гурьевой [28]. В рамках научного труда разработан алгоритм обработки геодинамических данных и прогнозирования деформаций грунтовых оснований площадок промышленных объектов, позволяющий определить деформации в горизонтальном и вертикальном направлениях и получить прогноз вероятной ситуации для своевременного вмешательства эксплуатационных служб промышленного объекта.

Что касается прогноза деформаций на территории шахтной подработки, вышеописанными нормативно-методическими источниками [26, 52, 63, 64] установлены методики расчета прогнозируемых деформаций. Согласно данным документам, математический аппарат расчета учитывает ряд параметров, среди которых глубина разработки, мощность и угол падения пласта и др. Однако в процессе сдвижения земной поверхности могут возникать некоторые расхождения между прогнозируемыми и реальными значениями деформаций, зафиксированными в результате инструментальных измерений на наблюдательных станциях. Это объясняется особенностями геологии горного массива, методологическим несовершенством применяемой в прогнозе математической модели, а также погрешностями инструментальных измерений. На основании этого возникает необходимость уточнения моделей прогноза деформаций в ходе мониторинга подрабатываемого объекта [16]. В качестве такого инструмента для уточнения прогноза деформаций земной поверхности могут служить калибровочные функции и искусственные нейронные сети.

1.4 Обзор разработок в области пространственно-временного анализа сдвижения

Ряд диссертаций отечественных и зарубежных ученых посвящен вопросам мониторинга деформаций и высокоточных геодезических измерений на земной поверхности, например, эти задачи изучали в своих трудах Е.Ю. Тюшевский [75] (анализ деформаций земной поверхности в Восточной Сибири), Хоанг Нгок Лам [77] (разработка программных средств для оценки величин деформаций), Ассане Антонио Алфредо [1] (анализ деформаций инженерных сооружений и земной поверхности). Однако в данных работах представлена лишь одна из составляющих мониторинга – инструментальный контроль; при этом не рассматривается пространственный анализ процесса деформирования земной поверхности и комплексный подход к данному вопросу.

В соответствии с действующей системой мониторинга, изложенной в нормативно-методических источниках [35, 51] и основанной на применении оптико-механического оборудования, оценка процесса сдвижения земной поверхности выполняется на основании рассчитываемых величин деформаций. Согласно «Правилам охраны сооружений и природных объектов...» [63], сдвижение отдельных точек в рассматриваемый момент времени на разные величины в мульде сдвижения является причиной возникновения вертикальных (наклоны, кривизна, скручивание) и горизонтальных (растяжения, сжатия, сдвиги) деформаций, а также провалов и сосредоточенных деформаций – трещин и уступов в вертикальной и сдвигов в горизонтальной плоскостях.

При обработке материалов наблюдений по профильным линиям величины сдвижений и деформаций определяют по следующим формулам [35]:

а) оседания (в м)

$$\eta = Z_{n-1} - Z_n, \quad (1.2)$$

где Z_{n-1} , Z_n – высотные отметки репера соответственно из предыдущего и данного наблюдений, м;

б) наклоны

$$i = \frac{\eta_n - \eta_{n-1}}{l}, \quad (1.3)$$

где η_n, η_{n-1} – величины оседания соответственно переднего и заднего концов интервала, мм; l – длина интервала из начального наблюдения, мм;

в) кривизна (1/м)

$$K = \frac{i_n - i_{n-1}}{l_{cp}}, \quad (1.4)$$

где i_n, i_{n-1} – величины наклонов соответственно последующего и предыдущего интервалов; $l_{cp} = \frac{l_n + l_{n-1}}{2}$ – полусумма длин последующего и предыдущего интервалов, м;

г) радиус кривизны (в м)

$$R = \frac{1}{K} \quad (1.5)$$

где K – кривизна, 1/м;

д) горизонтальные сдвигения (в м)

$$\xi = D_2 - D_1, \quad (1.6)$$

где D_1, D_2 – горизонтальные расстояния от опорного репера до данного соответственно из первого (предыдущего) и повторного (последующего) наблюдений, м;

е) горизонтальные деформации

$$\varepsilon = \frac{d_2 - d_1}{l}, \quad (1.7)$$

где d_1, d_2 – приведенные длины интервалов соответственно из первого (предыдущего) и повторного (последующего) наблюдений, мм.

По результатам вычислений составляют ведомости вертикальных и горизонтальных деформаций и производят построение графиков вертикальных и горизонтальных сдвижений, растяжений и сжатий, наклонов и кривизны. По построенным графикам определяют положение характерных точек муль-

ды сдвижения относительно границ выработанного пространства или движущегося забоя; границы зоны опасного влияния и просто влияния подземных разработок, плоского дна мульды сдвижения при полной подработке; точки максимального оседания при неполной подработке, горизонтального сдвижения, растяжений и сжатий, наклонов и кривизны; мест сосредоточенных деформаций [35].

Результаты наблюдений с помощью ЭТ, ЛСС и GNSS-приемников в рамках мониторинга земной поверхности могут быть представлены в виде координатных ведомостей, таблиц или баз данных, передаваемых далее для работы в вычислительные или графические программные комплексы. Процесс работы с данными, как и содержание файлов с результатами наблюдений, отличается в зависимости от вида используемого оборудования.

1. Данные, полученные в результате наблюдений электронным тахеометром.

В рамках мониторинга земной поверхности электронный тахеометр может быть использован в качестве основного инструмента при наблюдениях за реперами профильных линий. В таком случае, цифровая модель рельефа будет представлять собой набор точек, расположенных на территории мульды сдвижения.

2. Данные, полученные в результате наблюдений лазерной сканирующей системой.

Для анализа пространственной картины сдвижения в процесс мониторинга может быть включено лазерное сканирование. В отличие от измерений электронным тахеометром результаты таких наблюдений представляют собой объемные цифровые модели рельефа, в основе которых лежат так называемые «облака точек». С целью получения адекватной информации для цифровых моделей, содержащих большое количество точек, необходимо производить фильтрацию данных, удаление шумов и т.д.

3. Данные, полученные в результате спутниковых наблюдений.

Деформации земной поверхности, как и деформации обрабатываемых объектов, иногда могут характеризоваться весьма небольшой величиной, например, в несколько миллиметров. Это означает, что для корректного расчета деформаций спутниковые наблюдения должны производиться исключительно в режиме статики. Выбор статического режима наблюдений существенно ограничивает возможные объемы выполняемых работ и количество наблюдаемых точек. Цифровая модель рельефа, составленная по результатам GNSS-наблюдений, в таком случае будет являться набором отдельно измеряемых точек.

Конфигурация цифровых моделей рельефа может принимать различные формы:

- модели с регулярным расположением точек на прямоугольных, треугольных и шестиугольных (гексагональных) сетках;
- с нерегулярным представлением точек по структурным линиям, профилям, центрам площадей, локальным точкам;
- с изолинейным заданием точек (получаемым, например, при оцифровке горизонталей) [49].

Создание регулярной сетки представляет собой одну из актуальных задач при работе с цифровыми моделями рельефа, и заключается в пространственной интерполяции по исходным данным [78]. На решение подобных вопросов рассчитан функционал программного обеспечения Surfer.

Вопросы изучения динамики земной поверхности и проведения геодинамического мониторинга затронуты в ряде научно-технических публикаций. В частности, в работах упомянутого ранее автора А.А. Панжина рассматривается проведение мониторинга геодинамических процессов на горных предприятиях [59, 65, 100]. В работах говорится, что изучение современных сдвижений и деформаций, происходящих в массиве, требует проведения мониторинга на специально оборудованных наблюдательных станциях, пред-

ставляющих собой геодинамические полигоны. По мнению автора, в результате периодических измерений, проводимых в мониторинговом режиме, определяются полные пространственные смещения реперов наблюдательной станции, флуктуации поля пространственных деформаций и тензоров напряжений, вызывающих эти изменения. На основании данной информации формируют трехмерные цифровые модели рельефа. Геодезические методы при проведении геодинамического мониторинга земной поверхности рассмотрены также авторами В.И. Кафтаном и Л.И. Серебряковой [39].

Ю.О. Кузьмин в работе [46] исследует проблемные изучения деформационных процессов, и делает заключение о том, что эффективность и адекватность получаемой информации о современном геодинамическом состоянии недр в существенной мере зависит от возможности совмещения систем абсолютных и относительных геодезических наблюдений.

Построение динамической мульды сдвижения описано авторами С.В. Свирко, А.А. Реневым, А.И. Быкадоровым и П.М. Ларичкиным [67]. Ими разработан алгоритм расчета оседаний в любой точке динамической мульды сдвижений подрабатываемой земной поверхности в зависимости от положения очистного забоя в лаве при наличии и отсутствии «плоского дна» по простиранию и вкрест простирания. Реализации алгоритма и разработка динамических цифровых моделей выполнена в системе компьютерной математики Mathcad. В работе [67] также приведены в обобщенном виде некоторые результаты исследований в области инструментальных наблюдений динамики процессов сдвижения и деформаций горного массива и земной поверхности. Более ранние разработки в этом направлении изложены в монографии А.С. Ягунова «Динамика деформаций в подрабатываемом горном массиве» [79]. В рамках научно-исследовательской работы сотрудников РАН был издан труд, в основу которого легли закономерности и параметры современных геодинамических движений, протекающих в массиве горных пород [56].

Важнейшим практическим значением изучения геодинамических процессов является решение задач прогноза, снижения риска и уменьшения последствий геодинамических катастроф природного и техногенного характера, мониторинга окружающей среды. Аномальные техногенные геодинамические процессы вызывают горизонтальные сдвиги земной коры, разломообразование, подземные аварии. При этом страдают не только промышленные объекты, инженерные конструкции, жилые здания, но и население [49].

Вопрос прогнозирования динамики оседаний земной поверхности в результате шахтной подработки затронут Н.Н. Грищенковым в работе [14]; им предложены методика оценки деформаций земной поверхности в заданные моменты времени и методика определения сроков достижения возрастающими оседаниями и деформациями некоторых критических величин. Согласно содержанию статьи [14], применение логит-функции позволяет определить срок наступления заданных критических величин деформаций.

На основании вышесказанного можно заключить, что анализ влияния деформаций подрабатываемой земной поверхности целесообразно вести с помощью динамических ЦМР. Необходимость ДЦМР обусловлена неравномерным характером сдвижения земной поверхности. Систематический мониторинг подрабатываемых территорий позволяет на основании накопленных данных за весь период подработки представить результаты наблюдений в цифровом виде и отследить динамику нарастания деформаций на подрабатываемой территории [20].

Выводы к главе 1

Проведенный аналитический обзор нормативно-методической и научно-технической литературы позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на проработанность и изученность тематики, на сегодняшний день не представлен целостный подход к проведению мониторинга, основанный на применении электронного геодезического оборудования (электронных тахеометров,

лазерных сканирующих систем и спутниковых приемников) и совмещающий в себе инструментальные наблюдения, прогноз и анализ динамики нарастания деформаций на подрабатываемых территориях. В связи с этим является актуальной тема диссертации, направленная на разработку описанного комплекса.

На основании вышесказанного можно сформировать цель диссертационной работы, которая состоит в разработке методики геодезического мониторинга земной поверхности на подрабатываемых территориях, позволяющей производить прогнозирование и контроль динамики деформационного процесса.

Для достижения указанной цели необходимо решение ряда задач:

1. Разработать математические модели накопления погрешностей геодезических наблюдений на подрабатываемых территориях и оценить точность наблюдений.

2. Разработать программные средства расчета для различных видов наблюдений и произвести анализ результатов разработанных математических моделей и сформировать рекомендации к проведению наблюдений.

3. Разработать математические модели для корректировки прогноза деформаций земной поверхности.

4. Разработать программные средства для реализации моделей корректировки прогноза деформаций и произвести проверку качества работы алгоритмов корректировки прогноза.

5. Создать алгоритм построения динамических цифровых моделей рельефа (ДЦМР) на основании результатов наблюдений и прогноза.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

2.1 Спутниковые наблюдения в рамках геодезического мониторинга и оценка точности

На сегодняшний день методика наблюдений за сдвижением земной поверхности и деформациями подрабатываемых объектов закреплена «Инструкцией по наблюдениям за сдвижением...» [35]. Одновременно с разбивкой наблюдательной станции намечают места для закладки опорных реперов (не менее 3), от которых в дальнейшем будут определяться положения рабочих реперов профильных линий и контролироваться их неподвижность [35].

Привязка опорных реперов наблюдательной станции к исходным реперам (пунктам геодезической сети) может производиться с помощью современных методов измерений, в частности, посредством GNSS-наблюдений.

Спутниковые наблюдения могут быть проведены в различных режимах. В режиме «статики» измерения выполняются неподвижными приемниками (база и ровер) на 2-х или нескольких пунктах, расстояния между которыми, как правило, превышают 15 км. Продолжительность наблюдений зависит от ряда факторов: необходимая точность, расстояние между пунктами, количество спутников, состояние ионосферы и тропосферы и др. В режиме «статики» наблюдения на одной точке могут длиться более 1 часа.

Режим «быстрой статики» применим на меньших расстояниях (до 15 км); длительность наблюдений в несколько раз короче по сравнению со «статикой» (5-20 мин).

В режиме «кинематики» производят определение координат движимой станции в процессе перемещения. Режим «стой-иди» является одним из видов кинематических режимов, и для определения координат требует установки ровера лишь на 5-30 секунд на каждой определяемой точке.

Предполагаемая точность для режима «статики» в лучшем случае составит порядка 3 мм + 1 мм/км, для режима «кинематики» – около 10 мм + 1 мм/км (при использовании двухчастотной аппаратуры).

«Инструкцией...» [35] представлены требования к точности привязки опорных реперов к ближайшим пунктам геодезической сети. Относительная линейная невязка теодолитного хода не должна превышать 1:2000, угловая невязка должна быть не более определяемой по формуле:

$$f_{\beta} = 1' \sqrt{n}, \quad (2.1)$$

где n – число углов хода.

При определении высотных отметок пользуются формулой допуска для расхождений в суммах превышений между прямыми и обратными ходами (в мм):

$$\Delta h = \pm 15 \sqrt{L}, \quad (2.2)$$

где L – длина хода в одном направлении, км.

Указанные требования к нивелированию соответствуют среднему значению невязки между III и IV классами нивелирования [8], поэтому в качестве допустимой величины используется средняя квадратическая погрешность (СКП) III класса нивелирования, составляющая 5 мм.

Для оценки точности спутниковых наблюдений разработаны формулы, позволяющие произвести оценку путем анализа погрешностей длин интервалов и превышений, определяемых как СКП функций измеренных величин.

Следует заметить, что в результате спутниковых определений и в ходе последующей обработки в соответствующем программном обеспечении (см. пункт 1.2 данной диссертации) наблюдатель получает значения координат пунктов (x_i, y_i, z_i) , а также их погрешности $(m_{x_i}, m_{y_i}, m_{z_i})$.

На основании СКП координат рассчитываются ошибки определения длин и превышений между соседними реперами с номерами (i) и $(i+1)$:

$$m_L^2 = \left(\frac{x_i - x_{i+1}}{L}\right)^2 \cdot (m_{x_i}^2 + m_{x_{i+1}}^2) + \left(\frac{y_i - y_{i+1}}{L}\right)^2 \cdot (m_{y_i}^2 + m_{y_{i+1}}^2) + \left(\frac{z_i - z_{i+1}}{L}\right)^2 \cdot (m_{z_i}^2 + m_{z_{i+1}}^2); \quad (2.3)$$

$$m_H^2 = m_{z_i}^2 + m_{z_{i+1}}^2, \quad (2.4)$$

где m_L – СКП определения расстояния между реперами; m_H – СКП определения превышения между реперами; x_i, y_i, z_i – координаты репера i .

Учитывая вышеуказанные требования к точности, спутниковые наблюдения позволяют добиться удовлетворительных результатов лишь в режиме статики. При этом профильные линии на территории мульды сдвижения могут включать 50 и более реперов, что значительно повысит временные затраты. Ускорение процесса наблюдений путем перехода к режиму быстрой статики в свою очередь влечет за собой понижение точности. Анализ точности спутниковых наблюдений позволяет сделать вывод о возможности применения данной технологии лишь в ходе привязки опорных реперов наблюдательных станций [21].

2.2 Математическая модель накопления погрешностей наблюдений с помощью электронных тахеометров

Измерения, проводимые в соответствии с «Инструкцией по наблюдениям за сдвижением...» [35], характеризуются высокой точностью, но вместе с тем и значительными объемами работ на станции. В связи с этим отдается предпочтение электронным методам наблюдений, обеспечивающим быстроту измерений и обработки результатов. Такими функциями обладают электронные тахеометры [19].

Согласно «Инструкции...» [35] типовая наблюдательная станция должна состоять не менее чем из двух профильных линий вкрест простирания и одной по простиранию пласта при подвигании забоя в направлении простирания и не менее чем из двух линий по простиранию пласта и одной вкрест простирания при подвигании забоя по восстанию или падению. Длины про-

фильных линий определяют в зависимости от угла падения пласта и наличия старых выработок. Полная серия работ на станции включает геометрическое нивелирование, измерение расстояний между реперами профильных линий и съемку трещин на земной поверхности [91].

При проведении наблюдений электронным тахеометром схема выглядит следующим образом (рисунок 2.1). Точка стояния инструмента располагается на некотором расстоянии в стороне от профильной линии (T, T') или в ее створе (T''). Перед началом наблюдений выполняется ориентирование на исходный репер T_0 (задание дирекционного угла α_0 и координат точки стояния T). Затем производятся последовательные измерения для каждого репера с определением расстояний S_i , горизонтальных (β_i) и вертикальных (δ_i) углов. По результатам измерений вычисляют координаты реперов P_1, P_2, \dots, P_n ; по ним рассчитывают длины интервалов ($L_{i, i+1}$) и превышения ($H_{i, i+1}$).

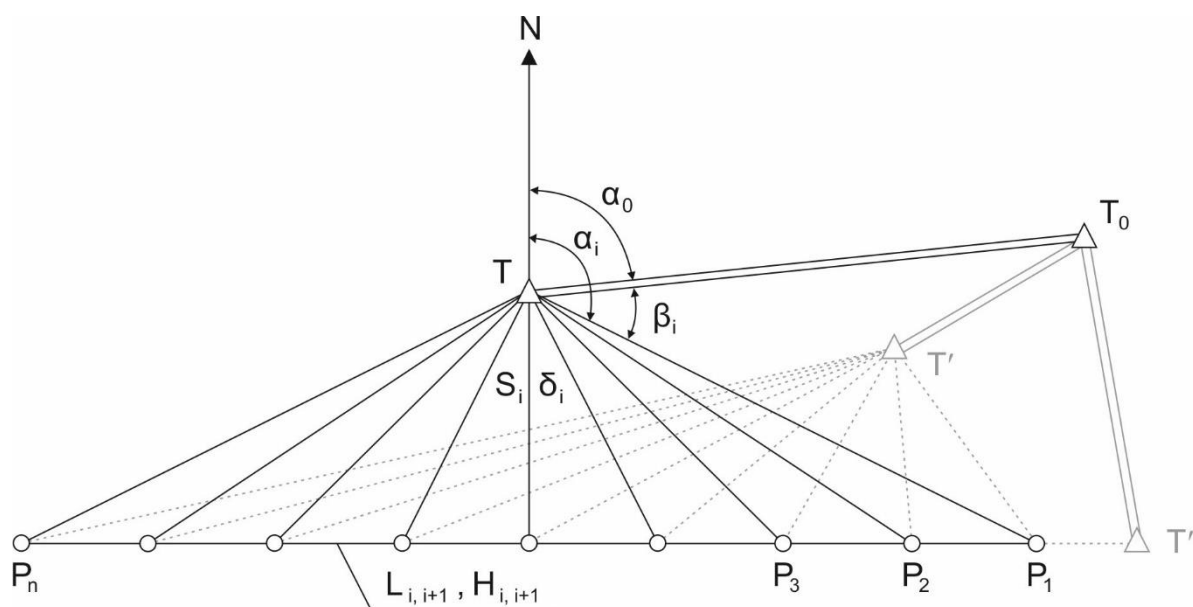


Рисунок 2.1 – Схема наблюдений на профильной линии с помощью электронного тахеометра

«Инструкцией...» [35] представлены требования к точности проводимых на наблюдательной станции измерений:

- расхождения в длине интервалов между реперами не должны превышать 1:10000;
- расхождение в суммах превышений между прямым и обратным ходами (в мм) не должно быть более $15\text{мм} \sqrt{L}$, где L – длина хода в одном направлении, км.

Указанные требования к измерению длин соответствуют требованиям к полигонометрии 1 разряда [9].

Для оценки точности был разработан математический аппарат формул, позволяющий произвести оценку путем анализа погрешностей длин интервалов и превышений, определяемых как СКП функций измеренных величин [19].

СКП координат рассчитываются по формулам:

$$m_{x_i}^2 = m_{x_{cm}}^2 + (\cos(\alpha_0 + \beta_i) \cdot \cos \delta_i)^2 \cdot m_s^2 + (S_i \cdot \sin \delta_i \cdot \cos(\alpha_0 + \beta_i))^2 \cdot \frac{m_\delta^2}{\rho^2} + (S_i \cdot \cos \delta_i \cdot \sin(\alpha_0 + \beta_i))^2 \cdot \frac{m_\alpha^2 + m_\beta^2}{\rho^2}, \quad (2.5)$$

$$m_{y_i}^2 = m_{y_{cm}}^2 + (\sin(\alpha_0 + \beta_i) \cdot \cos \delta_i)^2 \cdot m_s^2 + (S_i \cdot \sin \delta_i \cdot \sin(\alpha_0 + \beta_i))^2 \cdot \frac{m_\delta^2}{\rho^2} + (S_i \cdot \cos \delta_i \cdot \cos(\alpha_0 + \beta_i))^2 \cdot \frac{m_\alpha^2 + m_\beta^2}{\rho^2}, \quad (2.6)$$

$$m_{z_i}^2 = m_{z_{cm}}^2 + (\sin \delta_i)^2 \cdot m_s^2 + (S_i \cdot \cos \delta_i)^2 \cdot \frac{m_\delta^2}{\rho^2} + m_i^2 + m_v^2, \quad (2.7)$$

где m_x, m_y, m_z – СКП определения координат точки; $m_{x_{cm}}, m_{y_{cm}}, m_{z_{cm}}$ – СКП координат точки стояния; m_s – СКП измерения длин; $m_\alpha, m_\beta, m_\delta$ – СКП дирекционного угла исходного направления, горизонтального и вертикального углов; m_i, m_v – СКП измерения высоты инструмента и визирования.

На основании СКП координат рассчитываются ошибки определения длин и превышений между соседними реперами P_i и P_{i+1} по формулам (2.3), (2.4).

Приведенные выше формулы позволяют учесть влияние всевозможных условий наблюдений: расположения точки стояния инструмента и расстояния до линии реперов, интервалов между реперами профильной линии, угла наклона, точности оборудования, погрешностей измерения высоты инструмента и визирования, погрешностей координат планово-высотного обоснования [19].

2.3 Математическая модель накопления погрешностей наблюдений с помощью лазерных сканирующих систем

На сегодняшний день лазерное сканирование является одним из наиболее перспективных и современных методов наблюдений. В последние годы технология сканирования находит активное применение в областях геодезии и маркшейдерского дела, что обусловлено возможностью повышения производительности работ, увеличения скорости наблюдений и обработки результатов.

В ходе сканирования происходит измерение расстояний и горизонтальных и вертикальных углов. Существует два подхода к проведению наблюдений методом лазерного сканирования [30]. Первый (инструментальный) предполагает создание планово-высотного обоснования с привлечением дополнительного оборудования (электронного тахеометра, GNSS-приемников), или использование существующих пунктов триангуляции и полигонометрии. В таком случае для сканера будут заданы исходные координаты точки стояния и выполнено ориентирование на местности. Во втором подходе (аналитическом) местоположение инструмента вычисляется из обратной линейно-угловой засечки по опорным точкам с установленными на них марками, расположенным относительно равномерно в районе наблюдательной станции. Координаты марок получают по результатам наблюдений с помощью электронного тахеометра или спутниковых приемников. Схемы наблюдений представлены на рисунках 2.2 и 2.3.

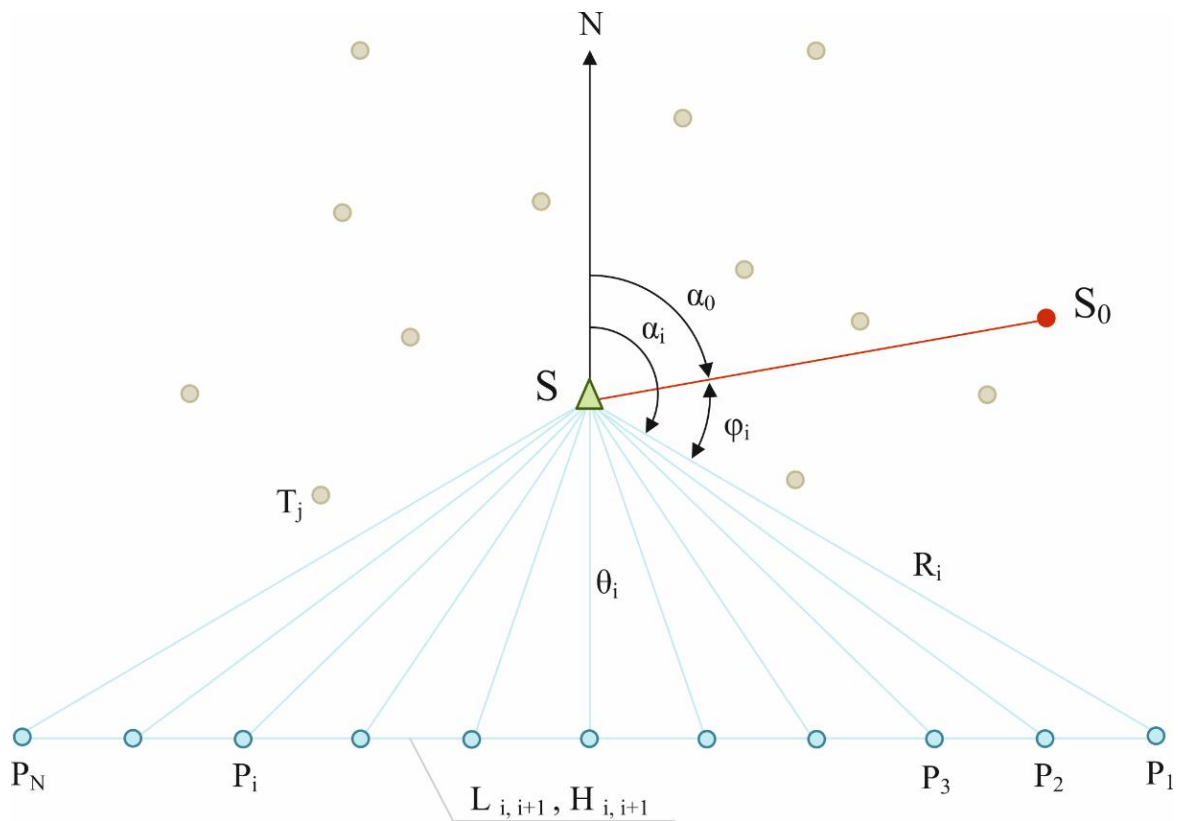


Рисунок 2.2 – Схема наблюдений (инструментальный метод)

Согласно схеме на рисунке 2.2, сканер располагается в точке S недалеко от профильной линии реперов P_1, P_2, \dots, P_N . Координаты точки S и дирекционный угол α_0 на некоторое исходное направление S_0 задаются на станции. В ходе наблюдений измеряют расстояния R_i , горизонтальные углы ϕ_i и вертикальные углы θ_i . На основании данных наблюдений рассчитывают координаты всех реперов X_i, Y_i, Z_i , после чего по ним вычисляют длины $L_{i,i+1}$ и превышения $H_{i,i+1}$ между реперами. Точки T_j – прочие точки, полученные по результатам сканерной съемки на станции и не фигурирующие в вычислениях [18].

В аналитическом методе вычислений, схема которого представлена на рисунке 2.3, не осуществляется ориентирование, однако используются опорные точки M_k , по которым происходит внешнее ориентирование облака точек.

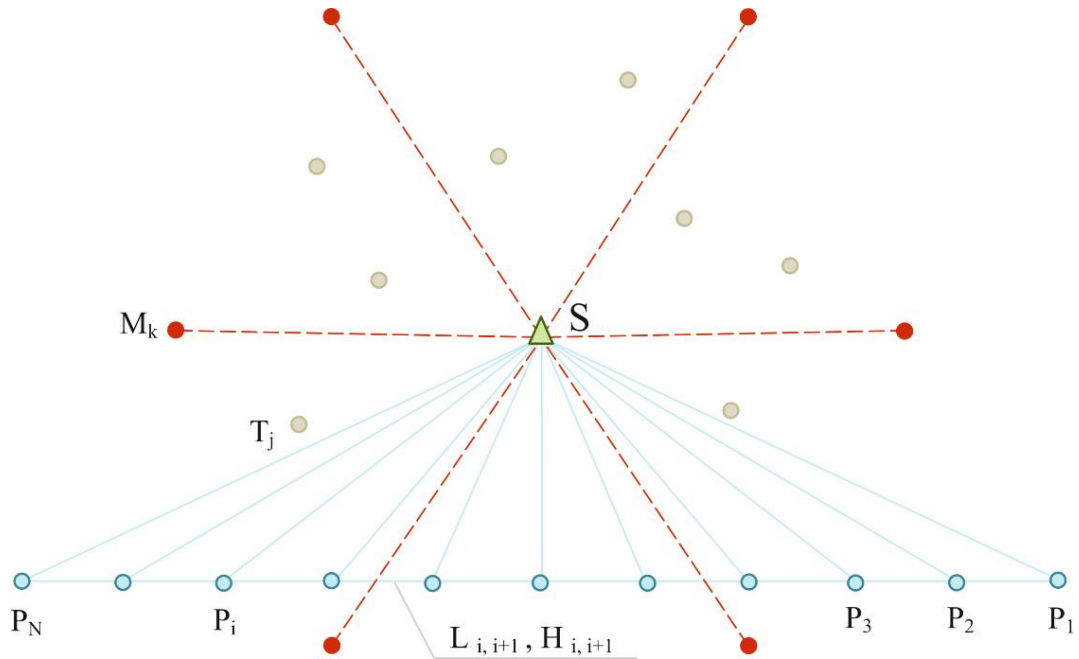


Рисунок 2.3 – Схема наблюдений (аналитический метод)

Расчет погрешностей наблюдений на станции производится в зависимости от выбранного подхода к проведению измерений. Оценка точности инструментального метода наблюдений учитывает все возможные факторы, способствующие накоплению погрешностей [44], и осуществляется с применением СКП функций измеренных величин.

Согласно источнику [30], пространственные координаты точек в системе координат ЛСС вычисляются по формулам (2.8):

$$\left. \begin{aligned} X_i &= R_i \cos \varphi_i \sin \theta_i \\ Y_i &= R_i \sin \varphi_i \sin \theta_i \\ Z_i &= R_i \cos \theta_i \end{aligned} \right\}, \quad (2.8)$$

где R_i – измеренная дальность от точки стояния сканера до объекта; φ_i – горизонтальный угол измеренного направления лазерного луча \bar{R} ; θ_i – вертикальный угол направления \bar{R} , отсчитываемый от оси Z до вектора \bar{R} (зенитное расстояние направления лазерного луча).

После проведения ориентирования инструмента на станции координаты точек в системе сканера и внешней системе будут совпадать.

СКП координат точек определяются по формулам:

$$m_{x_i}^2 = m_{x_{cm}}^2 + m_c^2 + (\cos(\alpha_0 + \varphi_i) \cdot \sin \theta_i)^2 \cdot m_R^2 + (R_i \cdot \cos \theta_i \cdot \cos(\alpha_0 + \varphi_i))^2 \cdot \frac{m_\theta^2}{\rho^2} + (R_i \cdot \sin \theta_i \cdot \sin(\alpha_0 + \varphi_i))^2 \cdot \frac{m_\alpha^2 + m_\varphi^2}{\rho^2}, \quad (2.9)$$

$$m_{y_i}^2 = m_{y_{cm}}^2 + m_c^2 + (\sin(\alpha_0 + \varphi_i) \cdot \sin \theta_i)^2 \cdot m_R^2 + (R_i \cdot \cos \theta_i \cdot \sin(\alpha_0 + \varphi_i))^2 \cdot \frac{m_\theta^2}{\rho^2} + (R_i \cdot \sin \theta_i \cdot \cos(\alpha_0 + \varphi_i))^2 \cdot \frac{m_\alpha^2 + m_\varphi^2}{\rho^2}, \quad (2.10)$$

$$m_{z_i}^2 = m_{z_{cm}}^2 + m_i^2 + (\cos \theta_i)^2 \cdot m_R^2 + (R_i \cdot \sin \theta_i)^2 \cdot \frac{m_\theta^2}{\rho^2}, \quad (2.11)$$

где $m_{x_{cm}}$, $m_{y_{cm}}$, $m_{z_{cm}}$ – СКП координат точки стояния; m_c – СКП центрирования; m_R – СКП измерения длин; m_α , m_φ , m_θ – СКП дирекционного угла исходного направления, горизонтального и вертикального углов; m_i – СКП измерения высоты инструмента [18].

По рассчитанным СКП координат вычисляют погрешности определения длин m_L и превышений m_H между соседними реперами P_i и P_{i+1} в соответствии с формулами (2.3), (2.4).

При проведении наблюдений аналитическим методом координаты X_i , Y_i , Z_i точек во внешней системе получают из уравнений (2.12):

$$\left. \begin{aligned} X_i &= a_{11}x_i + a_{12}y_i + a_{13}z_i + a_{14} \\ Y_i &= a_{21}x_i + a_{22}y_i + a_{23}z_i + a_{24} \\ Z_i &= a_{31}x_i + a_{32}y_i + a_{33}z_i + a_{34} \end{aligned} \right\}, \quad (2.12)$$

где x_i , y_i , z_i – координаты точек в системе сканера; a_{11} , a_{12} , a_{13} , ... a_{34} – коэффициенты аффинного преобразования координат.

Так как для каждой точки существует 12 неизвестных коэффициентов, то для определения этих коэффициентов необходимо не менее четырех опорных точек. Если точек более четырех, нахождение коэффициентов аффинного преобразования будет реализовано по методу наименьших квадратов (МНК).

Оценка точности производится подобно предыдущему методу – с применением СКП функций общего вида:

$$\left. \begin{aligned} m_{X_i} &= a_{11}^2 m_{x_i}^2 + a_{12}^2 m_{y_i}^2 + a_{13}^2 m_{z_i}^2 + a_{14}^2 + x_i^2 m_{a_{11}}^2 + y_i^2 m_{a_{12}}^2 + z_i^2 m_{a_{13}}^2 + m_{a_{14}}^2 \\ m_{Y_i} &= a_{21}^2 m_{x_i}^2 + a_{22}^2 m_{y_i}^2 + a_{23}^2 m_{z_i}^2 + a_{24}^2 + x_i^2 m_{a_{21}}^2 + y_i^2 m_{a_{22}}^2 + z_i^2 m_{a_{23}}^2 + m_{a_{24}}^2 \\ m_{Z_i} &= a_{31}^2 m_{x_i}^2 + a_{32}^2 m_{y_i}^2 + a_{33}^2 m_{z_i}^2 + a_{34}^2 + x_i^2 m_{a_{31}}^2 + y_i^2 m_{a_{32}}^2 + z_i^2 m_{a_{33}}^2 + m_{a_{34}}^2 \end{aligned} \right\}, \quad (2.13)$$

где m_{X_i} , m_{Y_i} , m_{Z_i} – СКП координат точек во внешней системе; m_{x_i} , m_{y_i} , m_{z_i} – СКП координат точек в системе сканера; $m_{a_{11}}$, $m_{a_{12}}$, ... $m_{a_{34}}$ – СКП определения коэффициентов аффинного преобразования [18].

Погрешности координат точек в системе сканера находят по формулам (2.9)-(2.11). СКП определения коэффициентов аффинного преобразования m_{a_k} определяют в ходе вычислений по МНК (2.14):

$$m_{a_k} = \mu \sqrt{Q_{kk}}, \quad (2.14)$$

где Q_{kk} – диагональный элемент матрицы весовых коэффициентов; μ – среднее квадратическое отклонение единицы веса, рассчитываемое по формуле (2.15):

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum V_{ij}^2}{3n - m}}, \quad (2.15)$$

где V_{ij} – элемент вектора невязок; n – число опорных точек; m – количество неизвестных (в данном случае, 12).

Разработанный математический аппарат позволяет учесть метод проведения наблюдений на станции, технические характеристики ЛСС, конфигурацию наблюдательной станции (расстояние между сканером и объектами, количество реперов, интервал между ними и т.д.) [18].

Создание программных комплексов на базе приведенных математических моделей накопления погрешностей (при наблюдениях электронным тахеометром и лазерной сканирующей системой) позволяет сформировать уникальные инструменты предварительного моделирования условий наблюде-

ний и оценить точность измерений на конкретных объектах без необходимости проведения полевых наблюдений.

2.4 Модель калибровочной функции для корректировки прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности

«Правилами охраны сооружений и природных объектов...» [63], а также «Правилами подработки зданий, сооружений и природных объектов...» [26] установлены методики расчета прогнозируемых деформаций. Для учета результатов измерений на наблюдательных станциях в прогнозе сдвижений и деформаций земной поверхности может использоваться ряд методов: экспертные оценки, нейронные сети, калибровочные функции. В данном подразделе рассмотрена методика такого учета с помощью калибровочных функций [25].

Диапазон применения данного метода определяется использованием наблюдательных станций, профильные линии которых ориентированы по простиранию и вкрест простирания залегания угольных пластов. Далее выполнен анализ применения данного метода для одной профильной линии.

Перед началом отработки лавы, то есть до начала процесса сдвижения, выполняется начальная серия измерений на профильной линии. В ходе этой серии производятся измерения расстояний между реперами профильной линии, и выполняется нивелирование по данным реперам. После этого в соответствии с проектом подработки уже в ходе процесса сдвижения периодически проводятся следующие серии инструментальных измерений.

Допустим, что на рисунке 2.4 приведен график оседаний земной поверхности для первой серии измерений. Черная кривая представляет собой кривую оседаний, полученную по результатам прогноза на момент времени, соответствующий времени выполнения первой серии измерений. Красной кривой обозначены оседания, полученные по результатам измерений на профильной линии.

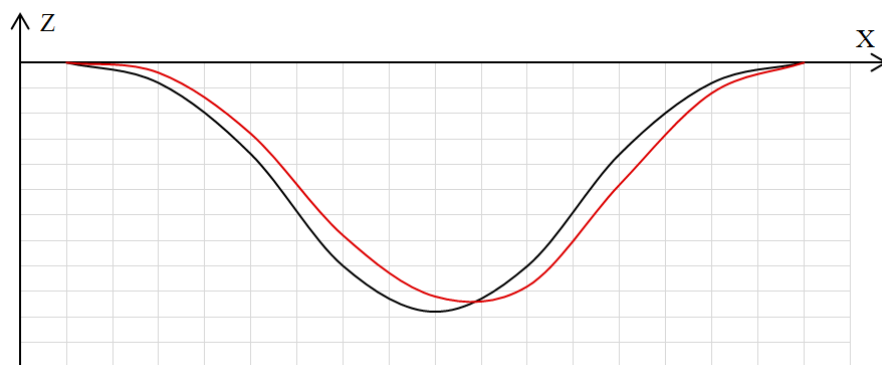


Рисунок 2.4 – График прогнозных и измеренных оседаний реперов профильной линии

При анализе графиков оседаний на рисунке 2.4 необходимо учесть два принципиальных момента, влияние которых на точность прогноза будет определяющим.

Во-первых, график прогнозных значений оседаний должен быть построен на дату проведения данной серии измерений на профильной линии. С этой целью найденные по существующей методике значения оседаний η_i на конец процесса сдвижения для всех реперов профильной линии преобразуются в значения оседаний $\eta_i(t)$ для текущего времени t , соответствующего периоду времени между началом процесса сдвижения и временем выполнения данной серии измерений на профильной линии. Это преобразование может быть записано в виде выражения:

$$\eta_i(t) = \eta_i \cdot \varphi(t, T_c), \quad (2.16)$$

где $\varphi(t, T_c)$ – функция данного преобразования, а T_c – длительность процесса сдвижения.

Многочисленные наблюдения, проведенные на наблюдательных станциях, позволили установить некоторую зависимость величины оседания от продолжительности процесса сдвижения, достоверно описываемую логистической функцией [14]:

$$f(t) = \frac{1}{1 + e^{-t}}, \quad (2.17)$$

где $f(t)$ – оседание в определенной точке, t – время от начала процесса сдвижения, отнесенное к общей продолжительности процесса сдвижения.

Поэтому построение графика прогнозных значений оседаний следует осуществлять с учетом формулы (2.17) [25].

Во-вторых, следует иметь в виду, что график измеренных значений оседаний часто представляется некой ломаной линией (рисунок 2.5). Колебания значений этой линии относительно ее общего тренда вызваны главным образом погрешностями измерений и представляют своего рода «белый шум», который устраняется с помощью имеющихся алгоритмов сглаживания данных. Основная суть сглаживания данных измерений заключается в том, чтобы отследить существенные отличия прогнозных значений от измеренных, которые бы не маскировались «белым шумом».

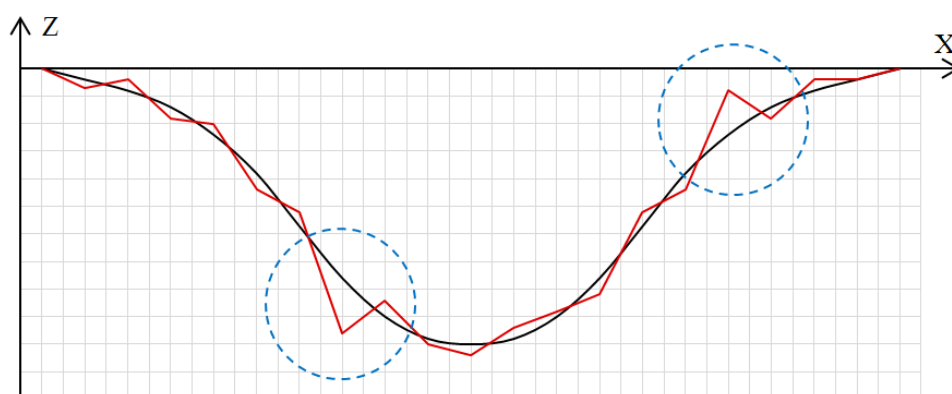


Рисунок 2.5 – График фильтрации и сглаживания результатов измерения оседаний реперов профильной линии

В некоторых случаях возникает необходимость проведения фильтрации данных. Например, на рисунке 2.5 показаны два пиковых значения оседаний, которые следует исключить из выборки измеренных значений. В первом случае (левый пик) имеет место слишком большое оседание, что чаще всего встречается при внешнем воздействии на репер (например, забивка его строителями, воздействие гусеничной техники и т.п.). Во втором случае

(правый пик) наблюдается чрезмерно малое оседание по сравнению с соседними реперами, что иногда наблюдается при неудачных попытках посторонних лиц извлечь репер из грунта. Поэтому сглаженная и отфильтрованная линия оседаний, полученная из результатов измерений, является наиболее вероятным отражением реальной картины оседаний на данной профильной линии.

Далее для всех реперов профильной линии находятся разности значений оседаний ΔZ_i между измеренными $\eta_i^{\text{изм}}$ и прогнозными $\eta_i(t)$ значениями оседаний:

$$\Delta Z_i = \eta_i^{\text{изм}} - \eta_i(t). \quad (2.18)$$

На рисунке 2.6 приведен график ΔZ_i разностей между измеренными и прогнозными значениями оседаний для данной серии измерений на профильной линии.



Рисунок 2.6 – График разностей между измеренными и прогнозными значениями оседаний реперов профильной линии

Если аппроксимировать разности ΔZ_i некоторой трансцендентной функцией, то будет получена калибровочная функция $\Delta Z_i(t)$ для момента времени t , когда производились измерения на профильной линии [25], т.е.:

$$Z_i(t) = f(\Delta Z_i, t). \quad (2.19)$$

Функция $f(\Delta Z_i, t)$ может быть различной (гиперболической, параболической, степенной, показательной, алгебраическим, тригонометрическим или ортогональным полиномом). Определение параметров этой функции

можно произвести методом наименьших квадратов по данным графика, приведенного на рисунке 2.6.

Одним из наиболее простых способов подбора такой функции является определение нелинейного тренда выбранной линии на графике в MS Excel. При этом в окне «Параметры линии тренда» необходимо установить флажки «Показывать уравнение на диаграмме» и «Поместить на диаграмму величину достоверности аппроксимации (R^2)». Первый флажок обеспечит вывод на диаграмму числовых значений параметров калибровочной функции на данный момент времени, а второй – позволит определить качество аппроксимации калибровочной функцией значений разностей между расчетными и прогнозными значениями оседаний [25].

Итак, после первой серии наблюдений (на момент t_1) получают калибровочную функцию $f_1(\Delta Z_{i,1}, t_1)$, которая описывает разности между расчетными и прогнозными значениями оседаний для первой серии измерений.

Для второй серии измерений на профильной линии (на момент t_2) прогнозные значения оседаний $\eta_i(t_2)_{\text{корр}}$ с учетом измерений, сделанных в предыдущей серии, можно найти из выражения:

$$\eta_i(t_2)_{\text{корр}} = \eta_i(t_2) + f_1(\Delta Z_{i,1}, t_1). \quad (2.20)$$

Затем находят разности $\Delta Z_{i,2}$ между значениями оседаний $\eta_{i,2}^{\text{ИЗМ}}$, измеренными во второй серии, и прогнозными значениями $\eta_i(t_2)_{\text{корр}}$ [25], т.е.:

$$\Delta Z_{i,2} = \eta_{i,2}^{\text{ИЗМ}} - \eta_i(t_2). \quad (2.21)$$

Далее по разностям $\Delta Z_{i,2}$ для реперов профильной линии описанным выше способом определяется новая калибровочная функция $f_2(\Delta Z_{i,2}, t_2)$ для прогноза значений оседаний на период до третьей серии инструментальных измерений на профильной линии.

В дальнейшем уточненные (скорректированные) значения оседаний i -го репера после k -ой серии измерений можно найти из выражения:

$$\eta_i(t_k)_{\text{корр}} = \eta_i(t_k) + f_{k-1}(\Delta Z_{i,k-1}, t_{k-1}). \quad (2.22)$$

Как показывает опыт использования указанного алгоритма прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности с учетом результатов измерений на наблюдательных станциях величины корректирующих поправок, выраженных калибровочными функциями $f_k(\Delta Z_{i,k}, t_k)$, уменьшаются с каждой последующей серией измерений в ходе всего процесса сдвижения. Оценку точности работы указанного алгоритма можно произвести по формуле:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum \Delta Z_{i,k}^2}{n}}, \quad (2.23)$$

где σ_k – средняя квадратическая погрешность прогнозирования оседания репера после k -ой серии измерений; $\Delta Z_{i,k}$ – разность между измеренными и прогнозными значениями оседаний; n – количество реперов профильной линии.

Аналогичный подход используется и для прогноза горизонтальных сдвижений земной поверхности (вдоль профильной линии). В этом случае вместо разности отметок нивелируемых реперов выступают разности длин интервалов между реперами, измеряемые в каждой серии измерений.

Что касается относительных деформаций (наклонов, кривизны, относительных деформаций), то их значения на период между сериями измерений следует определять по формулам, приведенным в нормативном документе [35].

Алгоритм корректировки прогноза с помощью калибровочной функции имеет следующий порядок:

1. Определение исходных параметров для вычислений.

По данным проекта подработки устанавливается скорость подвигания забоя лавы V , что позволяет рассчитать дату (день t) начала процесса сдвижения земной поверхности и определить продолжительность процесса сдвижения (по таблице, приведенной в источнике [26]).

Окончанием процесса сдвижения земной поверхности считается дата инструментальных наблюдений, после которой суммарные оседания на протяжении шести месяцев не превышают 30 мм или 10% от максимальных оседаний.

2. Расчет прогнозных деформаций на определенный день t_i инструментальных наблюдений.

Как было описано ранее, нарастание сдвижений и деформаций земной поверхности весьма достоверно описывается с помощью логистической функции (2.17). Имея результаты расчета деформаций на конец процесса сдвижения, вычисляют их величины на конкретную дату проведения инструментальных наблюдений t_i .

3. Определение параметров калибровочной функции.

В данном подразделе определена модель калибровочной функции, предполагающая построение линии тренда по данным разностей между величинами измеренных и расчетных оседаний реперов профильных линий. Функция построения линии тренда может быть реализована в программном обеспечении MS Excel. Формат линии тренда в MS Excel позволяет отображать уравнение функции и величину достоверности аппроксимации на диаграмме.

Полученное уравнение служит калибровочной функцией по результатам наблюдений на день t_i для последующих расчетов прогноза деформаций.

4. Расчет прогнозных деформаций на следующую дату (день t_{i+1}) инструментальных наблюдений.

Аналогично пункту 2, вычисляют величины оседаний реперов профильной линии на день сдвижения новой серии наблюдений с помощью логистической функции.

5. Внесение поправки калибровочной функции, определенной по результатам предыдущей серии наблюдений.

По итогам перерасчета деформаций имеются прогнозные значения оседаний реперов на дату последней серии наблюдений. Согласно математиче-

ской модели, описанной ранее, к имеющимся значениям прибавляются поправки калибровочной функции, в результате чего получают скорректированные значения деформаций.

Данные поправки считаются актуальными до момента проведения новой серии наблюдений и повторного определения калибровочной функции.

6. Переопределение параметров калибровочной функции.

На данном этапе, имея скорректированные значения оседаний реперов и измеренные значения на дату t_{i+1} , вновь вычисляют разности и строят линию тренда. Полученное уравнение будет служить актуальным уравнением калибровочной функции для расчетов на последующие даты.

7. Повторение пунктов 4-6 до последней серии наблюдений.

Данным алгоритмом предусмотрен циклический расчет калибровочной функции. Многократное переопределение уравнения калибровки по результатам нескольких серий наблюдений ведет к уменьшению коэффициентов уравнения и, соответственно, общей величины вносимой поправки.

Диапазон применения данного метода прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности зависит от наличия и ориентации профильных линий наблюдательных станций относительно направления залегания пластов. В том случае, если наблюдательная станция имеет на исследуемом участке профильную линию, расположенную параллельно простиранию пластов, полученные значения калибровочных функций можно использовать в точках других расчетных линий, расположенных параллельно профильной линии, то есть мульда сдвижения калибруется по простиранию. В случае, если наблюдательная станция имеет на исследуемом участке профильную линию, расположенную вкrest направления простирания пластов, полученные значения калибровочных функций также можно использовать в точках других расчетных линий, расположенных параллельно данной профильной линии, то есть мульда сдвижения калибруется вкrest простирания пластов. В случае наличия профильных линий, расположенных как по простиранию, так и вкrest простирания пластов, мульду можно калибровать по всей площади исследу-

емого участка. Если имеется несколько профильных линий, расположенных в одном направлении (например, чаще всего – вкрест простирания), то значения калибровочных функций для сечений, расположенных между этими профильными линиями параллельно им, определяются интерполированием. Наконец, отсутствие наблюдаемой станции на исследуемом участке является препятствием для применения данного метода. В этом случае прогноз сдвижений и деформаций земной поверхности осуществляют по принятой в настоящее время методике.

2.5 Модель искусственной нейронной сети для корректировки прогноза на основании данных инструментальных наблюдений

В целях разработки альтернативного инструмента систематической корректировки прогноза можно использовать технологии искусственных нейронных сетей. Алгоритмы расчета, основанные на применении нейронных сетей, в последнее время являются наиболее актуальными в области математического анализа данных.

Создание инструмента корректировки прогноза деформаций включает ряд этапов:

- разработка архитектуры нейронной сети;
- подготовка и нормализация входных данных;
- создание алгоритма расчета сети;
- обучение и оптимизация сети;
- тестирование сети.

Для реализации задачи формируется многослойная нейронная сеть прямого распространения (рисунок 2.7) [16]. В данном случае используется неглубокая сеть, имеющая, помимо входного и выходного слоев, один скрытый слой из 50 нейронов.

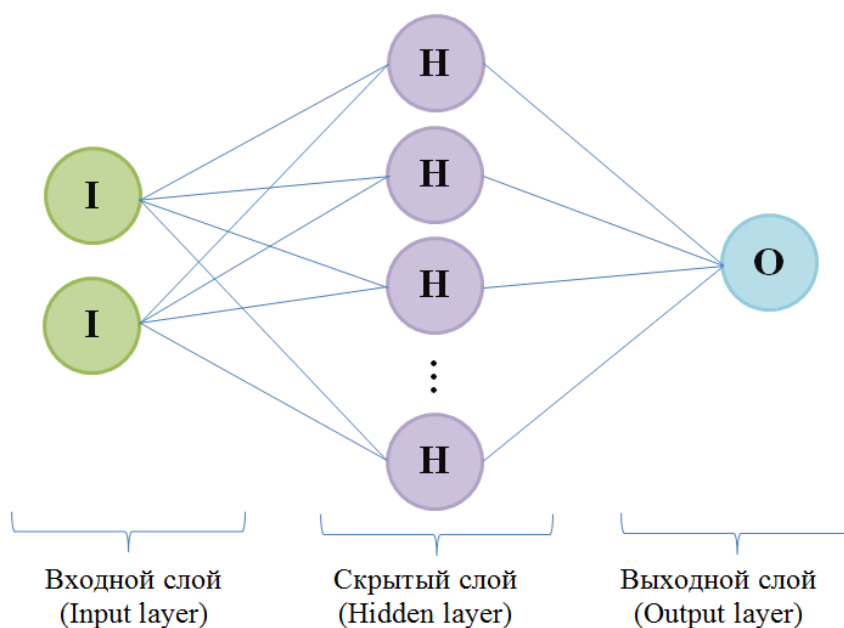


Рисунок 2.7 – Схема архитектуры нейронной сети

Первым этапом в работе с нейронной сетью является подготовка и нормализация входных данных. Как следует из рисунка 2.7, на вход подается два параметра: порядковый номер репера профильной линии и день сдвижения земной поверхности. Использование номеров реперов вместо плановых координат (X , Y) значительно упрощает работу с сетью за счет сокращения количества входных данных. День сдвижения t задается исходя из дат начала и конца процесса сдвижения (день 0 и день N соответственно, $0 \leq t \leq N$). На выходе имеется значение z_i ; координаты Z [16].

Корректная работа нейронной сети с данными возможна лишь после их нормализации – приведения к одной размерности посредством пересчета в диапазон $0..1$.

Перед началом работы составляют массивы входных (X) и выходных (Z) данных для обучения сети, причем массивы N (номера реперов) и T (дни сдвижения) совмещают в один:

$$N = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \dots \\ n_k \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_k \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} n_1 & t_1 \\ n_2 & t_2 \\ \dots & \dots \\ n_k & t_k \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_k \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Обучение сети построено на использовании алгоритма обратного распространения ошибки (Backpropagation), что предполагает проход по всем слоям сети в прямом и обратном направлении. Это означает, что при прямом проходе математический аппарат сети формирует новый массив высотных отметок Z' , отличный от исходного Z . При обратном проходе происходит процесс пересчета весов, зависящий от величин квадратов отклонений [16].

Чаще всего в качестве функции активации для многослойных сетей используют логистическую функцию (сигмоиду) вида (2.17), где t будет представлять собой аргумент функции активации.

Для произведения расчетов необходимо некоторым образом (например, случайным) задать значения матриц весов W_1 (размер 2×50) и W_2 (размер 50×1), характеризующих синапсы (связи), соединяющие слои нейронной сети. Прямой проход по слоям сети имеет следующий вид:

$$A_1 = XW_1, \quad A_2 = f(A_1), \quad A_3 = A_2W_2, \quad Z' = f(A_3), \quad (2.25)$$

$$Z' = f(f(XW_1)W_2).$$

В выражении (2.24) матрицы A_1 (размер $k \times 50$), A_2 ($k \times 50$), A_3 ($k \times 1$) являются матрицами промежуточных расчетов. На этапах вычисления A_2 и Z' используется функция активации, применяемая ко всем элементам матрицы [16].

Далее выполняется расчет целевой функции ошибок нейронной сети:

$$C = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (z_i - z'_i)^2. \quad (2.26)$$

Для обучения сети используется метод градиентного спуска, т.е. метод нахождения локальных экстремумов функции C , где z'_i вычисляется как элемент вектора-столбца Z' по формулам (2.25) при движении вдоль градиента. Пересчет весовых коэффициентов в матрицах W_1 и W_2 при обучении сети с

помощью алгоритма обратного распространения предполагает использование частных производных функций (2.17) и (2.25) последовательно по A_3 , W_2 , A_1 и W_1 . В частности, сначала определяют производную (2.27) функции активации (2.17), после чего рассчитывают производные $B_1 \left(\frac{\partial C}{\partial A_3} \right)$, $B_2 \left(\frac{\partial C}{\partial W_2} \right)$, $B_3 \left(\frac{\partial C}{\partial A_1} \right)$, $B_4 \left(\frac{\partial C}{\partial W_1} \right)$, что представлено ниже (2.28):

$$f'(Y) = \frac{e^{-Y}}{(1+e^{-Y})^2}; \quad (2.27)$$

$$B_1 = -(Z - Z') \cdot f'(A_3),$$

$$B_2 = -(Z - Z') \frac{\partial Z'}{\partial A_3} \frac{\partial A_3}{\partial W_2}, \quad B_2 = -(Z - Z') f'(A_3) \frac{\partial A_3}{\partial W_2},$$

$$B_2 = A_2^T B_1,$$

$$B_3 = (B_1 W_2^T) \cdot f'(A_1),$$

$$B_4 = B_1 W_2^T \frac{\partial A_2}{\partial A_1} \frac{\partial A_1}{\partial W_1}, \quad B_4 = B_1 W_2^T f'(A_1) \frac{\partial A_1}{\partial W_1},$$

$$B_4 = X^T B_2.$$

Существует множество алгоритмов оптимизации нейронных сетей. Обучение сетей может производиться с помощью таких методов, как метод сопряженных градиентов, метод Левенберга – Марквардта, метод Ньютона и т.д. Для данной сети использован алгоритм Бroyдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно (BFGS), представляющий собой один из наиболее известных квазиньютоновских методов оптимизации. Это итерационный метод, без ограничений выполняющий поиск локального экстремума нелинейных функций [16].

При тестировании сеть может выдавать неудовлетворительные результаты. Это может возникать по причине «недообучения» (предсказание недостаточно точных результатов) или «переобучения» сети (предсказание без учета шумов и отклонений). Такие проблемы связаны с выбором количества нейронов в скрытом слое; чересчур большое количество нейронов ведет к

«переобучению», малое – к «недообучению» сети. Во избежание данных проблем производят контроль целевой функции с помощью параметра регуляризации [16].

Алгоритм корректировки прогноза включает несколько этапов. Прежде всего, в качестве исходных данных формируются ЦМР на начало (по результатам наблюдений [35], ЦМР-0) и конец сдвижения (по результатам прогноза [63], ЦМР-N). Затем по мере получения новых данных в рамках систематического мониторинга составляются промежуточные ЦМР, добавляемые в файл обучения сети (ЦМР-1, ЦМР-2, ЦМР-3 и т.д.). После добавления каждой из них сеть производит расчеты и корректирует кривые прогноза. При уточнении прогноза более чем вдвое в сравнении с существующей методикой [63] ЦМР-N исключается из обучающего файла, что позволяет с применением нейронной сети определить уточненную ЦМР на конец сдвижения.

На основании вышесказанного необходимо заключить, что современный деформационный мониторинг является понятием комплексным, не ограниченным исключительно инструментальными наблюдениями на профильных линиях наблюдательных станций и предполагающим дальнейшее применение результатов наблюдений для разработки динамических цифровых моделей рельефа и уточнения прогнозируемых данных [16].

2.6 Создание динамических цифровых моделей рельефа и контроль динамики нарастания деформаций

В подразделах 2.1, 2.2 и 2.3 данной работы были решены задачи математической оценки точности инструментальных наблюдений на наблюдательных станциях при использовании GNSS-приемников, ЭТ и ЛСС.

В соответствии с изложенными теоретическими наработками, использование электронного геодезического оборудования предусмотрено на этапах разбивки наблюдательных станций, привязки опорных реперов и наблюде-

ний на реперах профильных линий, что дает возможность представить общую схему инструментальных наблюдений (рисунок 2.8).

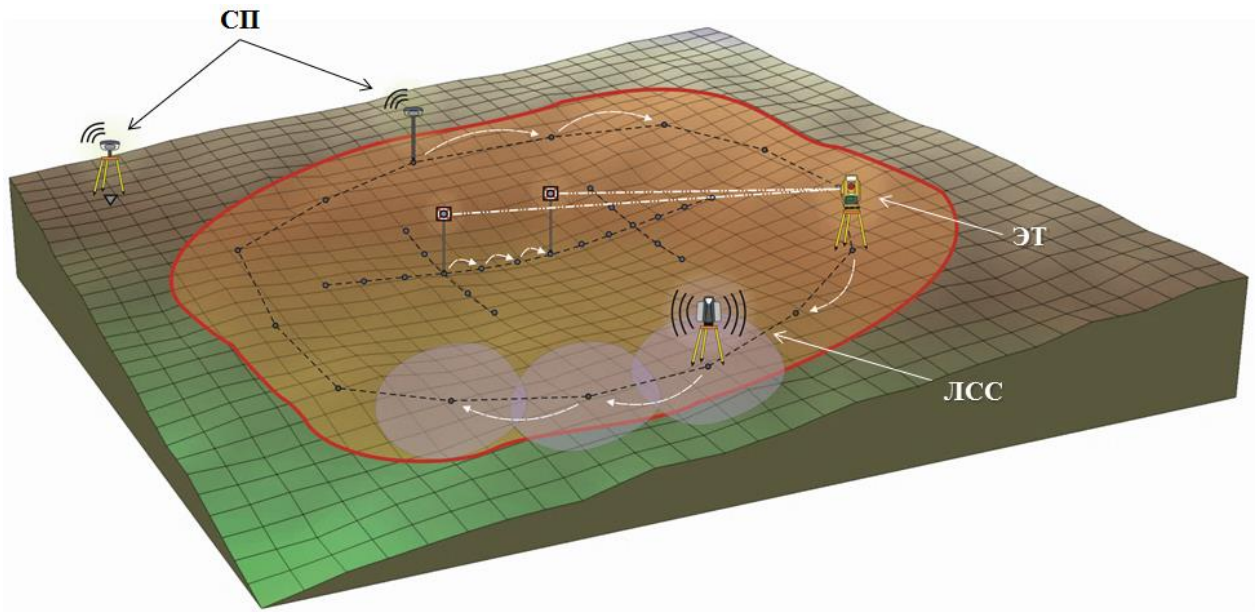


Рисунок 2.8 – Схема инструментальных наблюдений с применением спутниковых приемников (GNSS-приемников), электронных тахеометров (ЭТ) и лазерных сканирующих систем (ЛСС)

Несмотря на то, что результаты наблюдений являются ключевой составляющей при оценке деформирования земной поверхности, мониторинг смещений и деформаций этим не ограничивается. Систематический инструментальный контроль подрабатываемой территории позволяет копить и анализировать информацию с учетом пространственно-временных параметров. Таким образом, отдельные цифровые модели местности, сформированные на основании серий инструментальных наблюдений и прогноза, могут быть объединены и представлены в виде динамических цифровых моделей рельефа (ДЦМР) [23].

Как известно, в основе цифровых моделей рельефа лежат наборы пространственных координат точек, расположенных на наблюдаемой территории:

- отдельные точки съемочного обоснования, измеряемые с помощью GNSS-приемников;
- полилинейные объекты, представляющие собой профильные линии реперов, определяемые с помощью электронного тахеометра;
- облака точек, образованные в ходе лазерного сканирования профильных линий реперов и подрабатываемых объектов.

Цифровые модели, основанные на инструментально полученных результатах наблюдений и прогноза, обрабатывают в специальном программном обеспечении для фильтрации избыточных данных или выявления ошибочной информации. Различия в сетках ЦМР, образованных на базе разных серий наблюдений, нивелируются за счет приведения моделей к виду с регулярным расположением точек на прямоугольных сетках методом интерполирования. Впоследствии это позволяет упростить контроль динамики нарастания деформаций.

Процесс деформирования земной поверхности характеризуется величинами сдвижений и деформаций, рассчитываемых согласно «Инструкции...» [35]. В их число входят оседания, наклоны, кривизна, радиус кривизны, горизонтальные сдвижения и горизонтальные деформации, формулы которых приведены в подразделе 1.4 данной работы и свидетельствуют о том, что показатели деформаций находятся в прямой зависимости от результатов измерений на станции. Отсюда возникает необходимость анализа погрешностей при вычислении сдвижений и деформаций, и оценки влияния ошибок инструментальных наблюдений на итоговые показатели.

«Правилами охраны сооружений и природных объектов...» [63] закреплены допустимые величины деформаций земной поверхности для подрабатываемых зданий, сооружений и коммуникаций. Недостаточная точность при определении сдвижений и деформаций ведет к невозможности проведения адекватной оценки деформирования земной поверхности и подрабатываемых объектов.

Аналогично приему, описанному в подразделах 2.1, 2.2 и 2.3, с помощью функций общего вида СКП для каждого вида сдвижений и деформаций могут быть определены по следующим формулам:

а) оседания:

$$m_{\eta}^2 = m_{Z_{n-1}}^2 + m_{Z_n}^2; \quad (2.29)$$

б) наклоны:

$$m_i^2 = \frac{1}{l^2} \cdot (m_{\eta_n}^2 + m_{\eta_{n-1}}^2) + \left(\frac{\eta_{n-1} - \eta_n}{l^2} \right)^2 \cdot m_l^2; \quad (2.30)$$

в) кривизна:

$$m_K^2 = \left(\frac{2}{l_n + l_{n-1}} \right)^2 \cdot (m_{i_n}^2 + m_{i_{n-1}}^2) + \left(\frac{2 \cdot (i_n - i_{n-1})}{(l_n + l_{n-1})^2} \right)^2 \cdot (m_{i_n}^2 + m_{i_{n-1}}^2); \quad (2.31)$$

г) радиус кривизны:

$$m_R^2 = \frac{1}{K^2} \cdot m_K^2; \quad (2.32)$$

д) горизонтальные сдвижения:

$$m_{\xi}^2 = \left. \begin{aligned} & \left(\frac{X_k - X_0}{D_2} \right)^2 \cdot (m_{X_k}^2 + m_{X_0}^2) + \left(\frac{Y_k - Y_0}{D_2} \right)^2 \cdot (m_{Y_k}^2 + m_{Y_0}^2) + \\ & + \left(\frac{X_1 - X_0}{D_1} \right)^2 \cdot (m_{X_1}^2 + m_{X_0}^2) + \left(\frac{Y_1 - Y_0}{D_1} \right)^2 \cdot (m_{Y_1}^2 + m_{Y_0}^2) \end{aligned} \right\}, \quad (2.33)$$

где X_1, Y_1 и X_k, Y_k – плановые координаты рассматриваемого репера соответственно в первой и k -ой (последней) сериях инструментальных измерений; X_0, Y_0 – плановые координаты опорного репера, ближайшего к рассматриваемому реперу; m_{X_1}, m_{Y_1} и m_{X_k}, m_{Y_k} – СКП плановых координат рассматриваемого репера соответственно в первой и k -ой (последней) сериях инструментальных измерений; m_{X_0}, m_{Y_0} – СКП плановых координат опорного репера, ближайшего к рассматриваемому реперу; D_1 и D_2 – длина полигонометрического хода (периметр) от рассматриваемого репера до ближайшего к нему

опорного репера соответственно в первой и k -ой (последней) сериях инструментальных измерений;

е) горизонтальные деформации:

$$m_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{d_1^2} \cdot (m_{d_1}^2 + m_{d_2}^2) + \left(\frac{d_1 - d_2}{d_1^2} \right)^2 \cdot m_{d_1}^2, \quad (2.34)$$

где d_1, d_2 – приведенные длины интервалов соответственно из первого (предыдущего) и повторного (последующего) наблюдений, мм; m_{d_1}, m_{d_2} – СКП измерения длин интервалов в первом и последующем измерениях.

Возвращаясь к вопросу пространственно-временного контроля деформаций, следует обозначить возможность построения ДЦМР на основании результатов прогноза. В «Правилах охраны сооружений и природных объектов...» [63] изложена методика расчета сдвижений и деформаций земной поверхности при различных условиях подработки. Важно заметить, что все расчеты выполняются на момент завершения процесса сдвижения, что не дает возможности оценить его динамику.

Порядок построения ДЦМР можно представить следующим образом:

1. Построение ЦМР на начало процесса сдвижения. Проведение инструментальных наблюдений на профильных линиях и ситуационных съемок подрабатываемой территории. Интерполирование и составление регулярной сетки на территории сдвижения земной поверхности.

2. Построение ЦМР на конец процесса сдвижения. Расчет величин ожидаемых деформаций для реперов и узлов регулярной сетки на конец процесса сдвижения согласно «Правилам охраны сооружений и природных объектов...».

3. Расчет ЦМР на определенный момент времени посредством логистической функции на основании полученных ЦМР на начало и конец процесса сдвижения.

Выбор оборудования обусловлен требованиями к точности на том или ином этапе наблюдений и основан на математическом анализе погрешностей

измерений. Проведенный анализ позволяет заключить, что наиболее точным методом измерений являются наблюдения с помощью электронного тахеометра. Для достижения необходимой точности, регламентируемой нормативными документами, наблюдения должны быть произведены согласно разработанным рекомендациям.

Результаты инструментальных наблюдений обобщаются в виде координатной ведомости, на основании которой производится интерполирование и составляется регулярная сетка на территории сдвижения земной поверхности. В качестве метода интерполяции используется метод Кригинга, наиболее часто применяемый в области геостатистики.

На втором этапе построения ДЦМР выполняется прогнозирование координат ЦМР на конец процесса сдвижения, в рамках чего происходит расчет ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности.

Исходными параметрами для расчета деформаций являются граничные углы, угол максимального оседания или углы полных сдвижений, относительные величины максимального оседания и максимального горизонтального сдвижения, функции распределения сдвижений и деформаций. На базе Санкт-Петербургского горного университета, а также на базе научно-исследовательского института РАНМИ (г. Донецк) были разработаны программы, выполняющие вышеописанные расчеты. Вычисления производятся для реперов профильных линий и узлов регулярной сетки на территории сдвижения земной поверхности. Плановые координаты регулярных сеток в ЦМР на начало и конец процесса сдвижения должны совпадать.

Последний этап построения ДЦМР состоит в получении высотных координат реперов наблюдательных станций и узлов регулярной сетки территории сдвижения на определенную дату. Для этого необходимо применить установленный характер нарастания деформаций в процессе сдвижения земной поверхности, описываемый с помощью логистической функции.

Применение функции (2.17) к величине оседания в каждой точке регулярной сетки цифровой модели рельефа позволяет сформировать любое ко-

личество моделей в зависимости от выбранной степени детализации сдвижения в ДЦМР.

Разработка ДЦМР не только способствует организации пространственного представления результатов наблюдений, но также и является основой процесса отбора объектов, расположенных на обрабатываемой земной поверхности и подлежащих первостепенному обследованию. Визуализация ДЦМР посредством специального программного обеспечения дает возможность подробного отображения картины сдвижения, проведения детального анализа процесса нарастания деформаций и решения вопросов охраны обрабатываемых объектов [95]. В качестве таких программных средств могут выступать продукты компании Autodesk, например, AutoCAD или 3ds Max, с возможностью автоматизации трехмерных анимированных построений моделей местности при помощи MaxScript [22].

Выводы к главе 2

В ходе работы над теоретическими положениями геодезического деформационного мониторинга земной поверхности были получены следующие научные результаты:

- разработаны математические модели оценки точности наблюдений с помощью GNSS-приемников, электронных тахеометров и лазерных сканирующих систем в ходе инструментальных наблюдений на наблюдательных станциях;
- составлены схемы наблюдений профильных линий реперов с помощью перечисленного оборудования;
- определены основные факторы, влияющие на погрешности определения координат реперов, длин и превышений между реперами при наблюдениях;

- разработаны алгоритмы корректировки прогноза на основании данных инструментальных наблюдений посредством калибровочных функций и искусственной нейронной сети;
- описаны понятие и порядок формирования ДЦМР по результатам инструментальных наблюдений и прогноза сдвижений и деформаций;
- разработана математическая модель оценки точности определения сдвижений и деформаций земной поверхности;
- представлена технология контроля динамики сдвижения посредством применения логистической функции.

3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Математические модели накопления погрешностей при проведении измерений на наблюдательных станциях электронными тахеометрами и лазерными сканирующими системами позволяют не только оценить сопутствующие ошибки, но также выявить факторы, оказывающие влияние на точность наблюдений, и подобрать оптимальные условия наблюдений и геодезическое оборудование. Объемный математический аппарат формул приводит к необходимости автоматизации расчетов. С этой целью в среде Microsoft Visual Studio 2015 были разработаны два специализированных программных комплекса «Total Station» и «Laser Scanner», предназначенные для моделирования условий наблюдений на наблюдательных станциях с помощью электронного тахеометра и лазерной сканирующей системы соответственно.

Результаты геодезических наблюдений были задействованы на этапах формирования динамических цифровых моделей рельефа и уточнения прогноза деформаций подрабатываемых территорий на примере конкретных объектов подработки. Модель искусственной нейронной сети для корректировки прогноза по данным инструментальных наблюдений также легла в основу отдельной программы, созданной в среде программирования Spyder.

Разработанные программы прошли регистрацию в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент), и значатся в базах данных службы под следующими номерами:

- свидетельство о государственной регистрации №2017616397: «Программный комплекс моделирования условий съемки наблюдательных станций методом электронной тахеометрии» (приложение А);
- свидетельство о государственной регистрации №2017663004: «Программа моделирования условий съемки наблюдательных станций методом лазерного сканирования» (приложение Б);

- свидетельство о государственной регистрации №2018613553: «Программа расчета уточненного прогноза деформаций на базе нейронной сети» (приложение В).

3.1 Программный комплекс моделирования условий наблюдений с помощью электронного тахеометра

Представленная в данном подразделе программа предназначена для моделирования условий наблюдений и их анализа в рамках мониторинга земной поверхности, и основана на математической модели накопления погрешностей наблюдений с помощью электронного тахеометра.

Программа имеет два режима работы: режим моделирования и режим расчета. В режиме моделирования пользователю предоставляется возможность вручную задать ряд параметров, касающихся расположения инструмента и профильной линии реперов, технических характеристик оборудования и различных погрешностей, возникающих при наблюдениях. Режим характеризуется «идеальным» (равномерным и симметричным) расположением реперов профильной линии и свойством интерактивности, обеспечивающим мгновенный пересчет результатов в соответствии с геометрией наблюдательной станции.

Режим расчета позволяет пользователю загрузить для дальнейшей обработки файл с координатами реперов и точки стояния электронного тахеометра, сформированный по результатам натурных наблюдений или по данным картографических материалов.

При запуске приложения возникает стартовое окно, в котором необходимо выбрать режим работы программы. На рисунке 3.1 приведено рабочее окно режима моделирования. Визуально в нем выделить три ключевых блока: интерактивный блок, блок исходных данных и информационный блок [24].

Дополнительно в рабочем окне представлены панель проекта и панель инструментов. В нижней части окна расположена кнопка «Рекомендации», позволяющая перейти в режим многократных вычислений для анализа точности разработанных схем наблюдений.

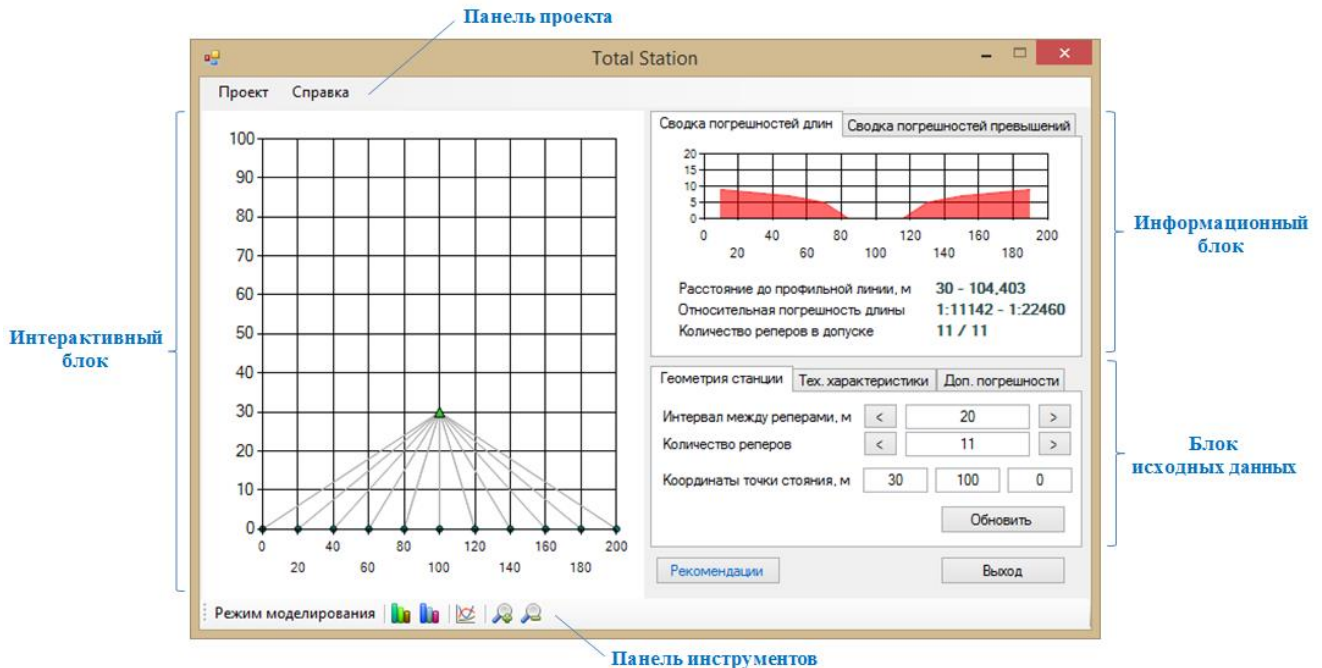


Рисунок 3.1 – Окно режима моделирования со схематическими указателями

Интерактивный блок программы представлен в виде схемы, на которой зеленым треугольником обозначено месторасположение электронного тахеометра, черными кружочками – положения реперов профильной линии. При нажатии левой кнопкой мыши в любом месте схемы происходит автоматическое перемещение точки стояния инструмента в указанное место, выполняется мгновенная перерисовка и пересчет погрешностей в соответствии с обновленной геометрией станции.

Блок исходных данных содержит поля для задания параметров, необходимых при расчете точности геодезических измерений. Для удобства при работе с программой параметры распределены по трем вкладкам (рисунок 3.2).

Вкладка «Геометрия станции» (рисунок 3.2, а) позволяет сформировать профильную линию, задав количество реперов и интервал между ними, а также координаты точки стояния электронного тахеометра.

(а) Скриншот вкладки «Геометрия станции». Поле «Интервал между реперами, м» содержит значение 20. Поле «Количество реперов» содержит значение 11. Поле «Координаты точки стояния, м» содержит значения 30, 100, 0.

(б) Скриншот вкладки «Тех. характеристики». Поле $m\beta$ содержит значение 5. Поле $m\delta$ содержит значение 5. Поле mSc содержит значение 2. Поле mSv содержит значение 2. Поле «Количество приемов» содержит значение 3.

(в) Скриншот вкладки «Доп. погрешности». Поле «СКП высоты инструмента» содержит значение 1. Поле «СКП высоты визирования» содержит значение 1. Поле «СКП точки стояния» содержит значения 0, 0, 0.

Рисунок 3.2 – Содержимое вкладок блока исходных данных

Во вкладке «Тех. характеристики» (рисунок 3.2, б) пользователем задаются количество полных приемов наблюдений и значения погрешностей при наблюдениях электронным тахеометром: $m\beta$ – СКП горизонтального угла, $m\delta$ – СКП вертикального угла, mSc , mSv – соответственно постоянная и переменная составляющие СКП измерения длины.

Прочие ошибки, возникающие в ходе инструментальных измерений, регулируются вкладкой «Доп. погрешности» (рисунок 3.2, в). В их число входят СКП высоты инструмента и СКП высоты визирования, измеряемые рулеткой. СКП точки стояния должно быть задано в соответствии с результатами спутниковых определений на опорных пунктах.

Кнопки «Обновить» на каждой из вкладок имеют тот же эффект, что и щелчок мышью по схеме интерактивного блока: программа обновляет схему и производит пересчет ошибок.

Результаты всех расчетов приводятся во вкладках информационного блока (рисунок 3.3). Каждая из них включает график распределения погреш-

ностей вдоль профильной линии. Расстояние от инструмента до профильной линии, ошибки длин и превышений, и количество реперов с допустимыми величинами погрешностей представлены диапазонами значений. Это объясняется различной точностью при наблюдениях за реперами, расположенными ближе или дальше относительно точки стояния электронного тахеометра.

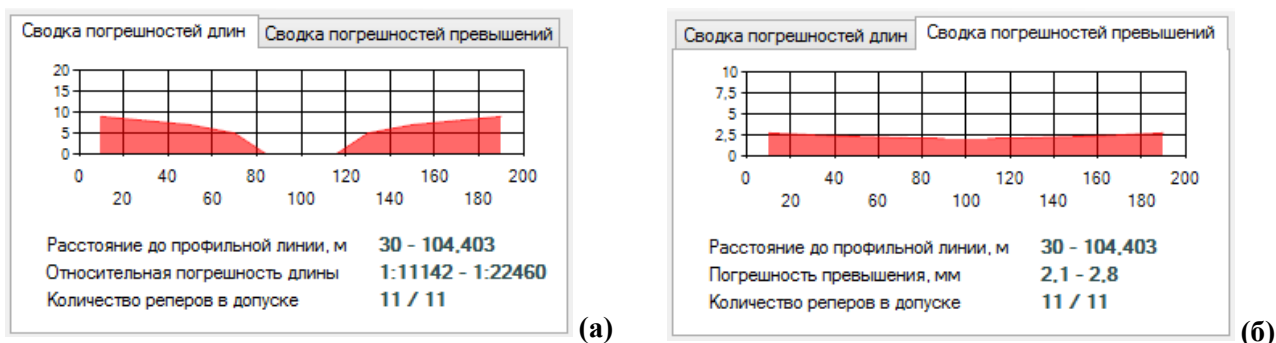


Рисунок 3.3 – Содержимое вкладок информационного блока

Информация о количестве реперов «в допуске» позволяет оперативно контролировать уровень точности при наблюдениях. Как видно из рисунка 3.3, а и 3.3, б, это величина напрямую связана с результатами расчета погрешностей длин и превышений. Допустимым граничным значением погрешности при вычислении длин интервалов между реперами является относительная ошибка 1:10000; допустимая СКП при определении превышений между реперами – 5 мм.

Рабочее окно программы содержит две функциональные панели – панель проекта и панель инструментов. Панель проекта позволяет переключаться между режимами работы программы, сохранять результаты моделирования, производить закрытие проекта или сброс до установок по умолчанию, переходить к справке и информации о программе и разработчике.

Панель инструментов дает возможность управлять отображением схемы интерактивного блока. Кнопки панели включают и отключают диаграммы погрешностей определения длин и превышений (рисунок 3.4), осуществляют управление масштабом схемы.

Как было сказано ранее, отличием режима расчета от режима моделирования прежде всего является возможность построения в программе наблюдательной станции по известным координатам реперов и точки стояния тахеометра. Данные заранее вносят в файл MS Excel (*.xls, *.xlsx). Файл исходных данных формируется установленным образом (данные содержатся в определенных ячейках таблиц), поэтому для упрощения взаимодействия с программой в разделе справки можно загрузить шаблон файла исходных данных.

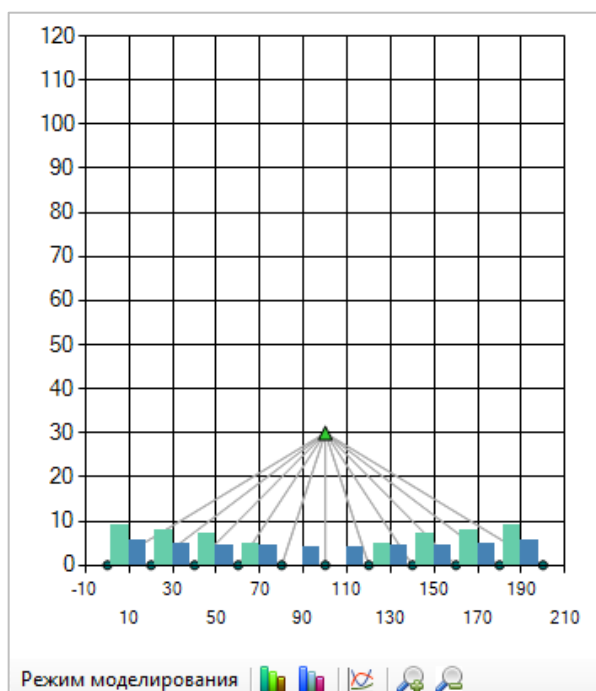


Рисунок 3.4 – Схема интерактивного блока с отображением диаграмм погрешностей

Необходимо заметить, что режим расчета не является основным режимом работы программы. Назначение разработанного комплекса состоит главным образом в моделировании условий геодезических наблюдений и подготовке специальных рекомендаций к работе на наблюдательных станциях.

Разработка рекомендаций предполагает выполнение многократных расчетов точности при задании всевозможных условий наблюдений для выявления наиболее оптимальных с точки зрения ожидаемой точности резуль-

татов, а также геометрии станции, технических характеристик применяемого оборудования и т.д.

Учитывая бесконечное количество вариантов наблюдательных станций, необходимо ввести некоторые ограничения с целью приведения идеи разработки методических рекомендаций к некоторому конкретному виду.

Режим многократного моделирования запускается нажатием кнопки «Рекомендации» в главном рабочем окне программы, в результате чего возникает новое окно для выбора и ввода параметров (рисунок 3.5).

В верхней части окна расположены два списка для выбора постоянных и переменных параметров моделирования; в нижней части – вкладки с полями для ввода значений параметров или указания диапазонов изменений этих значений. Для иллюстрации различий между постоянными и переменными параметрами необходимо привести следующие примеры.

Рисунок 3.5 – Окно ввода параметров
в режиме моделирования

Пример 1. Предполагается, что на подрабатываемой территории уже заложена прямая профильная линия из 11 реперов с одинаковым интервалом

10 м между реперами (т.е. общей длиной 100 м). Для наблюдений подготовлен электронный тахеометр, точность которого по результатам заранее проведенных исследований прибора составляет 5" при измерениях углов и 2 мм + 2 мм/км при измерении длин. Задача заключается в определении наилучшего местоположения прибора относительно профильной линии с учетом того, что сам тахеометр может быть расположен не далее 100 м и не ближе 5 м. Исходя из вышеописанного, интервал между реперами, количество реперов и технические характеристики прибора должны быть занесены в список «Постоянные значения» по причине их изначального предопределения. Тем временем параметр «Точка стояния» должен находиться в списке «Переменные значения», а диапазон его изменения (5...100 м) должен быть указан в нижней части окна в соответствующей вкладке (рисунок 3.6, а).

Пример 2. Допустим, запланированы закладка профильной линии и серия геодезических наблюдений на территории мульды сдвижения; конкретных требований при этом не представлено. Например, величина интервала между реперами может быть равна 5-10 м, количество реперов – 10-15. Для наблюдений может быть использован тахеометр с угловой точностью 5" и линейной точностью 2 мм + 2мм/км, или же прибор с угловой точностью 3" и линейной точностью 2 мм + 2мм/км. В таком случае все параметры должны быть перенесены в список «Переменные значения», после чего в нижней части окна для каждого из них будет установлен диапазон изменения значений.

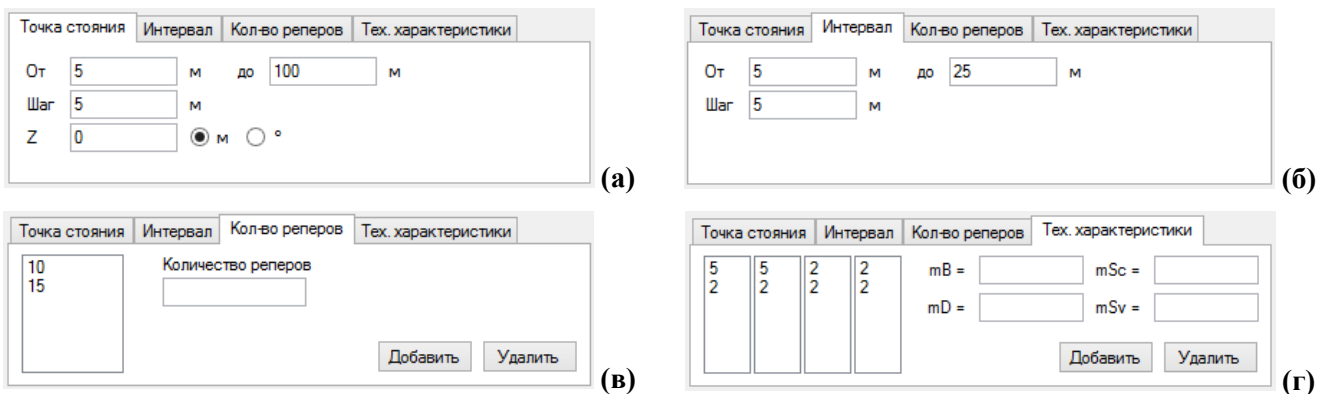


Рисунок 3.6 – Содержимое вкладок окна моделирования

На рисунке 3.6 приведен вид каждой из вкладок, расположенных в нижней части окна моделирования. Прежде чем задать значения параметров необходимо их статус (постоянный или переменный).

Во вкладке «Точка стояния» (рисунок 3.6, а) при переменном статусе параметра может быть задан конкретный интервал изменения расстояния между средней точкой профильной линии реперов и точкой стояния электронного тахеометра. Шаг устанавливается в зависимости от необходимой детальности разрабатываемых рекомендаций. Также режим моделирования позволяет указать для точки стояния инструмента конкретную высотную координату или угол наклона при измерениях.

Интервал между реперами профильной линии задается аналогичным образом во вкладке «Интервал» (рисунок 3.6, б). В случае если статус параметра «Точка стояния» или «Интервал» является постоянным, значение должно быть записано в первое поле соответствующей вкладки («От»).

Количество реперов профильной линии задается вручную в третьей вкладке окна моделирования – «Кол-во реперов» (рисунок 3.6, в). Все предполагаемые случаи должны быть занесены в поле данной вкладки. Из рисунка 3.6-в следует, что программа обработает лишь два случая (для 10 и 15 реперов); при этом, например, если необходимы расчеты для реперов в количестве от 10 до 15, то поле должно содержать значения «10, 11, 12, 13, 14, 15».

В последней вкладке («Тех. характеристики») находятся поля для ввода значений СКП одного или нескольких используемых электронных тахеометров (рисунок 3.6, г).

После задания всех исходных данных пользователь нажимает в окне моделирования кнопку «ОК», тем самым запуская процесс многократных расчетов. По результатам вычислений в корневой папке появляется один или несколько выходных файлов, что зависит от заданного количества электронных тахеометров (рисунок 3.6, г).

Количество рабочих листов в файле Excel определяется числом возможных вариантов согласно заданному в окне моделирования. Например,

интервал между реперами изменяется от 5 до 15 м с шагом 5 м (всего 3 варианта), а количество реперов может составлять 10 или 15 штук (всего 2 варианта). Таким образом, в одном расчетном файле будет 6 листов выходных таблиц. Количество строк в этих таблицах находится в прямой взаимосвязи с числом перестановок инструмента. В начало файла будет дополнительно помещен лист, содержащий главную таблицу рекомендаций к наблюдениям.

В таблице «Рекомендации» приводятся результаты расчета погрешностей определения длин и превышений при различных исходных данных. В последнем столбце дается лаконичное заключение относительно возможности проведения наблюдений в определенных условиях («да»/«нет»).

В начало каждого из последующих рабочих листов помещаются сводные таблицы погрешностей длин и превышений. Далее листы содержат подробные расчеты величин углов и длин, а также их погрешностей для всех вариантов станций.

На основании сформированных таблиц был проведен статистический эксперимент по выявлению факторов, влияющих на точность наблюдений с помощью электронного тахеометра [19]. Анализ результатов эксперимента позволил не только закрепить разработанные рекомендации к выполнению измерений на станции, но и выявить пути повышения точности геодезического мониторинга на подрабатываемых территориях.

3.2 Программный комплекс моделирования условий наблюдений с помощью лазерной сканирующей системы

Данный программный комплекс основан на математических моделях накопления погрешностей, изложенных в подразделе 2.3. С его помощью на основании многократного моделирования условий наблюдений разработаны рекомендации к проведению наблюдений для реперов профильных линий, окружающих объектов и подрабатываемой территории.

На рисунке 3.7 представлено рабочее окно программы. Как и в предыдущем случае, здесь присутствует разделение на три основных блока: визуальный блок, блок исходных данных и информационный блок [24].

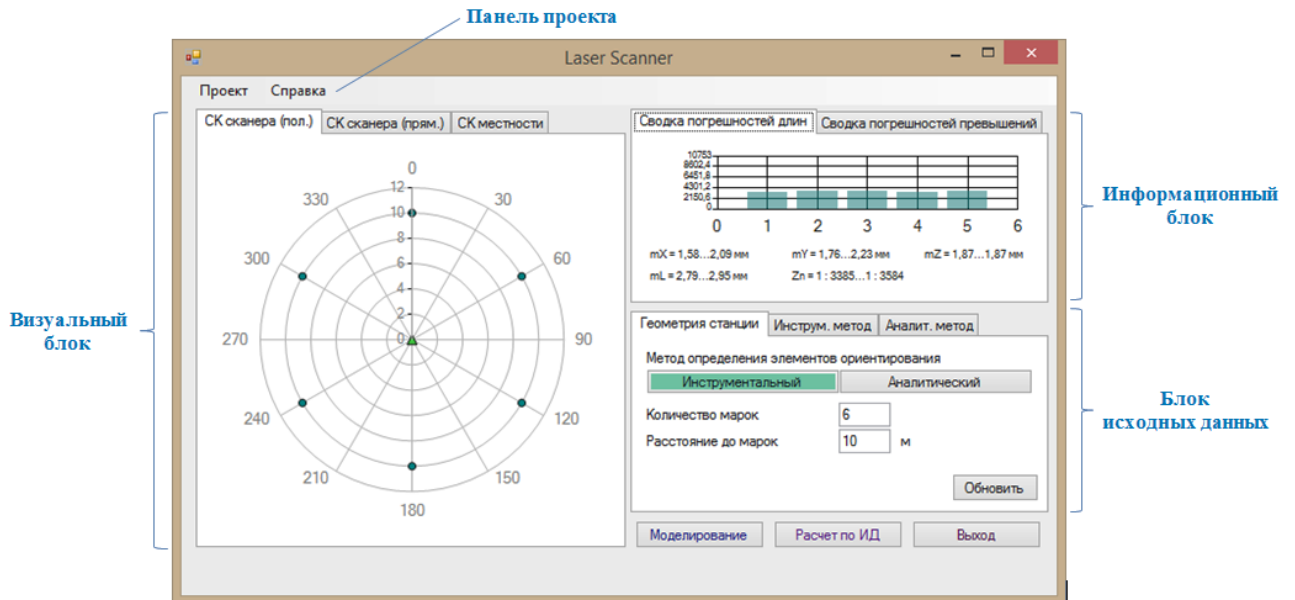


Рисунок 3.7 – Главное окно со схематическими указателями

Переключение между режимом моделирования и режимом расчета по исходным данным реализовано отдельно в виде кнопок «Моделирование» и «Расчет по ИД» в нижней части окна.

В визуальном блоке программы расположен набор вкладок со схемами (рисунок 3.8), изображающими взаимное расположение инструмента и визирных марок (реперов) в системе координат сканера (полярная – рисунок 3.8, а, прямоугольная – рисунок 3.8, б) и системе координат местности (рисунок 3.8, в). На каждой из представленных схем лазерная сканирующая система обозначена зеленым треугольником, визирные марки (реперы) – синими кружочками.

Следует заметить, что в качестве «идеального» расположения марок принято равномерное распределение по окружности с центром в точке стояния инструмента, что позволяет снизить погрешности при наблюдениях.

Классическая прямая профильная линия может быть сформирована специальным образом в режиме расчета по исходным данным.

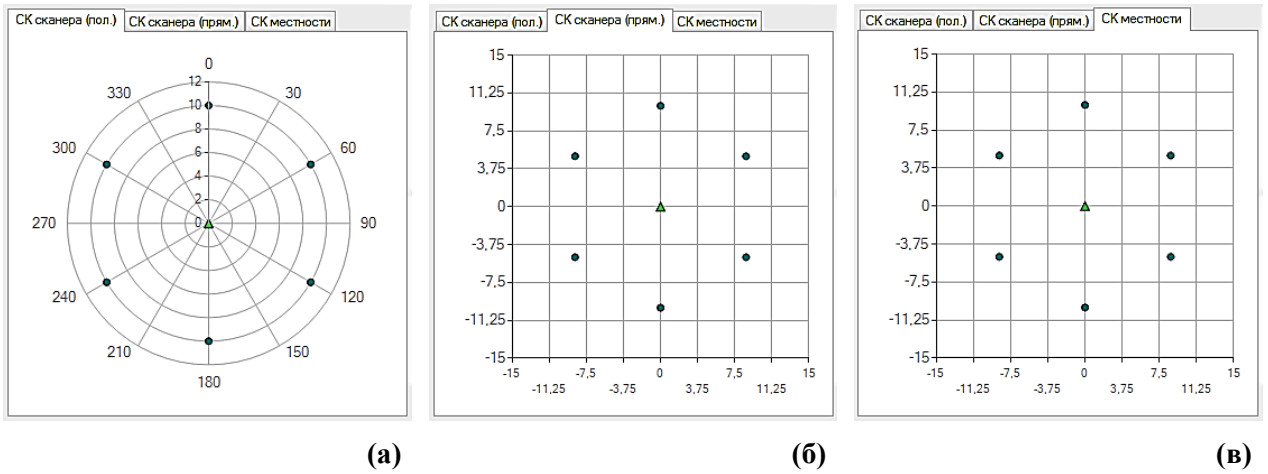


Рисунок 3.8 – Содержимое вкладок визуального блока

Блок исходных данных также характеризуется делением на вкладки (рисунок. 3.9), однако в данном случае первая из них является «управляющей». Во вкладке «Геометрия станции» (рисунок 3.9, а) необходимо задать метод определения элементов ориентирования в соответствии с моделируемой схемой наблюдений, количество визирных марок и расстояние до них от точки стояния инструмента. При выборе одного из методов (инструментальный или аналитический), вкладка другого автоматически отключается; например, на рисунке 3.9, а в «управляющей» вкладке выбран инструментальный метод, что означает отключение вкладки «Аналит. метод».

От выбора метода зависит набор необходимых исходных данных. Инструментальный метод (рисунок 3.9, б) подразумевает задание координат точки стояния и проведение ориентирования на местности, соответственно, для проведения расчетов необходимо указать СКП координат точки стояния, СКП центрирования, СКП измерения высоты инструмента с помощью рулетки и СКП определения дирекционного угла ($m\alpha$) в соответствии с точностными характеристиками сканирующей системы для измерения горизонтальных углов.

(а)

(б)

(в)

Рисунок 3.9 – Содержимое вкладок блока исходных данных

Аналитический метод (рисунок 3.9, в) основан на расчете местоположения сканера по специальным визирным маркам и требует указания погрешностей определения их координат. «Перенос» и «Поворот по час. стрелке» используются для внесения разницы между системами координат в режиме моделирования.

Несмотря на принципиальные различия в методах наблюдений, в каждой из вкладок необходимо задать технические характеристики используемого лазерного сканера: $m\varphi$ – СКП измерения горизонтальных углов, $m\theta$ – СКП измерения вертикальных углов, mR – СКП измерения длин.

Кнопки «Обновить» на каждой из вкладок используются для мгновенной перерисовки схем и перерасчета погрешностей наблюдений.

Информационный блок содержит результаты вычислений погрешностей координат марок, а также длин и превышений между ними (рисунок 3.10). Все значения приведены в виде диапазонов, что обусловлено геометрией наблюдательной станции. При работе в аналитическом режиме информационный блок каждый раз выдает различные результаты при расчете с одинаковыми исходными данными; этот эффект объясняется внесением дополнительной погрешности в высотную координату для исключения частно-

го случая, возникающего при расположении визирных марок в одной плоскости.



Рисунок 3.10 – Содержимое вкладок информационного блока

В верхней части рабочего окна расположена панель проекта, позволяющая переключаться между режимами, сохранять результаты моделирования, закрывать проект или производить сброс до установок по умолчанию, переходить к справке и информации о программе и разработчике.

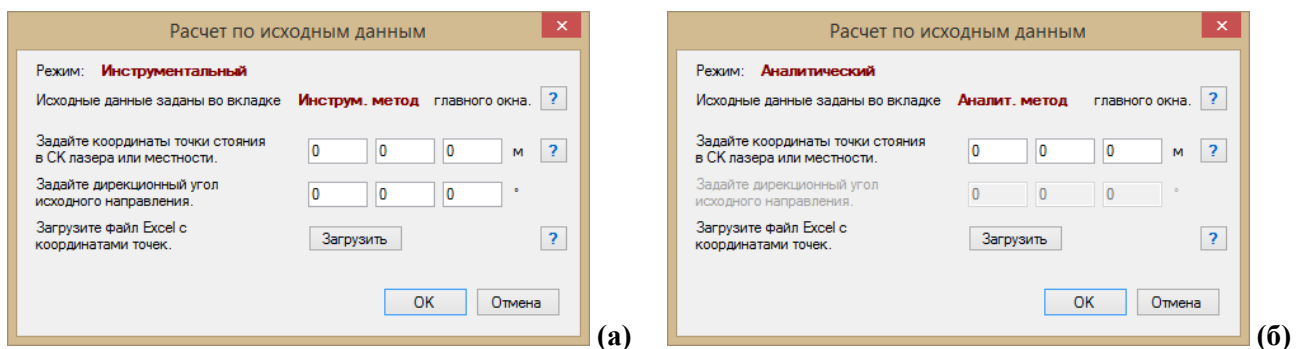


Рисунок 3.11 – Окно расчета по исходным данным
в зависимости от выбранного режима

Создание пользовательской профильной линии и расчет точности по данным существующей наблюдательной станции производится в режиме расчета по исходным данным, который запускается нажатием кнопки «Расчет по ИД», расположенной в нижней части главного окна программы. В отличие от режима расчета программного комплекса для электронного тахеометра, описанного в подразделе 3.1, в данном режиме не требуется наличие

файла исходных данных, составленного по шаблону; вместо этого добавлено дополнительно окно для ввода информации.

Содержимое окна зависит от выбранного метода наблюдений: для расчета необходимо задание списка координат снимаемых точек, координат точки стояния сканера и дирекционного угла исходного направления (только для инструментального метода). Файл Excel с координатами точек составляется в виде простой таблицы с тремя колонками для координат точек (столбцы А, В, С в файле Excel).

Основная часть работы в программе осуществляется в режиме моделирования, переход к которому выполняется посредством нажатия кнопки «Моделирование», расположенной в нижней части главного окна программы. Окно ввода параметров моделирования представлено на рисунок 3.12.

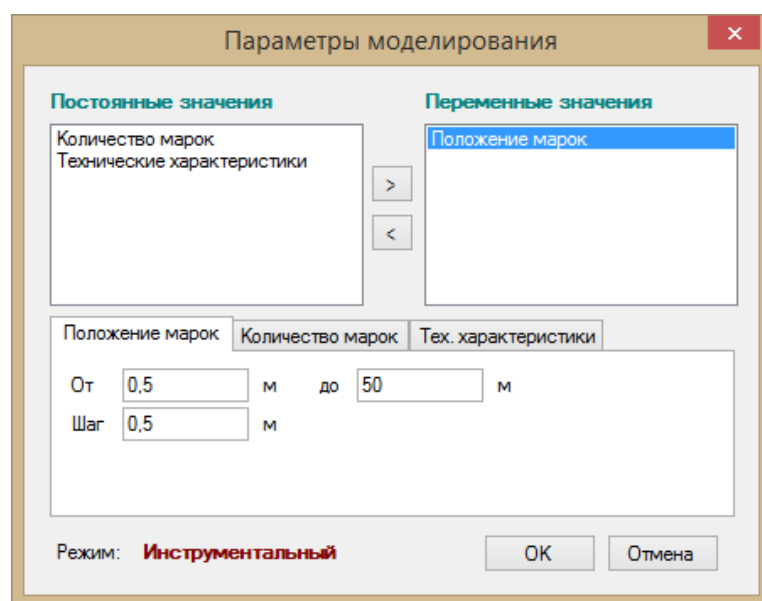


Рисунок 3.12 – Окно ввода параметров
в режиме моделирования

Работа в данном режиме подобна описанной в подразделе 3.1 данной диссертации. Пользователь задает статус параметров моделирования в верхней части рабочего окна и подробную информацию о диапазонах их изменений в нижней части окна. При моделировании условий наблюдений для ла-

зерного сканирования используются такие параметры, как положения марок (рисунок 3.13, а), их количество (рисунок. 3.13, б) и технические характеристики лазерной сканирующей системы (рисунок 3.13, в).



Рисунок 3.13 – Содержимое вкладок окна моделирования

После введения всех данных в соответствующие поля окна моделирования пользователь нажимает кнопку «ОК» для запуска работы режима. Один или несколько выходных файлов с результатами вычислений формируются в корневой папке программы.

В таблицу «Рекомендации» помещается информация о количестве марок, расстоянии между ними и точкой стояния инструмента, СКП координат марок, а также СКП длин и превышений между марками. Как и в выходных файлах предыдущего программного комплекса, столбец «Наблюдения» описывает возможность применения рассматриваемого оборудования в конкретных условиях.

Остальные листы выходного файла начинаются со сводных таблиц погрешностей длин и превышений, и включают подробные результаты расчетов величин, определяемых в ходе наблюдений, и их погрешностей.

Многократное моделирование условий лазерно-сканирующей съемки позволяет сформировать базу для статистической обработки с целью определения факторов, влияющих на точность. Созданный программный комплекс служит функциональным инструментом для разработки специальных реко-

мендаций к наблюдениям на подрабатываемых объектах и земной поверхности.

3.3 Инструментарий для корректировки прогноза деформаций посредством калибровочных функций

Математическая модель, представленная в подразделе 2.4, может быть реализована посредством встроенного инструментария MS Excel.

Исходными данными для расчета являются измеренные и прогнозные значения оседаний земной поверхности. Измеренные значения оседаний систематически определяют по результатам инструментальных наблюдений на наблюдательных станциях. Прогнозные значения вычисляются с применением специального программного обеспечения в соответствии с методикой прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности, изложенной в нормативных документах [12, 64]. Расчет прогнозных деформаций осуществляется на определенный день инструментальных наблюдений на основании логистической функции.

Данные всех серий измерений и прогнозные значения на конец процесса сдвижения записываются в электронную таблицу Excel. Далее посредством логистической функции выполняется расчет прогнозных значений деформаций на все даты инструментальных измерений.

По имеющимся данным измеренных и прогнозных деформаций рассчитывают разности, после чего определяют уравнение калибровочной функции в MS Excel посредством построения линии тренда. Для некоторой ломаной или кривой на графике возможен запуск процедуры аппроксимации и добавления линии тренда определенного вида: экспоненциальной, линейной, логарифмической, полиномиальной, степенной или функции линейной фильтрации. Опытным путем было установлено, что наилучшим образом в большинстве случаев разности описываются полиномом четвертой степени.

На основании полученного уравнения выполняется расчет поправок в значения прогнозных величин деформаций для последующей серии наблюдений. С каждой новой серией наблюдений будет производиться переопределение уравнения калибровочной функции и уточнение прогноза деформаций.

Алгоритм расчета калибровочной функции имеет циклический вид:

- 1) расчет прогнозных значений деформаций на конец процесса сдвижения в соответствии с существующей методикой;
- 2) определение прогнозных значений деформаций на определенную дату с помощью логистической функции;
- 3) расчет разностей между измеренными и прогнозными значениями деформаций;
- 4) построение линии тренда в MS Excel по данным рассчитанных разностей и определение уравнения калибровочной функции;
- 5) введение поправок, определяемых из уравнения калибровочной функции, в прогнозные значения деформаций последующей серии наблюдений;
- б) повторение пунктов 3-5.

Тестирование алгоритма позволило установить, что необходимость ввода поправок присутствует в течение первых 3-4 итераций; в дальнейшем поправками можно пренебречь ввиду их малых значений – на момент пятого переопределения функции величины поправок не превышают 2-3 мм [25].

3.4 Программный комплекс корректировки прогноза деформаций на основании нейронной сети

На основании математической модели искусственной нейронной сети, представленной в подразделе 2.5, была разработана специальная программа, позволяющая производить уточнение прогноза по данным инструментальных наблюдений.

Идея разрабатываемого инструмента состоит в том, чтобы обучить искусственную нейронную сеть особенностям деформирования земной поверхности в точках расположения реперов профильных линий на основании данных нескольких серий наблюдений. Это означает, что нейронная сеть будет получать обучающую информацию из цифровых моделей рельефа на начало и конец сдвижения (ЦМР-0, ЦМР-N), а также нескольких серий наблюдений (например, ЦМР-1, ЦМР-2, ЦМР-3), и по результатам обучения будет самостоятельно рассчитывать ЦМР в дальнейшем (ЦМР-4, ЦМР-5, ЦМР-6 и т.д.).

Процесс работы программы можно условно разделить на 6 этапов, в каждом из которых выполняется решение определенных задач, что схематически представлено на рисунке 3.14. На схеме связь между некоторыми из частей программы отмечена с помощью одинаковых символов (например, синий флажок в качестве обозначения связи между частями «Класс нейронной сети» и «Задание сети»). Финальная задача «Вывод итогового результата работы сети» является ключевой в процессе; в связи с этим для наглядности она обозначена отличительным зеленым значком.

Представленная нейронная сеть реализована с применением языка программирования Python в интегрированной среде разработки Spyder. В ходе работы используются библиотеки NumPy (работа с массивами и матрицами), SciPy (оптимизация, интегралы, специальные функции), math (работа с числами) и xlrd (чтение файлов Excel) [16].

Первым этапом программы, рассчитанным на взаимодействие с пользователем, является этап подготовки и чтения исходных данных. К обработке подается два файла Excel: обучающий и расчетный.

В обучающий файл с расширением *.xlsx в виде таблицы вносится объединенная информация о реперах профильных линий, собранная из ЦМР на начало и конец процесса сдвижения, а также массивов нескольких серий наблюдений. Таблица включает порядковые номера реперов, день сдвижения земной поверхности и значения координат Z; количество строк определяется произведением числа реперов и числа ЦМР. Расчетный файл имеет анало-

гичное содержание, однако длина его таблицы ограничена количеством строк для одной ЦМР. Столбец со значениями координат Z в расчетном файле является искомым.

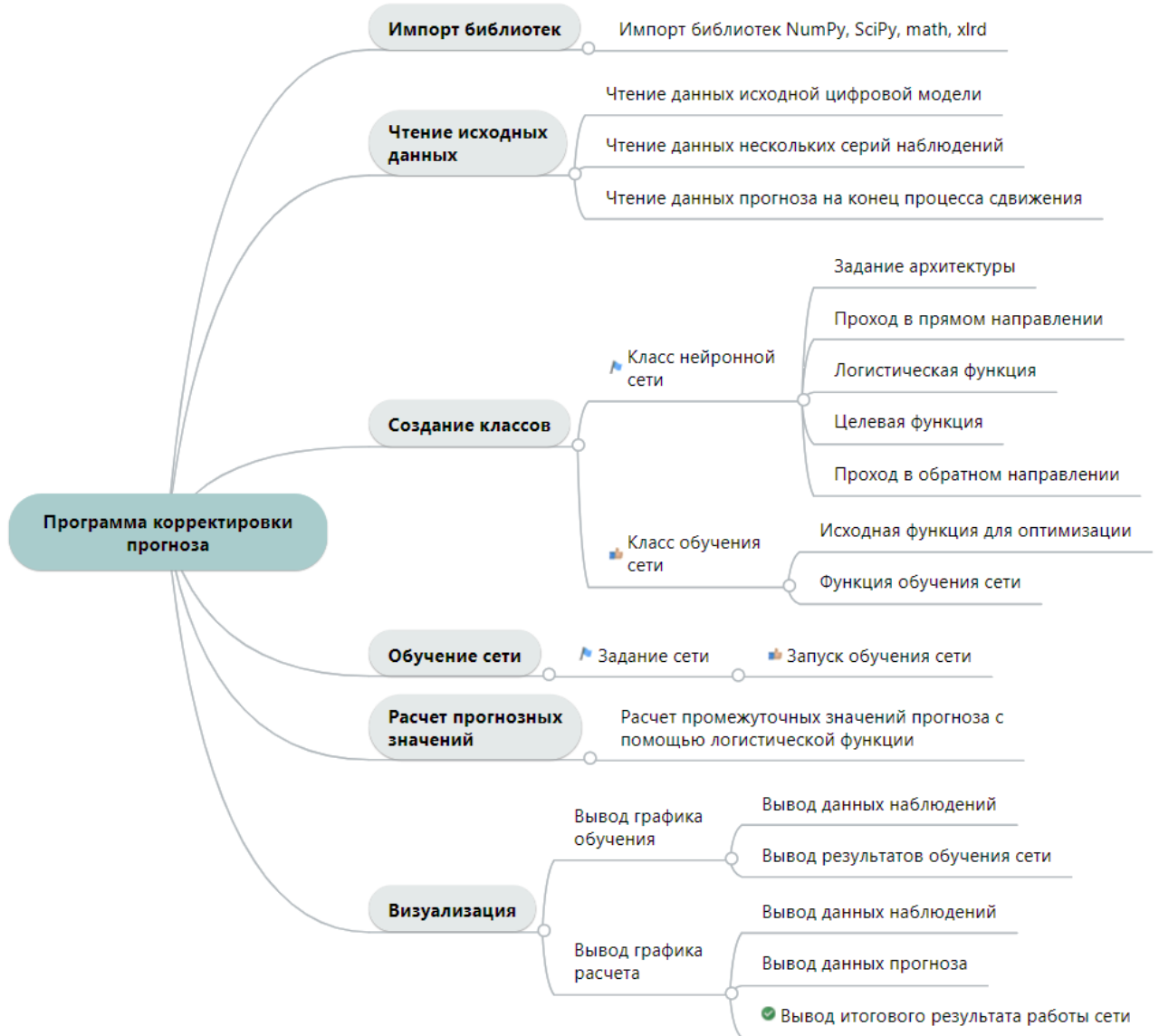


Рисунок 3.14 – Схема работы программы корректировки прогноза

Выборки, обрабатываемые нейронными сетями, могут состоять из совершенно произвольных данных, имеющих между собой существенные различия по абсолютным величинам; при этом сами нейронные сети не рассчитаны на распознавание этих различий по умолчанию. Зная диапазон изменения значений, производят нормализацию исходных данных – приведение их к единой размерности. Для решения описанной задачи могут быть примене-

ны методы линейной (подобно методу пропорции) или нелинейной нормализации (на основании логистической функции или гиперболического тангенса) [62].

Основная часть программного кода представляет собой создание классов нейронной сети и ее обучения, каждый из которых состоит из нескольких блоков (функций).

Класс нейронной сети включает блок инициализации, математический аппарат формул прохода в прямом и обратном направлении, блоки логистической и целевой функции. Блок инициализации дает информацию об архитектуре нейронной сети, т.е. ее типе (многослойная нейронная сеть прямого распространения), количестве входных (2) и выходных (1) параметров, скрытых слоев (1) и нейронов в каждом скрытом слое (50). В остальных блоках класса нейронной сети заложена теоретическая модель, подробно описанная подразделе 2.5.

Класс обучения сети содержит два основных блока: блок с исходной функцией для оптимизации (вспомогательный) и блок обучения (основной). Вспомогательный блок предназначен для подготовки к оптимизации; в нем выполняются вычисления целевой функции и ее производной (градиента). В основном блоке запускается модуль оптимизации (*scipy.optimize.minimize*), математический смысл которого заключается в нахождении экстремума функции. В качестве метода оптимизации используется алгоритм Бroyдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно (BFGS) [16].

По завершении процедуры создания классов осуществляется переход непосредственно к обучению нейронной сети. Данный этап, в отличие от предыдущего, представляет собой набор из нескольких команд для задания переменной самой сети и запуска процесса обучения.

Показателем качества работы сети является степень точности результатов ее вычислений по отношению к данным реальных наблюдений, а также в сравнении с существующей методикой прогнозирования деформаций на определенную дату. С целью проведения анализа в разработанный код до-

бавлен отдельный блок, производящий вычисления высотных координат реперов с помощью логистической функции при указании определенного дня сдвижения земной поверхности.

Финальный этап визуализации включает вывод графиков обучения и расчета в область консоли (рисунок 3.15).

Как можно заметить, кривые графика, составленного по данным обучающего файла, содержат пять подобных последовательно расположенных массивов. Для синей кривой эти массивы представляют собой данные ЦМР на начало и конец сдвижения (ЦМР-0, ЦМР-11), а также результаты трех серий геодезических наблюдений (ЦМР-1, ЦМР-2, ЦМР-3). Оранжевая кривая имеет плавный вид, и является отображением результатов обучения нейронной сети.

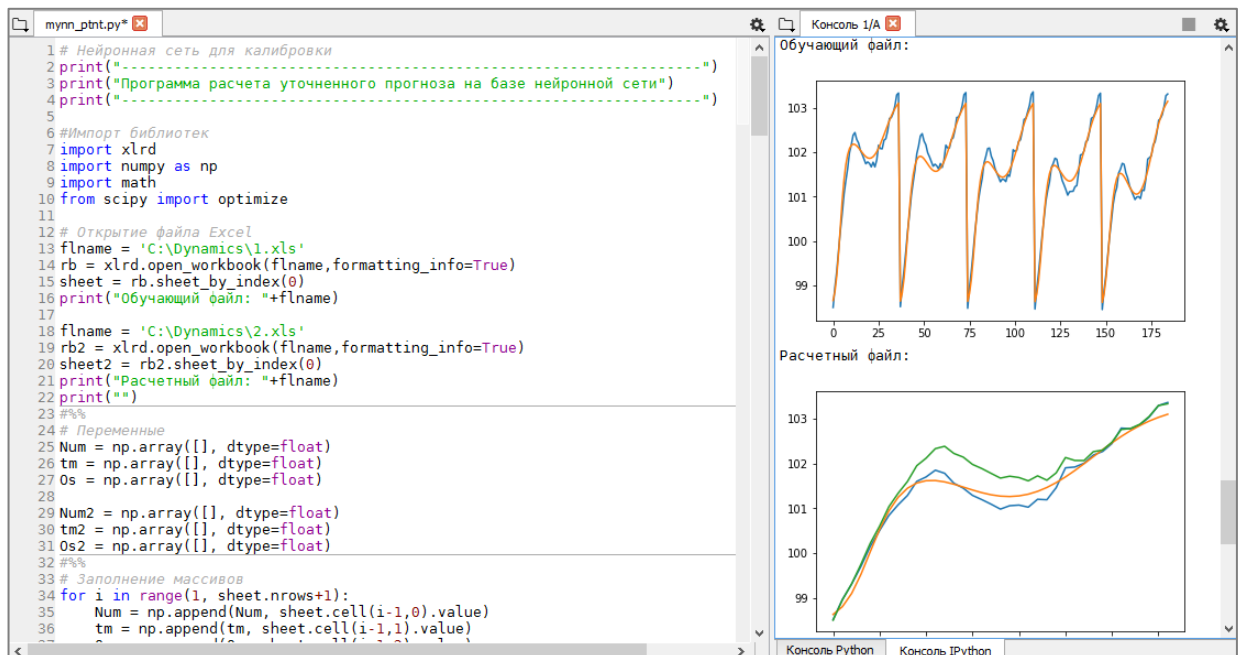


Рисунок 3.15 – Окно разработки программы и вывод графиков

Нижний график на рисунке 3.15 составлен по данным расчетного файла, и является итоговым результатом работы сети (согласно рисунку 3.14). Синяя кривая представляет результаты натуральных наблюдений для необработанной ранее серии (ЦМР-4), не включенной в вычислительный процесс про-

граммы и приведенной на графике исключительно с демонстрационной целью. Оранжевой кривой описаны данные, полученные в рамках прогноза нейронной сети. Зеленая кривая отображает результаты прогноза координат Z с помощью логистической функции.

Визуальный анализ графиков на рисунке 3.15 позволяет констатировать факт успешного обучения и тестирования нейронной сети на основании данных периодических натуральных наблюдений, что в свою очередь свидетельствует о возможности применения разработанного программного средства для уточнения результатов прогноза деформаций земной поверхности [16].

Выводы к главе 3

В рамках практической реализации математических моделей посредством разработки программного обеспечения были получены следующие результаты:

- разработаны программные комплексы моделирования условий наблюдений с помощью электронного тахеометра и лазерной сканирующей системы;
- описан порядок работы пользователя в режимах моделирования и расчета погрешностей по данным наблюдательных станций в вышеуказанных программах;
- приведено описание инструментария для корректировки прогноза на основании разработанного алгоритма калибровочных функций;
- разработан программный комплекс корректировки прогноза деформаций на основании нейронной сети;
- рассмотрена подробная схема работы программы корректировки прогноза на основании нейронной сети.

4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗРАБОТАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

4.1 Анализ результатов моделирования расчетов точности при наблюдениях электронными тахеометрами

Оценка накопления погрешностей измерений электронным тахеометром на наблюдательной станции требует наличия большого количества серий таких измерений. Учитывая, что длительность процесса сдвижения зависит от горно-геологических и горнотехнических условий ведения горных работ, и варьируется от нескольких месяцев до нескольких лет, получение необходимого количества измерений для объективной оценки возможно лишь спустя продолжительное время. Кроме того, время возрастает и с увеличением количества наблюдательных станций.

Внедрение в геодезическую практику разработанных методик наблюдений требует ускорения и автоматизации процесса оценки точности измерений. Эффективным решением этой проблемы представляется проведение статистического эксперимента. В ходе эксперимента осуществляется многократное моделирование условий наблюдений и расчет погрешностей измерений, что позволяет дать объективную оценку характеру их проявления в различных условиях. К таким условиям относятся геометрия станции, погрешности наблюдений и технические характеристики используемого оборудования. На основании представленных в подразделе 2.2 математических моделей накопления погрешностей было разработано специализированное программное обеспечение (подраздел 3.1), позволяющее автоматизировать расчеты [19].

Для выявления наилучших условий были смоделированы 5000 вариантов наблюдательных станций. Схема наблюдений предполагает расположение электронного тахеометра напротив середины профильной линии (рисунок 2.1). Кратчайшее расстояние от точки стояния инструмента до профильной линии в процессе моделирования изменяется от 5 до 100 м (с шагом 5 м). Интервал между реперами принимается равным 5, 10, 15, 20 и 25 м. С целью учета изменений геомет-

рии станции расчеты выполняются для четного и нечетного количества реперов (50 и 51), а также с различными вертикальными углами наклона при измерениях: 0° , 5° , 10° , 15° , 20° . Кроме того, принимаются во внимание технические характеристики используемого оборудования: предполагаемую точность измерения углов – 1", 2", 3", 5", 7", и точность измерения расстояний – 2 мм + 2 мм/км.

На основании анализа результатов вычислений были сделаны некоторые выводы:

- СКП длин интервалов и превышений между реперами возрастают с увеличением расстояния от инструмента до профильной линии;
- увеличение интервала между реперами имеет некоторое влияние на величины СКП расстояний и превышений;
- использование электронных тахеометров с угловой точностью 1", 2", 3" позволяет значительно уменьшить погрешности определения расстояний и превышений на расстояниях >40 м;
- угол наклона при измерениях в пределах 20° оказывает несущественное влияние на СКП расстояний и превышений [19].

На рисунке 4.1 отражена зависимость погрешности определения длины интервала от расстояния до точки стояния тахеометра. Кривыми описаны изменения погрешностей для профильных линий с разным интервалом между реперами; прямой красной линией обозначена допустимая точность наблюдений (в соответствии с «Инструкцией...» [35]).

На рисунках 4.2 и 4.3 представлены распределения погрешностей вдоль центральной части наблюдательной станции (фрагмент из 11 реперов, интервал между реперами 20 м, наблюдения с расстояния 20 м, угловая точность электронного тахеометра – 5"). На данных графиках электронный тахеометр располагается напротив середины линии и условно обозначен треугольником. Очевидно, что диапазон наблюдений не охватывает все реперы профильной линии в рамках допустимой точности определения расстояний; вместе с тем СКП превышений получены в соответствии с допусками.

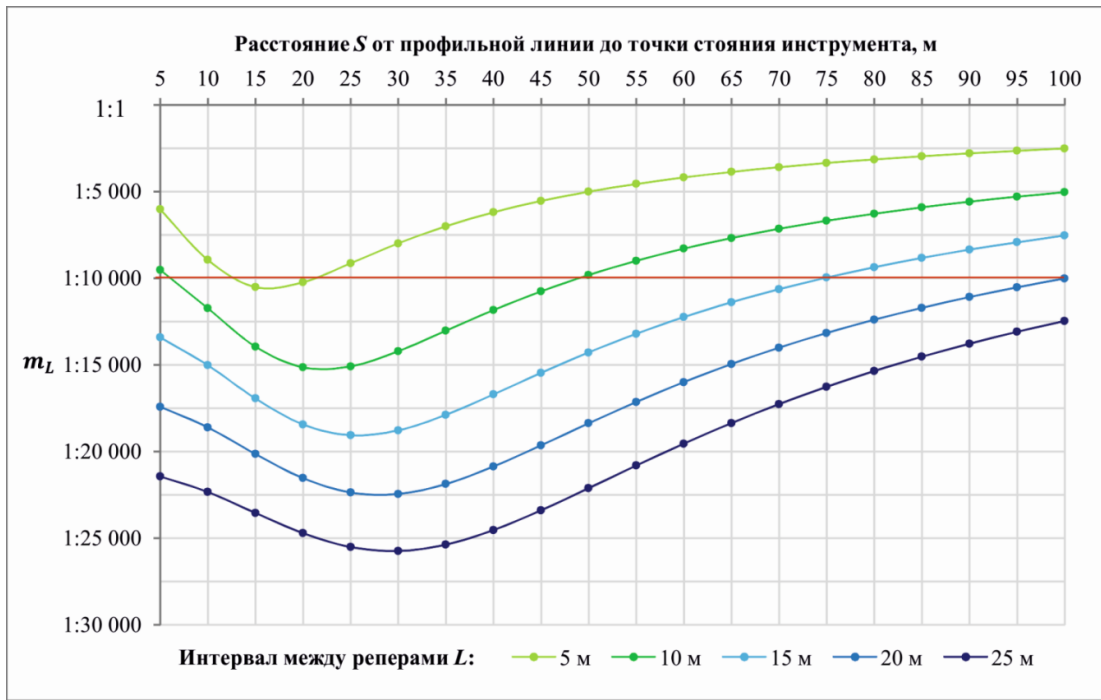


Рисунок 4.1 – График зависимости погрешностей длин интервалов от расстояния до точки стояния инструмента

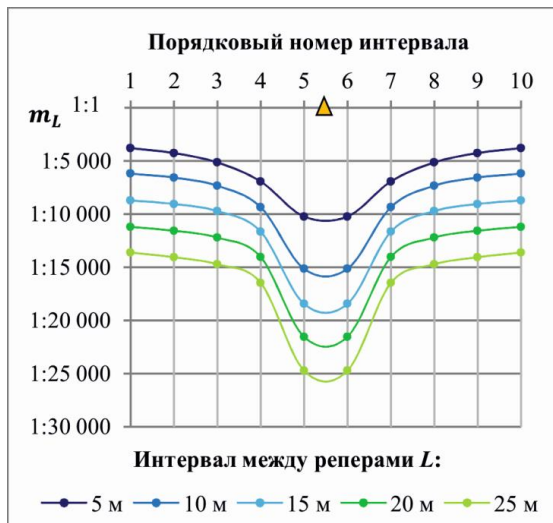


Рисунок 4.2 – Распределение относительных погрешностей длин вдоль станции в зависимости от интервала между реперами

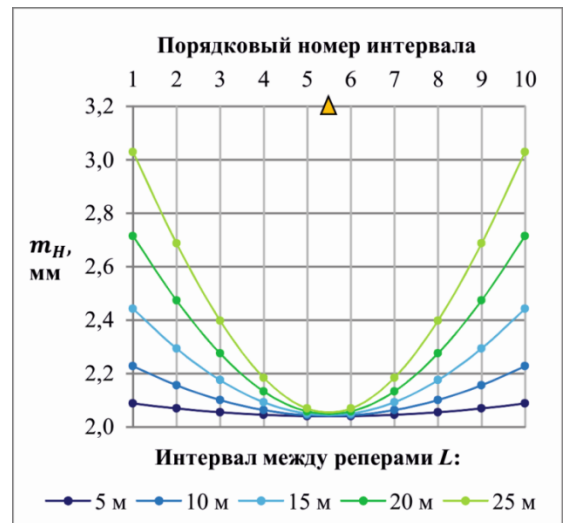


Рисунок 4.3 – Распределение погрешностей превышений вдоль станции в зависимости от интервала между реперами

На рисунке 4.4 представлена зависимость погрешностей длин интервалов от точности измерения углов различными электронными тахеометрами. Применение

электронных тахеометров с угловой точностью 5" или 7" может стать причиной возникновения погрешностей, не соответствующих установленным допускам.

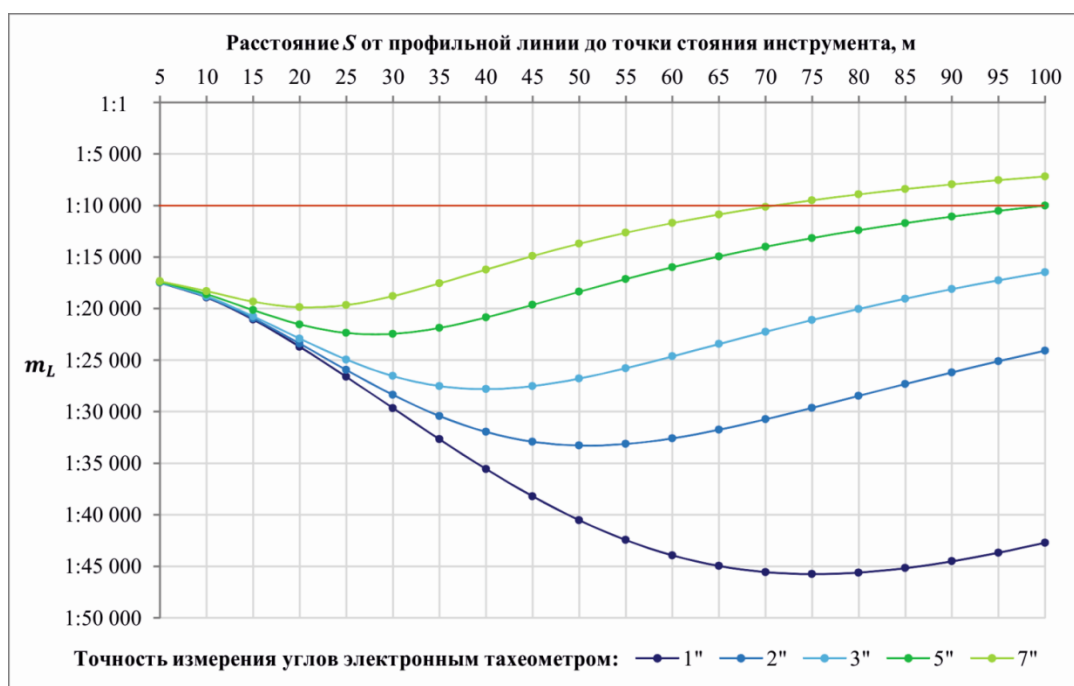


Рисунок 4.4 – Зависимость относительных погрешностей длин интервалов от угловой точности электронного тахеометра

По данным вычислений был проведен статистический анализ в виде расчета множественной регрессии для погрешностей и факторов, оказывающих влияние на их рост. Оценка влияния каждого фактора была произведена на основании выборки из 200 значений СКП длин и превышений. Коэффициенты расчета множественной регрессии сведены в таблице 4.1. Они позволяют сделать вывод о значительном влиянии на погрешности расстояния, с которого осуществляются наблюдения, а также угловой точности электронного тахеометра. Угол наклона, напротив, практически не имеет воздействия на точность наблюдений.

По результатам расчетов и с учетом вышеприведенных данных статистического анализа были определены условия применения электронного тахеометра, при которых погрешности расстояний и превышений между реперами удовлетворяют требованиям нормативных документов. Рекомендуемые условия проведения наблюдений приведены в таблицах 4.2-4.6.

Таблица 4.1 – Коэффициенты множественной регрессии

Факторы	Коэфф. m_L	Коэфф. m_H
Расстояние до профильной линии	0,893	0,564
Интервал между реперами	0,178	0,805
Угловая точность тахеометра	0,752	0,946
Угол наклона при измерениях	-0,010	0,030

Таблицы включают рекомендации для пяти электронных тахеометров с различной предполагаемой угловой точностью (1", 2", 3", 5", 7"). Каждым из них может быть снята профильная линия с интервалом L между реперами (5-25 м) с расстояния S до профильной линии (5-100 м). Для всех вариантов указано максимальное количество реперов N (из общего количества реперов 51), снимаемых с допустимой точностью, согласно «Инструкции...» [35]. В последних столбцах таблиц соответственно расстояниям S указаны минимально возможные относительные погрешности определения длин интервалов $\frac{m_L}{L}$ (наилучшие – с точки зрения точности) и средние квадратические ошибки определения превышений. В некоторых случаях проведение наблюдений не рекомендуется [19].

Таблица 4.2 – Рекомендуемые условия (точность угловых измерений – 1")

Интервал между реперами L	Расстояние S	Кол-во реперов N	Относительная погрешность определения длины $\frac{m_L}{L}$	СКО определения превышения m_H
5	5-10	Не рекомендуется		
	15-25	3	1:19807 ... 1:13310	2,0
	30-40	5	1:22997 ... 1:21850	2,0
	45-75	7	1:22474 ... 1:16225	2,0
	80-95	9	1:15333 ... 1:13093	2,0
	100	7	1:12472	2,0
10	5	Не рекомендуется		
	10-15	3	1:15273 ... 1:12063	2,0
	20-30	5	1:25318 ... 1:18732	2,0
	35-50	7	1:32305 ... 1:28029	2,0
	55-65	9	1:32449 ... 1:31431	2,0
	70-90	11	1:30521 ... 1:26148	2,0
	95-100	13	1:25082 ... 1:24064	2,0
15	5	3	1:13478	2,0
	10-15	5	1:17944 ... 1:15323	2,0
	20-30	7	1:27434 ... 1:20993	2,0

Продолжение таблицы 4.2

Интервал между реперами L	Расстояние S	Кол-во реперов N	Относительная погрешность определения длины $\frac{m_L}{L}$	СКО определения превышения m_H
15	35-40	9	1:33227 ... 1:30482	2,0
	45-55	11	1:38661 ... 1:35552	2,0
	60-70	13	1:39678 ... 1:39413	2,0
	75-90	15	1:39048 ... 1:36398	2,0
	95-100	17	1:35317 ... 1:34209	2,0
20	5-25	23	1:26632 ... 1:17490	2,0
	30-65	25	1:44976 ... 1:29667	2,0
	70-100	27	1:45770 ... 1:42740	2,0
25	5-100	43	1:51136 ... 1:21527	2,0

Таблица 4.3 – Рекомендуемые условия (точность угловых измерений – 2")

Интервал между реперами L	Расстояние S	Кол-во реперов N	Относительная погрешность определения длины $\frac{m_L}{L}$	СКО определения превышения m_H
5	5-10	Не рекомендуется		
	15-25	3	1:16386 ... 1:12838	2,0
	30-55	5	1:16250 ... 1:11131	2,0
	60	3	1:10293	2,1
	65-100	Не рекомендуется		
10	5	Не рекомендуется		
	10-20	3	1:18143 ... 1:12022	2,0
	25-35	5	1:23258 ... 1:20711	2,0
	40-60	7	1:23230 ... 1:19382	2,0...2,1
	65-100	9	1:18262 ... 1:12473	2,1...2,2
15	5	3	1:13471	2,0
	10-15	5	1:17810 ... 1:15286	2,0
	20-30	7	1:25677 ... 1:20616	2,0
	35-45	9	1:28698 ... 1:27398	2,0
	50-65	11	1:28419 ... 1:25667	2,0...2,1
	70-100	13	1:24516 ... 1:18431	2,1...2,2
20	5-100	23	1:33290 ... 1:17482	2,0...2,2
25	5-55	43	1:37421 ... 1:21518	2,0...2,1
	60-85	41	1:37295 ... 1:32865	2,1
	90-100	39	1:31702 ... 1:29417	2,1...2,2

Таблица 4.4 – Рекомендуемые условия (точность угловых измерений – 3")

Интервал между реперами L	Расстояние S	Кол-во реперов N	Относительная погрешность определения длины $\frac{m_L}{L}$	СКО определения превышения m_H
5	5-10	Не рекомендуется		
	15-40	3	1:13454 ... 1:10043	2,0...2,1
	45-100	Не рекомендуется		

Продолжение таблицы 4.4

Интервал между реперами L	Расстояние S	Кол-во реперов N	Относительная погрешность определения длины $\frac{m_L}{L}$	СКО определения превышения m_H
10	5	Не рекомендуется		
	10-20	3	1:17274 ... 1:11954	2,0
	25-40	5	1:19287 ... 1:17941	2,0...2,1
	45-65	7	1:16802 ... 1:12590	2,1
	70-75	5	1:11772 ... 1:11042	2,2
	80	3	1:10389	2,2
	85-100	Не рекомендуется		
15	5	3	1:13461	2,0
	10-20	5	1:20032 ... 1:15224	2,0
	25-30	7	1:23375 ... 1:22069	2,0
	35-60	9	1:23845 ... 1:19428	2,0...2,1
	65-75	11	1:18291 ... 1:16244	2,1...2,2
	80-100	9	1:15345 ... 1:12475	2,2...2,3
20	5-35	23	1:27525 ... 1:17469	2,0
	40-60	21	1:27824 ... 1:24648	2,1
	65-80	19	1:23451 ... 1:20056	2,2
	85-100	17	1:19055 ... 1:16481	2,2...2,3
25	5-100	31	1:31416 ... 1:20374	2,0...2,3

Таблица 4.5 – Рекомендуемые условия (точность угловых измерений – 5")

Интервал между реперами L	Расстояние S	Кол-во реперов N	Относительная погрешность определения длины $\frac{m_L}{L}$	СКО определения превышения m_H
5	5-10	Не рекомендуется		
	15-20	3	1:10524 ... 1:10241	2,0
	25-100	Не рекомендуется		
10	5	Не рекомендуется		
	10-20	3	1:15155 ... 1:11746	2,0
	25-35	5	1:15096 ... 1:13041	2,1
	40-45	3	1:11853 ... 1:10771	2,2
	50-100	Не рекомендуется		
15	5-10	3	1:15031 ... 1:13427	2,0
	15-20	5	1:18450 ... 1:16947	2,0
	25-55	7	1:19071 ... 1:13216	2,1...2,3
	60-70	5	1:12253 ... 1:10624	2,3...2,4
	75-100	Не рекомендуется		
20	5-15	23	1:20155 ... 1:17428	2,0
	20-25	21	1:22374 ... 1:21546	2,1
	30	19	1:22460	2,1
	35-40	17	1:21886 ... 1:20876	2,1...2,2
	45-50	15	1:19655 ... 1:18383	2,2
	55	13	1:17153	2,3
	60-70	11	1:16008 ... 1:14019	2,3...2,4

Продолжение таблицы 4.5

Интервал между реперами L	Расстояние S	Кол-во реперов N	Относительная погрешность определения длины $\frac{m_L}{L}$	СКО определения превышения m_H
20	75-80	9	1:13169 ... 1:12406	2,5...2,6
	85-90	7	1:11718 ... 1:11098	2,6...2,7
	95	5	1:10536	2,8
	100	3	1:10025	2,8
25	5-80	19	1:25751 ... 1:15368	2,0...2,6
	85	17	1:14540	2,6
	90	15	1:13789	2,7
	95	13	1:13104	2,8
	100	11	1:12480	2,8

Таблица 4.6 – Рекомендуемые условия (точность угловых измерений – 7")

Интервал между реперами L	Расстояние S	Кол-во реперов N	Относительная погрешность определения длины $\frac{m_L}{L}$	СКО определения превышения m_H
5	5-100	Не рекомендуется		
10	5	Не рекомендуется		
	10-30	3	1:13065 ... 1:10957	2,0...2,2
	35-100	Не рекомендуется		
15	5-10	3	1:14755 ... 1:13377	2,0
	15-45	5	1:16652 ... 1:11501	2,1...2,4
	50	3	1:10498	2,5
	55-100	Не рекомендуется		
20	5-25	17	1:19881 ... 1:17366	2,0...2,2
	30	15	1:18803	2,2
	35	13	1:17570	2,3
	40	11	1:16225	2,3
	45-50	9	1:14920 ... 1:13724	2,4...2,5
	55	7	1:12656	2,5
	60-65	5	1:11714 ... 1:10886	2,6...2,7
	70	3	1:10156	2,8
75-100	Не рекомендуется			
25	5-25	15	1:23083 ... 1:21379	2,1...2,2
	30-65	13	1:22089 ... 1:13478	2,2...2,7
	70	11	1:12601	2,8
	75	9	1:11819	2,9
	80	7	1:11121	3,0
	85	5	1:10496	3,1
	90-100	Не рекомендуется		

Из вышеописанного следует, что в результате проведенных исследований был определен диапазон наблюдений электронным тахеометром на наблюдатель-

ных станциях, при котором погрешности определения длин интервалов и превышений между реперами наблюдательных станций удовлетворяют требованиям нормативных документов [19].

В рамках практических исследований и внедрения разработанных рекомендаций автор принял участие в проведении двух серий наблюдений за сдвижением земной поверхности над трубопроводными коммуникациями на специальной наблюдательной станции «шахта «Дуванная» – пер. Стаханова – ул. Карпинского – ул. Гастелло» (г. Суходольск, 17-й северная лава пласта k_5^H шахты им. Н.П. Баракова). При выполнении геодезических наблюдений был использован электронный тахеометр Sokkia Set 530 RK3. Наблюдения производились с расстояния 21,04 м (первая серия) и 20,64 м (вторая серия). По итогам наблюдений и обработки полученных данных было установлено наличие высокой степени соответствия между предполагаемой (согласно разработанным рекомендациям) и фактической точностью результатов измерений: средний интервал между реперами профильной линии составил 20,09 м (первая серия) и 20,08 м (вторая серия); максимальная относительная погрешность определения длин – 1:18230 (первая серия) и 1:17903 (вторая серия); максимальные погрешности определения превышений между реперами во время обеих серий не превысили 3 мм.

Проведение инструментальных наблюдений в соответствии с разработанными рекомендациями позволяет минимизировать временные затраты и объемы работ в процессе мониторинга, и перейти к использованию электронного оборудования без ущерба точности [19].

4.2 Анализ результатов моделирования расчетов точности при наблюдениях с помощью ЛСС

На основании описанного в подразделе 2.3 математического аппарата формул был произведен расчет накопления погрешностей на наблюдательных станциях при всевозможных условиях наблюдений. Для автоматизации расчетов был разработан специальный программный комплекс (подраздел 3.2), с помощью ко-

того были смоделированы измерения на 42000 профильных линий. Этого достаточно, чтобы проследить влияние отдельных факторов на точность результатов. Такими факторами являются:

- метод проведения наблюдений на станции (инструментальный, аналитический);
- тип ЛСС в зависимости от принципа работы дальномерного блока (фазовый, импульсный);
- точностные характеристики ЛСС (СКП измерения расстояний и углов);
- расстояние между сканером и снимаемыми объектами;
- схема расположения реперов, количество и интервал между ними;
- количество используемых опорных точек [18].

Расстояние между сканерами и снимаемыми объектами задавалось в зависимости от типа ЛСС: для фазовых сканеров – от 0,5 до 50 м, для импульсных – от 1 до 100 м.

Схема расположения реперов была представлена в двух основных вариантах: равномерное расположение (реперы размещены по окружности с центром в точке стояния инструмента, подобно сканерным маркам) и классическое (реперы размещены в один ряд в стороне от инструмента). Количество реперов изменялось от 4 до 12, как и количество опорных точек при аналитическом методе вычислений. При классическом размещении реперов были сформированы профильные линии с интервалом от 5 до 25 м.

По результатам анализа вычислений было сформулировано несколько основных выводов.

1. Основополагающим отличием методов проведения измерений на станции является зависимость от абсолютно разных факторов. Например, погрешности координат точки стояния и ошибки, возникающие при установке сканера в рабочее положение (центрирование, измерение высоты прибора), учитываются лишь в инструментальном методе и при этом оказывают ощутимое влияние на точность, в то время как в аналитическом методе результат в главной степени зависит от

точности определения координат опорных точек. При погрешностях определения этих координат до 10 мм оба метода дают близкие результаты, однако при более грубом их определении аналитический метод несколько уступает инструментальному [18].

2. Второй вывод касается типа применяемых ЛСС. Импульсные ЛСС имеют более высокую угловую точность и превосходят фазовые (например, согласно паспортным характеристикам – 8" против 25"), но имеют меньшую линейную точность (1 мм против 0,6 мм). К примеру, Leica ScanStation P20 (импульсный) и Z+F Imager 5010X (фазовый) при соответствии фактических погрешностей приборов паспортным характеристикам в одинаковых условиях на расстоянии 5 м дадут примерно одинаковые погрешности координат (1,7 мм), а на расстоянии 30 м – 2,2 мм и 5,4 мм соответственно [18].

3. Увеличение количества опорных точек оказывает заметное положительное влияние на точность определения координат точек. Например, для станции с 5 марками в радиусе 10 м от точки стояния сканера погрешности координат опорных точек составят до 6,4 мм, а для станции с 12 марками – до 3,1 мм [18].

4. Как правило, профильные линии на наблюдательных станциях закладывают с интервалом 20-25 м, в некоторых случаях для дополнительного контроля интервал уменьшают до 5 м. По итогам многократного моделирования (для профильных линий с классическим расположением реперов) был составлен график зависимости погрешностей длин интервалов от расстояний до профильной линии (рисунок 4.5). Расчеты производились для сканера с угловой точностью 8" и линейной точностью 1 мм (наиболее высокий уровень точности); при этом результаты удовлетворительной точности могут быть получены лишь при измерениях с расстояния менее 16 м на профильных линиях с интервалом 25 м между реперами [18].

Оценив точность лазерно-сканирующей съемки можно заключить, что, несмотря на удобство и быстроту производства измерений, ЛСС уступает по точности как традиционной технологии, так и электронным тахеометрам. Однако при этом лазерная съемка может быть успешно интегрирована в процесс обследова-

ния и контроля объектов для создания трехмерных моделей зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния подработки [90].

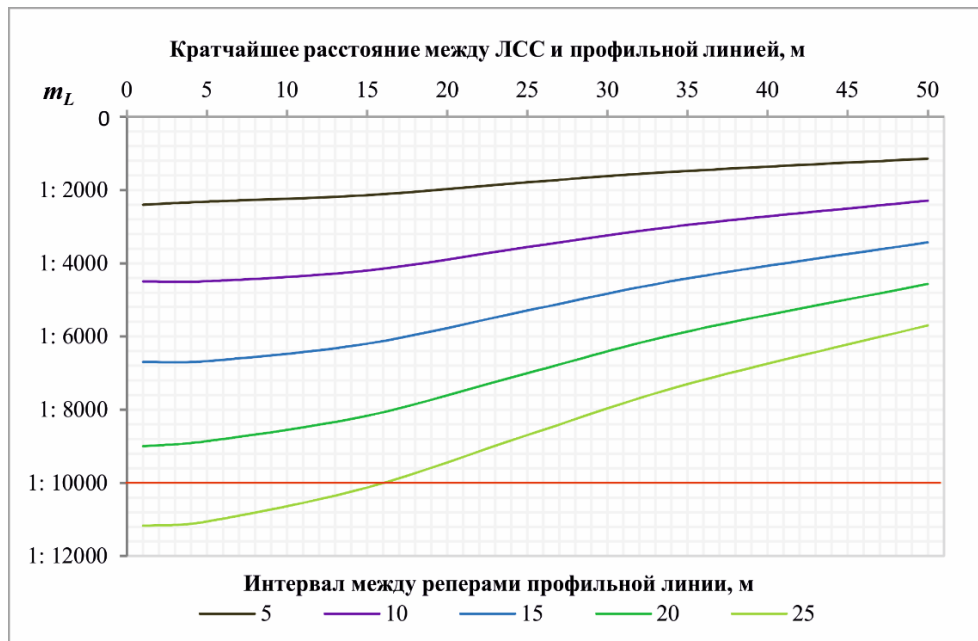


Рисунок 4.5 – График зависимости относительных погрешностей длин интервалов от расстояния до профильной линии

Можно заключить, что в результате проведенных исследований составлен математический аппарат формул, позволяющий произвести оценку точности лазерного сканирования. Разработанное программное обеспечение позволяет выполнить многократное моделирование условий наблюдений и выбрать наиболее выгодные с точки зрения точности параметры наблюдений. Несмотря на то, что при решении данной конкретной задачи лазерное сканирование несколько уступает по точности технологии измерений с помощью электронного тахеометра и классическим геодезическим наблюдениям, ЛСС могут быть успешно применены для контроля деформаций подрабатываемых объектов [18].

4.3 Анализ результатов расчетов точности при наблюдениях с помощью спутниковых приемников

Что касается спутниковых технологий, существует два возможных варианта их применения для мониторинга сдвижения: при создании планово-высотного

обоснования территории мульды сдвижения (последующие наблюдения на профильных линиях будут выполняться электронным тахеометром) или при непосредственных определениях координат этих реперов.

Важно учесть, что даже при проведении наблюдений в статическом режиме наблюдений точности полученных результатов может быть недостаточно для данного вида работ. Применяв функцию измеренных величин для вычисления точности определяемой длины для двух точек, расположенных на разных расстояниях друг от друга и не имеющих разницы в высоте, получим погрешности, представленные на рисунке 4.6 [17].

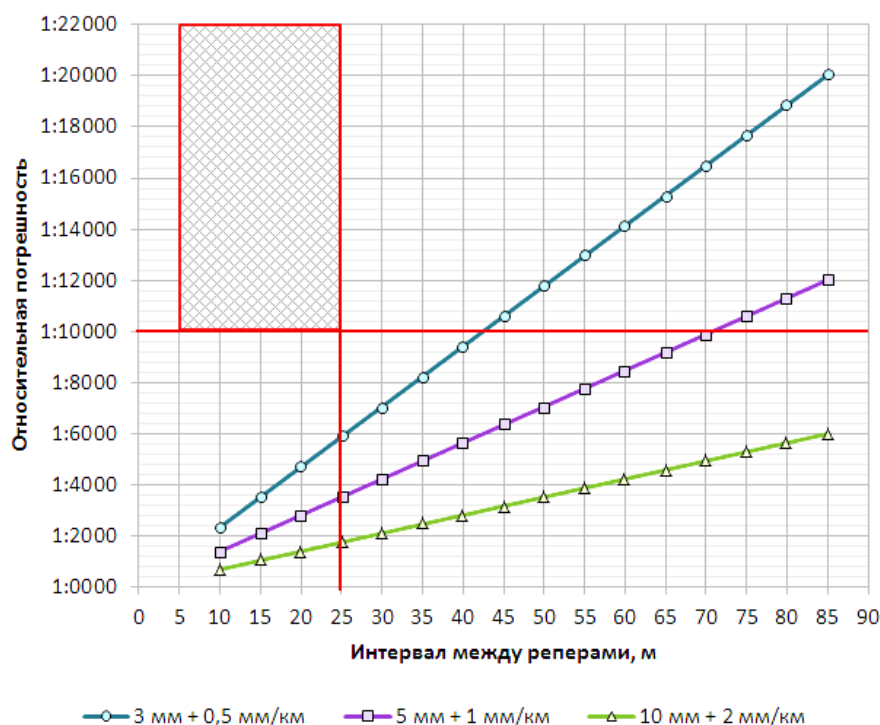


Рисунок 4.6 – Относительные погрешности определения длин

Линиями на графике показана растущая точность определения расстояний между реперами для различных приемников в зависимости от увеличения интервала между точками. Красной горизонтальной линией обозначена минимальная требуемая точность определения расстояния между реперами – 1:10000; точкам, расположенным ниже, соответствуют величины погрешностей, превышающие допустимые значения. Обычно для наблюдений в рамках проектов подработки объектов (например, трубопроводов) профильные линии закладывают с интерва-

лом 20-25 м; возможно уменьшение интервала при наблюдениях за объектами особой значимости. Красной вертикальной линией ограничен максимальный интервал между реперами, соответственно, результаты с требуемой точностью должны находиться на графике в рамках заштрихованного прямоугольника. На основании вышесказанного можно сделать вывод о нецелесообразности применения спутниковых технологий для наблюдений на профильных линиях [17].

Решением может стать применение высокоточных электронных тахеометров (угловая точность 1-3", линейная точность 2 мм + 2 мм/км) для наблюдений на наблюдательных станциях, либо проведение наблюдений по традиционной методике, описанной в «Инструкции...» [35].

Таким образом, применение спутниковых технологий при наблюдениях за сдвигами и деформациями земной поверхности возможно лишь при построении опорной сети для проведения последующих измерений электронным тахеометром. Непосредственное определение координат реперов методом GNSS-наблюдений при интервале 5-25 м между реперами не позволяет достичь точности, регламентируемой действующими нормативными документами. Для наблюдений реперов профильных линий рекомендуется применение высокоточных электронных тахеометров, либо традиционного оптико-механического оборудования [17].

4.4 Анализ результатов корректировки прогноза деформаций с помощью калибровочной функции

Алгоритм калибровки прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности с учетом результатов измерений на наблюдательных станциях, изложенный в подразделе 2.4, был протестирован на нескольких проектах подработки. В качестве исходных данных были использованы материалы следующих проектов:

- проект подработки магистрального газопровода-отвода 166-й лавой пласта с₆ шахты «Степная» ПСП «Шахтоуправление Першотравенское» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» (16 серий измерений для 37-ми реперов);

- проект подработки магистрального газопровода-отвода 171-й лавой пласта c_6 шахты «Степная» ПСП «Шахтоуправление Першотравенское» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» (12 серий измерений для 37 реперов);
- проект подработки газопроводов-отводов высокого давления 164-й бис лавой пласта c_6 шахты «Степная» ПСП «Шахтоуправление Першотравенское» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» (6 серий измерений для 41-го репера);
- проект подработки г. Суходольска и трубопроводов различного назначения в зоне влияния 17-й северной лавы пласта k_5^H СП «Шахта им. Н. П. Баракова» ОАО «Краснодонуголь» (3 серии измерений для 47-ми реперов).

В каждом из проектов приведены характеристики лавы и процесса сдвижения (скорость движения лавы V , средняя глубина отработки H_{cp} , продолжительность процесса сдвижения земной поверхности T и т.д.).

В качестве примера приведены материалы проекта трального газопровода-отвода 171-й лавой пласта c_6 шахты «Степная» ПСП «Шахтоуправление Першотравенское» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» (рисунок 4.7).

На рисунке 4.8 представлена шкала, описывающая частоту инструментальных наблюдений (серии от 0 до 11).

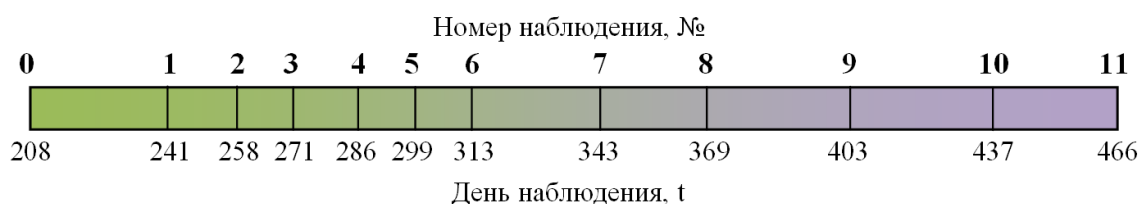


Рисунок 4.8 – Шкала процесса сдвижения

Согласно проекту подработки, за начало процесса сдвижения от 171-й лавы пласта c_6 принимается момент, когда ее очистной забой отойдет от разрезной выработки на расстояние, равное 1290 м. Учитывая скорость подвигания лавы 180 м/мес, это произойдет на 215 день после начала подработки (дата начала подработки – 20.05.2016 г.). Первое наблюдение было проведено до начала процесса

сдвижения (14.12.2016 г., 208 день), второе и все последующие – после начала процесса сдвижения (с 16.01.2017 г., 241 день).

После получения данных расчетов посредством логистической функции были определены величины оседаний на момент проведения наблюдений t_i ; в формулу были заложены даты начала и конца процесса сдвижения. Между полученными расчетными и измеренными значениями оседаний были вычислены величины разностей. Построение в MS Excel линии тренда позволило установить вид уравнения калибровочной функции (полином 4-й степени) и вычислить поправки в оседания реперов.

Калибровочная функция была определена 11 раз для данного проекта подработки. На рисунке 4.9 в качестве примера приведены результаты расчета на 286 день (серия №4). Очевидно, что прогноз сети гораздо ближе к реальной ситуации, чем прогноз по действующей методике. Аналогичная картина наблюдается и для всех остальных ЦМР. Поправки после первого определения калибровочной функции в среднем составили не более 21 мм, на момент второго переопределения их величины сократились в 2,6 раза, на момент пятого – не превысили 1,8 мм.

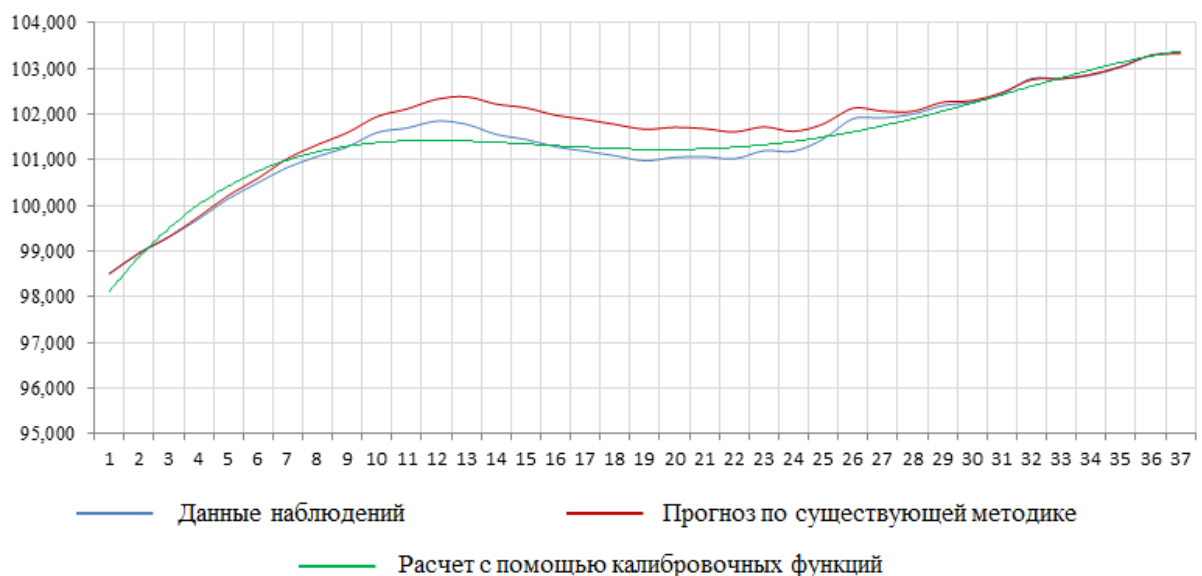


Рисунок 4.9 – Результаты работы алгоритма калибровочных функций

Алгоритм был протестирован на материалах всех вышеперечисленных проектах подработки. Расчет показал положительные результаты; согласно разработанной методике необходимость ввода поправок присутствует только для первых 3-4 серий наблюдений [25]. В результате исследования был разработан эффективный инструмент повышения точности прогноза деформаций земной поверхности, производящего корректировку на основании данных инструментальных измерений на наблюдательной станции. Тестирование методики позволило сделать вывод о целесообразности ее применения и возможности значительного повышения точности прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности.

4.5 Анализ результатов работы нейронной сети при корректировке прогноза деформаций

Алгоритм корректировки прогноза сдвижений и деформаций с помощью нейронной сети, представленный в подразделе 2.5, был протестирован на указанных в 4.4 проектах подработки: лавы 171-я, 166-я, 166-я бис и 17-я северная.

В качестве примера приведены материалы проекта подработки магистрального газопровода-отвода 171-й лавой пласта c_6 шахты «Степная» ПСП «Шахтоуправление Першотравенское» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь».

Для прогнозирования динамики деформаций необходимо иметь ЦМР на начало и конец сдвижения. Те же данные необходимы и при работе с нейронной сетью; для получения корректных результатов обучение сети должно производиться равномерно с учетом данных на начало и конец сдвижения.

Алгоритм корректировки прогноза может быть описан следующим образом (на приведенном примере, рисунок 4.8):

1. Составление ЦМР на начало процесса сдвижения по данным наблюдений (ЦМР-0: серия №0, день сдвижения $t=208$) и конец процесса сдвижения по данным прогноза (ЦМР-11: серия №11, конечный день сдвижения $t=466$). Обе ЦМР (ЦМР-0, ЦМР-11) включаются в обучающий файл для нейронной сети.

2. Использование логистической функции для прогноза деформаций в период между нулевой и первой сериями наблюдений (т.е. $208 < t < 241$).
3. Проведение серии наблюдений №1 (день 241). Включение результатов наблюдений в обучающий файл (ЦМР-0, ЦМР-1, ЦМР-11). Выполнение расчета нейронной сети и последующая корректировка прогноза деформаций. Использование параметров нового прогноза для периода $241 < t < 466$.
4. Использование шага 3 для всех последующих серий наблюдений (№2-10).
5. При уточнении прогноза более чем вдвое в сравнении с существующей методикой следует исключить ЦМР на конец сдвижения (ЦМР-11) из обучающего файла и рассчитать прогнозные значения деформаций на конец сдвижения с применением нейронной сети [16].

Обучение нейронной сети выполнялось до тех пор, пока точность прогноза деформаций земной поверхности с помощью нейронной сети не превысила точность прогноза по существующей методике. Сопоставление результатов прогноза приведено на рисунках 4.9 и 4.10. На рисунке 4.9 отображен процесс обучения на базе нескольких ЦМР (ЦМР-0, ЦМР-1, ЦМР-2, ЦМР-3, ЦМР-11), чем объясняется большое количество реперов. На графике 4.10 в качестве примера представлен прогноз сети для ЦМР-4 (№4, $t=286$) [16].

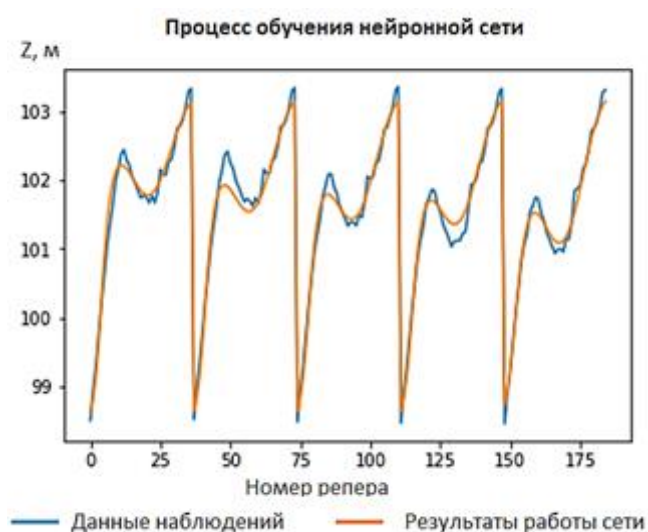


Рисунок 4.9 – График обучения нейронной сети

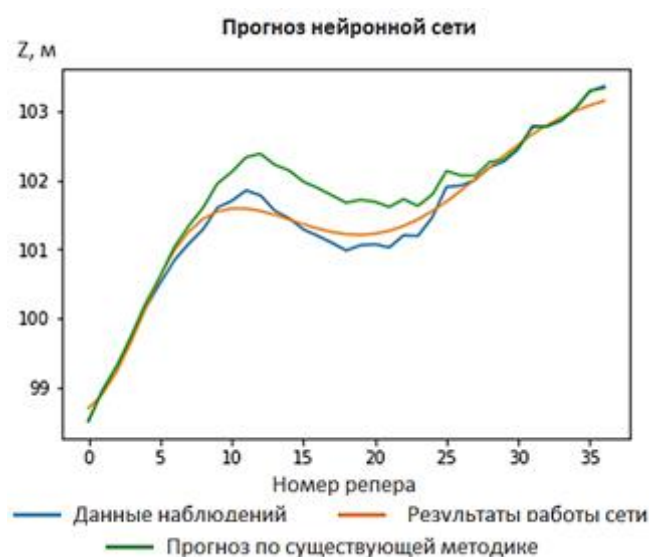


Рисунок 4.10 – График результатов работы нейронной сети

Тестирование описанного алгоритма на основе производственных данных дало возможность установить, что четырех (иногда трех – как в данном примере) циклов обучения нейронной сети (т.е. корректировок) вполне достаточно для получения нового, уточненного прогноза [16].

Результаты исследований позволяют говорить о создании инструмента корректировки точности расчета деформаций земной поверхности. По итогам тестирования разработанного инструмента можно заключить, что использование технологии нейронных сетей способно при удовлетворении определенных условий значительно повысить точность прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности при подземной разработке угольных месторождений.

4.6 Внедрение результатов исследования в геодезическую практику мониторинга территорий

Разработанная в ходе диссертационного исследования методика геодезического мониторинга на наблюдательных станциях с применением высокоточного электронного оборудования была внедрена на ПП «Шахтоуправление «им. Н.П. Баракова» СП «Краснодонуголь». В рамках внедрения проведены предварительный расчет точности измерений, а также серии наблюдений за сдвижением земной поверхности над трубопроводными коммуникациями на специальной наблюдательной станции «шахта «Дуванная» – пер. Стаханова – ул. Карпинского – ул. Гастелло», расположенной на подрабатываемом участке г. Суходольска 17-й северной лавой пласта k_5^H шахты им. Н.П. Баракова. Акт внедрения представлен в приложении Г.

Разработанная автором данной диссертационной работы методика корректировки прогнозируемых деформаций земной поверхности с помощью использования нейронной сети и калибровочных функций была внедрена в Республиканском академическом научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ) МОН ДНР. Методика использована при выполнении проекта подра-

ботки жилых и общественных зданий г. Кировское 6-й западной лавой пласта l_3 ГП «Шахта Комсомолец Донбасса» и проекта подработки железнодорожных путей ст. «Кальмиус», участков перегонов ст. «Кальмиус – Донецк 2» и ст. «Кальмиус – Ясиноватая», электрическиз коммуникаций связи, стрелочных централизаций на ст. «Кальмиус» 5-й восточной лавой пласта l_1 в шахты «Щегловская-Глубокая» ПАО «Шахтоуправления «Донбасс». Акт внедрения приведен в приложении Д.

Методика формирования динамических цифровых моделей рельефа (ДЦМР) для территорий земной поверхности, подрабатываемых подземными горными работами, разработанная автором данной диссертации, была внедрена в РАНИМИ МОН ДНР. Методика использована в отделе сдвижения земной поверхности и защиты подрабатываемых объектов института РАНИМИ при выполнении госбюджетной темы №2П/17 «Разработка методики формирования и визуализации цифровых моделей рельефа для территорий Донбасса в зонах влияния горных работ». Акт внедрения приведен в приложении Е.

Выводы к главе 4

В рамках аналитической работы над результатами практической реализации разработанных методик геодезического мониторинга земной поверхности были получены следующие научные и практические результаты:

- разработаны схемы проведения статистического эксперимента для оценки точности измерений, выполненных с помощью ЭТ и ЛСС;
- определен ряд факторов, оказывающих влияние на точность инструментальных наблюдений с помощью ЭТ и ЛСС;
- проведено многократное моделирование условий наблюдений с помощью ЭТ и ЛСС на наблюдательных станциях;
- установлены математические зависимости погрешностей определения длин и превышений от ряда факторов (методов наблюдений на станции, типа и

точности применяемого оборудования, расстояния, геометрии наблюдательной станции);

- по результатам анализа вычислений приведены заключения относительно применения ЭТ и ЛСС для геодезического мониторинга сдвижений и деформаций земной поверхности, представлены рекомендации к проведению наблюдений, выполнено тестирование разработанных рекомендаций посредством натурных наблюдений;
- проведен анализ применения спутниковых технологий для наблюдений за деформациями земной поверхности;
- проведен анализ результатов корректировки прогноза деформаций с помощью калибровочной функции и нейронной сети на основании проекта подработки;
- приведены выводы относительно использования методов корректировки прогноза для повышения точности расчета деформаций земной поверхности;
- описано внедрение разработанных методик в практику геодезического мониторинга сдвижений и деформаций земной поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований в диссертационной работе решена важная научно-техническая задача создания системы геодезического мониторинга подрабатываемых территорий с учетом динамики процесса сдвижения, заключающаяся в разработке механизма накопления погрешностей наблюдений с помощью электронного геодезического оборудования и механизма нарастания деформаций земной поверхности в ходе процесса сдвижения, позволяющая существенно повысить точность прогноза и осуществлять оперативный контроль деформаций земной поверхности от влияния подземных очистных работ.

В ходе исследования были получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработаны математические модели накопления погрешностей определения координат, длин интервалов и превышений между реперами профильных линий при наблюдениях с помощью электронных тахеометров, лазерных сканирующих систем и спутниковых приемников; разработаны рекомендации к проведению наблюдений на наблюдательных станциях; проведена апробация разработанных рекомендаций посредством натуральных наблюдений.

2. Разработаны алгоритмы корректировки прогноза деформаций земной поверхности на основании результатов систематических инструментальных наблюдений на профильных линиях наблюдательных станций посредством калибровочных функций и нейронной сети.

3. Представлен механизм формирования динамических цифровых моделей рельефа с использованием установленной функции нарастания этих деформаций.

4. Разработано геодезическое обеспечение мониторинга деформаций земной поверхности, позволяющее производить оперативный контроль состояния земной поверхности во время процесса ее сдвижения.

5. На основании вышеуказанных математических моделей были разработаны программные средства для моделирования условий наблюдений с помощью электронного тахеометра (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017616397) и лазерной сканирующей системы (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017663004), а также программный продукт, предназначенный для прогнозирования координат с учетом результатов инструментального мониторинга (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018613553).

6. Представленные технологии геодезических наблюдений за сдвижением и деформациями земной поверхности и калибровки прогноза, а также разработанное программное обеспечение были внедрены в СП «Краснодонуголь» (г. Краснодон) и научно-исследовательском институте РАНМИ (г. Донецк) (акты внедрения 01/101 и 01/102 от 16.04.2018 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ассане А.А. Геодезические методы анализа высотных и плановых деформаций инженерных сооружений и земной поверхности: дис. ...канд. техн. наук: 25.00.32 / Ассане Антонио Алфредо. – Москва, 2007. – 127 с.
2. Барулин, А.И. Интерпретация результатов пространственных инструментальных наблюдений за деформациями нагруженного отвалом борта карьера / А.И. Барулин, З.Р. Рахимов, А.Ф. Барулин // Геодезия и картография. – 2013. – №7. – С.8-15.
3. Бесимбаева, О.Г. Мониторинг состояния земной поверхности на подрабатываемых территориях / О.Г. Бесимбаева, Е.Н. Хмырова, В.В. Ефимова, Ж. Алданыш, В.Ф. Ярцева // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2015. – С. 187-192.
4. Ворошилов, А.П. Измерения осадок зданий и сооружений электронными тахеометрами / А.П. Ворошилов // Вестник ЮУрГУ. – 2005. – №13. – С. 37-39.
5. Галлини, Н.И. Обзор средств разработки программного обеспечения с помощью Microsoft Visual Studio 2013 / Н.И. Галлини, Т.Н. Филимоненкова // Проблемы современного педагогического образования. – 2014. – №45-1. – С. 316-321.
6. Ганьшин, В.Н. Геодезические методы измерения вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / В.Н. Ганьшин, А.Ф. Стороженко, Н.А. Буденков и др. – М.: Недра, 1991. – 188 с.
7. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах (Методическое руководство). – М.: ЦНИИГАиК, 1985. – 113 с.
8. ГКИНП (ГНТА)-03-010-02 Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – М.: ЦНИИГАиК, 2003. – 134 с.
9. ГКИНП 02-033-82 Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. – М.: «Недра», 1982. – 98 с.

10. Голендухин, М.А. Из опыта геодезических наблюдений за осадками и деформациями зданий и сооружений промышленных предприятий, расположенных на подрабатываемой территории / М.А. Голендухин, А.В. Заморин, И.А. Столбов, А.Ю. Шишунов, Т.П. Голендухина, Г.В. Поспелова // Маркшейдерский вестник. – 2003. – №2. – С. 31-33.

11. Голыгин, Н.Х. Возможности повышения точности геодезических измерений на основе искусственных нейросетей / Н.Х. Голыгин, О.Б. Хиноева, Х.К. Ямбаев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – №4. – С. 17-27.

12. ГОСТ Р 22.1.01-95. Мониторинг и прогнозирование. Основные положения. – М.: Изд. стандартов, 1997. – 5 с.

13. Грищенко, Н.Н. Алгоритм прогноза деформаций склонов мезорельефа при их подработке подземными горными работами / Н.Н. Грищенко, В.Р. Шнеер, Е.В. Блинникова // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – 2010. – №7. – С. 199-210.

14. Грищенко, Н.Н. Обоснование поэтапного применения мер защиты линейных инженерных коммуникаций на подрабатываемых участках / Н.Н. Грищенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. : Гірничо-геологічна. – 2012. – №16. – С. 3-11.

15. Грищенко, Н.Н. Прогноз деформаций земной поверхности на подрабатываемых территориях с учетом мезорельефа / Н.Н. Грищенко, Е.В. Блинникова // Маркшейдерский вестник. – 2013. – №4. – С. 34-38.

16. Грищенко, Е.Н. Использование нейронной сети для уточнения прогнозируемых деформаций земной поверхности / Е.Н. Грищенко, М.Г. Мустафин // Маркшейдерский вестник. – 2018. – №1. – С. 53-57.

17. Грищенко, Е.Н. К вопросу о точности спутниковых методов съемки при проведении наблюдений на маркшейдерских наблюдательных станциях / Е.Н. Грищенко // Приоритетные направления развития науки и образования : материалы XI Междунар. науч.–практ. конф. (Чебоксары, 27 нояб. 2016 г.). – 2016. – № 4 (11). – С. 71-73.

18. Грищенкова, Е.Н. Математическое моделирование погрешностей лазерного сканирования на наблюдательных станциях / Е.Н. Грищенкова, М.Г. Мустафин // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – №6. – С. 35-40.

19. Грищенкова, Е.Н. Математическое моделирование условий съемки наблюдательных станций методом электронной тахеометрии / Е.Н. Грищенкова // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – №5. – С. 49-53.

20. Грищенкова, Е. Н. Мониторинг сдвижения земной поверхности в зонах влияния очистных работ / Е.Н. Грищенкова // Форум проектов программ Союзного государства – V форум вузов инженерно-технологического профиля: сборник материалов форума. – 2016. – С. 14-15.

21. Грищенкова, Е.Н. Оценка точности различных методов съемки при проведении наблюдений на маркшейдерских наблюдательных станциях / Е.Н. Грищенкова // XII Всероссийская научно-практическая конференция «Новые технологии при недропользовании». Секция: Инновационные технологии в маркшейдерском деле, геодезии и кадастре. Сборник научных трудов. – 2016. – С. 14-15.

22. Грищенкова, Е.Н. Пространственная визуализация процесса сдвижения с помощью инструментальных средств 3Ds Max / Е.Н. Грищенкова, М.Г. Мустафин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – №9. – С. 36-41.

23. Грищенкова, Е.Н. Совершенствование технологии маркшейдерско-геодезических наблюдений за сдвигами и деформациями земной поверхности на территориях угольных шахт / Грищенкова Е.Н. // Естественные и технические науки. – 2016. – №5. – С. 66-70.

24. Грищенкова, Е.Н. Современное маркшейдерско-геодезическое обеспечение эксплуатации горных предприятий / М.Г. Мустафин, Е.Н. Грищенкова, Ж.А. Юнес, Г.И. Худяков // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2017. – №4. – С. 190-203.

25. Грищенко, Е.Н. Теоретические основы применения калибровочных функций для корректировки прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности / Е.Н. Грищенко // Естественные и технические науки. – 2018. – №4. – С. 130-132.

26. ГСТУ 101.00159226.001 – 2003. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом. – К., 2004. – 128 с.

27. Гудков, В.М. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений / В.М. Гудков, А.В. Хлебников. – М.: «Недра», 1990. – 335 с.

28. Гурьева, Е.А. Модели и методы обработки геодинимических данных и прогнозирования деформаций грунтовых оснований площадок промышленных объектов: дис. ...канд. техн. наук: 05.13.01 / Гурьева Екатерина Александровна. – М., 2008. – 186 с.

29. Гусев, В.Н. Методические подходы к съемке карьеров лазерно-сканирующими системами / В.Н. Гусев, Е.М. Волохов, В.А. Голованов, М.Ю. Васильев // Маркшейдерский вестник. – 2009. – №4. – С. 19-24.

30. Гусев, В.Н. Основы наземной лазерно-сканирующей съемки: Учеб. пособие / В.Н. Гусев, А.Н. Науменко, Е.М. Волохов, В.А. Голованов. – СПб: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2008. – 80 с.

31. Гусев, В.Н. Сдвигение и деформации горных пород: учеб. пособие / В.Н. Гусев, Е.М. Волохов. – СПб: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2003. – 83 с.

32. Гусев, В.Н. Способ определений вертикальных сдвижений и деформаций с помощью лазерно-сканирующих систем / В.Н. Гусев, М.Г. Выстрчил // Записки горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 245-248.

33. Ермолаев, Н.Р. Использование пакета Surfer в оценке почвенных свойств и экологических рисков (на примере типичных черноземов Курской области) / Н.Р. Ермолаев // Труды пятой международной научно-

практической конференции «Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование». – 2017. – С.70-73.

34. Ефремов, Е.Ю. Исследование процесса сдвижения горных пород с применением технологий спутниковой геодезии / Е.Ю. Ефремов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 11. С. 86-92.

35. Инструкция по наблюдениям за сдвижением земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях / Мин-во угольной пром-сти СССР: Утв. 30.12.87. Разраб. ВНИМИ; Состав.: И.А. Петухов, Н.И. Митичкина, В.Н. Земисев и др. – М.: «Недра», 1989. – 96 с.

36. Искусственная нейронная сеть – Национальная библиотека им. Н.Э. Баумана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.bmstu.wiki/Искусственная_нейронная_сеть.

37. Карсунская, М.М. Возможные пути уменьшения влияния инструментальных ошибок электронных геодезических приборов на точность угловых измерений / М.М. Карсунская, Х.К. Ямбаев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2000. – №4. – С. 100-115.

38. Кафтан, В.И. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений / В.И. Кафтан, П.А. Докукин // Геодезия и картография. – 2007. – №9. – С. 18-22.

39. Кафтан, В.И. Современные движения земной коры / В.И. Кафтан, Л.И. Серебрякова // М.: Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР, Геодезия и аэросъемка, 1990. – 151 с.

40. Кирков, А.Е. Применение аналитико-экспериментальных методов для прогноза вертикальных сдвижений и деформаций земной поверхности на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения / А.Е. Кирков // Маркшейдерский вестник. – 2011. – С. 53-56.

41. Колесатова, О.С. Производство маркшейдерских наблюдений за сдвижением земной поверхности на октябрьском месторождении с примене-

нием спутниковых технологий / О.С. Колесатова, А.Р. Усманов // Сборник научных трудов IX-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. под общей редакцией: А.Б. Копылова, И.А. Басалай. – 2013. – С. 231-234.

42. Колесатова, О.С. Совершенствование методики маркшейдерских наблюдений за деформирующимися участками бортов карьеров (на примере Камаганского месторождения) / О.С. Колесатова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – С. 23-32.

43. Комиссаров, А.В. Классификация погрешностей в результатах лазерного сканирования / А.В. Комиссаров // Геодезия и картография. – 2015. – №10. – С. 13-18.

44. Комиссаров, А.В. Методика исследования метрических характеристик сканов: дис. ...канд. техн. наук: 25.00.34 / Комиссаров Александр Владимирович. – Новосибирск, 2007. – 201 с.

45. Корнилов, Ю.Н. Применение методов лазерного сканирования при анализе геометрических параметров поверхностей объекта / Ю.Н. Корнилов, В.В. Кулеш // Записки горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 334-337.

46. Кузьмин, Ю.О. Проблемные вопросы изучения деформационных процессов в современной геодинамике / Ю.О. Кузьмин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – №3. – С. 98-107.

47. Лебедева, Е.В. Использование электронных тахеометров при маркшейдерских наблюдениях за конвергенцией горных выработок / Е.В. Лебедева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №6. – С. 200-201.

48. Лизунов, В.Д. Методы повышения точности геодезических средств измерений больших длин / В.Д. Лизунов, Г.А. Уставич, В.А. Середович, Л.Г. Куликова, В.Т. Новоевский // Гео-Сибирь. – 2006. – Т. 4. – С. 249-252.

49. Мазуров, Б.Т. Изучение геодинамических процессов на основе моделирования геодезических и гравитационных параметров: дис. ...д-ра техн. наук: 25.00.32 / Мазуров Борис Тимофеевич. – Новосибирск, 2007. – 254 с.

50. Медянцеv, А.Н. Погрешности расчета деформаций земной поверхности при ведении горных работ на больших глубинах угольных шахт Донбасса / А.Н. Медянцеv, А.А. Рускол // Маркшейдерский вестник. – 2009. – №2. – С. 41-42.

51. Методические указания по наблюдениям за сдвижением горных пород и за подрабатываемыми сооружениями / М-во угольной пром-сти СССР. Всесоюз. ордена Трудового Красного Знамени науч.-исслед. ин-т горн. геомех. и маркшейд. дела. – Л., 1987. – 183 с.

52. Методические указания по прогнозу сдвижений и деформаций земной поверхности и определению нагрузок на здания при многократных подработках. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 94 с.

53. Мустафин, М.Г. Контроль допустимых деформаций земной поверхности при строительстве вертикальных выработок в условиях застроенных территорий / М.Г. Мустафин, А.С. Наумов // Записки горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 194-197.

54. Мустафин, М.Г. Применение пространственных моделей объектов при геодезическом мониторинге деформационных процессов / М.Г. Мустафин, А.В. Ковязин // Записки горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 191-193.

55. Нестеренко, Е.А. Рациональное применение лазерно-сканирующих систем / Е.А. Нестеренко // Записки горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 344-348.

56. Опарин, В.Н. Современная геодинамика массивов горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / В.Н. Опарин, А.Д. Сашурин, Г.И. Кулаков и др. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. – 450 с.

57. Орлов, Г.В. Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки / Г.В. Орлов. – М.: издательство «Горная книга», издательство Московского государственного горного университета, 2010. – 199 с.: ил.

58. Панжин, А. А. Наблюдение за сдвижением земной поверхности на горных предприятиях с использованием GPS / А. А. Панжин // Изв. УГГГА. Сер. Горное дело. – 2000. – № 11. – С. 196-203.

59. Панжин, А.А. Пространственный геодинимический мониторинг состояния породного массива и объектов на земной поверхности при недропользовании / А.А. Панжин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №11. – С. 164-177.

60. Писаренко, М.В. Прогноз ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности с помощью ГИС технологий / М.В. Писаренко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – №12. – С. 310-315.

61. Пискарев, В.К. Прогноз длительности процесса сдвижения при отработке месторождения / В.К. Пискарев, Я.К. Костина // Маркшейдерский вестник. – 2010. – С. 12-13.

62. Портал искусственного интеллекта. Способы нормализации данных: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://neuronus.com/theory/931-sposoby-normalizatsii-peremennykh.html>

63. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на угольных месторождениях / Минтопэнерго РФ. РАН. Гос. НИИ горн. геомех. и маркшейд. дела – Межотраслевой научн. Центр ВНИМИ. – СПб., 1998. – 291 с.

64. Расчет ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности: Методические указания / Санкт-Петербургский горный ин-т. Сост.: В.Н. Гусев, Е.М. Волохов. – СПб, 2004. – 22 с.

65. Сашурин, А.Д. Исследование геодинимических процессов с применением GPS-технологий / А.Д. Сашурин, А.А. Панжин, Ю.П. Коновалова //

Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2003. – № 7. – С. 34-38.

66. Сашурин, А.Д. GPS-технологии в исследовании деформационных процессов на горных предприятиях / А.Д. Сашурин, А.А. Панжин, Ю.П. Коновалова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2002. - №11. – С. 98-101.

67. Свирко, С.В. Динамическая мульда сдвижений земной поверхности при разработке пологих и наклонных угольных пластов Кузбасса с повышенными скоростями подвигания очистных забоев / С.В. Свирко, А.А. Ренев, А.И. Быкадоров, П.М. Ларичкин // Современные тенденции и инновации в науке и производстве. – 2015. – С. 91-92.

68. Середович, В.А. Наземное лазерное сканирование / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: Сибирская государственная геодезическая академия, 2009. – 261 с.

69. Середович, В.А. Некоторые проблемы автоматизации обработки результатов геодезических измерений / В.А. Середович, Д.А. Ферулев // Гео-Сибирь. – 2006. – №1. – С. 137-140.

70. Середович, В.А. Исследования точности измерений, выполненных наземным лазерным сканером / В.А. Середович, А.В. Иванов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – №3. – С. 134-143.

71. Середович, В.А. Мониторинг деформаций сооружений в сочетании с технологией трехмерного моделирования / В.А. Середович, Т.А. Широкова, Д.В. Комиссаров, А.В. Середович, А.В. Комиссаров, Г.Н. Ткачева, С.С. Студенков // Геодезия и картография. – 2006. – №6. – С. 12-14.

72. Середович, В.А. Особенности, проблемы и перспективы применения НЛС / В.А. Середович, А.В. Середович // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2011. – №2. – С. 223-224.

73. СП 11-104-97 Инженерно-геодезические изыскания для строительства. – М.: ПНИИИС Госстроя России, 1997. – 77 с.

74. Справочник геодезиста (в двух книгах) / Под ред. В.Д. Большакова и Г.П. Левчука, издание 2-е, испр. и перераб. – М.: «Недра», 1975. – 1056 с.

75. Тюшевский, Е.Ю. Технология высокоточных геодезических измерений при оценке деформаций земной поверхности в Восточной Сибири: дис. ...канд. техн. наук: 25.00.32 / Тюшевский Евгений Юрьевич. – Новосибирск, 2009. – 124 с.

76. Усанов, С.В. Современные технологии мониторинга процесса сдвижения / С.В. Усанов, Ю.П. Коновалова, О.Д. Желтышева // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 36-39.

77. Хоанг, Н.Л. Разработка и исследование методики создания блочно-программного продукта для анализа результатов наблюдений за высотными смещениями земной поверхности: дис. ...канд. техн. наук: 25.00.32 / Хоанг Нгок Лам. – Москва, 2002. – 151 с.

78. Хромых, В.В. Цифровые модели рельефа: Учебное пособие / В.В. Хромых, О.В. Хромых. – Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. – 178 с.

79. Ягунов, А.С. Динамика деформаций в подрабатываемом горном массиве: монография / А.С. Ягунов. – Кемерово, Кузбассвуиздат, 2010. – 239 с.

80. Ямбаев, Х.К. Геодезический мониторинг движений земной коры: состояние, возможности, перспектива / Х.К. Ямбаев, В.Р. Ященко // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т.3. – С. 139-155.

81. Ямбаев, Х.К. Некоторые итоги геодезического мониторинга движений земной коры территории промышленных площадок крупных инженерных сооружений / Х.К. Ямбаев, В.Р. Ященко // Геодезия и картография. – 2011. – №9. – С. 2-7.

82. ArcGIS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://resources.arcgis.com/ru/help/>

83. AutoCAD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autodesk.ru/products/autocad/overview>

84. AutoCAD Civil 3D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autodesk.ru/products/civil-3d/overview>
85. Bond, J. Using GPS for augmenting deformation monitoring systems in open pit mines - Problems and solutions / J. Bond, A. Chrzanowski, R. Wilkins // *Geomatica*. – 2005. – №59, Issue 1. – Pp. 73-82.
86. Deruyter, G. Risk assessment: A comparison between the use of laser scanners and total stations in a situation where time is the critical factor / G. Deruyter, A. Van Quickelberghe, T. Nuttens, C. Stal, A. De Wulf // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. – 2013. – №2. – Pp. 687-694.
87. El-Ashmawy, K.L.A. Developing and testing a method for deformations measurements of structures / K.L.A. El-Ashmawy // *Geodesy and Cartography*. – 2017. – №43, Issue 1. – Pp. 35-40.
88. El-Tokhey, M.E. Accuracy assessment of laser scanner in measuring and monitoring deformations of structures / M.E. El-Tokhey, A.K. Abdel-Gawad, Y.M. Mogahed, A.M. El-Maghraby // *World Applied Sciences Journal*. – 2013. – №26, Issue 2. – Pp. 144-151.
89. Erdelyi, J. Automation of point cloud processing to increase the deformation monitoring accuracy / J. Erdelyi, A. Kopacik, I. Liptak, P. Kyrinovic // *Applied Geomatics*. – 2017. – №9, Issue 2. – Pp. 105-113.
90. Grishchenkova, E. Laser scanning in displacement monitoring of undermined territories / E. Grishchenkova // *9th GeoSymposium of Young Researches Silesia 2016*. – 2016. – P. 32.
91. Grishchenkova, E. Modern methods of geodetic monitoring of the earth surface displacement on undermined territories / E. Grishchenkova // *Scientific Reports on resource issues*. Vol. 1. – 2016. – Pp. 78-81.
92. Gu, F. Status and development trend of 3D laser scanning technology in the mining field / F. Gu, H. Xie // *International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, RSETE 2013*. – 2013. – Pp. 407-410.

93. Hope, C. Manual total station monitoring / C. Hope, M. Chuaqui // *Geotechnical News*. – 2008. – №26, Issue 3. – Pp. 28-30.
94. Kuttykadamov, M.E. Geodetic monitoring methods of high-rise constructions deformations with modern technologies application / M.E. Kuttykadamov, K.B. Rysbekov, I. Milev, K.A. Ystykul, B.K. Bektur // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2016. – №93, Issue 1. – Pp. 24-31.
95. Kuzin, A.A. Prediction of natural and technogenic negative processes based on the analysis of relief and geological structure / A.A. Kuzin, E.N. Grishchenkova, M.G. Mustafin // *Procedia Engineering*. – 2017. – Т. 189. – Pp. 744-751.
96. Liang, B. The study of deformation monitoring based on the ground three-dimensional laser scanning technology / B. Liang, C. Yue, X.H. Chen, B. Wang, X.K. Sun // *Advanced Materials Research*. – 2014. – №1022. – Pp. 387-391.
97. MapInfo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mapinfo.ru/>
98. Mustafin, M.G. Monitoring of Deformation Processes in Buildings and Structures in Metropolises / M.G. Mustafin, V.A. Valkov, A.I. Kazantsev // *Procedia Engineering*. – 2017. – №189. – Pp. 729-736.
99. Nuttens, T. Deformation monitoring with terrestrial laser scanning: Measurement and processing optimization through experience / T. Nuttens, A. De Wulf, G. Deruyter, C. Stal, H. De Backer, K. Schotte // *12th International Multi-disciplinary Scientific GeoConference and EXPO - Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, SGEM 2012*. – 2012. – №2. – Pp. 707-714.
100. Panzhin, A.A. The spatial geodynamics monitoring at the mining enterprises and urban areas / A.A. Panzhin // *Rock dynamics and applications - state of the art: proceedings of the 1st International conference on rock dynamics and applications, ROCDYN-1*. – 2013. – Pp. 319-324.

101. Salagean, T. The use of Laser scanning technology in land Monitoring of mining areas / T. Salagean, T. Rusu, D. Onose, R. Farcas, B. Duda, P. Sestras // Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. – 2016. – №11, Issue 2. – Pp. 565-573.
102. Topocad [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://topocad.ru/>
103. QGIS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.qgis.org/>
104. Vacca, G. Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings / G. Vacca, F. Mistretta, F. Stochino, A. Dessi // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives. – 2016. – №41. – Pp. 453-460.
105. Visual studio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://imagine.microsoft.com/ru-ru/Catalog/Product/530>
106. Wang, H. Application of Leica TS30 ultra-precision total station in deformation monitoring / H. Wang // Journal of Liaoning, Technical University (Natural Science Edition). – 2015. – №34, Issue 3. – Pp. 401-404.
107. Yao, Y. Overall deformation monitoring for landslide by using ground 3D laser scanner / Y. Yao, S. Jiang, H. Wang // Journal of Geomatics. – 214. – №39, Issue 1. – Pp. 50-53+56.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017616397

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ
УСЛОВИЙ СЪЕМКИ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ТАХЕОМЕТРИИ

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Автор: *Гриценкова Екатерина Николаевна (UA)*


Заявка № 2017613419

Дата поступления 17 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 июня 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017663004

ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ СЪЕМКИ
НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ МЕТОДОМ
ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯПравообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*Автор: *Гриценкова Екатерина Николаевна (UA)*

Заявка № 2017619744

Дата поступления 29 сентября 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 ноября 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018613553

ПРОГРАММА РАСЧЕТА УТОЧНЕННОГО ПРОГНОЗА
ДЕФОРМАЦИЙ НА БАЗЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Автор: *Грищенкова Екатерина Николаевна (UA)*

Заявка № 2017663327

Дата поступления 21 декабря 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 марта 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ильин



УТВЕРЖДАЮ:



Директор технический
СП «Краснодонуголь»

В.Ю. Князев

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
научно-технической продукции

1. Наименование объекта внедрения

Методика геодезического мониторинга на наблюдательных станциях с применением высокоточного электронного оборудования.

Разработана аспирантом кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета Грищенко Е.Н.

2. Краткое описание внедренного объекта (мероприятия)

Новая методика геодезических наблюдений за деформациями земной поверхности на подрабатываемых территориях с использованием электронных тахеометров, лазерных сканирующих систем и спутниковых приемников позволяет значительно повысить производительность съемки маркшейдерских наблюдательных станций. Рекомендации по применению данной методики гарантируют выполнение требований нормативных документов по точности определяемых параметров. Математический аппарат расчета точности результатов измерений позволяет оценить оптимальные условия съемки реперов профильных линий наблюдательных станций.

3. Сведения о внедрении (формы и методы внедрения)

Произведен предварительный расчет точности измерений. Проведены серии наблюдений за сдвижением земной поверхности над трубопроводными коммуникациями на специальной наблюдательной станции «шахта «Дуванная» – пер. Стаханова – ул. Карпинского – ул. Гастелло», расположенной на подрабатываемом участке г. Суходольска 17-й северной лавой пласта k_5^H шахты им. Н.П. Баракова.

4. Дата внедрения: 2017 г.

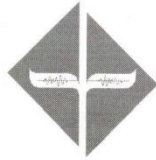
5. Основные характеристики предприятия, на котором внедрен объект: ПП «Шахтоуправление «им. Н.П. Баракова» СП «Краснодонуголь».

6. Сведения об эффективности внедрения НТП: обеспечение систематического маркшейдерского мониторинга состояния подрабатываемой земной поверхности над подземными трубопроводными коммуникациями и обеспечение их безопасной эксплуатации при максимально возможной добыче угля.

И.о.главного маркшейдера
СП «Краснодонуголь»

Казачкова Ю.В.

**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКАНСКИЙ АКАДЕМИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И
ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ГОРНОЙ ГЕОЛОГИИ,
ГЕОМЕХАНИКИ, ГЕОФИЗИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА (РАНИМИ)**



Донецкая Народная Республика
283004, город Донецк, Киевский район
улица Челюскинцев, 291
Тел.: +38 (062) 300 26 11; Тел/факс +38 (062) 300 22 97
E-mail: ranimi@ranimi.org

16.04.18 № 01/101
на № _____ от _____

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ
научно-технической продукции**

1. Наименование объекта внедрения:

Методика корректировки прогнозируемых деформаций земной поверхности с помощью использования нейронной сети и калибровочных функций, разработанная аспирантом кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета Грищенковой Е.Н.

2. Краткое описание внедрённого объекта

Методика корректировки прогноза деформаций земной поверхности на основании результатов периодических инструментальных наблюдений позволяет значительно (более чем вдвое) повысить точность прогноза сдвижения. Корректировка прогноза деформаций земной поверхности осуществляется с помощью использования нейронной сети и калибровочных функций.

Обучение нейронной сети производится на базе цифровых моделей рельефа на начало и конец сдвижения, а также на даты проведения натурных наблюдений. Разработанная нейронная сеть производит калибровку модели прогноза до момента достижения необходимого уровня точности прогноза, и по истечении периода обучения позволяет вычислить деформации реперов профильной линии на конкретную дату.

Калибровочные функции создаются на основе степенных полиномов, аппроксимирующих разности между измеренными и прогнозными значениями абсолютных деформаций (оседаний и горизонтальных сдвижений). Эти функции создаются на каждой стадии инструментальных измерений и используются для прогноза деформаций на последующий период.

3. Сведения о внедрении (формы и методы внедрения)

Методика корректировки прогнозируемых деформаций земной поверхности с помощью использования нейронной сети и калибровочных функций использована при выполнении:

- проекта подработки жилых и общественных зданий г. Кировское 6--й западной лавой пласта I₃ ГП «ШАХТА КОМСОМОЛЕЦ ДОНБАССА»;
- проекта подработки железнодорожных путей ст. «Кальмиус», участков перегонов ст. «Кальмиус – Донецк 2» и ст. «Кальмиус – Ясиноватая», электрических коммуникаций связи, стрелочных централизаций на ст. «Кальмиус» 5-й восточной лавой пласта I₁ в шахты «Щегловская-Глубокая» ПАО «Шахтоуправления «Донбасс».

4. Дата внедрения – 2017 г.

5. Предприятие, на котором внедрён объект

Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ) МОН ДНР

6. Сведения об эффективности внедрения НТП

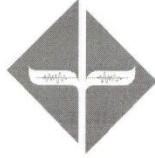
Методика корректировки прогнозируемых деформаций земной поверхности с помощью использования нейронной сети и калибровочных функций позволяет существенно повысить точность прогноза сдвижения, что способствует рациональному и обоснованному применению мер защиты охраняемых объектов на подрабатываемой территории и соответственно повышению безопасности подрабатываемых объектов.

Зам. директора РАНИМИ
по научной работе

д-р техн. наук, проф. В.А. Дрибан



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКАНСКИЙ АКАДЕМИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И
ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ГОРНОЙ ГЕОЛОГИИ,
ГЕОМЕХАНИКИ, ГЕОФИЗИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА (РАНИМИ)**



Донецкая Народная Республика
283004, город Донецк, Киевский район
улица Челюскинцев, 291
Тел.: +38 (062) 300 26 11; Тел/факс +38 (062) 300 22 97
E-mail: ranimi@ranimi.org

16.04.18 № 01/102
на № от

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ
научно-технической продукции**

1. Наименование объекта внедрения:

Методика формирования динамических цифровых моделей рельефа (ДЦМР) для территорий земной поверхности, подрабатываемых подземными горными работами, разработанная аспирантом кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета Грищенко Е.Н.

2. Краткое описание внедрённого объекта

В процессе мониторинга сдвижений и деформаций земной поверхности от влияния подземных горных работ осуществляется систематический инструментальный контроль подрабатываемой территории, который позволяет накапливать анализировать цифровую информацию с учётом пространственно-временных параметров. Отдельные цифровые модели местности, сформированные на основании серий инструментальных наблюдений, могут быть объединены и представлены в виде динамических цифровых моделей рельефа (ДЦМР).

Цифровые модели, основанные на полученных результатах инструментальных наблюдений, обрабатывают с помощью специального программного обеспечения для фильтрации избыточных данных или выявления ошибочной информации. Различия в сетках ЦМР, образованных на базе различных серий наблюдений устраняются за счёт приведения моделей к виду с регулярным расположением точек на прямоугольных сетках методом интерполирования, что позволяет упростить контроль динамики нарастания деформаций.

Процесс деформирования земной поверхности характеризуется величинами сдвижений и деформаций (оседания, наклоны, кривизна, радиус кривизны, горизонтальные сдвигения и горизонтальные деформации). Показатели деформаций находятся в прямой зависимости от результатов инструментальных измерений на наблюдательной станции. Отсюда возникает необходимость анализа погрешностей при вычислении сдвижений и деформаций, и оценки влияния ошибок инструментальных наблюдений на итоговые показатели. Одной из основных функций ДЦМР является обеспечение решения указанных задач.

3. Сведения о внедрении (формы и методы внедрения)

Методика формирования динамических цифровых моделей рельефа использована в отделе сдвижения земной поверхности и защиты подрабатываемых объектов института РАНИМИ при выполнении госбюджетной темы № 2П/17 «Разработка методики формирования и визуализации цифровых моделей рельефа для территорий Донбасса в зонах влияния горных работ».

4. Дата внедрения – 2017-2018 гг.

5. Предприятие, на котором внедрён объект

Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ) МОН ДНР

6. Сведения об эффективности внедрения НТП

Разработка ДЦМР не только способствует организации пространственного представления результатов наблюдений, но и является основой процесса отбора объектов, расположенных на подрабатываемой земной поверхности и подлежащих первостепенному обследованию. Визуализация ДЦМР посредством специального программного обеспечения даёт возможность подробного отображения картины сдвижения, проведения детального анализа процесса нарастания деформаций и решения вопросов охраны подрабатываемых объектов.

Внедрение методики формирования динамических цифровых моделей рельефа позволило ускорить выполнение госбюджетной темы № 2П/17 «Разработка методики формирования и визуализации цифровых моделей рельефа для территорий Донбасса в зонах влияния горных работ».

Зам. директора РАНИМИ
по научной работе

д-р техн. наук, проф. В.А. Дрибан

