

На правах рукописи

ГРИЩЕНКОВА Екатерина Николаевна



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

Специальность 25.00.32 – Геодезия

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель –
доктор технических наук

Мустафин Мурат Газизович

Официальные оппоненты:

Волков Виктор Иванович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра городского хозяйства, геодезии, землеустройства и кадастров, профессор

Мазуров Борис Тимофеевич

доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра космической и физической геодезии, профессор

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится 25 сентября 2018 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.08 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

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

Автореферат разослан 25 июля 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СКАЧКОВА
Мария Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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.

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.

Значительный вклад в развитие научных представлений о мониторинге деформаций земной поверхности и подрабатываемых объектов внесли сотрудники ВНИМИ – авторы «Инструкции по наблюдениям за сдвижением земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях» и «Правил охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на угольных месторождениях», 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. Следует особо

отметить ученых, разработки которых позволили существенно продвинуть фронт исследований в области методов наблюдений за деформациями земной поверхности: В.И. Волков, В.Н. Гусев, В.Н. Земисев, М.А. Иофис, В.И. Кафтан, В.Г. Колмогоров, А.В. Комиссаров, М.А. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, А.Н. Медянцев, М.Г. Мустафин, А.А. Панжин, И.А. Петухов, А.Д. Сашурин, В.А. Середович, А.Ф. Стороженко, Е.Ю. Тюшевский, Х.К. Ямбаев и др.

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; практические исследования разработанных рекомендаций.

3. Разработка математических моделей калибровочных функций и нейронной сети для корректировки прогноза деформаций земной поверхности; 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 логистической 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 натурных 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 и лазерной сканирующей системы. 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. 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 техноло-гии 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.).

Личный вклад соискателя. 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 программных комплексов моделирования условий наблюдений; статистическая обработка результатов моделирования; практические исследования разработанных рекомендаций к проведению измерений на наблюдательных станциях; разработка модели корректировки прогноза с помощью калибровочных функций; 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.

Публикации и программы для ЭВМ. Основное содержание работы отражено в 13 публикациях, из них 6 – в журналах, включенных в перечень ведущих научных изданий ВАК Министерства 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, и

научно-исследовательском институте РАНМИ, г. Донецк (акты внедрения 01/101 и 01/102 от 16.04.2018 г.).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения, изложенных на 135 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ нормативно-методической литературы, технической литературы и научно-технических публикаций в области геодезического мониторинга деформаций земной поверхности. Описан порядок проведения наблюдений за сдвижением земной поверхности согласно существующей технологии, охарактеризована точность измерений. Установлена целесообразность применения электронных геодезических методов наблюдений, в частности, электронных тахеометров, лазерных сканирующих систем и спутниковых приемников. Дана характеристика средств обработки результатов наблюдений. Описаны существующие методики прогноза деформаций земной поверхности, способы их корректировки и совершенствования. Выполнен обзор исследований в области пространственно-временного анализа сдвижения. Обоснована необходимость формирования динамических ЦМР для осуществления контроля динамики деформаций земной поверхности.

Во второй главе представлены разработанные математические модели накопления погрешностей наблюдений с помощью электронных тахеометров, лазерных сканирующих систем и спутниковых приемников. Описана разработанная модель корректировки прогноза посредством калибровочных функций на основании данных инструментальных наблюдений. Представлена разработанная модель искусственной нейронной сети для корректировки прогноза с применением результатов инструментальных наблюдений. Подробно изложен процесс формирования и обработки ДЦМР.

Третья глава содержит описание разработанного программного обеспечения для расчета и исследования точности

геодезических наблюдений в ходе мониторинга земной поверхности. Представлены программные комплексы моделирования условий наблюдений с помощью электронного тахеометра и лазерной сканирующей системы, а также корректировки прогноза деформаций на основании калибровочных функций и искусственной нейронной сети. Описан процесс разработки алгоритмов и программных средств.

В четвертой главе проанализированы результаты практической реализации разработанных математических моделей. Приведены рекомендации к проведению наблюдений с помощью электронного геодезического оборудования на наблюдательных станциях. Выполнена оценка результатов работы калибровочных функций и нейронной сети при корректировке прогноза деформаций. Описано внедрение результатов исследований в геодезическую практику мониторинга подрабатываемых территорий.

В заключении диссертации изложены основные результаты и выводы, полученные в ходе исследований.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

Измерения, проводимые в соответствии с «Инструкцией по наблюдениям за сдвижением...», характеризуются следующей точностью: 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.

Для оценки точности был разработан математический аппарат формул, позволяющий произвести оценку путем анализа погрешностей длин интервалов и превышений, определяемых как средние квадратические погрешности (СКП) функций измеренных величин.

СКП координат рассчитываются по формулам:

$$m_{x_i}^2 = m_{x_{cm}}^2 + (\cos(\alpha_0 + \beta_i) \cdot \cos \delta_i)^2 \cdot m_s^2 + (S_i \cdot \sin \delta_i \cdot \cos(\alpha_0 + \beta_i))^2 \cdot \frac{m_\delta^2}{\rho^2} + (S_i \cdot \cos \delta_i \cdot \sin(\alpha_0 + \beta_i))^2 \cdot \frac{m_\alpha^2 + m_\beta^2}{\rho^2}, \quad (1)$$

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

$$m_{z_i}^2 = m_{z_{cm}}^2 + (\sin \delta_i)^2 \cdot m_s^2 + (S_i \cdot \cos \delta_i)^2 \cdot \frac{m_\delta^2}{\rho^2} + m_i^2 + m_v^2, \quad (3)$$

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 с номерами (i) и $(i+1)$:

$$m_L^2 = \left(\frac{x_i - x_{i+1}}{L}\right)^2 \cdot (m_{x_i}^2 + m_{x_{i+1}}^2) + \left(\frac{y_i - y_{i+1}}{L}\right)^2 \cdot (m_{y_i}^2 + m_{y_{i+1}}^2) + \left(\frac{z_i - z_{i+1}}{L}\right)^2 \cdot (m_{z_i}^2 + m_{z_{i+1}}^2); \quad (4)$$

$$m_H^2 = m_{z_i}^2 + m_{z_{i+1}}^2, \quad (5)$$

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

Оценка точности расстояний и превышений при наблюдениях посредством спутниковых приемников также будет производиться с помощью формул (4) и (5).

При наблюдениях с помощью лазерной сканирующей системы расчет погрешностей на станции производится в зависимости от выбранного подхода к проведению измерений.

СКП координат точек определяются по формулам:

$$m_{x_i}^2 = m_{x_{cm}}^2 + m_c^2 + (\cos(\alpha_0 + \varphi_i) \cdot \sin \theta_i)^2 \cdot m_R^2 + (R_i \cdot \cos \theta_i \cdot \cos(\alpha_0 + \varphi_i))^2 \cdot \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} + (R_i \cdot \sin \theta_i \cdot \sin(\alpha_0 + \varphi_i))^2 \cdot \frac{m_\varphi^2 + m_\theta^2}{\rho^2}, \quad (6)$$

$$m_{y_i}^2 = m_{y_{cm}}^2 + m_c^2 + (\sin(\alpha_0 + \varphi_i) \cdot \sin \theta_i)^2 \cdot m_R^2 + (R_i \cdot \cos \theta_i \cdot \sin(\alpha_0 + \varphi_i))^2 \cdot \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} + (R_i \cdot \sin \theta_i \cdot \cos(\alpha_0 + \varphi_i))^2 \cdot \frac{m_\varphi^2 + m_\theta^2}{\rho^2}, \quad (7)$$

$$m_{z_i}^2 = m_{z_{cm}}^2 + m_i^2 + (\cos \theta_i)^2 \cdot m_R^2 + (R_i \cdot \sin \theta_i)^2 \cdot \frac{m_\theta^2}{\rho^2}, \quad (8)$$

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.

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 (4), (5).

Определение оптимальных параметров мониторинга производится по результатам многократного моделирования условий наблюдений, к которым относятся геометрия станции, погрешности наблюдений, технические характеристики используемого оборудования и проч. На основании вышеприведенных математических моделей накопления погрешностей были разработаны программные средства, позволяющие автоматизировать расчеты.

Для выявления наилучших условий для всех видов оборудования было смоделировано более 45000 вариантов наблюдательных станций. На основании результатов моделирования были разработаны рекомендации к проведению наблюдений. В таблице 1 приведены рекомендации к измерениям электронным тахеометром на профильных линиях; L – интервал между реперами, N – количество точек, снимаемых с необходимой точностью, S – кратчайшее расстояние от профильной линии до электронного тахеометра.

Таблица 1 – Рекомендуемые условия для наблюдений электронным тахеометром

L	Угловая точность измерений электронным тахеометром									
	1"		2"		3"		5"		7"	
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
5	3	15-40	3	15-25	3	15-40	3	15-20	Не рекоменд.	
	7	45-100	5	30-55						
10	5	20-50	5	25-60	3	10-40	3	10-20	3	10-30
	9	55-100	9	65-100	7	45-65	5	25-35		
15	7	20-70	7	20-45	7	25-60	5	15-20	3	5-10
	15	75-100	11	50-100	11	65-75	7	25-55		
20	23	5-25			17	65-100	9	55-80	5	45-65
	25	30-65	23	5-100	21	40-60	15	30-50	11	30-40
	27	70-100			23	5-35	21	5-25	17	5-25
25	43	5-100	41	60-85	31	5-100	13	85-95	5	70-85
			43	5-55			19	5-80	13	5-65

Оценив точность лазерно-сканирующей съемки можно заключить, что, несмотря на удобство и быстроту производства измерений, данный метод уступает по точности как традиционной технологии, так и электронным тахеометрам. Однако при этом лазерная съемка может быть успешно интегрирована в процесс обследования и контроля объектов для создания трехмерных моделей зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния подработки.

Применение спутниковых технологий при наблюдениях за сдвигениями и деформациями земной поверхности рекомендуется лишь при построении опорной сети для проведения последующих измерений электронным тахеометром.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что применение высокоточных электронных тахеометров в процессе геодезического мониторинга деформаций позволяет достичь точности, регламентируемой нормативными документами.

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.

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. Возникает необходимость уточнения моделей прогноза деформаций в ходе мониторинга подрабатываемых объектов.

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

$$\Delta Z_i = \eta_i^{\text{изм}} - \eta_i(t). \quad (9)$$

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, т.е.:

$$Z_i(t) = f(\Delta Z_i, t). \quad (10)$$

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:

$$\eta_i(t_2)_{\text{корр}} = \eta_i(t_2) + f_1(\Delta Z_{i,1}, t_1). \quad (11)$$

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

$$\Delta Z_{i,2} = \eta_{i,2}^{\text{изм}} - \eta_i(t_2). \quad (12)$$

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:

$$\eta_i(t_k)_{\text{коpp}} = \eta_i(t_k) + f_{k-1}(\Delta Z_{i,k-1}, t_{k-1}). \quad (13)$$

Данным алгоритмом корректировки прогноза предусмотрен циклический расчет калибровочной функции. Многократное переопределение коэффициентов уравнения функции по результатам серий наблюдений ведет к уменьшению значений коэффициентов и, соответственно, общих величин вносимых поправок.

Алгоритм был протестирован на ряде проектов подработки. Расчет показал положительные результаты; согласно разработанной методике необходимость ввода поправок присутствует только для первых 3-4 серий наблюдений.

Нейронная сеть. Для реализации задачи формируется многослойная нейронная сеть прямого распространения. На вход подается два параметра: порядковый номер репера профильной линии и день сдвижения земной поверхности. 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 .

Обучение сети построено на использовании алгоритма обратного распространения ошибки (Backpropagation), что предполагает проход по всем слоям сети в прямом и обратном направлении. Чаще всего в качестве функции активации для многослойных сетей применяется логистическая функция (сигмоида). Для обучения данной сети использован алгоритм Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно (BFGS).

Алгоритм корректировки прогноза включает несколько этапов. Прежде всего, в качестве исходных данных формируются

ЦМР на начало (по результатам наблюдений, ЦМР-0) и конец сдвижения (по результатам прогноза, 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 расчет и корректирует кривые прогноза. При уточнении прогноза более чем вдвое в сравнении с существующей методикой ЦМР-N исключается из обучающего файла, что позволяет с применением нейронной сети определить уточненную ЦМР на конец сдвижения.

Тестирование описанного алгоритма на основе производственных данных дало возможность установить, что четырех циклов обучения нейронной сети вполне достаточно для получения нового, уточненного прогноза.

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.

Создание цифровых моделей земной поверхности на основании прогноза деформаций и результатов инструментальных наблюдений с помощью электронных тахеометров, лазерных сканирующих систем и спутниковых приемников является основанием для анализа динамики нарастания деформаций на подрабатываемых территориях и изменения границ влияния в пространстве мульды сдвижения. Результаты исследований служат основой для совершенствования методов прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности на подрабатываемых территориях.

Порядок построения ДЦМР можно представить следующим образом:

1. Построение ЦМР на начало процесса сдвижения. Проведение инструментальных наблюдений на подрабатываемых территориях. Интерполирование и составление регулярной сетки на территории сдвижения земной поверхности.

2. Построение ЦМР на конец процесса сдвижения. Расчет величин 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.

Применение логистической функции к величине оседания в каждой точке регулярной сетки цифровой модели рельефа позволяет сформировать любое количество 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 подрабатываемой 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 подрабатываемых объектов.

Разработанная методика геодезического мониторинга внедрена на шахтах Донбасса: ПП «Шахтоуправление «им. Н.П. Баракова» СП «Краснодонуголь»; ГП «Шахта Комсомолец Донбасса»; «Щегловская Глубокая» ПАО «Шахтоуправления «Донбасс» (акты внедрения содержатся в приложениях диссертации).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 и лазерной сканирующей системы, а также программный продукт, предназначенный для прогнозирования координат с учетом результатов инструментального мониторинга.

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. Краснодар) и научно-исследовательском институте РАНМИ (г. Донецк).

Публикации по теме диссертации.

В изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России:

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

2. Грищенко, Е.Н. Математическое моделирование погрешностей лазерного сканирования на наблюдательных станциях

/ Е.Н. Грищенко, М.Г. Мустафин // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – №6. – С. 35-40.

3. 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.

4. 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.

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

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

В журналах, включенных в базы данных Scopus и Web of Science:

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

8. Grishchenkova, E.N. 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, T 189, 2017. – С. 744-751.

В прочих изданиях:

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. Grishchenkova, E. Laser scanning in displacement monitoring of undermined territories / E. Grishchenkova // 9th GeoSymposium of Young Researches Silesia 2016. – 2016. – P. 32.

13. 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.