

На правах рукописи

Губайдуллина Рушания Айратовна



**МОДЕЛЬНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ
ИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

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

Санкт-Петербург – 2020

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Мустафин Мурат Газизович

Официальные оппоненты:

Ямбаев Харьес Каюмович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», кафедра геодезии, профессор;

Афонин Дмитрий Андреевич

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра инженерной геодезии, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Защита диссертации состоится 29 декабря 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В современной геодезической практике координаты играют значительную роль. С их помощью не только задают местоположение объекта в пространстве, но и решают широкий спектр задач, таких как определение его формы и размеров, вынос в натуру, или отображение на плане или карте, проверка соответствия размещения объекта и его элементов проектным данным и др. Для решения этих актуальных задач создаются системы закрепленных на местности точек (геодезические сети), которые согласно ГОСТ Р 55024-2012 могут быть различными по назначению.

Координаты точек геодезических сетей чаще всего определяют по результатам линейно-угловых измерений. Перед обработкой из результатов стремятся в полной мере исключить грубые и систематические ошибки. Последние исключить не всегда возможно, поэтому их влияние стараются уменьшить. Это особенно важно, если решение задачи подразумевает выполнение повторных измерений и дальнейшее установление стабильности геодезической сети, как например, при создании геодезической основы перед строительством особо ответственных сооружений, реконструкции геодезических сетей, контроле геодезической разбивочной сети, оценке деформаций различных объектов и т.д. Данные виды работ регламентированы нормативными документами и, как правило, выполняются посредством сравнения координат точек в соседних циклах наблюдений. Тем не менее, систематические ошибки могут оказаться и не вполне учтёнными из-за изменений условий наблюдений от цикла к циклу. Результат – ошибочные выводы о стабильности сети. Для того, чтобы учесть влияние систематических ошибок выполняют обязательную аттестацию средств измерений, а непосредственно перед началом работ и их проверку, определяют поправки в результаты измерений, разрабатывают и совершенствуют методики наблюдений.

Вопросами устранения систематических ошибок геодезических измерений в той или иной степени интересовались и интересуются практически все специалисты в области геодезии. Наиболее весомый вклад в изучение данной проблемы внесли такие видные ученые, как: А.П. Ворошилов, А.В. Виноградов,

Н.Х. Голыгин, П.А. Карев, А.П. Карпик, М.М. Карсунская, А.В. Комиссаров, А.В. Кошелев, Г.В. Лифашина, А.В. Никонов, И.И. Менухов, А.В. Мерзенин, И.С. Пандул, С.В. Травкин, Г.А. Уставич, И.Н. Чешева, О.Б. Хиноева, Н.В. Яковлев, Х.К. Ямбаев и др.

Однако, известные на сегодняшний день средства борьбы с систематическими ошибками зачастую требуют выполнения большого объема работ, в частности лабораторных, создания и обслуживания специальных стендов, изучения и анализа факторов, оказывающих влияние на результаты измерений, установления их математической зависимости.

В данной диссертационной работе предложен принципиально иной подход к решению вышеперечисленных геодезических задач. Он основан на принципе моделирования, при котором используются не сами измеренные величины, а отношения между ними (безразмерные соотношения между линейными величинами, соотношения между тригонометрическими функциями углов). Тогда, величины, полученные по результатам начальных измерений, принимаются как базовые, формирующие некоторую начальную безразмерную модель сети, фиксирующую её состояние на начальный момент времени. Все последующие измерения позволяют установить, сохраняются ли эти базовые элементы (базовая модель) неизменными. Такой подход позволяет получить ряд преимуществ по сравнению с подходом традиционным: обеспечивается автоматическое исключение систематических ошибок, линейных относительно измеряемых величин, а при определённых условиях и нелинейных. В связи с этим становится проще обеспечивать преемственность и непрерывность выполнения работ, в случаях, когда требуется возобновить контроль другими средствами измерений.

Объект исследования – геодезические сети.

Предмет исследования – процесс построения геодезических сетей и обработки результатов геодезических измерений.

Цель работы – повышение эффективности работ при построении и оценке геодезических сетей различного назначения.

Идея работы заключается в представлении геодезической сети как единой системы, а элементов, определяющих её форму и размер – однородными элементами в виде безразмерных (относительных) величин. Это обеспечивает получение дополнительного

параметра – коэффициента отношений, который может служить масштабным коэффициентом, и дает возможность применения альтернативных равноточных приборов при определении координат точек геодезических сетей (в том числе многократном).

Задачи исследований:

1. Анализ существующих подходов к определению координат пунктов геодезической сети и устранению систематических ошибок линейных и угловых измерений.
2. Разработка принципов использования соотношений элементов геодезической сети, как альтернативного способа определения ее координат.
3. Обоснование использования элементов теории подобия при решении задач деформационного мониторинга.
4. Обоснование методики определения координат пунктов геодезической сети по соотношениям её измеренных элементов.
5. Практическая проверка предлагаемой методики на моделях и в натуральных условиях.

Методология и методы исследования

Заключаются в последовательном и обоснованном применении следующих методов исследования: анализа существующих методов определения и оценки координат пунктов геодезических сетей (метода наименьших квадратов и обобщенного метода наименьших квадратов для обработки результатов наблюдений); обработки геодезических измерений на основе относительных величин, статистического анализа, теории подобия при теоретических и экспериментальных исследованиях, а также сопоставлении полученных результатов с результатами, полученными по традиционным методикам и, таким образом, установлении области применения разработанной методики.

Научная новизна:

1. Доказана принципиальная возможность использования соотношений элементов геодезических сетей для определения координат пунктов, в том числе и при повторных измерениях.
2. Впервые предлагается применять относительные безразмерные параметры в геодезических сетях для учета систематических ошибок при измерении линейных величин.

3. Предложен метод совместной обработки коэффициентов отношений, полученных по результатам линейных и угловых измерений.

4. Разработана методика определения степени деформирования геодезических сетей любого назначения, основанная на анализе результатов повторных измерений, дополняющая традиционные подходы и обеспечивающая возможность применения альтернативных равноточных приборов в различных циклах наблюдений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование относительных, нормированных величин является весьма эффективным средством исключения систематических ошибок из результатов измерений при построении геодезических сетей любого назначения.

2. Определение координат точек геодезической сети возможно по коэффициентам отношений линейных и угловых величин, вычисленных и уравненных по результатам измерений, в том числе и неравноточных.

3. Применение при решении задач деформационного мониторинга коэффициентов отношений линейно-угловых величин, обеспечивает контроль деформаций при вариативности приборов и преемственность конечных результатов.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенная методика построения сетей и обработки результатов измерений, основанная на применении безразмерных коэффициентов отношений, может быть широко использована не только в геодезической практике, но и в других областях науки, имеющих дело с измерениями. Выводы и методические разработки могут быть использованы в учебном процессе по специальности «Прикладная геодезия», а также в геодезических организациях, в частности в ЗАО «Геодезические приборы» и ООО НПП «БЕНТА» (Санкт-Петербург).

Теоретическая значимость работы заключается в теоретическом обосновании применения при обработке результатов полевых работ и оценке геодезических сетей не самих измерений, а их соотношений.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается использованием современных, широко применяемых в разных областях науки методов, использованием

сертифицированных приборов и методик при проведении экспериментальных исследований и обработке данных натурных наблюдений, хорошей сходимостью при сравнении полученных результатов с данными независимых исследовательских работ; качественным и количественным согласованием результатов расчетов с экспериментальными данными. Они не противоречат и дополняют ранее опубликованные по теме диссертации работы в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, а также в других изданиях отечественных и зарубежных исследователей.

Апробация результатов исследования. Основные положения и выводы, полученные в ходе данного научного исследования, докладывались на 7 научно-практических конференциях: Международной конференции «58 Konferencja Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH» (г. Краков, Польша, декабрь 2017 г.); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы инженерной геодезии» (г. Санкт-Петербург, ноябрь 2019 г.); Российско-германской сырьевой конференции (Молодежный день) (г. Санкт-Петербург, ноябрь 2019 г.); получен диплом I степени на XV Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, май 2019 г.); Международном симпозиуме EUROCK 2018 (г. Санкт-Петербург, май 2018 г.); Международной конференции во Фрайбергской горной академии (г. Фрайберг, Германия, июнь 2018 г.); II Всероссийской научно-практической конференции «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения» (г. Санкт-Петербург, апрель 2018 г.).

Личный вклад автора заключается в анализе литературы по теме исследования; постановке цели и задач диссертации; теоретическом обосновании предложенных рекомендаций; оценке их эффективности на моделях; проведении экспериментальных исследований; интерпретации полученных результатов; подготовке публикаций и апробации основных результатов работ.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11-ти печатных работах, в том числе две – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты

диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, одна – в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 189 наименований, и 6 приложений. Диссертация изложена на 171 странице машинописного текста, содержит 24 рисунка и 58 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность профессорско-преподавательскому составу и сотрудникам кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета, а также личную благодарность научному руководителю д.т.н. М.Г. Мустафину за помощь, оказанную при работе над диссертацией.

Искреннюю благодарность и глубокую признательность автор выражает к.т.н. Ю.Н. Корнилову за идеи, предложения и весомый вклад в развитие данного исследования, а также неоценимую поддержку на разных этапах написания работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели, задачи, защищаемые положения и новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования.

В первой главе рассмотрены возможные методы описания формы и размеров объекта (сети). Согласно традиционной технологии, геодезисты для этого используют координаты (характерных) точек. Представлен анализ нормативной документации, методической, технической и научно-профессиональной литературы о способах определения координат точек геодезических сетей и дальнейшего их использования при решении задач деформационного мониторинга и оценки стабильности опорных пунктов геодезических сетей. Особое внимание уделено анализу способов уменьшения влияния систематических ошибок из геодезических измерений. Установлена необходимость разработки более простой технологии учета их влияния. Обоснована возможность использования относительных величин в геодезии, которые не только задают форму объекта (сети), но также являются эффективным инструментом устранения систематических

погрешностей линейных, относительно измеряемых величин. Главное преимущество такого подхода состоит в том, что они являются однородными, в том смысле, что при делении и умножении их на одно и то же число, форма объекта (сети) никак не меняется. Выявлена целесообразность использования относительных величин при деформационном мониторинге объектов и земной поверхности. Описана технология перехода от абсолютных величин, принятых в геодезии, к относительным безразмерным и рассмотрена возможность осуществления обратного перехода к абсолютным размерным величинам.

Во второй главе изложена технология применения однородных элементов при получении и обработке геодезических измерений. Показано, что измерения в геодезической сети, могут быть представлены в виде относительных величин, путем нормирования всех измеренных величин относительно, например, первой. Показаны новые пути решения различных геодезических задач. Проиллюстрирована технология оценки эквивалентности точностей линейных и угловых измерений, на основании этого предложена и подробно изложена технология совместного уравнивания линейных и угловых измерений.

В третьей главе предложена методика оценки стабильности геодезической сети, обоснованная принципами ее геометрического подобия. Сформулированы условия стабильности сети, которые базируются на трех теоремах подобия. Согласно одной из этих теорем, именно безразмерные комплексы (коэффициенты отношений) задают состояние модели (сети) в рассматриваемый момент времени, а значит, их и можно использовать при анализе стабильности сети. Показана целесообразность использования данной технологии для выявления равномерных и неравномерных деформаций.

В четвертой главе выполнена апробация предложенной технологии получения и обработки данных натурных наблюдений линейно-угловой сети.

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

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Использование относительных, нормированных величин является весьма эффективным средством исключения

систематических ошибок из результатов измерений при построении геодезических сетей любого назначения.

Как правило, в геодезической практике, все результаты измерений представляют в виде абсолютных (размерных) величин. Однако, они также могут быть представлены в относительных (безразмерных) величинах. Для того чтобы перейти от абсолютных величин к относительным необходимо выполнить нормирование измеренных величин относительно какой-то из них, принятой за базовую. В общем случае это выражается уравнением вида (1):

$$K_i = \frac{x_i}{x_1} \quad (1)$$

где x_i – результаты измерений одноимённых величин (сравниваемая величина), x_1 – величина, принятая за базисную (основание сравнения). В качестве базисной можно использовать и любую другую из величин, измеренных тем же прибором и при тех же внешних условиях наблюдений. Кроме того, необходимо обеспечить условие однозначности, чтобы выделить из множества подобных систем одну. В качестве такого условия в геодезии можно принять некоторый базис.

Относительные величины K_i принято называть коэффициентами отношений. Именно они позволяют задать внутренний масштаб модели (сети), органически связанный с системой, в которой выполняются измерения. При таком подходе к измерениям в геодезии, сеть рассматривается как модель, а измеренные в ней углы и расстояния, выраженные в относительных величинах, рассматриваются как однородные элементы, описывающие ее форму.

На примере решения простейших геодезических задач доказано, что переход от абсолютных величин к коэффициентам их отношений позволяет учитывать систематические ошибки, линейные относительно измеряемых величин, а в случае равенства расстояний и нелинейные. Получены новые формулы решения известных задач. В частности, решение линейной засечки из двух треугольников с учетом влияния систематической ошибки реализовано в программном коде (свидетельство о госрегистрации № 2020611726).

Предложен также другой вариант решения линейной засечки – из одного треугольника, при условии измерения стороны между двумя исходными точками (l^*). Это обеспечивает оценку соотношений всех сторон при постоянстве внешних условий измерений, а для

вычисления искоемых координат x , y точки P необходимо использовать систему уравнений (2):

$$\begin{cases} K_0^2 [(x_p - x_A)^2 + (y_p - y_A)^2] - K_1^2 \cdot l^{*2} = 0 \\ K_0^2 [(x_p - x_B)^2 + (y_p - y_B)^2] - K_2^2 \cdot l^{*2} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где $x_A, y_A; x_B, y_B$ – координаты исходных точек, $K_0=l_0/l_0=1$, $K_1=l_1/l_0$, $K_2=l_2/l_0$, l_0 – результат измерения исходной стороны А-В, l_1, l_2 – измеренные расстояния до определяемой точки, l^* – расстояние между исходными точками, полученное по результатам решения обратной геодезической задачи. Из формулы 2 в неявном виде коэффициенту K_0 , относящемуся к исходной стороне, ставится в соответствие её длина l^* , то есть, можно осуществить переход от относительных величин к абсолютным. Заметим, что при таком подходе в равностороннем треугольнике будут исключены все систематические ошибки.

При использовании относительных величин в непосредственных измерениях линейных величин совершенно неважно, какой мерный прибор применялся и в каких единицах получены результаты. Пропадает также необходимость и в компарировании прибора. Важно только, чтобы в процессе выполнении работ соблюдалось постоянство внешних условий. Как это влияет на технологию обработки результатов измерений продемонстрировано на примере определения координат точек теодолитного хода. В этом случае исправленные приращения координат можно вычислять по формулам (3):

$$\Delta x'_i = \frac{(x_k - x_n) \cdot K_{xi}}{\sum_1^n \Delta K_{xn}}, \quad \Delta y'_i = \frac{(y_k - y_n) \cdot K_{yi}}{\sum_1^n \Delta K_{yn}} \quad (3)$$

где $\Delta K_{xi} = K_i \cdot \cos \alpha_{in}$, $\Delta K_{yi} = K_i \cdot \sin \alpha_{in}$, $K_i = \frac{D_i}{D_1}$ – коэффициенты отношений измеренных расстояний, D_i – измеренные расстояния, α_{in} – исправленное значение дирекционного угла.

Изложена технология получения и обработки результатов измерений сети трилатерации. Сеть в таком случае необходимо строить не в виде треугольников (тогда число неизвестных будет на одно больше числа уравнений (4)), а в виде четырёхугольников в соответствии с рисунком 1, с измерением всех сторон, в том числе диагональных. При этом для рассматриваемого фрагмента число уравнений вида (4) будет равно числу неизвестных.

$$K_3^2 [(x_A - x_1)^2 + (y_A - y_1)^2] - K_1^2 [(x_B - x_1)^2 + (y_B - y_1)^2] = 0 \quad (4)$$

где $K_3=l_3/l_1$, $K_1=l_1/l_1=1$.

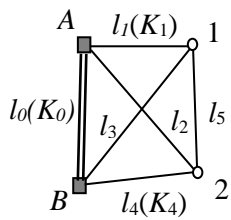


Рисунок 1 – Фрагмент сети трилатерации

Если, например, к стороне 1-2 присоединить ещё один четырёхугольник, то можно будет составить 9 уравнений, появляется одно избыточное. Каждый последующий четырёхугольник увеличивает число избыточных уравнений на единицу. Измерение исходной стороны, например А-В также добавляет одно уравнение. При этом в процессе выполнения полевых работ важно следить за постоянством условий измерений и, если

это невозможно (в силу, например большого их объёма), сеть следует разделить на участки (на рисунке 2 показаны пунктиром), в пределах которых обеспечивалось бы такое постоянство. При этом для сохра-

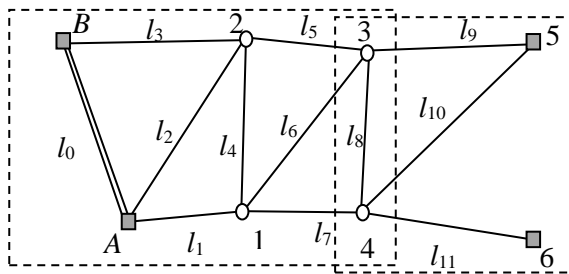


Рисунок 2 – Схема сети трилатерации

нения подобия хотя бы одна сторона предыдущего участка должна быть измерена повторно, в условиях измерений последующего (например, сторона 3-4). Координаты точек сети трилатерации могут быть получены при уравнивании коэффициентов отношений измеренных расстояний параметрическим способом обобщённого метода наименьших квадратов.

Предложенная технология была опробована на примере обработки сети трилатерации (рисунок 2), полученной по результатам моделирования. При этом в качестве измеренных величин использовались вычисленные по результатам решения обратных геодезических задач расстояния, искаженные влиянием как систематической, так и

случайной ошибок. Причем величина систематической ошибки превосходила величину случайной в 4 раза, и в первом случае все расстояния оказались длиннее истинных в 1,0003 раза, а во втором – в результате неучтенной систематической ошибки, все расстояния оказались больше истинных на 40 мм. Результаты уравнивания представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Сравнение истинных координат определяемых точек и координат, полученных по результатам уравнивания двумя способами

№	Истинные координат определяемых точек		Уравненные координаты (традиционная методика)				Уравненные координаты (предлагаемая методика)	
			С систематической ошибкой		Нулевая систематическая ошибка			
	X,м	Y,м	X,м	Y,м	X,м	Y,м	X,м	Y,м
1	240,000	520,000	239,968	519,999	239,997	520,001	239,997	520,001
2	340,000	450,000	340,017	449,997	339,994	449,993	339,993	449,993
3	350,000	570,000	350,020	569,991	350,004	569,990	350,004	569,990
4	250,000	630,000	249,981	629,999	250,007	630,004	250,008	630,005

Данные таблицы 1 показывают, что в результате уравнивания по обобщенному методу наименьших квадратов с использованием относительных величин оказались полностью исключены систематические ошибки линейные относительно измеренных расстояний.

Таблица 2 – Сравнение истинных координат определяемых точек и координат, полученных по результатам уравнивания двумя способами. Расстояния между точками примерно равны

№	Истинные координат определяемых точек		Уравненные координаты (традиционная методика)				Уравненные координаты (предлагаемая методика)	
			С систематической ошибкой		Нулевая систематическая ошибка			
	X,м	Y,м	X,м	Y,м	X,м	Y,м	X,м	Y,м
1	240,000	520,000	239,969	519,996	239,997	520,001	240,002	519,999
2	340,000	450,000	340,026	449,997	339,994	449,993	339,998	449,993
3	350,000	570,000	350,024	569,991	350,004	569,990	350,006	569,991
4	250,000	630,000	249,978	629,997	250,007	630,004	250,009	630,004

Исходя из данных, представленных в таблице 2, можно сделать вывод, что в случае равенства расстояний предлагаемая технология позволяет исключить и нелинейные систематические ошибки. Таким образом, доказана эффективность применения данной технологии в сравнении с традиционным подходом, с точки зрения борьбы с неучтенными систематическими ошибками.

2. Определение координат точек геодезической сети возможно по коэффициентам отношений линейных и угловых величин, вычисленных и уравненных по результатам измерений, в том числе и неравноточных.

Если звено линейно-угловой сети представляет собой треугольник, то и угловые измерения также могут быть представлены в виде относительных величин. Согласно теореме синусов, отношения синусов измеренных углов треугольника также являются коэффициентами отношений противолежащих сторон. Таким образом, каждая сторона треугольника будет иметь два коэффициента отношений – один, полученный по результатам линейных измерений, второй – как отношение синусов измеренных углов. А раз так, то можно полагать, что угловые и линейные измерения эквивалентны по точности, если относительные ошибки определения коэффициентов друг другу равны. То есть выполняется соотношение (5):

$$\frac{m_l}{l} = \frac{m_{\sin\beta}}{\sin\beta} \quad (5)$$

где l – измеренное расстояние, β – противолежащий измеренный угол, $m_{\sin\beta}$ – ошибка определения синуса угла β , m_l – ошибка определения расстояний.

Следовательно, для того чтобы угловые и линейные измерения были эквиваленты по точности, необходимо чтобы при постоянстве ошибки линейных измерений, точность определения угла удовлетворяла равенству (6):

$$m_\beta = \rho'' \frac{m_l}{l} \operatorname{tg}\beta \quad (6)$$

где l – измеренное расстояние и β – противолежащий измеренный угол, ρ'' – значение одного радиана в секундах.

Условие (6) целесообразно проверять как при проектировании линейно-угловой сети, так и при совместной обработке линейных и угловых измерений. И если оно соблюдается, то полученные по результатам угловых и линейных измерений коэффициенты отношений,

можно обрабатывать как равноточные величины. В случаях, когда точность угловых измерений оказалась выше, можно от коэффициентов отношений, полученных по соотношениям измеренных расстояний отказаться, либо вводить веса, как это принято в традиционном уравнивании. При этом вес измерения будет зависеть от ошибки определения коэффициента отношений, которая может быть вычислена, например, по формуле (7) для линейных измерений, а для угловых по формуле (8):

$$m_{t_3} = \frac{\sqrt{l_1^2 + l_3^2}}{l_1^2} m_l \quad (7)$$

$$m_{k_3} = \frac{\sqrt{\sin^2 \beta_1 \cos^2 \beta_3 + \sin^2 \beta_3 \cos^2 \beta_1}}{\sin^2 \beta_1} m_\beta \quad (8)$$

где l_1, l_2, l_3 – измеренные расстояния; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – измеренные углы.

Доказана необходимость использования предложенной технологии при совместном уравнивании линейных и угловых измерений на примере уравнивания смоделированной линейно-угловой сети, в которой в качестве измеренных расстояний и углов приняты их истинные значения, искаженные влиянием случайной ошибки измерений, а в длины линий также введена систематическая ошибка. При этом сеть была спроектирована таким образом, чтобы условие эквивалентности (6) соблюдалось. Результаты уравнивания по традиционному методу и по предлагаемой технологии представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение истинных координат определяемых точек и координат, полученных по результатам уравнивания двумя способами

№	Истинные координат определяемых точек		Уравненные координаты (традиционная методика)				Уравненные координаты (предлагаемая методика)	
			С систематической ошибкой		Нулевая систематическая ошибка			
	X, м	Y, м	X, м	Y, м	X, м	Y, м	X, м	Y, м
1	240,000	520,000	239,976	519,998	239,996	519,997	240,004	520,000
2	340,000	450,000	340,014	449,995	339,996	449,995	339,990	450,002
3	350,000	570,000	350,017	569,993	350,000	569,993	349,993	569,995
4	250,000	630,000	249,983	630,002	250,003	630,002	250,012	630,006

Анализируя данные, полученные в таблице 3, приходим к выводу, что предлагаемая методика позволила не только правильно организовать

процедуру совместного уравнивания коэффициентов отношений, полученных по результатам линейных и угловых измерений, но и исключить влияние систематической ошибки, линейной относительно измеряемых расстояний.

Процедура уравнивания неравноточных величин (коэффициентов отношений, полученных по результатам измерений линейных и угловых величин) проиллюстрирована на примере обработки экспериментальных данных. В таблице 4 показаны результаты уравнивания по предлагаемой методике и по традиционной технологии.

Таблица 4 – Сравнение полученных координат определяемых точек при уравнивании экспериментальной линейно-угловой сети

№	Уравнивание относительных величин		Традиционная технология уравнивания <i>Credo</i>	
	X, м	Y, м	X, м	Y, м
0	670485,017	692579,164	670485,018	692579,164
3	670549,335	692637,480	670549,337	692637,478
4	670682,928	692633,317	670682,929	692633,315
5	670639,053	692696,043	670639,052	692696,044
6	670762,718	692659,976	670762,720	692659,975

Представленные в таблице 4 результаты позволяют сделать вывод о корректности предлагаемой технологии уравнивания относительных величин, полученных по результатам линейных и угловых измерений, так как она позволяет получить практически те же результаты (расхождения координат определяемых точек по двум методам не превосходит 2м), что и при традиционном уравнивании.

Таким образом, доказано, что относительные величины могут использоваться для грамотного сопоставления линейных измерений – угловым, что позволяет правильно организовать процедуру обработки измерений по коэффициентам отношений.

3. Применение при решении задач деформационного мониторинга коэффициентов отношений линейно-угловых величин, обеспечивает контроль деформаций при вариативности приборов и преемственность конечных результатов.

Согласно предлагаемой технологии, сеть следует считать стабильной, если коэффициенты подобия сходственных величин подобны и соответственно равны для всех элементов сети. Кроме того, необходимо чтобы условие однозначности, позволяющее выделить из множества подобных систем только одну, в рамках

рассматриваемых циклов наблюдений были не только подобны, но и численно равны. Математически первое условие представляется отношением вида (9):

$$m_1 = \frac{K_1^I}{K_1^{II}} = idem, \text{ (то есть } m_1 = \frac{K_1^I}{K_1^{II}} \cdot \dots = m_n = \frac{K_n^I}{K_n^{II}} \text{)} \quad (9)$$

где m – коэффициент подобия, одинаковый для всех одноименных элементов сети, K_1^I K_1^{II} – коэффициенты отношений, значения одноименной безразмерной величины в первом и втором циклах наблюдений (сходственные величины), *idem* – «соответственно одинаковые для всех рассматриваемых процессов».

В качестве условия однозначности может выступать, базис, причем если он – один из элементов объекта, то речь может идти, только о неизменности формы. Если он с объектом не связан и стабилен во времени, то будут оценены равномерные расширения и сжатия.

В работе использование предложенного подхода рассмотрено на примере оценки стабильности бортов карьера, по результатам линейных измерений и нивелирования вдоль профильных линий. Выполнено сравнение результатов обработки измерений по традиционной методике и с использованием элементов теории подобия. Измерения в двух циклах выполнялись двумя разными тахеометрами (постоянная дальнометра первого +98 мм, а атмосферная поправка +2 мм; для второго + 46 мм, атмосферная поправка +4 мм), но равноточными. При обработке измерений с использованием предлагаемой технологии систематические ошибки (постоянная тахеометра и атмосферная поправка) не учитывались и намеренно использовалось неверное расстояние между исходными точками, полученное по плану, с ошибкой более чем в 1 метр. Заметим, что сеть была спроектирована таким образом, что расстояния между деформационными марками были равны. При определении смещений точек по высоте использовалась известная методика тригонометрического нивелирования.

Предложенная методика оценки стабильности сети позволила выявить неравномерные деформации в плане и по высоте. А дальнейшая обработка измерений двумя способами – получить одинаковые смещения. Таким образом, предлагаемая методика анализа состояния геодезической сети и технология обработки измерений позволила не только выявить неравномерные деформации, но и получить верные смещения, даже при выполнении измерений в двух циклах приборами с разными систематическими ошибками, но равноточными.

Кроме того, она оказалась устойчива по отношению к ошибкам исходных данных и небольшим, но и не линейным, систематическим ошибкам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги выполненных исследований:

1. На основании многочисленных примеров, приведенных в данной работе, доказана эффективность применения принципа моделирования по отношению к геодезической сети, при котором её элементы определяются не самими измеренными величинами, а их отношениями, что в свою очередь, является основой для разработки новых подходов решения множества геодезических задач.

2. Разработана методика, позволяющая учитывать и исключать систематические ошибки измерений, основанная на применении относительных величин. Основное их преимущество состоит в том, что такой подход позволяет привести все измерения, выполненные в одной системе (т.е. при одних и тех же условиях наблюдений) к единому «внутреннему» масштабу, органически связанному с рассматриваемым явлением. При этом совершенно неважно знать саму величину этой ошибки, важно лишь обеспечить стабильности внешних условий в момент проведения измерений и при, необходимости делить сеть на участки, в пределах которых эта стабильности обеспечивается. Это дает большую мобильность и позволяет использовать широкий спектр приборов равной точности.

3. Предложена технология оценки эквивалентности точностей линейных и угловых измерений, основанная на использовании отношений тригонометрических функций измеренных углов и сторон треугольника, которая может применяться при проектировании линейно-угловых сетей и их дальнейшей обработке. На основании этого разработан алгоритм совместного уравнивания относительных величин, полученных по результатам линейных и угловых измерений. Доказана его применимость на основании обработки натуральных наблюдений.

4. Предложена принципиально новая методика оценки деформированного состояния при повторных измерениях, в которой расширен арсенал современных достижений, за счет использования элементов теории подобия, и рассматриваются не сами измерения, а их отношения.

5. Перспективы настоящих исследований состоят в их углублении и распространении применительно к задачам промышленной геодезии для выверки оборудования и механизмов, а также для геодинамического и деформационного мониторингов.

Сформулированные и доказанные в работе положения представляют принципиально новый подход к измерениям, в связи с чем, возможное развитие исследования заключается в использовании относительных величин не только при решении широкого диапазона геодезических задач, но и применении их в любой измерительной практике.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России

1. **Губайдуллина, Р.А.** О соотношении точностей линейных и угловых измерений в линейно-угловых сетях / Р.А. Губайдуллина, Ю.Н. Корнилов. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-2-145-149 // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – Т. 64. № 2. – С. 145-149.

2. Корнилов, Ю.Н. Использование относительных величин для исключения систематических погрешностей геодезических измерений / Ю.Н. Корнилов, **Р.А. Губайдуллина** // Маркшейдерский вестник. – 2020. – № 3. – С. 17-24.

В изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus

3. **Gubaydullina, R.** The application of similarity theory elements in geodesy / R. Gubaydullina, Yu. N. Kornilov. – DOI:10.1201/9781003014577-23 // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. – CRC Press. – 2019. – Vol. 1. – P. 183-188.

В прочих изданиях

4. Корнилов, Ю.Н. Принцип отношений (подобия) при измерении и определении координат точек / Ю.Н. Корнилов, **Р.А. Губайдуллина** // Маркшейдерский вестник. – 2019. – № 1. – С. 34-38.

5. **Губайдуллина, Р.А.** Использование элементов теории подобия в геодезии / Р.А. Губайдуллина, Ю.Н. Корнилов // Современные проблемы инженерной геодезии. Труды Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 23-27.

6. **Gubaydullina, R.A.** The principle of homogeneous elements for solving deformation monitoring problem / R.A. Gubaydullina, Yu. N. Kornilov // Abstract book. XII Russian-German Raw Materials Forum: Youth Day. – 2019. – P. 57-59.

7. **Gubaydullina, R.** The application of similarity theory elements in geodesy / R. Gubaydullina, Yu. N. Kornilov // Scientific conference abstracts. Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. – 2019. – P. 84.

8. **Gubaydullina, R.** Deformation monitoring of open pit mine slopes using an unmanned aerial vehicle (UAV) system / R. Gubaydullina, M. Mustafin // Proceeding of the 2018 European Rock Mechanics Symposium – EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. – CRC Press. – 2018. – Vol. 2. – P. 1639 – 1644.

9. **Губайдуллина, Р.А.** Мониторинг деформаций карьерных откосов аэрофотосъемочной аппаратурой с беспилотных летательных комплексов / Ю.Н. Корнилов, Р.А. Губайдуллина // Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопрограммной информации и системы подготовки специалистов в области геодезического и навигационного обеспечения. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией д.т.н., профессора В.Ф. Алексева. – 2018. – С. 386-391.

10. **Gubaydullina, R.** The use of unmanned aerial vehicles for deformation monitoring of quarry slopes / R. Gubaydullina // Scientific Reports on Resource Issues 2018. – Medienzentrum der TU Bergakademie Freiberg. – 2018. – P. 58-63.

11. **Губайдуллина, Р.А.** Особенности использования метода аэрофототопографической съемки при деформационном мониторинге / Р.А. Губайдуллина // Тенденции развития науки и образования. – НИЦ «Л-Журнал». – №45. – 2018. – С. 41-44.

Свидетельство:

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020611726 Российская Федерация. Программа для определения координат точки из линейной засечки с учетом систематических погрешностей измеряемых величин: №2020610158; заявл. 10.01.20; опубл. 06.02.2020, Бюл. № 2 / Корнилов Ю.Н., **Губайдуллина Р.А.** // заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 1 с.