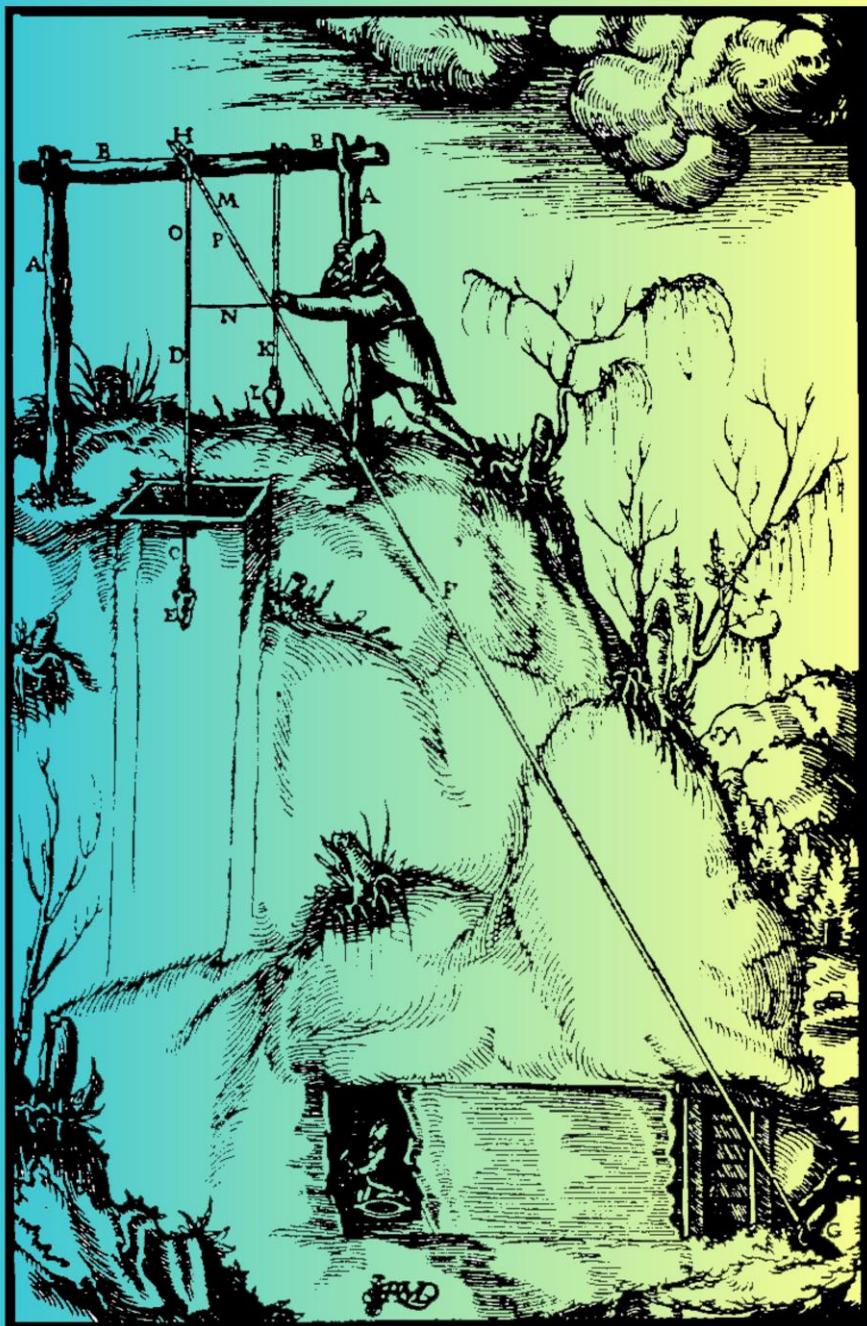


Маркшейдерское дело



Часть I

С.В. Смолич
Б.А. Просекин

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Забайкальский государственный университет

С. В. Смолич
Б. А. Просекин

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО

Часть 1

Учебное пособие

Чита
ЗабГУ
2019

УДК 622.1 (075)
ББК 33.12 я 75
С 512

Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом
Забайкальского государственного университета

Рецензенты

Д. Д. Шестернев, канд. геол.-минерал. наук, гл. геолог,
ОАО «Забайкальский трест
инженерно-строительных изысканий»
Д. Л. Авгулевич, канд. геол.-минерал. наук, гл. специалист
по инженерным изысканиям, АО «ПитерГОРпроект»

Смолич, Сергей Вениаминович

С 512 Маркшейдерское дело : учебное пособие / С. В. Смолич, Б. А. Просекин ; Забайкальский государственный университет. – Чита : ЗабГУ, 2019.
ISBN 978-5-9293-2385-0

Ч. 1. – 2019. – 187 с.

ISBN 978-5-9293-2386-7

В учебном пособии рассматриваются: общие понятия дисциплины, методы маркшейдерских исследований, используемые приборы и оборудование, порядок измерений, а также изложены теоретические основы и приведены примеры практического использования маркшейдерских работ при подземной и открытой разработке месторождений полезных ископаемых.

В основу издания положены учебные программы курсов «Дистанционные методы зондирования Земли» и «Проект производства маркшейдерских работ» для студентов направлений 21.05.02, 21.05.03 и 21.05.04 горно-геологического профиля.

УДК 622.1 (075)
ББК 33.12 я 75

ISBN 978-5-9293-2386-7 (Ч. 1)
ISBN 978-5-9293-2385-0

© Забайкальский государственный
университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Предисловие | 5 |
| Введение | 6 |
| Глава 1. Проект производства маркшейдерских работ | 7 |
| 1.1. Разработка ППМР на этапах разведки и разработки месторождений полезных ископаемых | 11 |
| 1.2. Проект производства маркшейдерских работ на этапе строительства горного предприятия | 16 |
| 1.3. Проект маркшейдерских работ при строительстве технологического комплекса на промышленной площадке | 28 |
| 1.3.1. Проект построения строительной сетки | 28 |
| 1.4. Проект маркшейдерских работ при монтаже армировки ствола шахты | 32 |
| 1.4.1. Допустимые отклонения геометрических параметров при строительномонтажных работах | 35 |
| 1.5. Основные положения проекта построения маркшейдерской опорной сети на поверхности | 40 |
| 1.6. Основные положения проекта построения подземной маркшейдерской опорной сети | 44 |
| 1.7. Проект производства маркшейдерских работ для проведения выработок встречными забоями | 50 |
| 1.7.1. Методика производства маркшейдерских работ | 51 |
| 1.8. Проект производства маркшейдерских работ под наблюдением за сдвижением при подземной разработке рудных месторождений | 54 |
| 1.9. Проект производства маркшейдерских работ при ведении работ в опасных зонах | 56 |
| 1.10. Проект производства работ | 59 |
| на действующем горном предприятии | 59 |
| 1.11. Аудит маркшейдерских работ | 62 |
| на действующем горном предприятии | 62 |
| Глава 2. Особенности работы с электронными тахеометрами на станции | 65 |
| 2.1. Оценка погрешности ориентирования тахеометра в пространстве при наведении его на точку визирования ... | 65 |
| 2.2. Погрешность определения координат точек базовой стороны | 67 |
| 2.3. Погрешность центрирования прибора | 70 |
| 2.4. Погрешность визирования | 78 |
| 2.5. Учёт погрешности определения координат базовой стороны | 83 |
| 2.6. Погрешность ориентирования тахеометра на линии визирования | 84 |

| | |
|---|------------|
| 2.7. Погрешность измерения угла в полигонометрическом ходе | 87 |
| 2.8. Погрешности разбивочных работ | 94 |
| Глава 3. Особенности ГНСС (GNSS)-технологий | 104 |
| 3.1. Проект производства маркшейдерских работ с применением глобальных спутниковых систем | 104 |
| 3.2. Целевое назначение проектируемых работ | 112 |
| 3.3. Краткая физико-географическая характеристика района работ | 112 |
| 3.4. Сведения о топографо-геодезической обеспеченности района работ | 112 |
| 3.5. Обоснование необходимости и способов построения планово-высотной основы и выбор масштаба съёмки | 113 |
| 3.5.1. Выбор оборудования и метода съёмки | 113 |
| 3.5.2. О конфигурации опорных геодезических сетей, создаваемых с применением технологии ГНСС | 124 |
| 3.5.3. О необходимости иметь пять базовых опорных пунктов | 128 |
| 3.5.4. Предрасчёт погрешности определения координат пунктов геодезической сети, полученных с помощью ГНСС-технологий | 134 |
| 3.6. Организация и сроки выполнения работ, мероприятия по технике безопасности и охране труда | 160 |
| 3.7. Перечень топографо-геодезических, картографических и других материалов, подлежащих сдаче по окончании работ | 161 |
| Глава 4. Выполнение обратных линейно-угловых засечек электронными тахеометрами | 164 |
| 4.1. Классический способ, без учёта уравнивания измерений | 165 |
| 4.2. Предрасчёт погрешности обратной линейной засечки с учётом параметрического уравнивания | 170 |
| 4.2.1. Среднеквадратическая погрешность определения плановых координат пункта, измеренного обратной линейной засечкой | 172 |
| 4.2.2. Среднеквадратическая погрешность определения высотной отметки пункта, измеренного обратной линейной засечкой | 175 |
| Заключение | 181 |
| Библиографический список | 183 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

В основу учебного издания, предназначенного для студентов горно-геологических специальностей вузов, положены курсы лекций, читаемые в Забайкальском государственном университете для студентов направления «Горное дело». Горный инженер должен хорошо разбираться в горно-геологической документации, уметь читать топографические карты и планы, разрабатывать и реализовывать проекты разработки месторождений полезных ископаемых.

Данная дисциплина изучается в нескольких семестрах, как на младших курсах (разделы «Геодезия» и «Маркшейдерское обеспечение горных работ»), так и на старших курсах (разделы «Высшая геодезия» и «Дистанционное зондирование Земли»). Пособие содержит одну из наиболее важных частей этих дисциплин – составление проекта производства геодезических и маркшейдерских работ.

Рассмотрены теоретические основы маркшейдерских работ и измерений, приведены примеры практического опыта выполнения работ, связанного с различными видами маркшейдерского обеспечения горно-геологических работ.

Учитывая возросшие современные требования к информационным технологиям (мониторинг различных явлений, происходящих как на поверхности Земли, так и в её недрах), учебное издание будет полезно инженерно-техническому персоналу, чья работа требует выполнения различных маркшейдерско-геодезических измерений на местности и использования горной маркшейдерской документации.

ВВЕДЕНИЕ

Маркшейдерское дело (маркшейдерия) – это область горной науки и техники, которая включает совокупность методов, способов и средств, применяемых при разведке месторождений полезных ископаемых, проектировании, строительстве и эксплуатации горных предприятий и других, связанных с ними объектов. О маркшейдерии до сих пор часто говорят как об искусстве. Дело в том, что слова «маркшейдерское дело» или «маркшейдерия» произошли от нем. *Markscheidenkunst* – в дословном переводе это означает «марки устанавливать искусство», в русской транскрипции – «искусство устанавливать границы».

В предлагаемом учебном пособии сделана попытка изложить в доступной форме необходимый перечень базисных положений маркшейдерии с точки зрения понимания методов измерений при использовании современной приборной базы и программного обеспечения. На основании этих представлений у студентов должно сложиться системное понимание основ некоторых маркшейдерских дисциплин и особенностей методов практической реализации при использовании современного геодезического и маркшейдерского оборудования, подкреплённого компьютерными программами с внедрением интеллектуальных методов обработки данных измерений на местности и построением по ним трёхмерных моделей месторождения и горных выработок (3D-моделей).

В первой части данного пособия представлен материал по проектированию маркшейдерских работ и предрасчёту их точности при выборе геодезических приборов, методов и техники для изысканий и строительства новых или реконструкции и эксплуатации существующих инженерных сооружений, а также для установки и монтажа сложного оборудования промышленных предприятий.

Глава 1

ПРОЕКТ ПРОИЗВОДСТВА МАРКШЕЙДЕРСКИХ РАБОТ

Совершенствование геодезических приборов и инструментов, широкое внедрение цифровых способов получения исходных данных, специализированные программные продукты обработки и хранения данных революционно влияют на производство маркшейдерских работ на горных предприятиях.

Деятельность маркшейдерских служб на горных предприятиях определяется следующими основными нормативными документами, среди них:

- Закон Российской Федерации «О недрах» [19];
- постановление о лицензировании производства маркшейдерских работ (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 28.03.2012 г. № 257) [24];
- РД 07-408-01. Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр»;
- РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ» [31];
- РД 07-604-03. Инструкция по маркшейдерскому учёту объёмов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом» [32];
- РД 07-226-98. Инструкция по производству геодезическо-маркшейдерских работ при строительстве коммунальных тоннелей и инженерных коммуникаций подземным способом;
- РД 07-113-96. Инструкция о порядке утверждения мер охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок;

- ПБ 03-428-02. Правила безопасности при строительстве подземных сооружений;
- ФНП «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твёрдых полезных ископаемых» [16; 28];
- ФНП «Правила безопасности при разработке угольных месторождений открытым способом» [29];
- ПБ 07-601-03. Правила охраны недр [30].

Существующая нормативная база, регламентирующая производство маркшейдерских работ, начинает отставать от современных высоко технологичных способов съёмки, обработки и хранения данных. Принимая во внимание это обстоятельство, маркшейдерские службы горных предприятий вынуждены переходить на разработку *проектов производства маркшейдерских работ*, учитывающих конкретные условия применения современных цифровых технологий. Такой подход не противоречит требованиям вышеуказанных нормативных документов.

Так, согласно постановлению «О лицензировании производства маркшейдерских работ», утверждённому Правительством РФ от 28.03.2012 г. № 257 [24] (п. 5, подп. «е»), лицензионным требованием при осуществлении деятельности по производству маркшейдерских работ является проведение указанных работ в соответствии с согласованной в установленном порядке *проектной документацией на производство маркшейдерских работ*.

Сложность разработки *проекта маркшейдерских работ* для маркшейдерских служб горных предприятий связана с недостаточной методической базой. Разделы технических проектов, описывающие деятельность геолого-маркшейдерских служб, не охватывают весь перечень вопросов маркшейдерского обеспечения и тем более связанных с внедрением на производстве цифровых технологий.

Единственным методическим документом в этой области являются «Рекомендации по подготовке проектной документации на производство маркшейдерских работ», разработанные Научным центром геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского государственного горного

института имени Г. В. Плеханова [33]. Рекомендации формируют общий подход к составлению проектной документации на производство маркшейдерских работ при строительстве, эксплуатации и ликвидации (консервации) горных, нефтегазодобывающих, специализированных и других организаций, имеющих лицензии на производство маркшейдерских работ. Рекомендации разработаны на основе анализа нормативных правовых актов, регламентирующих маркшейдерское обеспечение производства работ.

Под проектной документацией на производство маркшейдерских работ следует понимать документ регламентирующего характера, содержащий:

- описание состава (объёмов) маркшейдерских работ по видам (направлениям);
- допустимые погрешности тех или иных измерений;
- методики выполнения этих работ с оценкой их точности;
- методы их контроля;
- сроки исполнения;
- состав отчётной документации в конкретных условиях недропользования;
- виды и состав графической документации, включая традиционный бумажный и электронный способы её хранения;
- организация баз данных цифровых измерительных приборов, способы обработки и хранения цифровой информации.

В зависимости от выданной лицензии на право пользования участка недр и условий, указанных в лицензионном соглашении, исходя из стадии разработки месторождения возможны различные подходы к разработке проекта производства маркшейдерских работ (далее – ППМР), представленные на рис. 1.1.

Проект может быть разработан как один из разделов в составе технического проекта разработки месторождения, может быть выполнен и как комплексный проект, охватывающий весь комплекс маркшейдерских работ на горном предприятии, и как отдельный документ на локальные виды маркшейдерских работ. Возможно применение типовых решений.



Рис. 1.1. Типовые подходы к разработке проекта производства маркшейдерских работ

Проект разрабатывается на основе проектной документации на пользование участками недр (проект организации строительства) в соответствии с техническим заданием на проектирование.

Особое внимание при разработке проекта необходимо уделить обоснованию практического использования инновационных разработок в области маркшейдерского дела:

- усовершенствованные методы производства маркшейдерских работ;
- применение новых приборов и средств измерений;
- внедрение эффективных систем контроля производства работ, не регламентируемых требованиями действующих нормативных документов;

– применение в решении маркшейдерских задач несертифицированных программных продуктов, разработанных силами организации.

1.1. Разработка ППМР на этапах разведки и разработки месторождений полезных ископаемых

Все горные предприятия проходят закономерный цикл начала и окончания производства горных работ, связанный с поиском, открытием и разведкой полезного ископаемого, разработкой и его полным извлечением из недр земли.

Задачи маркшейдерских служб напрямую зависят от этапов развития горных работ.

На этапе производства геологоразведочных работ необходимо проведение топографо-геодезических работ на территории, охваченной поисками и разведкой полезных ископаемых.

Основными задачами топографо-геодезического обеспечения геологоразведочных работ являются:

- своевременное и качественное обеспечение геологоразведочных организаций и их структурных подразделений топографическими картами (планами), аэрокосмическими материалами, топографическими основами специальных (геологических, геофизических, гидрогеологических, инженерно-геологических и др.) карт;
- подготовка на местности сети точек геологоразведочных наблюдений и соответствующее (геодезическое, маркшейдерское, инженерно-геодезическое и т. п.) сопровождение этих наблюдений в процессе геологоразведочного производства;
- определение планово-высотного положения устьев скважин, горных выработок, геофизических и других пунктов и точек (в дальнейшем именуемых объектами или пунктами геологоразведочных наблюдений).

В соответствии с указанными задачами выполняются:

- создание геодезической основы для геологоразведочных работ;

- топографические съёмки в масштабах 1:5000 и крупнее;
- разбивочно-привязочные работы;
- маркшейдерские работы;
- создание топографических основ;
- разные сопутствующие работы.

В соответствии с требованиями «Инструкции по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ (утв. Министерством природных ресурсов РФ 03.12.1996 г.) [9] топографо-геодезические работы проводятся, как правило, в Государственной системе координат (1942 г.) и в Балтийской системе высот (1977 г.). Прямоугольные координаты геодезических пунктов и объектов геологоразведочных наблюдений вычисляются в шести- или трёхградусных зонах проекции Гаусса.

При удалении участка на расстояние более 10 км от пунктов Государственных геодезической и нивелирной сетей допускается применение местной системы координат и высот – единой для всего комплекса геологоразведочных работ на данном участке. Исходные пункты и данные местной системы координат и высот определяются любыми средствами и методами, обеспечивающими заданную точность проектируемых работ, а также переход к Государственной системе координат и высот.

К маркшейдерским работам относятся:

- перенесение на местность проектного положения и плано-высотная привязка канав, траншей, неглубоких шурфов и других мелких горных выработок на земной поверхности, а также обеспечение их проходки по заданному направлению и с проектными параметрами;

- маркшейдерское обеспечение строительства технологических комплексов на шахтной поверхности, сооружения шахтных стволов и монтажа подъёмных установок, проходки капитальных горных выработок по заданному направлению и их эксплуатации, а также построение наземных и подземных маркшейдерских опорных и съёмочных сетей;

- перенесение на местность проектного положения и плано-высотная привязка мелких горных выработок выполняются согласно требованиям данной Инструкции;

- остальные маркшейдерские работы, приведённые в этом пункте, выполняются в установленном порядке с соблюдением требований «Инструкции по производству маркшейдерских работ» [31].

Для выноски объектов геологоразведочных работ необходимо руководствоваться требованием «Инструкции по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ» [9].

Исходными для разбивочно-привязочных работ могут служить любые пункты (точки) с известными координатами и высотами при условии, что совокупная погрешность их положения и метода привязки не превысит величин, приведённых в таблице данной инструкции.

Нормы точности, изложенные в п. 2.5.1, табл. 2.1, характеризуются средними квадратическими погрешностями (СКП) определения планово-высотного положения объектов геологоразведочных наблюдений относительно пунктов Государственных геодезической и нивелирной сетей, а в случаях применения местной системы координат и высот – относительно исходных пунктов этой системы [Там же].

Средняя квадратическая погрешность перенесения в натуру проектного положения объектов геологоразведочных наблюдений, за исключением объектов геофизических наблюдений, не должна превышать удвоенного значения СКП их привязки. Перенесение в натуру проектного положения геофизических профилей или отдельных пунктов (точек) осуществляется с точностью их плановой привязки.

Перенесение в натуру или смещение на местности от проектного положения объектов геологоразведочных наблюдений производится по письменному распоряжению руководителя геологоразведочных работ и оформляется актом, передаваемым непосредственным исполнителям работ.

Отметки устьев стационарных гидрорежимных скважин определяются от ближайших пунктов Государственной нивелирной сети с СКП не более 10 см.

При геологической съёмке и поисково-разведочных работах, согласно данной инструкции, на твёрдые ископаемые должны соблюдаться условия, приведённые в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Нормы точности для определения положения
объектов геологоразведочных работ**

| <i>Стадии (подстадии) геологоразведочных работ</i> | <i>СКП определения положения объектов геологических наблюдений, м</i> | |
|--|---|------------------|
| | <i>в плане</i> | <i>по высоте</i> |
| Геологическая съёмка, глубинное геологическое картирование и общие поиски с составлением отчётных карт масштабов: 1:100 000 и мельче | 80(100) | 10(20) |
| 1:50 000 | 40(50) | 5(10) |
| 1:25000 | 20(25) | 2(3) |
| Детальные поиски, поисково-оценочные работы и предварительная разведка с составлением отчётных карт масштаба 1:10 000 | 5 | 1(2) |
| Поисково-оценочные работы, предварительная и детальная разведки с составлением отчётных карт масштабов 1:5000 и крупнее | 2 | 0,5 |

При поисках и разведке нефтяных и газовых месторождений должны соблюдаться условия, приведённые в табл. 1.2.

Таблица 1.2

**Нормы точности определения устьев скважин
для нефтяных и газовых месторождений**

| <i>Вид (категория) скважин</i> | <i>Предельная СКП определения положения устья скважин, м</i> | |
|--|--|------------------|
| | <i>в плане</i> | <i>по высоте</i> |
| Опорные и параметрические | 100 | 5,0 |
| Структурные и поисковые | 30 | 1,0 |
| Разведочные | 12 | 0,5 |
| В том числе на эксплуатационных площадях | 4 | 0,3 |

Определение плановых координат и высот объектов геологических наблюдений на месторождениях твёрдых полезных ископаемых на стадиях разведки эксплуатируемого месторождения в пределах горного отвода и эксплуатационной разведки, а также при проходке тяжёлых выработок (шахт, штолен) и скважин, проектные глубины которых достигают горизонтов подземных выработок, выполняется в соответствии с требованиями «Инструкции по производству маркшейдерских работ» [31].

Топографическую съёмку поверхности проводят как правило тахеометрическим способом. Возможно применение современных инновационных способов съёмки (лазерное сканирование, аэрофотосъёмка с квадрокоптеров) на основе локального проекта производства маркшейдерских работ с обоснованием допустимых погрешностей измерений.

Тахеометрическую съёмку выполняют теодолитами типа Т30, Т15, авторедукционными или электронными тахеометрами.

При съёмке теодолитами и редукционными тахеометрами отсчёты по горизонтальному кругу разрешается округлять до десятков минут.

Расстояние от инструмента до пикета принимают не более 150, 200 и 300 м при съёмке бровок уступов и других нечётких контуров в масштабах 1:1000, 1:2000 и 1:5000 соответственно; при съёмке теодолитом с 25-кратным и более увеличением зрительной трубы расстояние от инструмента до пикета принимают не более при съёмке нечётких контуров 200, 250 и 350 м соответственно. Если высота уступа (вынимаемого слоя) меньше 3 м, то расстояние до пикета принимают не более 150 м. При съёмке чётких контуров (здания, сооружения) расстояния от инструмента до пикета принимают не более 80, 100 и 150 м при съёмке в масштабах 1:1000, 1:2000 и 1:5000 соответственно.

С каждого пункта съёмочной сети (станции) для контроля набирают дополнительные пикеты, расположенные на участках, снятых с соседних пунктов. На каждой станции составляют абрис, на котором показывают положение бровок усту-

пов и других объектов съёмки. Вычисление горизонтальных проложений и высот пикетов выполняют в журнале тахеометрической съёмки или на компьютере. Высоты пикетов и горизонтальные проложения после вычисления округляют до дециметров. Погрешность нанесения пикета на план допускается не более 0,5 мм.

При выполнении съёмки электронным тахеометром предельное расстояние от прибора до отражателя устанавливают исходя из соответствующих технических характеристик прибора и условий видимости. В этом случае нанесение на план пикетов необходимо производить по их координатам. При использовании специализированного программного обеспечения и ведении документации в электронном виде положение съёмочных пикетов наносится только по координатам в автоматизированном режиме.

Проектно-сметная документация на топографо-геодезические работы разрабатывается совместно с проектом на геологоразведочные работы и является его составной частью.

Топографо-геодезическая часть геологоразведочного проекта составляется на весь комплекс полевых, камеральных и сопутствующих работ наиболее квалифицированными специалистами и подписывается техническим руководителем работ. В случае изменения проекта на геологоразведочные работы топографо-геодезическая его часть также пересматривается и после внесения соответствующих исправлений вновь подписывается техническим руководителем работ.

1.2. Проект производства маркшейдерских работ на этапе строительства горного предприятия

Маркшейдерское обеспечение во время строительства горного предприятия является неотъемлемой частью технологического процесса строительного производства и осуществляется по единому для данной строительной площадки графику, связанному со сроками выполнения общестроительных, монтажных и специальных работ.

При строительстве крупных и сложных объектов разрабатываются проекты производства маркшейдерских работ в порядке, установленном для разработки проектов производства работ.

В общем случае задачами маркшейдерского обеспечения при строительстве являются:

- проверка числовых значений разбивочных элементов и графической части проектных чертежей;
- перенесение геометрических элементов проекта в натуру;
- контроль соблюдения установленного проектом соотношения геометрических элементов сооружений;
- наблюдение за деформациями сооружений;
- производство съёмочных работ, составление и пополнение графической документации;
- учёт объёмов основных строительных работ.

Учитывая важность и ответственность разбивочных работ при переносе проекта сооружения в натуру, обусловленную большими материальными и финансовыми затратами, маркшейдерам необходимо выполнить контрольные вычисления и проверить соответствие указанных на проектных чертежах координат и размеров основных элементов сооружения с вычисленными значениями.

Проверку высотных отметок производят, используя значения уклонов и расстояний, указанных на чертежах, а также расстояний между ярусами сооружения, производя вычисления, сравнивают полученные результаты с проектными значениями.

Обычно проверка начинается с общестроительных чертежей путём простого суммирования размеров внутренних конструкций и сопоставления полученного результата с общим размером всего сооружения, в дальнейшем последовательно сравнивают соответствующие размеры и положение конструкций во всех остальных чертежах.

До начала выполнения маркшейдерско-геодезических работ на строительной площадке рабочие чертежи, используемые при разбивочных работах, должны быть проверены в части взаимной увязки размеров, координат и отметок (высот) и разрешены к производству техническим надзором заказчика.

Проектные чертежи можно принять к производству разбивочных работ только тогда, когда будет совершенно очевидна правильность всех размеров и числовых значений, а также наличие согласованности всего комплекса проектных чертежей по данному сооружению. Для получения данных, отсутствующих на проектных чертежах, но являющихся необходимыми для перенесения проекта в натуру, выполняют детальные дополнительные расчёты.

Перенесение геометрических элементов проекта в натуру выполняется для определения на местности планового и высотного положения характерных точек и плоскостей строящегося сооружения в соответствии с рабочими чертежами проекта.

Компоновка зданий и сооружений определяется проектом и на строительных чертежах задаётся осями. Относительно осей сооружения в рабочих чертежах указывают местоположение всех элементов сооружения. На строительных чертежах (рис. 1.2) оси проводят штрих пунктирными линиями и обозначают цифрами и буквами в кружках. Для обозначения продольных осей служат буквы русского алфавита, а для поперечных – арабские цифры. Оси обозначают слева направо и снизу вверх. Высоты плоскостей и отдельных точек проекта задают от условной поверхности.

В нормативных документах существует понятие «разбивочные оси». На практике разбивочные оси разделяют на главные, основные и промежуточные или детальные оси.

Главные оси – оси симметрии, их обозначают для зданий и сооружений сложной конфигурации. Для линейных сооружений это будут продольные оси этих сооружений.

Основные оси определяют форму и габариты зданий и сооружений.

Промежуточные или детальные оси – это оси отдельных элементов зданий, сооружений.

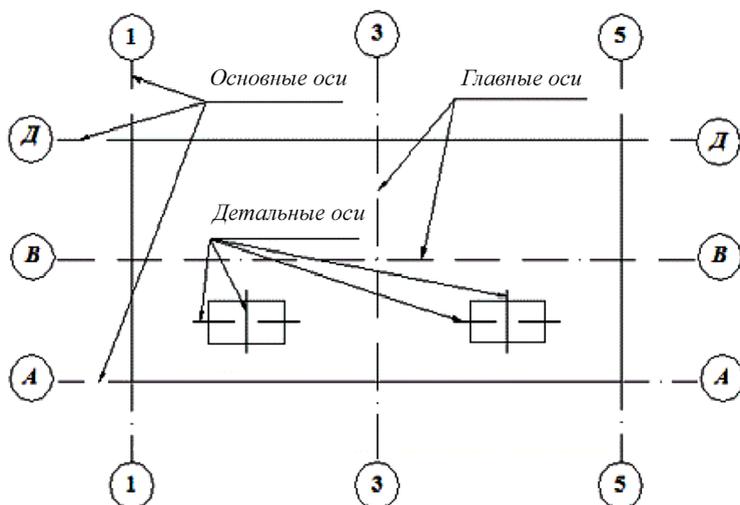


Рис. 1.2. Пример расположения осей строительных конструкций в проектных чертежах

Возведению строительных конструкций предшествует перенесение геометрических элементов проекта сооружения в натуру, т. е. вынесение и закрепление на местности разбивочных осей. Поэтому маркшейдерские работы по перенесению проектов зданий и сооружений в натуру называют разбивкой. Весь процесс разбивки сооружения определяется правилом перехода от общего к частному. Разбивка главных и основных осей определяет положение всего сооружения на местности, т. е. его размеры и ориентирование относительно сторон света и существующих контуров местности. Детальная разбивка определяет взаимное положение отдельных элементов и конструкций сооружения.

Если положение главных и основных осей может быть определено на местности с погрешностью 30–50 мм, то детали с погрешностью 2–3 мм и точнее. Точность перенесения основных осей может быть повышена, если это обусловлено проектом, когда

возводимое сооружение технологически связано с действующим объектом и к точности их взаимного положения предъявляют повышенные требования.

Вынос знаков разбивочной основы для строительства производят методами триангуляции, полигонометрии, засечек.

Перед выносом в натуру проекта инженерного сооружения необходимо выполнить специальную маркшейдерскую подготовку, которая предусматривает:

- маркшейдерскую привязку проекта;
- составление разбивочных чертежей;
- разработку проекта производства маркшейдерских работ.

Привязкой проекта называют расчёт разбивочных элементов, по которым выносят его в натуру от пунктов маркшейдерско-геодезической основы или капитальных опорных строений.

Разбивочными элементами являются расстояния, углы и превышения, выбор и расчёт которых зависят от принятого способа разбивки. Для выноса сооружения в натуру необходимо иметь на местности пункты маркшейдерско-геодезической основы с известными координатами. В этой же системе должны быть определены координаты основных точек сооружения, определяющих его геометрию. Координаты же точек, принадлежащих сооружению, в случае их отсутствия определяют графически или вычисляют аналитически, при этом используют основные чертежи проекта.

Различают три способа маркшейдерской подготовки разбивочных данных: графический, графоаналитический и аналитический.

Графический способ – необходимые линейные и угловые разбивочные элементы определяют графически по генплану с точностью масштаба плана. К точности планового положения объектов не предъявляют повышенных требований.

Графоаналитический способ – графически определяют координаты некоторых точек здания или сооружения, а значения угловых и линейных разбивочных элементов рассчитывают.

Аналитический способ – все данные для разбивки находят путём математических вычислений, при этом координаты минимум двух точек сооружения должны быть указаны на проектных чертежах.

Результаты маркшейдерской подготовки проекта отображают на разбивочных чертежах. Разбивочный чертёж является основным документом, по которому выполняют разбивочные работы в натуре. Его составляют в масштабах 1:500, 1:2000, а иногда и крупнее, в зависимости от сложности сооружения или составляющих его элементов. На разбивочном чертеже показывают:

- контуры выносимых зданий и сооружений с их размерами и расположением осей;
- пункты маркшейдерско-геодезической основы, от которых производится разбивка;
- разбивочные элементы, значения которых подписываются прямо на чертеже.

Разбивочные работы в процессе строительства должны обеспечивать вынос в натуру от пунктов маркшейдерско-геодезической основы с заданной точностью осей и отметок, определяющих в соответствии с проектной документацией положение в плане и по высоте частей и конструктивных элементов сооружений.

Требования к точности разбивочных работ зависят от многих факторов:

- вида, назначения, местоположения сооружения;
- размеров сооружения и взаимного расположения его частей;
- материала, из которого возводится сооружение;
- порядка и способа производства строительных работ;
- технологических особенностей эксплуатации и т. п.

Нормы точности на разбивочные работы задаются в проекте или в нормативных документах:

- строительных нормах и правилах (СНиП);
- государственном стандарте (ГОСТ);
- ведомственных инструкциях.

В случаях строительства по проектной документации, содержащей допуски на изготовление и возведение конструкций сооружений, не предусмотренные стандартами, нормами и правилами, необходимую точность разбивочных работ определяют специальными расчётами по условиям, заложенным в проектной документации.

Если два или несколько зданий (сооружений) связаны единой технологической линией или конструктивно, расчёт точности разбивочных работ следует выполнять как для одного здания (сооружения).

Точность построения разбивочной основы строительной площадки принимают в соответствии с данными, приведёнными в табл. 1.3.

Таблица 1.3

**Нормы точности построения разбивочной сети
строительной площадки**

| <i>Характеристика объектов строительства</i> | <i>Величины средних квадратических погрешностей построения разбивочной сети строительной площадки</i> | | |
|---|---|-------------------------------|--|
| | <i>угловые измерения, с</i> | <i>линейные измерения</i> | <i>определение превышения на 1 км хода, мм</i> |
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью более 1 км; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки более 100 тыс. м | 3 | 1:25 000 | 4 |
| Предприятия и группы зданий (сооружений) на участках площадью менее 1 км; отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки от 10 до 100 тыс. м | 5 | 1:10 000 | 6 |

Окончание табл. 1.3

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|----|--------|----|
| Отдельно стоящие здания (сооружения) с площадью застройки менее 10 тыс. м; дороги, инженерные сети в пределах застраиваемых территорий | 10 | 1:5000 | 10 |
| Дороги, инженерные сети вне застраиваемых территорий; земляные сооружения, в том числе вертикальная планировка | 30 | 1:2000 | 15 |

Разбивочные работы для монтажа технологического оборудования и строительных конструкций необходимо выполнять с точностью, обеспечивающей соблюдение допусков, предусмотренных соответствующими нормами и правилами, государственными стандартами или техническими условиями, а также проектной документацией.

Предельные (допустимые) отклонения δ определяют по формуле

$$\delta = t m, \quad (1.1)$$

где δ – предельные (допустимые) отклонения;

t – величина, равная 2; 2,5; 3; определяется при разработке проекта производства работ или проекта производства геодезических работ;

m – средняя квадратическая погрешность, принимается по табл. 1.4.

Точность геометрических параметров в нормативных документах и чертежах определяется предельно допустимыми отклонениями.

По указанным допускам на положение строительных конструкций определяют долю, приходящуюся на маркшейдерские измерения. Для этого с учётом конкретной технологии возведения строительной конструкции решается вопрос о соотношении ошибок каждой технологической операции.

Если принять принцип равных влияний всех n источников, то на каждый из них, в том числе и на маркшейдерские измерения σ , придётся доля от общей ошибки установки *σобщ*

$$\sigma = \frac{\sigma_{общ}}{\sqrt{n}}. \quad (1.2)$$

Таблица 1.4

Нормы точности для разбивочных работ

| <i>Характеристика зданий, сооружений, строительных конструкций</i> | <i>Величины средних квадратических погрешностей построения внешней и внутренней разбивочных сетей здания сооружения и других разбивочных работ</i> | | |
|--|--|-----------------------------|--|
| | <i>линейные измерения</i> | <i>угловые измерения, с</i> | <i>определение превышения на станции, мм</i> |
| Металлические конструкции с фрезерованными контактными поверхностями; сборные железобетонные конструкции, монтируемые методом самофиксации в узлах; сооружения высотой свыше 100 до 120 м или с пролётами свыше 30 до 36 м | 1:15 000 | 5 | 1 |
| Здания свыше 15 этажей, сооружения высотой свыше 60 до 100 м или с пролётами от 18 до 30 | 1:10 000 | 10 | 2 |
| Здания свыше 5 до 15 этажей, сооружения высотой свыше 15 до 60 м или с пролётами от 6 до 18 м | 1:5000 | 20 | 2.5 |
| Здания до 5 этажей, сооружения высотой до 15 м или с пролётами до 6 м | 1:3000 | 30 | 3 |
| Конструкции из дерева; инженерные сети, дороги подъездные пути | 1:2000 | 30 | 5 |
| Земляные сооружения, в том числе вертикальная планировка | 1:1000 | 45 | 10 |

Примечание.

1. Величины средних квадратических погрешностей (гр. 2-4) назначаются в зависимости от наличия одной из характеристик, указанных в гр. 1; при наличии двух и более характеристик величины средних квадратических погрешностей назначаются по той характеристике, которой соответствует более высокая точность.

2. Точность геодезических построений для строительства уникальных и сложных объектов и монтажа технологического оборудования следует определять расчётами на основе специальных технических условий и с учётом особых требований к допускам, предусматриваемых проектом.

Переход от допуска σ к среднему квадратическому отклонению δ выполняют по приближённой формуле

$$\delta = \sigma / 3. \quad (1.3)$$

Разбивочные работы сводятся к фиксации на местности точек, определяющих проектную геометрию сооружения. Плановое положение этих точек может быть найдено с помощью построения на местности проектного угла от исходной стороны и выноса проектного расстояния от исходного пункта. Построение проектного угла осуществляется от пунктов маркшейдерско-геодезической сети, созданной перед началом производства разбивочных работ. Задача сводится к отысканию на местности направления, которое образовывало бы с исходным направлением АВ проектный угол β (рис. 1.3). В нашем случае АВ – исходное направление, С – точка определяемого направления.

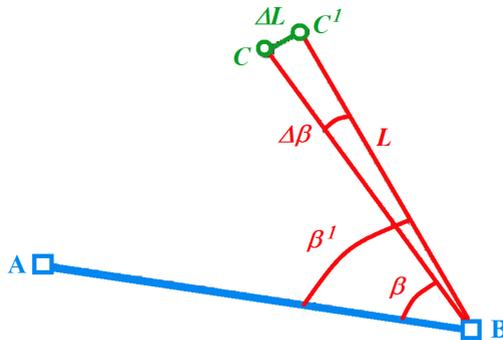


Рис. 1.3. Вынос в натуру проектного угла

Работы ведут в следующем порядке. Устанавливают теодолит в точке В и приводят его в рабочее положение. Наводят зрительную трубу на точку А и берут отсчёт по лимбу горизонтального круга. Далее прибавляют или отнимают к этому отсчёту проектный угол β и, открепив алидаду, устанавливают вычисленный отсчёт. Теперь визирная ось зрительной трубы указывает на требуемое направление. Зная проектное расстояние L , положение этой точки фиксируют на местности (точка С). Стандартные геодезические и маркшейдерские приборы, изготовленные серийно, по точности предназначены для выполнения измерений, а не построений. В результате точность вынесения разбивочных элементов этими приборами оказывается ниже, чем точность измерений с использованием этих же приборов. Поэтому, если необходимо построить проектный угол с заданной точностью, поступают следующим образом. Построенный в натуре угол измеряют несколькими приёмами и определяют его более точное значение β^1 . Число приёмов, необходимых для измерения угла, определяют по формуле

$$n = \frac{m_u^2}{m_\beta^2}, \quad (1.4)$$

где m_u – номинальная для данного теодолита средняя квадратическая погрешность измерения угла;

m_β – требуемая средняя квадратическая погрешность вынесения угла.

Измерив построенный в натуре угол, вычисляют поправку $\Delta\beta$, которую необходимо ввести для уточнения построенного угла. Зная проектное расстояние L , вычисляют линейную поправку ΔL

$$\Delta L = L \frac{\Delta\beta''}{\rho''}, \quad (1.5)$$

где $\Delta\beta = \beta^1 - \beta$, с.

Далее откладывают от точки С перпендикулярно к линии ВС величину вычисленной поправки ΔL и фиксируют точку C^1 . Угол ABC^1 и будет равен проектному углу с заданной точностью. Для контроля угол ABC^1 измеряют необходимым количеством приёмов. Если полученное значение отличается

от проектного на допустимую величину, то работу заканчивают. В противном случае требуются дальнейшие уточнения.

В табл. 1.5 приведены условия обеспечения точности угловых измерений, использование которых поможет правильно выбрать программу измерений исходя из применяемых приборов и инструментов.

Таблица 1.5

Условия обеспечения точности измерений

| <i>Процессы, условия измерений, тип приборов</i> | <i>Средние квадратические погрешности результатов угловых измерений, с</i> | | | | | |
|---|--|----------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------|
| | <i>3</i> | <i>5</i> | <i>10</i> | <i>20</i> | <i>30</i> | <i>45</i> |
| Центрирование теодолита и визирных целей | Оптический центрир | | | Оптический центрир, нитяной отвес | | |
| Типы теодолитов по ГОСТ 10529-79 или им равноточные | T2 | T5 | | | T30 | |
| Количество приёмов | 3 | | 2 | | 1 | |

Для построения проектной длины линии необходимо от исходной точки отложить в заданном направлении расстояние, горизонтальное проложение которого равно проектному значению. Вынесение на местности расстояний может быть выполнено мерными приборами, т. е. рулетками или мерными проволоками, оптическими дальномерами, свето- и радиодальномерами. Современные электронно-оптические приборы позволяют измерять и выносить линии с гарантируемой точностью в пределах

$$\Delta l = \pm (2 \div 4 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot L) \text{ мм}, \quad (1.6)$$

где L – измеряемое расстояние, км.

Вынесение длин мерными приборами для точных разбивок производится при постоянном натяжении с введением поправок за компарирование, температуру и наклон линии к горизонту.

Откладываемая на местности величина будет равна

$$D = D_0 \pm d_k \pm d_t + d_h, \quad (1.7)$$

где D_0 – проектное (горизонтальное) расстояние;

d_k – поправка за компарирование, вычисляемая по формуле

$$d_k = - \frac{k \cdot D_0}{l_0}, \quad (1.8)$$

где k берётся из аттестата прибора или определяется путём сравнения рабочей меры прибора с эталонной;

l_0 – длина мерного прибора;

d_t – поправка за температуру, вычисляется по формуле

$$d_t = - \alpha \cdot D_0 \cdot (t - t_0),$$

где α – коэффициент расширения (для стали $\alpha = 0,000011 - 0,000012$);

t – температура при измерении;

t_0 – температура компарирования;

d_h – поправка за наклон линии к горизонту, вычисляется по формуле

$$dh = 2 \cdot D_0 \cdot \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right), \quad (1.9)$$

где δ – угол наклона линии;

h – превышение концов линии.

1.3. Проект маркшейдерских работ при строительстве технологического комплекса на промышленной площадке

1.3.1. Проект построения строительной сетки

Перед началом строительных работ на промышленной площадке создают разбивочную сеть в виде системы прямоугольников со сторонами, параллельными осям шахтных стволов (рис. 1.4) [39]. Пункты строительной сетки должны обеспечить решение двух задач:

- топографическую съёмку крупного масштаба 1:500, в частности, для исполнительного генерального плана;
- быстрый, безошибочный перенос на промышленную площадку осей шахтных стволов, зданий, инженерных коммуникаций, транспортных путей и др.

На современных шахтных площадках характерно наличие крупных сооружений, имеющих жёсткую технологическую связь между собой. Поэтому для таких условий строительную сетку проектируют одновременно с генеральным планом. *Проект разбивочной сети разрабатывает проектная организация.*

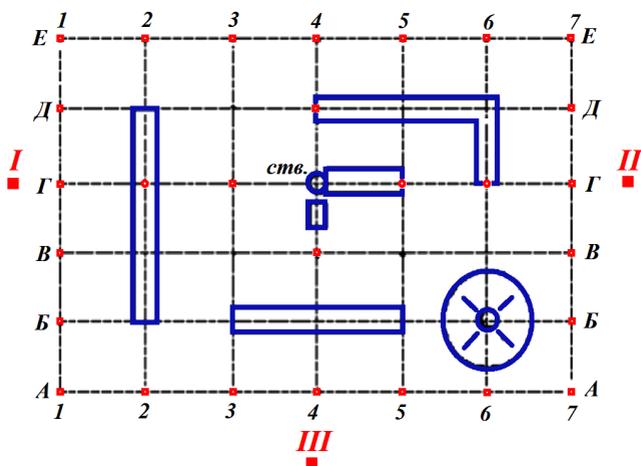


Рис. 1.4. Пример разбивочной сети на промышленной площадке

Размеры сторон в запроектированной сетке зависят от расстояний между объектами или проездами и составляют примерно 80–350 м. На генеральный план наносят исходные пункты триангуляции и полигонометрии, намечают границы секций и проектируют по этим границам основные ходы и связь между ними.

Построение строительной сетки производят от пунктов маркшейдерской опорной сети. Если исходная маркшейдерская основа недостаточна, производят её сгущение. Для этого

вставляют отдельные пункты методом триангуляции или трилатерации, либо прокладывают дополнительные ходы полигонометрии.

После сгущения маркшейдерской основы производят разбивку базиса сетки – главную ось ствола. Концы базиса или совмещают с исходными пунктами маркшейдерской основы, или выносят в натуру небольшими по протяжённости ходами полигонометрии. Линию между концами базиса провешивают, отмечают на ней места закладки пунктов и закрепляют их постоянными или временными знаками.

Постоянными знаками закрепляют основные пункты 1Г, 3Г, 7Г, 4Б, 4Д, а временными – дополнительные 2Г, 5Г, 6Г (рис. 1.4). Число и расположение основных и дополнительных пунктов определяются максимальным удобством проведения разбивочных работ. По постоянным центрам базисной линии прокладывают контрольный полигонометрический ход и в случае необходимости производят редуцирование центров знаков в проектное положение.

Между окончательно вынесенными центрами измеряют контрольные углы. Отклонение величин контрольных углов от проектных значений не должно превышать $\pm 10''$. От окончательных центров базисной линии выносят остальные пункты сетки и закрепляют их временными знаками.

Далее вычисляют координаты знаков в истинной или условной системе координат, направление осей которой совпадает с направлением сторон сетки. После вычисления координат временных знаков вычисляют поправки, редуцируют пункты в проектное положение и закрепляют постоянными знаками основные пункты сети. Как правило, это пункты, находящиеся по периметру сетки по осям: А-А, Е-Е, 1-1, 7-7.

Правильность вынесения проектных центров после редуцирования контролируют измерением длин сторон между смежными центрами или диагоналей четырёхугольников, а также измерением углов на пунктах, расположенных в шахматном порядке. Допустимые отклонения длин сторон от проектных составляют ± 20 мм и диагоналей ± 25 мм. Допустимые отклонения углов от проектных – $\pm 20''$.

Высоты всех пунктов сети определяют проложением нивелирных ходов IV класса от пунктов I, II и III. Завершают полевые и камеральные работы составлением каталога координат пунктов и отчёта. В отчёте описывают условия производства работ, применявшиеся инструменты, способы вычисления координат и производят оценку точности пунктов.

Для сравнительно небольших шахт строительство поверхностного комплекса не связанных друг с другом сооружений на промышленной площадке допускается без создания строительной сетки. Разбивку сооружений в этом случае производят от знаков, фиксирующих положение осей ствола.

Осями вертикального ствола называют две взаимно перпендикулярные прямые, одна из которых параллельна, а другая перпендикулярна основному расстрелам. Точка пересечения осей ствола служит его центром. Центр ствола переносят в натуру дважды независимо от пунктов маркшейдерской опорной сети, удалённых от места заложения ствола не более чем на 300 м. Расхождение в положении центра ствола из двукратных определений не должно превышать 0,1 м. Его закрепляют временной точкой и вычисляют фактические координаты.

Оси ствола выносят в натуру при помощи теодолита, установленного на точке центра ствола. Угловая погрешность в разбивке главной оси относительно опорной сети не должна превышать $\pm 2'$, а погрешность разбивки другой оси, перпендикулярной главной, не должна превышать $\pm 30''$. Осевые пункты размещают с учётом взаимной видимости между смежными пунктами, долговременной их сохранности и удобства использования для разбивочных работ.

Каждую из осей закрепляют не менее чем шестью постоянными знаками, по три с каждой стороны. Расстояние между соседними пунктами должно быть не менее 50 м, но при стеснённых условиях расстояние между ними разрешается уменьшать до 20 м.

Для определения координат осевых пунктов и вынесенного центра ствола прокладывают полигонометрический ход 2-го разряда. По мере застройки промплощадки для удобства использования положение осей ствола выносят и закрепляют на капитальных зданиях и сооружениях.

1.4. Проект маркшейдерских работ при монтаже армировки ствола шахты

В проекте организации маркшейдерских работ при монтаже армировки указывают:

- методы перенесения в ствол разбивочных осей;
- схему расположения армировочных отвесов;
- типы и размеры шаблонов;
- методы контрольных измерений и исполнительной съёмки, допустимые погрешности измерений;
- технические средства измерений и вспомогательное оснащение маркшейдерских работ;
- нормы допустимых отклонений армировки;
- мероприятия, обеспечивающие безопасность маркшейдерских работ.

Для выполнения работ, обеспечивающих монтаж армировки, маркшейдер руководствуется проектными чертежами поперечного сечения ствола, размещения монтажного оборудования, расположения проходческих лебёдок, сопряжения ствола с околоствольными выработками каждого горизонта и т. п. Типовая схема размещения маркшейдерских приборов и оборудования при армировании ствола показана на рис. 1.5.

Число отвесов и их размещение в сечении ствола определяют в соответствии с расположением расстрелов в ярусе:

- отвесы опускают вблизи узлов крепления проводников или около сочленения расстрелов;
- главный расстрел устанавливают по двум отвесам;
- расстрел, параллельный главному, устанавливают по одному отвесу и горизонтальному шаблону;
- группу вспомогательных расстрелов, перпендикулярных к главному, устанавливают по отвесу у среднего расстрела с помощью горизонтальных шаблонов;
- установку расстрелов, расстояние между которыми превышает 3 м, производят по двум отвесам каждый;
- монтажный кондуктор устанавливают по трём отвесам.

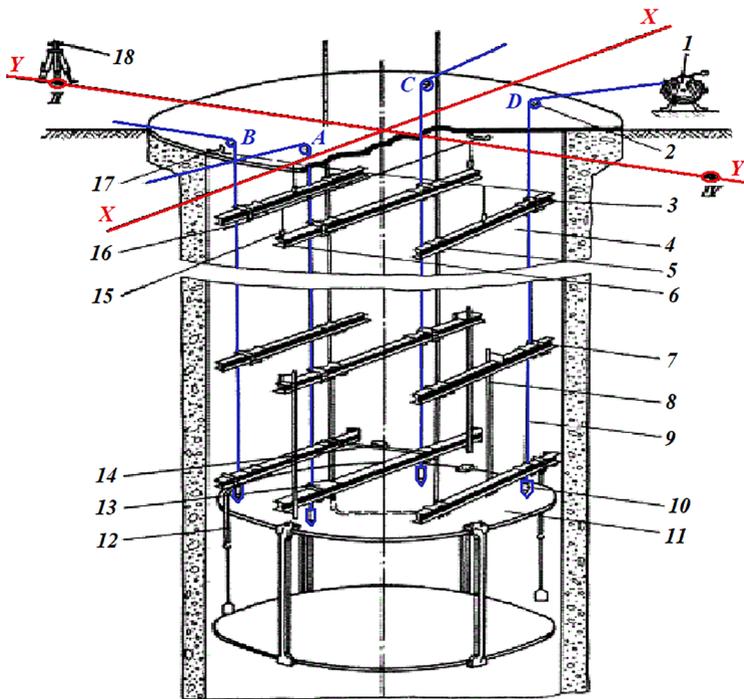


Рис. 1.5. Монтаж расстрелов относительно подвижных отвесов:
 1 – лебёдка; 2 – направляющий блок; 3 – центрировочная пластина;
 4 – контрольный ярус; 5 – боковой расстрел; 6 – центральный расстрел;
 7 – ограничитель колебаний; 8 – дистанционный шаблон; 9 – нить отвеса;
 10 – разъёмный груз; 11 – подвесной двухэтажный армировочный полок;
 12 – шаблон для разбивки лунок; 13 – накладной шаблон;
 14 – горизонтальный шаблон; 15 – шнуровой отвес;
 16 – разбивочная ось; 17 – осевая скоба;
 8 – теодолит; А, В, С, D, – подвижные отвесы

Схемы размещения отвесов при армировании для унифицированных сечений стволов с жесткими проводниками показаны на рис. 1.6.

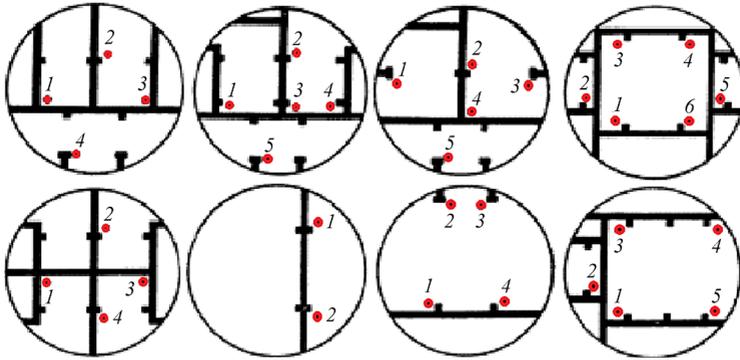


Рис. 1.6. Примеры размещения армировочных отвесов в сечении ствола

Армировочные шаблоны подразделяются на группы:

- шаблоны для разметки длины расстрелов и мест расположения лежек или монтажных отверстий и для контроля сборки яруса в целом (рис. 1.7);
- шаблоны для взаимной установки расстрелов по высоте (дистанционные шаблоны); шаблоны для разбивки лунок под расстрелы; шаблоны для взаимной установки расстрелов в ярусе (горизонтальные шаблоны, рис. 1.8);
- шаблоны для установки расстрелов относительно отвесов (рис. 1.9).

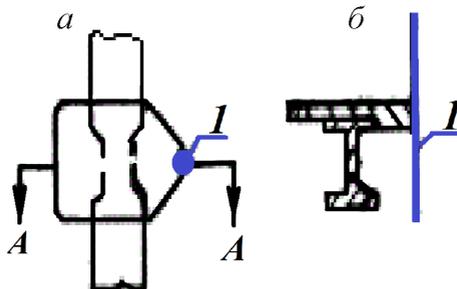


Рис. 1.7. Шаблон для проверки положения лежек на расстрелах по отвесам:
а – план; *б* – разрез по А-А; *l* – отвес

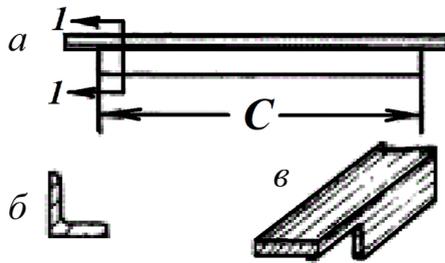


Рис. 1.8. Шаблон из железного уголка 50×50 мм для проверки параллельности расстрелов: *a* – вид сбоку; *б* – разрез по 1-1; *в* – деталь шаблона из уголка с вырезом на конце; *C* – расстояние между расстрелами

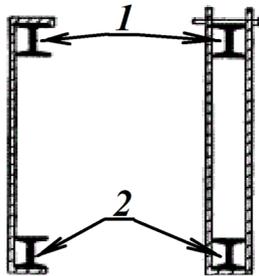


Рис. 1.9. Шаблон для установки и проверки расстрелов по вертикали: *1, 2* – первый и второй ярусы расстрелов

Размеры рабочей части шаблонов не должны отличаться от проектных более чем на 1 мм. В комплект армировочных шахтных отвесов входят лебёдки, тросы (проволоки), грузы, направляющие блоки и центрировочные пластины, устройства для решения задачи проектирования, ограничители колебаний.

1.4.1. Допустимые отклонения геометрических параметров при строительно-монтажных работах

Допустимые отклонения геометрических параметров строящихся зданий и сооружений шахтной поверхности определены в СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» (п. 4.12.2, табл. 4.9) [36] и приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Предельные нормы отклонений строительных конструкций

| <i>Параметр</i> | | | | <i>Предельные отклонения, мм</i> | <i>Контроль (метод, объём, вид регистрации)</i> |
|---|--------|----|--------|---|---|
| А. Колонны и опоры | | | | | |
| 1. Отклонения отметок опорных поверхностей колонны и опор от проектных | | | | ±5 | Измерительный, каждая колонна и опора, геодезическая исполнительная схема |
| 2. Разность отметок опорных поверхностей соседних колонн и опор по ряду и в пролёте | | | | ±3 | То же |
| 3. Смещение осей колонн и опор относительно разбивочных осей в опорном сечении | | | | ±5 | -- |
| 4. Отклонение осей колонн от вертикали в верхнем сечении при длине колонн, мм: | | | | | Измерительный, каждая колонна и опора, геодезическая исполнительная схема |
| свыше | 4000 | до | 8000 | ±10 | |
| " | 8000 | " | 16 000 | ±12 | |
| " | 16 000 | " | 25 000 | ±15 | |
| " | 25 000 | " | 40 000 | ±20 | |
| 5. Стрела прогиба (кривизна) колонны, опоры и связей по колоннам | | | | 0,0013 расстояния между точками закрепления, но не более 15 | Измерительный, каждый элемент, журнал работ |
| 6. Односторонний зазор между фрезерованными поверхностями в стыках колонн | | | | 0,0007 поперечного размера сечения колонны; при этом площадь контакта должна составлять не менее 65 % площади поперечного сечения | То же |

Продолжение табл. 1.6

| <i>Параметр</i> | <i>Предельные отклонения, мм</i> | <i>Контроль (метод, объём, вид регистрации)</i> |
|--|--|---|
| Б. Фермы, ригели, балки, прогоны | | |
| 7. Отметки опорных узлов | ±10 | Измерительный, каждый узел, журнал работ |
| 8. Смещение ферм, балок ригелей с осей на оголовках колонн из плоскости рамы | ±15 | Измерительный, каждый элемент, геодезическая исполнительная схема |
| 9. Стрела прогиба (кривизна) между точками закрепления сжатых участков пояса фермы и балки ригеля | 0,0013 длины закреплённого участка, но не более 15 | Измерительный, каждый элемент, журнал работ |
| 10. Расстояние между осями ферм, балок, ригелей, по верхним поясам между точками закрепления | ±15 | То же |
| 11. Совмещение осей нижнего и верхнего поясов ферм относительно друг друга (в плане) | 0,004 высоты фермы | "-" |
| 12. Отклонение симметричности установки фермы, балки, ригеля, панели перекрытия и покрытия (при длине площадки опирания 50 мм и более) | ±10 | "-" |
| 13. Отклонение стоек фонаря и фонарных панелей от вертикали | ±8 | "-" |
| 14. Расстояние между прогонами | ±5 | "-" |
| В. Подкрановые балки | | |
| 15. Смещение оси подкрановой балки с продольной разбивочной оси | ±5 | Измерительный, на каждой опоре, журнал работ |

Продолжение табл. 1.6

| <i>Параметр</i> | <i>Предельные отклонения, мм</i> | <i>Контроль (метод, объём, вид регистрации)</i> |
|---|----------------------------------|--|
| 16. Смещение опорного ребра балки с оси колонны | ±20 | То же |
| 17. Перегиб стенки в сварном стыке (измеряют просвет между шаблоном длиной 200 мм и вогнутой стороной стенки) | ±5 | -"- |
| Г. Крановые пути | | |
| а) мостовых кранов | | |
| 18. Расстояние между осями рельсов одного пролета (по осям колонн, но не реже чем через 6 м) | ±10 | Измерительный, на каждой опоре, геодезическая исполнительная схема |
| 19. Смещение оси рельса с оси подкрановой балки | ±15 | То же |
| 20. Отклонение оси рельса от прямой на длине 40 м | ±15 | -"- |
| 21. Разность отметок головок рельсов в одном поперечном разрезе пролёта здания: | | -"- |
| на опорах | ±15 | |
| в пролёте | ±20 | |
| 22. Разность отметок подкрановых рельсов на соседних колоннах (расстояние между колоннами): | | Измерительный, на каждой опоре, геодезическая исполнительная схема |
| при L менее 10 м | ±10 | |
| при L 10 м и более | 0,001 но не более 15 | |
| 23. Взаимное смещение торцов стыкуемых рельсов в плане и по высоте | ±2 | Измерительный, каждый стык, журнал работ |

Окончание табл. 1.6

| <i>Параметр</i> | <i>Предельные отклонения, мм</i> | <i>Контроль (метод, объём, вид регистрации)</i> |
|--|----------------------------------|--|
| 24. Зазор в стыках рельсов (при температуре 0 °С и длине рельса 12,5 м); при изменении температуры на 10 °С допуск на зазор изменяется на 1,5 мм | ±4 | То же |
| б) подвесных кранов | | |
| 25. Разность отметок нижнего ездового пояса на смежных опорах (вдоль пути) независимо от типа крана (расстояние между опорами) | 0,0007·L | Измерительный, на каждой опоре, геодезическая исполнительная схема |
| 26. Разность отметок нижних ездовых поясов соседних балок в пролётах в одном поперечном сечении двух- и многоопорных подвесных кранов: | | Измерительный, каждая балка, геодезическая исполнительная схема |
| на опорах | ±6 | |
| в пролёте | ±10 | |
| 27. То же, но со стыковыми замками на опорах и в пролёте | ±2 | То же |
| 28. Смещение оси балки с продольной разбивочной оси пути (для талей ручных и электрических не ограничивается) | ±3 | — |

1.5. Основные положения проекта построения маркшейдерской опорной сети на поверхности

Создание опорной сети маркшейдерских пунктов должно соответствовать требованиям п. 30 «Инструкции по производству маркшейдерских работ» (РД 07-603-03). В качестве исходных пунктов для построения маркшейдерской опорной сети служат пункты государственной геодезической сети и геодезических сетей сгущения.

В соответствии с приказом № 383 Министерства экономического развития Российской Федерации от 28.07.2017 г. «Об утверждении порядка установления местных систем координат» при осуществлении градостроительной и кадастровой деятельности, землеустройства, недропользования должны использоваться местные системы координат [21].

Для Забайкальского края применяется местная система координат МСК-75. Территория края разделена на три зоны. Преобразование координат из государственной системы координат в местную осуществляется путём преобразования с использованием «ключей пересчёта», установленных для каждой отдельной зоны.

Маркшейдерские опорные сети могут создаваться с использованием спутниковой аппаратуры.

Маркшейдерские опорные сети на земной поверхности создаются методами триангуляции, трилатерации, полигонометрии четырёх классов, 1-го и 2-го разряда, нивелированием III и IV классов в соответствии с установленными требованиями «Инструкции по производству маркшейдерских работ».

В табл. 1.7 приведены характеристики сетей триангуляции 4-го класса, 1-го и 2-го разрядов.

Таблица 1.7

Характеристика опорной маркшейдерской сети

| <i>Показатели</i> | <i>4-й класс</i> | <i>1-й разряд</i> | <i>2-й разряд</i> |
|--|------------------|-------------------|-------------------|
| Длина стороны треугольника, км, не более | 5 | 5 | 3 |

Окончание табл. 1.7

| <i>Показатели</i> | <i>4-й класс</i> | <i>1-й разряд</i> | <i>2-й разряд</i> |
|--|------------------|-------------------|-------------------|
| Минимально допустимая величина угла: | | | |
| в сплошной сети | 20° | 20° | 20° |
| связующего в цепочке треугольников | - | 30° | 30° |
| во вставке | - | 30° | 20° |
| Число треугольников между исходными сторонами или между исходным пунктом и исходной стороной, не более | - | 10 | 10 |
| Минимальная длина исходной стороны, км | - | 1 | 1 |
| Средняя квадратическая погрешность измерения углов, вычисленная по невязкам треугольников | 2" | 5" | 10" |
| Предельная невязка в треугольнике | 8" | 20" | 40" |
| Относительная погрешность исходной (базисной) стороны, не более | 1:200 000* | 1:50 000 | 1:20 000 |
| Относительная средняя квадратическая погрешность определения длины стороны в наиболее слабом месте, не более | - | 1:20 000 | 1:10 000 |
| * – при развитии самостоятельных сетей | | | |

Характеристика сетей полигонометрии 4-го класса, 1-го и 2-го разрядов приведена в табл. 1.8.

Таблица 1.8

Характеристика сетей полигонометрии

| <i>Показатели</i> | <i>4-й класс</i> | <i>1-й разряд</i> | <i>2-й разряд</i> |
|----------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Предельная длина хода, км: | | | |
| отдельного | 10 | 5 | 3 |
| между исходной и узловой точками | 7 | 3 | 2 |
| между узловыми точками | 5 | 2 | 1,5 |

Окончание табл. 1.8

| <i>Показатели</i> | <i>4-й класс</i> | <i>1-й разряд</i> | <i>2-й разряд</i> |
|--|------------------|-------------------|-------------------|
| Предельный периметр полигона, км | 30 | 15 | 9 |
| Длина сторон хода, км: | | | |
| наибольшая | 2 | 0,8 | 0,35 |
| наименьшая | 0,25 | 0,12 | 0,08 |
| средняя расчётная | 0,50 | 0,30 | 0,20 |
| Число сторон в ходе, не более | 15 | 15 | 15 |
| Предельная относительная невязка хода | 1:25 000 | 1:10 000 | 1:5000 |
| Средняя квадратическая погрешность измерения угла (по невязкам в ходах и полигонах), с | 2 | 5 | 10 |
| Угловая невязка хода или полигона, не более, где n – число углов в ходе, с | $5\sqrt{n}$ | $10\sqrt{n}$ | $20\sqrt{n}$ |

Примечание.

1. В отдельных случаях при привязке ходов полигонометрии к пунктам государственной геодезической сети с использованием светодальномеров длины примычных сторон хода могут быть увеличены на 30 %.

2. В порядке исключения в ходах полигонометрии 1-го разряда длиной до 1 км и в ходах полигонометрии 2-го разряда длиной до 0,5 км допускается абсолютная линейная невязка 10 см.

3. Число угловых и линейных невязок, близких к предельным, допускается не более 10 %.

4. Допускается увеличение длин ходов полигонометрии 1-го и 2-го разрядов на 30 % при условии определения дирекционных углов сторон хода с точностью $5''\pm 7''$ не реже чем через 15 сторон и не реже чем через 3 км.

Расстояние между пунктами параллельных полигонометрических ходов 1-го разряда, по длине близких к предельным, не должно быть менее 1,5 км. При меньших расстояниях ближайшие пункты связываются ходом того же разряда.

Если пункты хода полигонометрии 1-го разряда отстоят меньше чем на 1,5 км от пунктов параллельного хода полигонометрии 4-го класса, то между этими ходами осуществляется связка проложением хода 1-го разряда.

Характеристика сетей полигонометрии 4-го класса, 1-го и 2-го разрядов, прокладываемых с использованием электронных тахеометров и светодальномеров, приведена в табл. 1.9.

Таблица 1.9

**Характеристика сетей полигонометрии
при использовании электронно-цифровых приборов**

| <i>Показатели</i> | <i>4-й класс</i> | <i>1-й разряд</i> | <i>2-й разряд</i> |
|---|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Предельная длина отдельных полигонометрических ходов* в зависимости от числа сторон n в ходе, км | 8 при $n = 30$ | 10 при $n = 50$ | 6 при $n = 30$ |
| | 10 при $n = 20$ | 12 при $n = 40$ | 8 при $n = 20$ |
| | 12 при $n = 15$ | 15 при $n = 25$ | 10 при $n = 10$ |
| | 15 при $n = 10$ | 20 при $n = 15$ | 12 при $n = 8$ |
| | 20 при $n = 6$ | 25 при $n = 10$ | 14 при $n = 6$ |
| Наименьшая длина сторон хода**, км | 0,25 | 0,12 | 0,08 |
| Средняя квадратическая погрешность измерения длины стороны | До 500 м – 2 см | До 1000 м – 3 см | До 1000 м – 5 см |
| | От 500 до 1000 м – 3 см | Свыше 10000 м – 1:30 000 | |
| | Свыше 1000 м – 1:40 000 | | |
| <p>* – предельная длина ходов: – между исходным и узловым пунктами – $2/3$ длины отдельного хода, определённого в зависимости от числа сторон n; – между узловыми пунктами – $1/2$ длины отдельного хода, определённого в зависимости от числа сторон n (при уменьшении числа сторон n хода на $2/3$ и $1/2$ соответственно);</p> <p>** – при измерении линий светодальномерами и электронными тахеометрами предельная длина сторон не устанавливается, однако следует избегать перехода от наименьших сторон хода к максимально возможным</p> | | | |

Нивелирные сети III и IV классов прокладывают внутри полигонов высшего класса отдельными линиями или в виде систем линий с узловыми пунктами.

Допустимые периметры полигонов нивелирования III класса составляют 150 км. Нивелирование III класса выполняют в прямом и обратном направлениях; невязки в полигонах и по линиям допускаются не более $10\sqrt{L}$, мм, где L – длина хода, км.

Нивелирование IV класса выполняют в одном направлении; невязки в полигонах и по линиям допускаются не более $20\sqrt{L}$, мм, где L – длина хода, км. Длина линий нивелирования IV класса допускается не более 50 км.

Если при создании съёмочных сетей используются приборы или методика измерений, обеспечивающие более высокую точность измерений, допускается изменять параметры построения съёмочных сетей, при этом погрешности положения пунктов, полученные по предварительной оценке точности, не должны превышать установленных величин.

1.6. Основные положения проекта построения подземной маркшейдерской опорной сети

Подземные маркшейдерские опорные сети являются главной геометрической основой для выполнения съёмки горных выработок и решения горно-геометрических задач, связанных с обеспечением рациональной и безопасной разработки месторождений полезных ископаемых.

Построение подземной маркшейдерской опорной сети осуществляют по техническому проекту, составленному с учётом перспективного плана развития горных работ.

Исходными пунктами для развития подземных маркшейдерских опорных сетей при вскрытии месторождений штольнями и наклонными стволами служат подходные пункты в количестве не менее трёх, располагаемые не далее 300 м от устья вскрываемых выработок. При вскрытии месторождений вертикальными стволами – пункты центрирования и ориентирования сети, закреплённые в приствольных выработках на каждом горизонте ведения горных работ. Ориентирование подземной маркшейдерской опорной сети выполняют гирокопическим или геометрическим способом. Центрирование сети и передачу высот производят от подходных пунктов и реперов на промышленной площадке шахты.

В период разработки месторождения все вновь пройденные горные выработки, имеющие выход на земную поверх-

ность, используют для примыкания подземной маркшейдерской опорной сети к пунктам маркшейдерской опорной сети наземной поверхности.

Подземные маркшейдерские опорные сети состоят из полигонометрических ходов и ходов геометрического и тригонометрического нивелирования, которые прокладывают по главным и подготовительным горным выработкам.

Построение подземных маркшейдерских опорных сетей выполняют с разделением полигонометрических ходов на секции с гироскопически ориентированными сторонами (гиросторонами).

Подземные маркшейдерские опорные сети создают в виде систем замкнутых, разомкнутых и висячих ходов. Висячие ходы прокладывают дважды или осуществляют примыкание к гиросторонам. Разомкнутые ходы прокладывают между сторонами существующей подземной маркшейдерской опорной сети.

Средняя квадратическая погрешность положения наиболее удалённых пунктов подземной маркшейдерской опорной сети относительно исходных пунктов допускается не более 0,8 мм на плане.

В проекте должны быть изложены основные вопросы построения сети:

1. Характеристика пунктов и сторон маркшейдерской геодезической опорной сети, используемых для определения координат и высот подходов пунктов, определения поправки гироскопа. При необходимости сгущения опорной сети определяют объёмы и сроки выполнения работ.

2. Сведения о существующей подземной опорной сети и возможности использования ранее проложенных полигонометрических ходов, которые по точности измерений и сохранности пунктов могут быть включены в проектируемую сеть.

3. Схема построения проектируемой сети.

4. Места и способы дополнительного центрирования и ориентирования сети.

5. Расчёт точности положения удалённых пунктов подземной опорной сети.

6. Приборы и оборудование для построения сети.

7. Методика гироскопического ориентирования, измерений углов и линий. В случае, если сеть реконструируют с целью проведения выработок встречными забоями, в проекте приводят расчёт точности угловых и линейных измерений, определяют методику выполнения работ и выбирают соответствующие инструменты.

8. Порядок уравнивания подземной опорной сети, применение программного обеспечения для обработки измерений.

9. Календарный план выполнения работ с указанием объёмов по видам и исполнителей (шахта, подрядная организация, специализированная группа и др.).

10. Меры безопасности при выполнении работ.

В графическую часть проекта включают:

1. План опорной сети на земной поверхности (масштабы 1:1000–1:10 000) с нанесенной схемой примыкания к точкам центрирования и указанием стороны для определения поправки гирокомпаса.

2. Планы горных выработок, на которые наносят:

1) технические границы шахты;

2) существующие и проектируемые капитальные и подготовительные горные выработки;

3) существующие исходные пункты опорной сети, места дополнительного ориентирования и центрирования;

4) схему существующей опорной сети и проектируемые ходы;

5) сохранившиеся постоянные пункты (с указанием номера) и проектируемые группы постоянных пунктов;

6) существующие и проектируемые гиростороны.

При составлении проекта расчёт точности положения удалённых пунктов выполняют с учётом существующих и проектируемых гиросторон, а также точек дополнительного центрирования сети. Для несложных схем построения сетей может выполняться только расчёт средних квадратических погрешностей положения удалённых пунктов магистральных ходов относительно ближайших точек центрирования.

Построение систем полигонометрических ходов, разделённых на секции гиросторонами, производят при удалении пунктов сетей от точек центрирования на расстояние более 2 км. Гиростороны размещают через 20–30 углов или их положение и число определяют при составлении проекта сети. Закрепляют гиростороны постоянными пунктами (рис. 1.10).

Для определения дирекционных углов сторон подземной опорной сети используют маркшейдерские гирокомпасы или другие гирокопические приборы, позволяющие выполнять ориентирование со средней квадратической погрешностью не более 1'.

Гирокопические измерения, их обработка и вычисления выполняют в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации прибора. Поправку гирокомпаса определяют перед началом и после окончания ориентирования подземной маркшейдерской опорной сети шахты (горизонта).

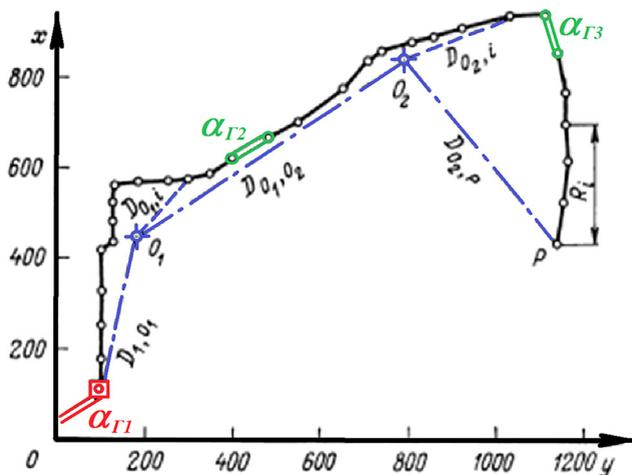


Рис. 1.10. Схема полигонометрического хода, разделённого на секции гиросторонами

Длина ориентируемых сторон подземной маркшейдерской опорной сети допускается не менее 50 м.

Гироскопический азимут каждой ориентируемой стороны определяют независимо дважды; второе определение может быть выполнено на той же точке, но после выключения блока электропитания до полной остановки гиromотора и повторного центрирования гироскопа.

Допустимая разность между двумя последовательными определениями гироскопического азимута или поправки определяется по формуле

$$f_a = 3m_r, \quad (1.10)$$

где m_r – средняя квадратическая погрешность единичного определения гироскопического азимута.

При допускаемых расхождениях за окончательное значение гироскопического азимута стороны принимают среднеарифметическое из двух определений.

В этом случае средняя квадратическая погрешность положения последней точки хода определяется следующей формулой:

$$\begin{aligned} M_{p^2} = & \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \left\{ \sum_{i=1}^{t_r} D_{o_{1,i}}^2 + \sum_{i=1}^{t_r} D_{o_{2,i}}^2 + \dots + \sum_{i=1}^{t_r} D_{o_{r,i}}^2 + \sum_{i=1}^{t_r+1} R_i^2 \right\} + \\ & + \frac{m_{\alpha_r}^2}{\rho^2} \left\{ \sum_{j=1}^{r-1} D_{o_{j,0(j+1)}}^2 + D_{1,o_1}^2 + D_{o_{r,P}}^2 \right\} + \mu^2 \sum_{i=1}^n s_i + \lambda^2 L^2, \quad (1.11) \end{aligned}$$

где m_β – средняя квадратическая погрешность измерения углов;

m_{α_r} – средняя квадратическая погрешность определения дирекционных углов гиросторон;

μ, λ – коэффициенты случайного и систематического влияния при линейных измерениях;

n – число сторон хода;

r – число секций хода;

t – число углов в секции;

$D_{o_{1,i}}, D_{o_{2,i}}, D_{o_{r,i}}$ – расстояния, определяемые в каждой секции от её центра тяжести до 1-го пункта секции;

R_i – расстояние от i -го пункта висячего хода, опирающегося на гиросторону, до последнего пункта P ;

$D_{O_i, O_{(j+1)}}$ – расстояние между центрами тяжести смежных секций i и $j + 1$;

D_{1, O_1} – расстояние от первого пункта хода до центра тяжести первой секции;

$D_{O_r, P}$ – расстояние от центра тяжести последней секции до последнего пункта P ;

s – длина стороны;

L – длина замыкающей хода.

Координаты центра тяжести секций определяются по формулам

$$X_{ц.т} = \frac{\sum x}{n}; \quad Y_{ц.т} = \frac{\sum y}{n}. \quad (1.12)$$

Для полигонометрических ходов, близких к вытянутым, необходимое число гиросторон может быть определено по табл. 1.10 в зависимости от протяжённости ходов и средней длины сторон.

Таблица 1.10

Длина полигонометрического хода, км

| Средняя длина стороны, м | | | | | | | | Число гиростворов |
|--------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------------------|
| 30 | 40 | 50 | 60 | 80 | 100 | 160 | 200 | |
| <i>Масштаб 1:2000</i> | | | | | | | | |
| 1,7 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 2,4 | 2,7 | 2,8 | 1 |
| 3,1 | 3,3 | 3,5 | 3,7 | 3,9 | 4,1 | 4,3 | 4,6 | 2 |
| 4,2 | 4,5 | 4,8 | 4,9 | 5,2 | 5,4 | 5,8 | 6,0 | 3 |
| 5,2 | 5,5 | 5,8 | 5,9 | 6,3 | 6,5 | 6,9 | 7,0 | 4 |
| 6,0 | 6,4 | 6,6 | 6,8 | 7,2 | 7,4 | 7,8 | 8,0 | 5 |
| 6,7 | 7,1 | 7,4 | 7,6 | 7,9 | 8,1 | 8,5 | 8,6 | 6 |
| 7,3 | 7,8 | 8,0 | 8,3 | 8,6 | 8,8 | 9,1 | 9,2 | 7 |
| 7,9 | 8,3 | 8,6 | 8,8 | 9,1 | 9,3 | 9,6 | 9,8 | 8 |
| 6,4 | 8,8 | 9,1 | 9,3 | 9,6 | 9,8 | 10,0 | 10,2 | 9 |
| 8,9 | 9,3 | 9,5 | 9,7 | 10,0 | 10,2 | 10,5 | 10,6 | 10 |

Окончание табл. 1.10

| Средняя длина стороны, м | | | | | | | | Число гиростворов |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------|
| 30 | 40 | 50 | 60 | 80 | 100 | 160 | 200 | |
| Масштаб 1:1000 | | | | | | | | |
| 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,8 | 1 |
| 1,8 | 2,0 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,6 | 2 |
| 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 3,0 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3 |
| 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,4 | 3,5 | 3,6 | 3,7 | 3,8 | 4 |
| 3,5 | 3,6 | 3,7 | 3,8 | 3,9 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | 5 |
| 3,8 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | 4,4 | 4,5 | 6 |
| 4,1 | 4,3 | 4,4 | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,8 | 4,8 | 7 |
| 4,4 | 4,6 | 4,7 | 4,7 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 5,0 | 8 |
| 4,7 | 4,8 | 4,9 | 5,0 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 5,2 | 9 |
| 4,9 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,4 | 5,4 | 10 |

Данные в табл. 1.10 рассчитаны по формуле (1.11) для вытянутых ходов, разделённых гиросторонами на $r + 1$ участков одинаковой длины, из которых первые r участков – секции между гиросторонами, а последний участок – висячий ход, опирающийся на гиросторону.

1.7. Проект производства маркшейдерских работ для проведения выработок встречными забоями

Для обеспечения проходки выработок встречными забоями составляют проект производства маркшейдерских работ, который утверждает технический руководитель (руководитель) организации.

При подготовке проекта главный маркшейдер должен получить от руководства горного предприятия (за подписью главного инженера) величины допустимых расхождений выработок по ответственным направлениям (допуски), устанавливаемые в зависимости от назначения и вида крепления горных выработок, рода откатки и т. д.

Проект должен содержать:

- обоснование требований к величинам допустимых расхождений забоев по ответственным направлениям;
- графическую часть (выкопировку с плана горизонта);
- пояснительную записку, обосновывающую оценку точности смыкания забоев с описанием методики выполнения маркшейдерских работ.

Предрасчёт ошибки смыкания забоев производится по каждому из ответственных направлений и отдельно по источникам возникновения ошибок. Необходимо сопоставление ожидаемой ошибки смыкания забоев, определяемой как тройная средняя ошибка по основному направлению, с допусками определёнными проектом.

Если рассчитанная ожидаемая погрешность смыкания превысит установленную допустимую, необходимо последовательно повторить расчёт, принимая более точные методы работ и более точные маркшейдерские приборы (например, определение гиросторон, измерение линий светодальномером), а при необходимости увеличить количество наблюдений для тех видов работ, которые в основном определяют величину общей ожидаемой погрешности смыкания.

Допустимые величины расхождения встречных забоев определяются в зависимости от способа сооружения и крепления горных выработок и *устанавливаются проектом*.

Работы по обеспечению проходки встречными забоями выработок, не требующих высокой точности смыкания (разрезных печей, восстающих, вентиляционных выработок), производят без специального предрасчёта.

1.7.1. Методика производства маркшейдерских работ

В целях исключения грубых ошибок при измерениях маркшейдерские работы должны быть проведены как минимум дважды и желательно – различными способами и разными исполнителями.

Последние пункты полигонометрических ходов (не менее трёх), предназначенные для задания направления выработкам, закрепляют постоянными центрами. Контрольные ходы прокладывают не реже чем через 500 м подвигания забоя.

Окончательное направление выработок определяют по координатам конечных пунктов, когда расстояние между забоями составит 50 м, а в конвейерных выработках – 150 м (рис. 1.11).

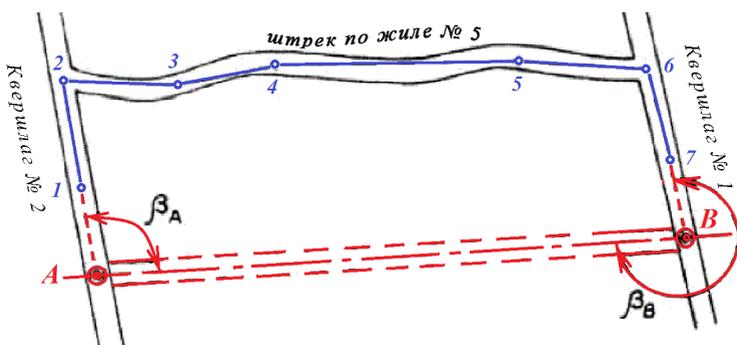


Рис. 1.11. Схема сбойки горных выработок

Направление между точками и расстояние определяется по следующим формулам:

$$\operatorname{arctg}(AB) = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}, \quad (1.13)$$

$$L_{AB} = \frac{\Delta Y}{\sin(AB)} = \frac{\Delta X}{\cos(AB)}, \quad (1.14)$$

где AB – дирекционный угол линии AB ;

X_A, Y_A, X_B, Y_B – координаты точек A и B по линии сбойки;

L_{AB} – длина сбойки по линии AB ;

$\Delta X, \Delta Y$ – приращения координат линии AB .

Горизонтальные углы для задания направлений определяются следующим образом:

$$\beta_A = (AB) - (A1), \quad (1.15)$$

$$\beta_B = (BA) - (B7), \quad (1.16)$$

где $\angle AB$ – дирекционный угол линии АВ;

$\angle A1, \angle B7$ – дирекционные углы линий А1 и В7.

Для контроля по высоте определяется проектный уклон i

$$i = \frac{H_B - H_A}{L_{AB}}, \quad (1.17)$$

где H_B, H_A – высотные отметки точек А и В;

L_{AB} – длина сбойки по линии АВ.

При расстоянии между забоями 20 м главный маркшейдер в письменном виде ставит в известность об этом технического руководителя (руководителя) предприятия и начальников участков, ведущих проходку.

В сложных горно-геологических условиях необходимость повторного предупреждения о расстоянии до сбойки выработки устанавливает главный инженер организации. Как правило, такие предупреждения выдаются за 3 и 7 метров до сбойки, о чём производится запись в «Книге маркшейдерских указаний» (табл. 1.11).

Таблица 1.11

Книга маркшейдерских указаний

| <i>Дата</i> | <i>Эскиз</i> | <i>Указание</i> | <i>Решение технического руководителя</i> |
|-------------|--------------|-----------------|--|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

После проведения сбойки необходимо произвести замыкание теодолитного хода, вычисление фактических невязок и их сравнение с данными предрасчёта.

1.8. Проект производства маркшейдерских работ под наблюдением за сдвижением при подземной разработке рудных месторождений

Проведение наблюдений за сдвижением и деформированием массива горных пород, земной поверхности и объектов, подлежащих охране, является одной из основных задач маркшейдерской службы предприятия. Наблюдения выполняют силами маркшейдерского отдела или специальной группы по наблюдению за сдвижением. К проведению наблюдений могут привлекаться и специализированные организации.

Закладку наблюдательных станций и наблюдения на них проводят на основании *проекта наблюдений за сдвижением*, составленного главным маркшейдером рудника с участием других технических служб или специализированной организацией.

Проект согласовывают с главным маркшейдером вышестоящей организации. Его утверждает главный инженер предприятия, на которого возлагаются общее руководство по выполнению работ, предусмотренных проектом, и оперативное решение вопросов, связанных с обеспечением нормального функционирования объектов, подлежащих охране.

Перед составлением проекта наблюдательной станции необходимо ознакомиться с имеющимися на предприятии материалами по сдвижению горных пород и результатами проведённых ранее наблюдений, оценить их достоверность. Если на месторождении сохранились старые наблюдательные станции, необходимо их обследовать и установить возможность использования в дальнейшем.

При проектировании наблюдательных станций, проведении наблюдений, анализе и обобщении результатов необходимо учитывать, что характер и параметры процесса сдвижения горных пород и земной поверхности существенно зависят от следующих горно-геологических и горнотехнических факторов:

- структурных особенностей массива горных пород (слоистое или неслоистое строение, согласное или несогласное за-

легание рудных тел и вмещающих пород, тектоническая нарушенность, трещиноватость, мощность слоёв пород, характер их контактов и т. д.);

- формы, размеров и глубины залегания рудных тел, соотношения размеров выработанного пространства и глубины разработки;

- физико-механических свойств руды и вмещающих пород;
- углов падения рудных тел и вмещающих пород;
- способа управления кровлей.

Проект наблюдений за сдвижением должен состоять из краткой пояснительной записки и графических материалов, характеризующих горно-геологическую ситуацию в районе наблюдательной станции, взаимное расположение реперов наблюдательной станции и подрабатываемых объектов очистных выработок.

Пояснительная записка содержит:

- цель наблюдений;
- краткую геологическую характеристику наносов и вмещающих пород; тектонику месторождения на участке наблюдений;
- применяемую систему разработки, её основные параметры; выбор местоположения и расчёт длин профильных линий; определение интервалов между реперами; конструкцию и способы закладки реперов; методику проведения наблюдений, их периодичность;

- характеристику инструментов, допустимые погрешности наблюдений; способ привязки станции к маркшейдерской опорной сети; план организации работ по закладке наблюдательной станции, расчёт количества необходимых материалов, рабочей силы и оборудования;

- меры безопасности при проведении наблюдений; перечень объектов, подлежащих охране, и их характеристику (тип фундамента, материал, размеры и т. д.);

- очередность закладки профильных линий; период наблюдений.

Графические материалы должны содержать план наблюдательной станции, геологические разрезы по профильным линиям, план очистных выработок или вертикальную проекцию (при крутом падении).

План наблюдательной станции составляют в зависимости от требуемой детальности в масштабах 1:500, 1:1000 или 1:2000. На плане должны быть нанесены:

- рельеф земной поверхности, контуры имеющихся провалов, зона трещин; сооружения, другие наземные и подземные объекты и коммуникации в районе наблюдательной станции (с выделением объектов, подлежащих охране);
- профильные линии и реперы наблюдательной станции; контуры рудных тел и очистных выработок (проектных и существующих) с датами отработки отдельных камер или участков, границы предохранительных целиков (зон) под объектами, подлежащими охране, и вероятная зона опасных сдвижений;
- положение основных подготовительных выработок, по которым проектируют проведение инструментальных и визуальных наблюдений.

На геологических разрезах по профильным линиям должны быть показаны горные выработки, слои пород, слагающие толщину, тектонические нарушения и другие элементы геологического строения участка наблюдений. Разрезы строят в масштабе плана наблюдательной станции.

1.9. Проект производства маркшейдерских работ при ведении работ в опасных зонах

При ведении горных работ на карьерах необходимо осуществлять контроль состояния бортов, траншей, уступов, откосов и отвалов, а также зон возможных обвалов или провалов вследствие наличия подземных выработок или карстов. При обнаружении признаков сдвижения горных пород работы прекращаются до принятия мер, обеспечивающих устойчивость горного массива.

К опасным зонам на угольном разрезе, где ведутся горные работы, относятся участки, площадки, в пределах которых имеются зоны, характеризующиеся наличием природных или техногенных факторов, под воздействием которых может воз-

никнуть аварийное состояние объекта ведения горных работ, что может создать угрозу опасности для жизни людей либо нанесёт значительный ущерб имуществу других лиц и окружающей природной среде.

Периодичность осмотров и инструментальных наблюдений за деформациями бортов, откосов, уступов и отвалов, а также объектов, попадающих в зоны влияния горных работ и расположенных на земной поверхности, устанавливается *в проекте производства маркшейдерских работ*.

Во время перемещения и складирования вскрышных пород маркшейдерской службой организации должен быть организован систематический контроль за устойчивостью отвалов и инструментальные наблюдения за деформациями всей площади отвала.

Частота наблюдений, количество профильных линий и их протяжённость, расположение, типы грунтовых реперов и расстояние между ними, методы и способы наблюдений и оценки их результатов определяются *проектом наблюдательной станции или проектом производства маркшейдерских работ*.

Вышеприведённые требования к наличию проектов маркшейдерских работ изложены в Федеральных нормах и правилах в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твёрдых полезных ископаемых» и «Правила безопасности при разработке угольных месторождений открытым способом» [16; 28; 29].

Для производства маркшейдерских наблюдений составляют специальный проект, который должен состоять из пояснительной записки, плана наблюдательной станции, а также соответствующих геологических карт и разрезов.

Пояснительная записка включает:

- техническое задание;
- общие сведения об участке наблюдений (горно-геологические, рельефные и климатические условия, возможный тип деформаций, фактическое и планируемое развитие горных работ);
- принципиальную схему наблюдений;

- расчёт или обоснование необходимой точности и периодичности наблюдений;
- конструкции опорных и рабочих пунктов (реперов) и расчёт расхода материалов, необходимых для закладки станции;
- методы и средства измерений;
- рекомендации по методике обработки и интерпретации результатов наблюдений;
- периодичность наблюдений;
- состав исполнителей и смету.

План наблюдательной станции составляют в масштабе 1:1000 или 1:2000, реже – 1:5000.

На плане показывают:

- состояние горных работ на момент составления проекта;
- проект дальнейшего развития горных работ;
- сооружения, находящиеся на бортах карьера или вблизи отвала;
- рельеф местности;
- расположение опорных и рабочих реперов.

К плану наблюдательной станции должны быть приложены детальные геологические разрезы, на которые наносят:

- границы литологических разновидностей пород;
- степень и характер трещиноватости каждой литологической разновидности;
- дизъюнктивные нарушения и тектонические трещины большого протяжения с указанием направления и угла их падения;
- характеристики сопротивления сдвигу пород, слагающих борт;
- характеристики сопротивления сдвигу по поверхностям ослабления по тектоническим трещинам, дизъюнктивным нарушениям, контактам между слоями или сланцеватости.

Все материалы по проекту наблюдательной станции должны быть сброшюрованы и подписаны лицом, составившим проект. Проект утверждается главным инженером предприятия.

1.10. Проект производства работ на действующем горном предприятии

Большинство горных предприятий рассчитаны на длительный срок существования и поэтапное развитие и наращивание производственных мощностей по добыче полезного ископаемого. В течение этого времени производятся геолого-разведочные работы по доразведке и уточнению балансовых запасов полезных ископаемых, вскрытие вновь выявленных запасов полезных ископаемых и строительство новых горных объектов на данных участках месторождения, консервация и ликвидация отработанных балансовых запасов. По этой причине, а также в связи с внедрением цифровых технологий на действующем горном предприятии маркшейдерские службы неизбежно сталкиваются с вопросами обслуживания всего спектра производства маркшейдерских работ.

Проект производства маркшейдерских работ на действующем предприятии может изменяться и дополняться в зависимости от задач, возникающих при производстве горных работ, и в своём составе может иметь следующие разделы:

- 1) титульный лист;
- 2) краткую географо-климатическую характеристику месторождения;
- 3) анализ топографической изученности, застроенности территории;
- 4) характеристику, перечень и состав маркшейдерских работ;
- 5) опорные маркшейдерские сети;
- 6) съёмочное обоснование;
- 7) методы производства съёмочных работ;
- 8) приборы и инструменты для производства маркшейдерских измерений;
- 9) специализированное ПО для производства вычислений и камеральной обработки полевых измерений;
- 10) документацию;
- 11) организацию маркшейдерской службы в структуре горного предприятия;

- 12) производственный контроль;
- 13) мониторинг за состоянием горного и земельного отводов;
- 14) приложения (лицензии, НТД, типы и виды отчётной, полевой и вычислительной документации).

В текстовых приложениях к проекту должны быть приложены копии:

- лицензии на производство маркшейдерских работ пользователя недр; положения о маркшейдерской службе;
- методики расчёта численности маркшейдерской службы организации;
- должностные инструкции главного, участкового и сменного маркшейдеров;
- документы, свидетельствующие об организации производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности и охраны недр при производстве маркшейдерских работ;
- перечень имеющейся нормативной, методической, технологической и технической документации, используемой при производстве маркшейдерских работ;
- образцы маркшейдерских журналов и ведомостей, принятых в организации;
- перечень оборудования, приборов и инструментов, средств вычислений, необходимых для производства маркшейдерских работ;
- перечень нормативной, методической, технологической и технической документации, используемой при производстве маркшейдерских работ и иной документации;
- обоснование применяемой методики измерений с предрасчётом погрешности определения пунктов опорной и съёмочной сети и сопоставления данных расчётов с нормативными требованиями действующей инструкции на производство маркшейдерских работ.

При определении численного состава маркшейдерской службы организации учитываются объёмы и сроки производства отдельных видов маркшейдерских работ (число горно-транспортных комплексов, горных участков, удалённость мест производства маркшейдерских работ, климатические

условия выполнения работ, наличие и количество наблюдательных станций по мониторингу сдвижений и деформаций горного массива в местах производства горных работ и т. п.).

Графические материалы проекта должны содержать:

- обзорную карту района работ с указанием границ участка недр, представленного при лицензировании и уточнённых границ горного отвода;
- схему плано-высотного опорного и съёмочного обоснования;
- схему ориентирно-соединительной съёмки;
- схему передачи высот по вертикальным горным выработкам;
- схемы, используемые для определения оценки точности опорного и съёмочного обоснования;
- необходимые графические пояснения к текстовому материалу.

При изменении горно-геологических, технологических и иных условий пользования недрами, а также при изменении организационных и технических условий производства маркшейдерских работ на объектах недропользования в проект вносятся соответствующие изменения и дополнения.

Проект на отдельные виды маркшейдерских работ составляется по упрощённой форме и предусматривает сведения о владельце лицензии на отдельные виды работ (копию лицензии), основу выполнения работ (нормативное требование, рекомендации НИР и т. п.), график производства работ, обеспечение производства маркшейдерских работ, сведения об ответственных исполнителях работ, методику (алгоритм) выполнения работ с графическими пояснениями, перечень отчётных материалов.

Проектная документация на производство маркшейдерских работ утверждается руководителем организации, осуществляющей его реализацию. При производстве маркшейдерских работ на договорной основе проект утверждается пользователем недр.

Проектная документация подписывается разработчиками проекта, главным маркшейдером организации, осуществляющим реализацию проекта.

Согласование проекта производства маркшейдерских работ осуществляется в территориальном органе Ростехнадзора, для чего в органы Ростехнадзора направляется:

- сопроводительное письмо;
- проектная документация (пояснительная записка, текстовые, табличные и графические приложения);
- копия лицензии на производство маркшейдерских работ организации, подготовившей проект (в случае его подготовки сторонней организацией).

1.11. Аудит маркшейдерских работ на действующем горном предприятии

Для качественной подготовки проекта необходимо произвести аудит производимых маркшейдерской службой работ по обслуживанию горного производства.

При проведении аудита необходимо всесторонне проанализировать деятельность маркшейдерской службы, методику выполнения работ. Перечень вопросов, на которые необходимо дать ответ, выглядит следующим образом:

1. Топографо-геодезическая изученность и застроенность территории разработки месторождения, сохранность и состояние пунктов опорного обоснования.

2. Наличие и сроки действия лицензии на пользование недрами, лицензии на право производства маркшейдерских работ.

3. Изучение технического проекта разработки месторождения с целью соблюдения проектных технических границ отработки с фактическим положением горных работ.

4. Наличие и сроки действия горного отвода и сравнение его границ с границами лицензионного участка недр и технической границей отработки месторождения, определённой в проекте на разработку.

5. Горно-геологические и горно-технические условия разработки месторождения, наличие опасных зон сдвижений и деформаций горного массива, проявление динамических форм горного давления (горных ударов), этапов и способов разработки месторождения.

6. Характеристика маркшейдерских работ, выполняемых силами маркшейдерской службы предприятия, и маркшейдерско-геодезических работ, выполняемых силами подрядных организаций на договорной основе.

7. Методики создания маркшейдерских опорных и съёмочных сетей плано-высотного обоснования. Соответствие выполняемых работ требованиям действующей инструкции по производству маркшейдерских работ (РД 07-603-03).

8. Перечень имеющихся в наличии у маркшейдерской службы предприятия геодезических приборов и инструментов. Периодичность их поверок и метрологического контроля.

9. Анализ применяемых программных продуктов, используемых для обработки маркшейдерских измерений на предмет их сертификации и применимости в данной области.

10. Перечень первичной, вычислительной и графической документации. Организация учёта и хранения документации.

11. Численный состав. Квалификация сотрудников маркшейдерской службы в соответствии с требованиями, изложенными в «Положении о лицензировании деятельности по производству маркшейдерских работ», утверждённом постановлением Правительства Российской Федерации от 04.06.2002 г. № 382, своевременное прохождение ими курсов повышения квалификации.

12. Система производственного контроля на предприятии за соблюдением требований промышленной безопасности и охраны недр при производстве маркшейдерских работ.

Контрольные вопросы

1. Какими нормативно-техническими документами регламентируется разработка ППМР?

2. Какова основная нормативно-законодательная база регламентирующая деятельность маркшейдерской службы предприятия?

3. Основные требования Положения о геолого-маркшейдерских службах горного предприятия («РД 07-408-01. О геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр»).

4. Организационная структура маркшейдерской службы горного предприятия.
5. Назовите разделы «Проекта производства маркшейдерских работ».
6. Порядок проведения аудита маркшейдерской службы действующего предприятия.
7. Основные отличия разработки ППМР на действующем и вновь строящемся предприятии.
8. Типы проектных решений при разработке ППМР.

Рекомендуемая литература

1. О лицензировании производства маркшейдерских работ: постановление Правительства РФ от 28.03.2012 г. № 257.
2. О недрах: федер. закон от 03.03.1995 г. № 27-ФЗ (с изм. от 03.08.2018 г.). – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=13077>. – Текст: электронный.
3. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твёрдых полезных ископаемых / Госгортехнадзор России. – М., 2013. – 273 с.
4. Правила безопасности при разработке угольных месторождений открытым способом / Госгортехнадзор России. – М., 2017. – 56 с.
5. Правила охраны недр (ПБ 07-601-03). – М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2003. – 64 с.
6. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ / Госгортехнадзор России. – М., 2004. – 60 с.
7. РД 07-604-03. Инструкция по маркшейдерскому учёту объёмов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом / Госгортехнадзор России. – М., 2003. – 13 с.
8. Рекомендации по подготовке проектной документации на производство маркшейдерских работ / Научный центр геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского государственного горного института (технического университета) имени Г. В. Плеханова. – СПб., 2009. – 11 с.
9. Сученко В. Н. Маркшейдерское обеспечение строительства тоннелей и метрополитенов: учеб. пособие. – М.: Российский университет дружбы народов, 2008. – 207 с.

ГЛАВА 2

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ С ЭЛЕКТРОННЫМИ ТАХЕОМЕТРАМИ НА СТАНЦИИ

Проведение геодезических измерений постоянно сопровождается погрешностями измерений. В последние 10–15 лет в повседневной практике применялись оптические приборы старого образца, часто теодолиты технической точности, но сегодня они сняты с производства. Поэтому даже для выполнения рядовых работ технической точности повсеместно начали применять точные электронные тахеометры (с точностью отсчитывания направления 1", 2", 3", 5" или 10"). Так как электронные тахеометры ещё позволяют измерять расстояние до 5 км с высокой точностью от 5 до 15 мм, их начали применять без должного внимания к точности получаемых конечных результатов.

В данной главе предлагается рассмотреть различные особенности применения электронных тахеометров в деталях.

2.1. Оценка погрешности ориентирования тахеометра в пространстве при наведении его на точку визирования

Точность наведения на цель (геодезическую марку, отражательную призму) зависит от ряда параметров (рис. 2.1, 2.2):

- 1) увеличения зрительной трубы (равной обычно 20^x – 31^x , иногда может доходить до 40^x);
- 2) разрешающей способности человеческого глаза (в среднем принимают 60" при хороших условиях освещения и при плохих 100" – сумерки или шахтные горные выработки);

- 3) точности совмещения сетки нитей с центром визирной марки (зависит от конструкции сетки нитей: простое перекрестие или наличие биссектора);
- 4) точности установки (центрирования) визирной марки над точкой визирования (погрешность редукции);
- 5) точности центрирования тахеометра над точкой стояния;
- 6) точности определения координат исходных (базовых) точек стояния и визирования (ранее всегда считалось, что координаты базовых точек определены с достаточно высокой точностью и их погрешностью можно пренебречь);
- 7) погрешностей, определяемых условиями измерения (температура окружающего воздуха; атмосферное давление; расстояние измерения; превышение точки визирования над точкой стояния – перепад высот).

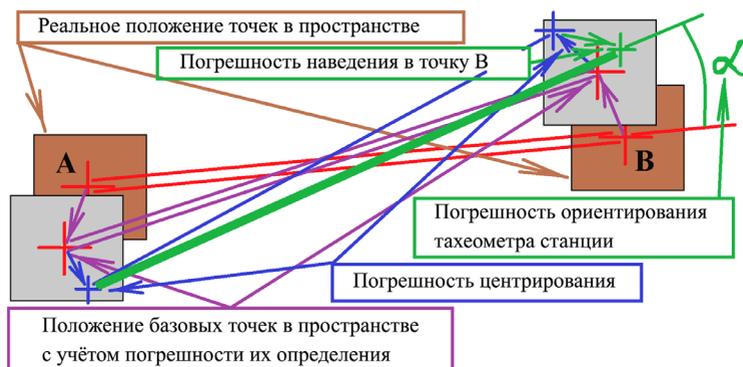


Рис. 2.1. Схема образования погрешностей ориентирования тахеометра в пространстве относительно базовых точек

Мы специально перечислили практически все моменты возникновения погрешностей при установке тахеометра на станцию и его ориентирования по базовой точке, чтобы в дальнейшем у нас была возможность некоторые из них приравнивать к нулю, если методика измерения такое предполагает. Дело в том, что сегодня электронные тахеометры начали использовать при граничных условиях, при длинах сторон от 1,5–2,0 м до 5 км.

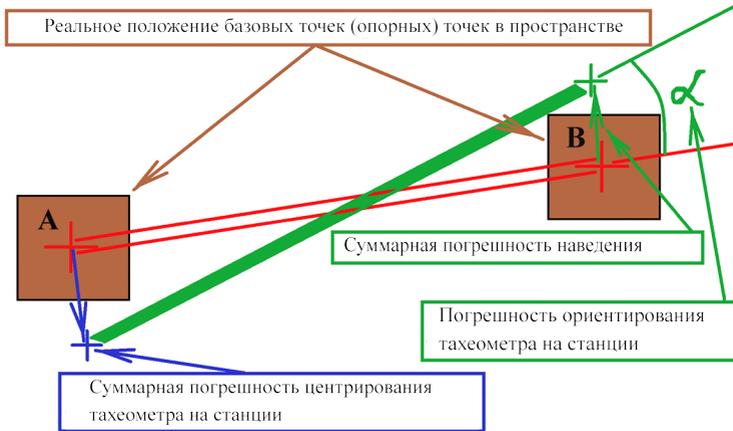


Рис. 2.2. Погрешность ориентирования тахеометра в пространстве относительно базовых точек

В таких случаях на точность измерения углов или точность их вычисления начинают влиять совершенно другие погрешности, которые ранее считались несущественными.

2.2. Погрешность определения координат точек базовой стороны

Погрешность определения координат точек исходной (базовой) стороны зависит от класса точности геодезических работ, с которым они были получены. В соответствии с «Руководством по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS» [4] (п. 2.1.2.1, табл. 1), пункты государственной геодезической сети по точности взаимного положения для самой слабой стороны ранее подразделялись на следующие классы и разряды:

- 1) для триангуляции, трилатерации и полигонометрии 1-го класса 1:300 000;
- 2) для триангуляции, трилатерации и полигонометрии 2-го класса 1:250 000;

3) для триангуляции, трилатерации и полигонометрии 3-го класса 1:120 000;

4) для триангуляции, трилатерации и полигонометрии 4-го класса 1:70 000;

5) для городской полигонометрии 4-го класса 1:25 000;

6) для городской полигонометрии 1-го разряда 1:10 000;

7) для городской полигонометрии 2-го разряда 1:5000.

Согласно «Инструкции по производству маркшейдерских работ» (п. 26, табл. 1) [31], относительная средняя квадратическая погрешность определения длины стороны в наиболее слабом месте не должна превышать:

1) для триангуляции 1-го разряда 1:20 000. Полигонометрии 1-го разряда 1:10 000;

2) для триангуляции 2-го разряда 1:10 000. Полигонометрии 2-го разряда 1:5000.

Приведённые данные могут быть основой для установления среднеквадратической погрешности определения координат исходных точек, принятых за базовые. В этом случае точность взаимного положения базовых пунктов может быть вычислена по формуле

$$m_{\text{Баз.}} = S \cdot 10^3 \cdot St, \quad (2.1)$$

где $m_{\text{Баз.}}$ – среднеквадратическая погрешность определения расстояния между базовыми точками, мм;

S – расстояние между базовыми точками, м;

St – нормативная относительная погрешность определения длин сторон в соответствующем классе или разряде.

Тогда среднеквадратическая погрешность определения координаты одной из базовых точек m_{xy} может быть определена как

$$m_{xy} = m_{\text{Баз.}} / \sqrt{2}, \quad (2.2)$$

где m_{xy} – среднеквадратическая погрешность определения координаты одной из базовых точек, мм;

$m_{\text{Баз.}}$ – среднеквадратическая погрешность определения расстояния между базовыми точками, мм.

При этом среднеквадратическая погрешность определения дирекционного угла базовой стороны $m_{\text{Дир.}}$ с учётом правила сложения погрешностей m_{xy} составит (рис. 2.3)

$$m_{\text{Дир.}} = \frac{\sqrt{2} \cdot m_{xy}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho, \quad (2.3)$$

или с учётом формул (2.1)–(2.3)

$$m_{\text{Дир.}} = \rho \cdot St, \quad (2.4)$$

где $m_{\text{Дир.}}$ – среднеквадратическая погрешность дирекционного угла, вызванная погрешностью определения исходных значений координат точек базовой линии, s ;

St – нормативная относительная погрешность определения длин сторон в соответствующем классе или разряде;

ρ – значение радиана, выраженное в секундах (206 264,806).

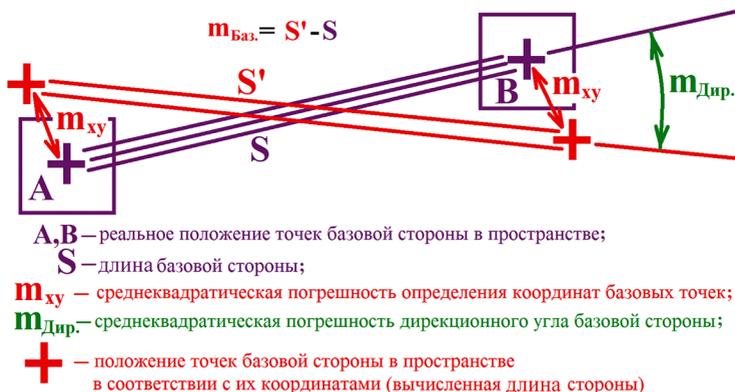


Рис. 2.3. Схема образования погрешности дирекционного угла базовой линии

Пример расчёта. Если проектируемые измерения опираются на базовую сторону полигонометрии 1-го разряда длиной $S = 800$ м, а её измерения были выполнены с относительной погрешностью 1:10 000, среднеквадратическая погрешность определения координаты одной из базовых точек составит

$$m_{\text{Баз.}} = 800 \cdot \frac{1}{10000} = 0,08 \text{ м},$$

$$m_{xy} = \frac{0.08}{\sqrt{2}} = 0,056 \text{ м},$$

$$m_{\text{Дир.}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0.056}{800} \cdot 206265'' = 21''$$

или

$$m_{\text{Дир.}} = 206265'' \cdot \frac{1}{10000} = 21''.$$

Данную погрешность следует учитывать при установке тахеометра на базовой (опорной) стороне при измерении примычных углов. Однако в маркшейдерской и геодезической практике, к сожалению, принято считать, что координаты опорных точек правильны и определены без погрешностей.

2.3. Погрешность центрирования прибора

Центрирование геодезических приборов, марок и отражателей над точкой выполняют с помощью круглых и цилиндрических уровней.

При выполнении высокоточных геодезических и маркшейдерских работ, таких как триангуляция, трилатерация, полигонометрия или установка GPS-приёмников, установка приборов производится на штативы (рис. 2.4). Центрирование прибора в этом случае выполняют с помощью оптического или лазерного центрира, ось которого устанавливается в вертикальное положение с помощью цилиндрического уровня прибора или адаптера.

Электронные тахеометры обычно оборудуются круглым уровнем с чувствительностью b' на 2 мм (принято записывать $\tau = b'/2$ мм) в пределах внутреннего круга (рис. 2.5), цилиндрическим с чувствительностью $\tau = 30''/2$ мм (рис. 2.6) или электронным на дисплее с чувствительностью до 1'' (рис. 2.7).

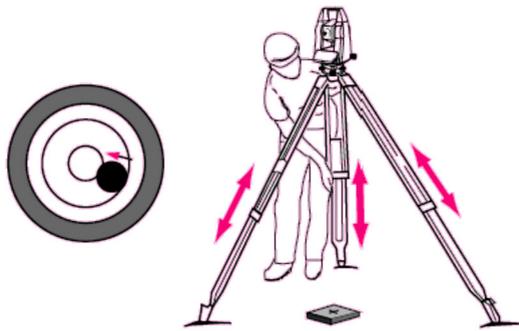


Рис. 2.4. Центрирование прибора над геодезической точкой



Рис. 2.5. Круглый уровень тахеометра

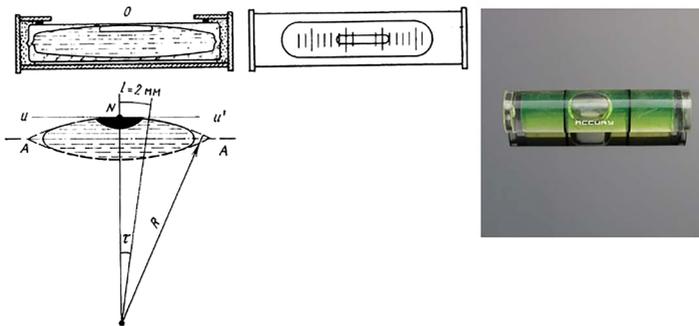


Рис. 2.6. Устройство цилиндрического уровня



Рис. 2.7. Электронные уровни тахеометров

Погрешность центрирования зависит от нескольких параметров: а) чувствительности используемого уровня; б) высоты установки инструмента; в) типа установочного оборудования (штатив обыкновенный, штатив телескопический, вежа с биподом, с триподом или вежа, удерживаемая вручную).

На рис. 2.8–2.14 представлены различные варианты установки геодезических приборов.



Рис. 2.8. Призменный отражатель, установленный через адаптер на трегер, устанавливаемый на базовой точке



Рис. 2.9. Адаптер для установки марок и GPS-приёмников (чувствительность уровня $\tau = 60''/2$ мм)



Рис. 2.10. Штативы телескопические, оборудованные круглым уровнем (чувствительность уровня $\tau = 6''/2$ мм)



Рис. 2.11. Веха телескопическая в комплекте с биподом, оборудованная круглым уровнем (чувствительность уровня $\tau = 6''/2$ мм)



Рис. 2.12. GNSS-приёмник, установленный на телескопическую вежу в комплекте с биподом



Рис. 2.13. Вехи телескопические, удерживаемые вручную по круглому уровню (чувствительность уровня $\tau = 10'/2$ мм)



Рис. 2.14. GNSS-приёмник, установленный на телескопическую вежу и удерживаемый вручную по круглому уровню

Рассмотрим возникновение погрешности центрирования для различных вариантов установки геодезических приборов.

Точность установки оси штатива или вежи в вертикальное положение зависит от того, на сколько точно устанавливают пузырёк уровня в нуль пункт.

Исследования, проведённые с круглыми уровнями, стандартно применяемыми на вежах и телескопических штативах, показали, что для круглого уровня возможны следующие положения пузырька уровня (рис. 2.15):

1) если пузырёк уровня касается контура окружности чувствительности (рис. 2.15б), среднее квадратическое отклонение (СК) от вертикали составляет от 5' до 8';

2) если пузырёк уровня находится на контуре окружности чувствительности (рис. 2.15в), СК отклонение от вертикали может составлять от 6' до 26'.

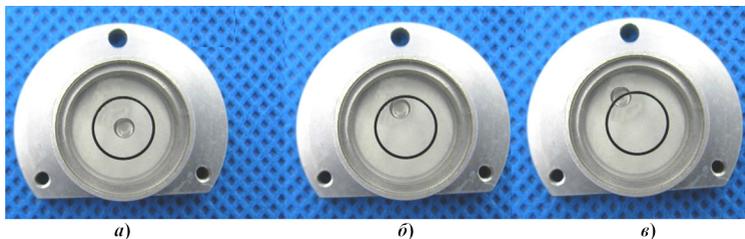


Рис. 2.15. Положение пузырька уровня относительно нуля пункта:
 а) пузырёк находится в нуль пункте;
 б) пузырёк находится внутри контура круга чувствительности;
 в) пузырёк находится на контуре круга чувствительности

Это указывает на необходимость при установке оси геодезических приборов в вертикальное положение по круглому уровню следить за тем, чтобы пузырёк уровня находился всегда внутри круга чувствительности (рис. 2.15а, б).

Как уже отмечалось выше, погрешность центрирования зависит от высоты установки прибора и используемого оборудования для установки геодезического прибора. Необходимо также заметить, что при центрировании над геодезической точкой визирной цели (марки) такую погрешность обычно принято называть погрешностью редуцирования $m_{\text{ред.}}$. На рис. 2.16 показано, как вычисляется погрешность центрирования (редуцирования) от перечисленных параметров выше.

Погрешность центрирования $m_{\text{цент.}}$ или редуцирования $m_{\text{ред.}}$ вычисляются по формулам

$$m_{\text{цент.}} = (\tau \cdot h \cdot 10^3) / \rho, \quad (2.5)$$

$$m_{\text{ред.}} = (\tau \cdot h \cdot 10^3) / \rho, \quad (2.6)$$

где τ – чувствительность уровня, с;

h – высота установки геодезического прибора, м;

ρ – значение радиана, выраженный в секундах (206 264,806).

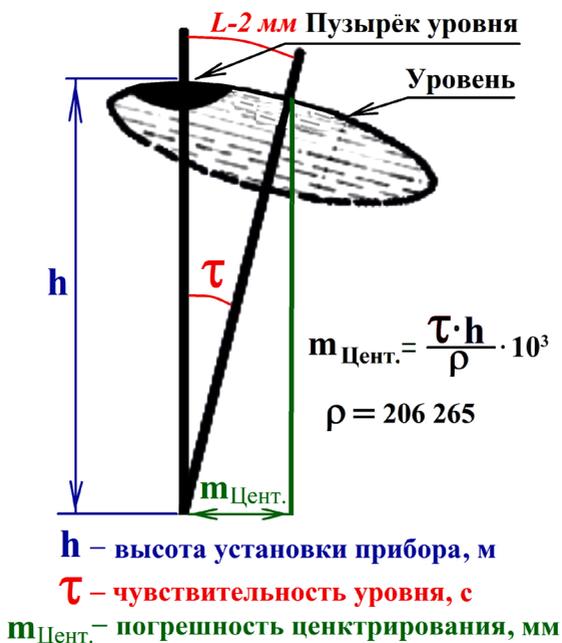


Рис. 2.16. Погрешность центрирования прибора

Приведём соответствующие расчёты для различных вариантов установки геодезических приборов.

Пример 1.

При высоте установки антенны базового ГНСС приёмника на штативе с адаптером $h = 1,7$ м и чувствительности цилиндрического уровня адаптера, имеющего оптический центр $\tau = 60''/2$ мм

$$m_{\text{Цент.}} = (60 \cdot 1,7 \cdot 10^3) / 206\,265 = 0,5 \text{ мм.}$$

Пример 2.

При высоте установки антенны ровера ГНСС приёмника на вехе с удержанием вехи биподом $h = 1700$ мм и чувствительности круглого уровня вехи $\tau = 8''/2$ мм

$$m_{\text{Цент.}} = (8 \cdot 60 \cdot 1700) / 206\,265 = 4,0 \text{ мм.}$$

Пример 3.

При высоте установки антенны ровера ГНСС приёмника на вехе с удержанием вехи в ручную $h = 1700$ мм и чувствительностью круглого уровня вехи $\tau = 20''/2$ мм

$$m_{\text{Цент.}} = (20 \cdot 60 \cdot 1700) / 206\,265 = 9,9 \text{ мм.}$$

Как видно из приведённых расчётов, погрешность центрирования прибора над геодезической точкой может различаться в 20 раз, в зависимости от используемого оборудования для установки геодезических инструментов.

2.4. Погрешность визирования

Погрешность визирования (наведения тахеометра на визирную цель) зависит от разрешающей способности человеческого глаза, увеличения зрительной трубы, конструкции визирной сетки нитей и погрешности редуцирования установки визирной марки, которая была рассмотрена ранее.

Разрешающая способность трубы – способность отметить (увидеть) раздельно две близлежащие точки цели. Оценивается углом r , при котором две точки ещё не сливаются в одну. Погрешность от разрешающей способности зрительной трубы вычисляют по формуле

$$m_{\text{Раз.}} = \varphi / V, \quad (2.7)$$

где $m_{\text{Раз.}}$ – среднеквадратическая погрешность разрешающей способности зрительной трубы, с;

φ – разрешающая способность человеческого глаза (в зависимости от условий видимости $\varphi = 60'' \div 100''$), с;

V – увеличение зрительной трубы, крат.

Увеличение зрительной трубы V – это отношение угла β , под которым предмет виден в трубу к углу α , под которым предмет виден невооружённым глазом. Фактически это есть отношение фокусных расстояний объектива и окуляра (рис. 2.17)

$$V = \beta / \alpha = F_{\text{Об.}} / F_{\text{Ок.}}, \quad (2.8)$$

где $F_{\text{Об.}}$ – фокусное расстояние объектива зрительной трубы, мм;
 $F_{\text{Ок.}}$ – фокусное расстояние окуляра зрительной трубы, мм.

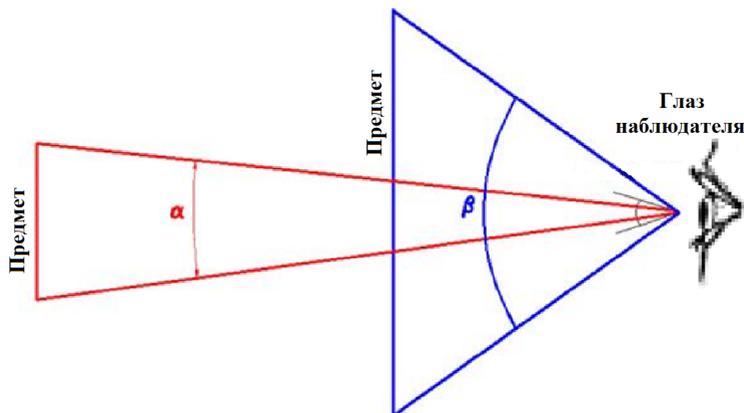


Рис. 2.17. Увеличение зрительной трубы

Зрительные трубы геодезических приборов имеют увеличение $V = 20^x - 50^x$. Современные электронные тахеометры, как правило, имеют увеличение $V = 31^x$.

Пример расчёта:

$$m_{\text{Раз.}} = 60'' / 31^x = 2''.$$

Погрешность наведения определяется конструктивными особенностями сетки нитей зрительной трубы прибора.

Если зрительная труба геодезического прибора оборудована биссектором, то наблюдатель при наведении на визирную цель старается поместить её симметрично вертикальным линиям биссектора (рис. 2.18). Считается, что человеческий глаз замечает несимметричность при отношениях А:В более 2:1. В соответствии с рис. 2.18 максимальный размах погрешности наведения составит $D/2$ и в соответствии с правилом трёх сигм для нормального закона распределения погрешностей среднеквадратическая погрешность визирования с помощью биссектора составит

$$m_{\text{Нав.}} = D / (2 \cdot 6) = D / 12, \quad (2.9)$$

где $m_{\text{Нав.}}$ – среднеквадратическая погрешность наведения с помощью биссектора, с;

D – угловое расстояние между нитями биссектора ($D = 30'' - 60''$), с.

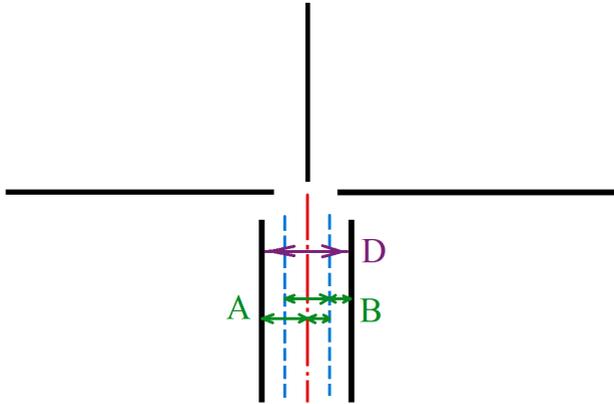


Рис. 2.18. Схема образования погрешности наведения при наличии биссектора:

D – угловое расстояние биссектора, с;

A, B – несимметричность при наведении обычно 2:1

Согласно представленного выражения (2.9), среднеквадратическая погрешность визирования с помощью биссектора составит

$$m_{\text{Нав.}} = D / 12 = 60'' / 12 = 5''.$$

Если наблюдатель наводит трубу на визирную цель по одной центральной нити, за погрешность наведения принято принимать $1/2$ половины угла, под которым нить видна из центра объектива, так как за линией сетки нитей образуется мёртвая зона (рис. 2.19)

$$m_{\text{Нав.}} = 1/2 \cdot (b \cdot \rho) / f', \quad (2.10)$$

где $m_{\text{Нав.}}$ – среднеквадратическая погрешность наведения с помощью одной нити, с;

b – толщина нити сетки нитей ($b = 0,003–0,01$), мм;
 f – расстояние от объектива до сетки нитей ($f = 105–125$), мм;
 ρ – значение радиана, выраженное в секундах (206 264,806).

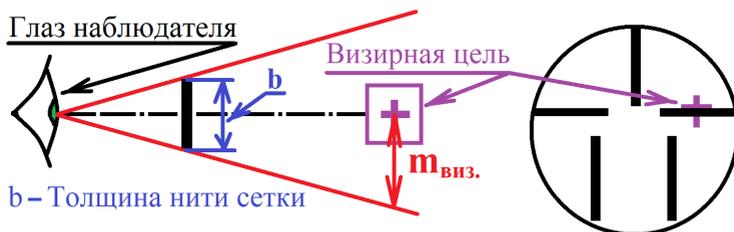


Рис. 2.19. Схема образования мёртвой зоны при наведении на цель по одной нити сетки

Пример расчёта:

$$m_{\text{Нав.}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{b \cdot \rho}{f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,01 \cdot 206265}{105} = 10''.$$

Данный случай чаще всего возникает при измерении вертикальных углов. Многие современные тахеометры имеют биссектор и на горизонтальной сетке нитей.

Суммарная или общая среднеквадратическая погрешность визирования, в соответствии с теорией сложения погрешностей [13; 26], может быть определена путём квадратичного суммирования всех независимых погрешностей

$$m_{\text{Виз.}}^2 = \left(\frac{m_{\text{Ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho \right)^2 + m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{Раз.}}^2, \quad (2.11)$$

где $m_{\text{Виз.}}$ – среднеквадратическая погрешность визирования тахеометра на марку, с;

$m_{\text{Ред.}}$ – среднеквадратическая погрешность редуцирования визирной марки над точкой, мм;

S – расстояние до визирной марки, м;

$m_{\text{Нав.}}$ – среднеквадратическая погрешность наведения, с;

$m_{\text{Раз.}}$ – среднеквадратическая погрешность разрешающей способности зрительной трубы, с;

ρ – значение радиана, выраженное в секундах (206 264,806).

Часто значение погрешности визирования необходимо получить в миллиметрах. В этом случае формула (2.11) примет вид

$$m_{\text{Виз.}}^2 = m_{\text{Ред.}}^2 + \left(\frac{S \cdot 10^3}{\rho}\right)^2 \cdot (m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{Раз.}}^2). \quad (2.12)$$

Пример расчёта. Для измерения горизонтальных и вертикальных углов применён электронный тахеометр с увеличением трубы $V = 31^{\times}$. Визирная марка установлена на телескопическом штативе, оборудованном круглым уровнем с чувствительностью $\tau = 8'/2$ мм, на высоте $h = 1,7$ м. Расстояние до визирной марки $S = 198$ м. Измерения выполняются в горной выработке со слабым освещением (разрешающая способность глаза $\varphi = 100''$).

При измерении горизонтального угла и использовании при наведении на визирную цель биссектора сетки нитей

$$m_{\text{Ред.}} = \frac{\tau \cdot h}{\rho} = \frac{8 \cdot 60 \cdot 1700}{206 \ 265} = 4,0 \text{ мм},$$

$$m_{\text{Раз.}} = \frac{\varphi}{V} = \frac{100''}{31^{\times}} = 3,2'',$$

$$m_{\text{Нав.}} = \frac{D}{12} = \frac{60''}{12} = 5'',$$

$$m_{\text{Виз.}} = \sqrt{\left(\frac{m_{\text{Ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{Раз.}}^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{4 \cdot 206 \ 265}{198 \ 000}\right)^2 + 3,2''^2 + 5''^2} = 7,2'',$$

$$m_{\text{Виз.}} = \sqrt{m_{\text{Ред.}}^2 + \left(\frac{S \cdot 10^3}{\rho}\right)^2 \cdot (m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{Раз.}}^2)} =$$

$$= \sqrt{4^2 + \left(\frac{198 \cdot 1000}{206 \ 265}\right)^2 \cdot (3,2''^2 + 5''^2)} = 7 \text{ мм}.$$

При измерении вертикального угла и использовании при наведении на визирную цель одинарной нити

$$m_{\text{ред.}} = \frac{\tau \cdot h}{\rho} = \frac{8 \cdot 60 \cdot 1700}{206265} = 4,0 \text{ мм},$$

$$m_{\text{раз.}} = \frac{\varphi}{V} = \frac{100''}{31^{\times}} = 3,2'',$$

$$m_{\text{Нав.}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{b \cdot \rho}{f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,01 \cdot 206265}{105} = 10'',$$

$$\begin{aligned} m_{\text{Виз.}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{раз.}}^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{4 \cdot 206265}{198\,000}\right)^2 + 3,2''^2 + 10''^2} = 11,3'', \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{Виз.}} &= \sqrt{m_{\text{ред.}}^2 + \left(\frac{S \cdot 10^3}{\rho}\right)^2 \cdot (m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{раз.}}^2)} = \\ &= \sqrt{4^2 + \left(\frac{198 \cdot 1000}{206\,265}\right)^2 \cdot (3,2''^2 + 10''^2)} = 11 \text{ мм}. \end{aligned}$$

2.5. Учёт погрешности определения координат базовой стороны

В некоторых случаях, при расчёте погрешностей измерений, возникает необходимость учесть погрешности исходных данных, рассмотренных в разделе 2.1. В этом случае к погрешности визирования следует добавить их погрешности, вычисляемые по формулам (2.1) или (2.4) в зависимости от требуемых единиц измерения

$$m_{\text{Виз.Б}}^2 = \left(\frac{m_{\text{Ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho \right)^2 + m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{Раз.}}^2 + m_{\text{Дир.}}^2, \text{ с} \quad (2.13)$$

$$m_{\text{Виз.Б}}^2 = m_{\text{Ред.}}^2 + m_{\text{Баз.}}^2 + \left(\frac{S \cdot 10^3}{\rho} \right)^2 \cdot (m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{Раз.}}^2), \text{ мм}, \quad (2.14)$$

где $m_{\text{Виз.Б}}$ – среднеквадратическая погрешность визирования тахеометра на марку, с или мм;

$m_{\text{Ред.}}$ – среднеквадратическая погрешность редуцирования визирной марки над точкой, мм;

S – расстояние до визирной марки, м;

$m_{\text{Нав.}}$ – среднеквадратическая погрешность наведения, с;

$m_{\text{Раз.}}$ – среднеквадратическая погрешность разрешающей способности зрительной трубы, с;

$m_{\text{Дир.}}$ – среднеквадратическая погрешность определения дирекционного угла исходной (базовой) стороны, с;

ρ – значение радиана, выраженное в секундах (206 264,806).

2.6. Погрешность ориентирования тахеометра на линии визирования

Погрешность ориентирования электронного тахеометра на линии визирования может быть получена путём квадратичного сложения погрешности визирования и погрешности центрирования его на станции

$$m_{\text{Ориент.}}^2 = \left(\frac{m_{\text{Центр.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho \right)^2 + m_{\text{Виз.}}^2, \quad (2.15)$$

где $m_{\text{Ориент.}}$ – среднеквадратическая погрешность ориентирования тахеометра на линии визирования, с;

$m_{\text{Центр.}}$ – среднеквадратическая погрешность центрирования тахеометра на станции базовой линии, мм;

S – длина базовой линии, м;

$m_{\text{Виз.}}$ – среднеквадратическая погрешность визирования на марку, с;

Если необходимо рассчитать погрешность ориентировки прибора с учётом погрешности определения координат исходной (базовой) стороны, то к погрешности ориентирования следует добавить погрешность определения дирекционного угла базовой стороны $m_{\text{Дир.}}$ (2.4). При этом формула (2.15) примет вид

$$m_{\text{Ориент.Б}}^2 = \left(\frac{m_{\text{Цент.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho \right)^2 + m_{\text{Виз.}}^2 + m_{\text{Дир.}}^2 \quad (2.16)$$

где $m_{\text{Ориент.Б}}$ – среднеквадратическая погрешность ориентирования тахеометра на станции базовой линии, с;

$m_{\text{Цент.}}$ – среднеквадратическая погрешность центрирования тахеометра на станции базовой линии, мм;

S – длина базовой линии, м;

$m_{\text{Виз.}}$ – среднеквадратическая погрешность визирования на марку, с;

$m_{\text{Дир.}}$ – среднеквадратическая погрешность дирекционного угла, вызванная погрешностью исходных значений координат, с.

Пример расчёта. Предположим, что проектируемые измерения опираются на базовую сторону триангуляции 4-го класса длиной $S = 4000$ м, а её измерения были выполнены с относительной погрешностью $St = 1:70\,000$ согласно соответствующей инструкции. Для измерений на станции установлен тахеометр, имеющий оптический центр с точностью центрирования $m_{\text{Цент.}} = 2$ мм и зрительную трубу с увеличением 31^{\times} . В точке визирования, на телескопическом штативе, имеющем круглый уровень с чувствительностью $\tau = 6'/2$ мм, установлена марка в виде отражательной призмы на высоте $h = 1,7$ м. Визирование выполняется с помощью биссектора. Условия измерения (видимость) хорошие. Требуется определить точность ориентирования тахеометра после его установки на станции

$$m_{\text{Дир.}} = \rho \cdot St = 206265'' \cdot \frac{1}{70000} = 3'';$$

$$m_{\text{Цент.}} = 2,0 \text{ мм};$$

$$m_{\text{ред.}} = \frac{\tau \cdot h}{\rho} = \frac{6 \cdot 60 \cdot 1,7 \cdot 10^3}{206265} = 3,0 \text{ мм};$$

$$m_{\text{раз.}} = \frac{\varphi}{V} = \frac{60''}{31^{\text{X}}} = 2'';$$

$$m_{\text{Нав.}} = \frac{D}{12} = \frac{60''}{12} = 5'';$$

$$\begin{aligned} m_{\text{Виз.}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{раз.}}^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 206265}{4000 \cdot 10^3}\right)^2 + 5''^2 + 2''^2} = 5,4'', \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{Ориент.}} &= \left(\frac{m_{\text{Цент.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Виз.}}^2 + m_{\text{Дир.}}^2 = \\ &= \sqrt{\left(\frac{2}{4000 \cdot 10^3} \cdot 206265\right)^2 + 5,4^2 + 3^2} = 6,2''. \end{aligned}$$

В качестве замечания можно отметить, что нами в данных разделах ещё не учтена погрешность за счёт боковой рефракции. Однако она проявляется только при высокоточных работах и при больших расстояниях. Эта погрешность может достигать 10'' при расстояниях между базовыми точками 10–20 км [27; 40]. Более подробно эта погрешность будет рассмотрена в разделе тригонометрического нивелирования. Анализ приведённых формул показывает, что при значительных расстояниях между базовыми точками влияние погрешностей центрирования прибора и редукции марки становится незначительным.

2.7. Погрешность измерения угла в полигонометрическом ходе

Погрешность измерения горизонтального угла включает в себя инструментальную ошибку и ошибку от центрирования тахеометра и редуциции сигналов (рис. 2.20). Инструментальная погрешность m_i (погрешность собственно измерения угла) зависит от качества используемых приборов и способов, применяемых при измерении угла.

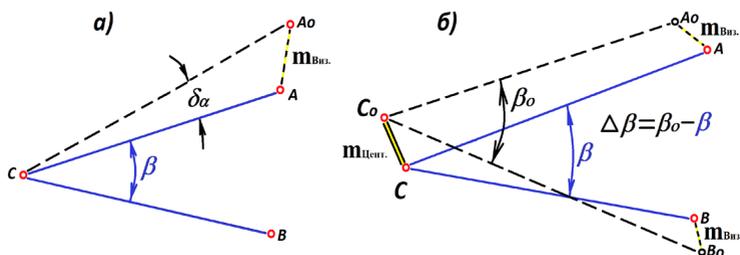


Рис. 2.20. Погрешности измерения угла:

- а) от эксцентриситета сигнала;
- б) от центрирования тахеометра и погрешности визирования;
- $m_{\text{Inst.}}$ – погрешность центрирования прибора;
- $m_{\text{Виз.}}$ – погрешность визирования на марку;
- β – значение угла на местности; β_0 – измеренное значение угла;
- $\Delta\beta$ – ошибка измерения угла

При измерении угла способом «полных приёмов» значения угла определяют по формуле

$$\beta = (\beta_{\text{КП}} + \beta_{\text{КЛ}}) / 2 \quad \text{или} \quad \beta = 1/2 [(b - a) + (b' - a')],$$

где β – значение угла в одном полном приёме;

$\beta_{\text{КП}}$ – значение угла, измеренное при круге право (КП);

$\beta_{\text{КЛ}}$ – значение угла, измеренное при круге лево (КЛ);

b – отсчёт по тахеометру на точку В при круге право (КП);

a – отсчёт по тахеометру на точку А при круге право (КП);

b' – отсчёт по тахеометру на точку В при круге лево (КЛ);

a' – отсчёт по тахеометру на точку А при круге лево (КЛ);

Согласно теории погрешностей измерений [13; 26], для функции измеренных величин

$$U = x + y + \dots + z,$$

где U – функция независимых величин;
 x, y, z – измеряемые параметры.

Погрешность функции может быть вычислена по формуле

$$m_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \cdot m_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \cdot m_y^2 + \dots + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \cdot m_z^2, \quad (2.17)$$

где m_u – среднеквадратическая погрешность функции независимых величин x, y, z ;

$\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}$ – частные производные измеряемых параметров x, y, z ;

m_x, m_y, m_z – среднеквадратические погрешности измеряемых параметров x, y, z .

Поэтому среднеквадратическая погрешность измерения угла одним полным приёмом составит

$$m_\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (m_a^2 + m_b^2)},$$

где m_β – среднеквадратическая погрешность измерения угла в одном полном приёме, с;

m_a – среднеквадратическая погрешность направления на точку a , с;

m_b – среднеквадратическая погрешность направления на точку b , с.

Так как погрешность каждого направления складывается из погрешностей отсчитывания по прибору $m_{\text{От.}}$ и его ориентирования на визирную марку $m_{\text{Ориент.}}$

$$m_a^2 = m_{a'}^2 = m_{\text{От.}}^2 + m_{\text{Ориент.А}}^2;$$

$$m_b^2 = m_{b'}^2 = m_{\text{От.}}^2 + m_{\text{Ориент.В}}^2.$$

Среднеквадратическая погрешность измерения угла одним полным приёмом составит

$$m_{\beta} = \sqrt{m_{\text{От.}}^2 + \frac{1}{2} \cdot (m_{\text{Ориент.А}}^2 + m_{\text{Ориент.В}}^2)}, \quad (2.18)$$

где m_{β} – среднеквадратическая погрешность измерения угла одним полным приёмом, с;

$m_{\text{От.}}$ – среднеквадратическая погрешность отсчёта по тахеометру, с;

$m_{\text{Ориент.А}}$ – среднеквадратическая погрешность ориентирования тахеометра на сигнал (марку А), с;

$m_{\text{Ориент.В}}$ – среднеквадратическая погрешность ориентирования тахеометра на сигнал (марку В), с.

При измерении угла n приёмами среднеквадратическая погрешность измерения угла определится как

$$m_{\beta} = \sqrt{\frac{m_{\text{От.}}^2 + \frac{1}{2} \cdot (m_{\text{Ориент.А}}^2 + m_{\text{Ориент.В}}^2)}{n}}, \quad (2.19)$$

где m_{β} – среднеквадратическая погрешность измерения угла одним полным приёмом, с;

$m_{\text{От.}}$ – среднеквадратическая погрешность отсчёта по тахеометру, с;

$m_{\text{Ориент.А}}$ – среднеквадратическая погрешность ориентирования тахеометра на сигнал (марку А), с;

$m_{\text{Ориент.В}}$ – среднеквадратическая погрешность ориентирования тахеометра на сигнал (марку В), с;

n – число полных приёмов.

При измерении угла способом «повторений» на тахеометре берётся только два отсчёта, независимо от числа повторений n , а угол вычисляют по формуле

$$\beta = (b_n - a_1) / 2n,$$

где β – значение измеренного угла способом повторений;

b_n – отсчёт по тахеометру последнего наведения на точку В;

a_1 – отсчёт по тахеометру первого наведения на точку А;

n – число повторений.

Так как при измерении угла способом повторений выполняется $4n$ визирований на сигнал (визирные марки) и только 2 отсчёта, первый и последний, среднеквадратическая погрешность измерения угла может быть вычислена по формуле

$$m_{\beta} = \sqrt{\frac{1}{2n} \left(\frac{m_{\text{от.}}^2}{n} + m_{\text{Ориент.А}}^2 + m_{\text{Ориент.В}}^2 \right)}, \quad (2.20)$$

где m_{β} – среднеквадратическая погрешность измерения угла одним полным приёмом, с;

$m_{\text{от.}}$ – среднеквадратическая погрешность отсчёта по тахеометру, с;

$m_{\text{Ориент.А}}$ – среднеквадратическая погрешность ориентирования тахеометра на сигнал (марку А), с;

$m_{\text{Ориент.В}}$ – среднеквадратическая погрешность ориентирования тахеометра на сигнал (марку В), с;

n – число повторений.

Необходимо заметить, что так как современные электронные тахеометры обычно имеют точность отсчитывания $1''\text{--}5''$, соизмеримую с точностью визирования, способ повторений сегодня применяется все реже.

При использовании электронного тахеометра отсчёты выводятся на дисплей тахеометра в соответствии со штриховой шкалой. При этом тахеометр автоматически выполняет округление до соответствующего разряда, поэтому погрешность отсчитывания $m_{\text{от.}}$ по электронному тахеометру может быть определена на основе теории округления [2; 12; 23].

При точности прибора ϑ (интервал округления) максимальная погрешность округления, очевидно, не превысит половины интервала округления, т. е. величины $\vartheta/2$. Тогда для доверительной вероятности P можно записать выражение абсолютной погрешности округления

$$m_{\text{от.}} = P \cdot \vartheta/2, \quad (2.21)$$

где $m_{\text{от.}}$ – среднеквадратическая погрешность отсчёта по тахеометру, с;

P – доверительная вероятность результата (обычно = 0,95), отн. ед.;

ϑ – интервал округления (паспортная точность электронного тахеометра, обычно 1", 5" или 10").

Следует заметить, что большинство тахеометров могут повышать точность вывода результатов на дисплей. Например, тахеометр с паспортной точностью отсчитывания 5" может выводить результаты с точностью до 1". Поэтому при расчётах всегда необходимо брать паспортную точность прибора, в данном случае 5". Дело в том, что в современных электронных приборах реальная точность определяется не точностью выводимого результата, а точностью конструктивных особенностей прибора – прецизионностью его изготовления.

Пример расчёта. В проектируемом полигонометрическом ходе 1-го разряда предполагается выполнить измерения углов и расстояний электронным тахеометром (рис. 2.21). Полигонометрический ход опирается на базовую сторону триангуляции 4-го класса длиной $S_a = 4000$ м (длина стороны С-А), измерения которой были выполнены с относительной погрешностью $St = 1:70\,000$ согласно соответствующей инструкции. Средняя длина стороны полигонометрического хода, проложенного в штольне $S_b = 315$ м (длина стороны С-В). Горизонтальные углы измеряются тахеометром, имеющим оптический центрир с точностью центрирования $m_{\text{цент.}} = 2$ мм, зрительную трубу с увеличением $V = 31^x$ и точность отсчитывания по горизонтальному кругу $\vartheta = 5''$. В точках визирования, на телескопическом штативе, имеющем круглый уровень с чувствительностью $\tau = 6'/2\text{мм}$, установлены марки в виде отражательной призмы на высоте $h = 1,7$ м. Визирование выполняется с помощью биссектора, имеющего угловое расстояние $D = 60''$. Условия измерения (видимость) на базовой стороне хорошие $\varphi = 60''$. Условия измерения на стороны полигонометрии удовлетворительные, так как точки B и G находятся в штольне со слабым освещением $\varphi = 100''$.

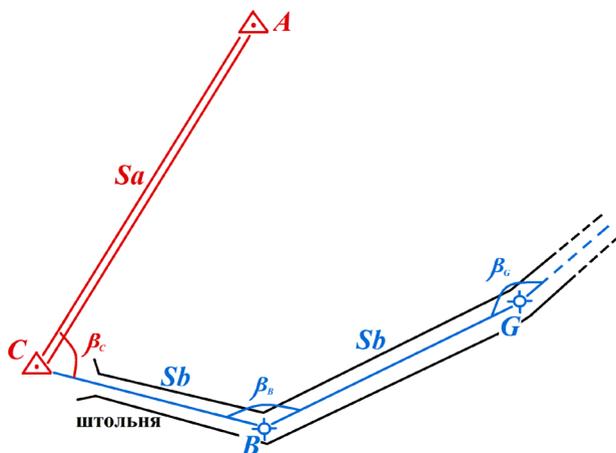


Рис. 2.21. Схема полигонометрического хода 1-го разряда

Требуется определить точность измерения тахеометром примычного угла и остальных углов полигонометрического хода.

Погрешность определения исходного дирекционного угла между базовыми точками (2.4):

$$m_{\text{дир.}} = \rho \cdot St = 206265 \cdot \frac{1}{70000} = 3''.$$

Погрешность редуцирования визирной марки над точкой визирования (2.6)

$$m_{\text{ред.}} = \frac{\tau \cdot h}{\rho} = \frac{6 \cdot 60 \cdot 1,7 \cdot 10^3}{206265} = 3,0 \text{ мм.}$$

Погрешность, определяемая разрешающей способностью человеческого глаза и увеличением зрительной трубы на дневной поверхности (2.7)

$$m_{\text{раз.}} = \frac{\varphi}{V} = \frac{60''}{31^{\times}} = 2''.$$

Погрешность, определяемая разрешающей способностью человеческого глаза и увеличением зрительной трубы в штольне (2.7)

$$m_{\text{Раз.}} = \frac{\varphi}{V} = \frac{100''}{31^X} = 3''.$$

Погрешность, определяемая конструкцией сетки нитей зрительной трубы (2.9)

$$m_{\text{Нав.}} = \frac{D}{12} = \frac{60''}{12} = 5''.$$

Погрешность визирования тахеометра на марку точки A базовой стороны (2.11)

$$\begin{aligned} m_{\text{Виз.А}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{Ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{Раз.}}^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 206265}{4000 \cdot 10^3}\right)^2 + 5^2 + 2^2} = 5,4''. \end{aligned}$$

Погрешность визирования на марки точек B и G , установленных в штольне (2.11)

$$\begin{aligned} m_{\text{Виз.}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{Ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{Раз.}}^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 206265}{315 \cdot 10^3}\right)^2 + 5^2 + 3^2} = 6,2''. \end{aligned}$$

Погрешность ориентирования тахеометра на базовой линии (2.16)

$$\begin{aligned} m_{\text{Ориент.Б}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{Центр.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Виз.}}^2 + m_{\text{Дир.}}^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 206265}{4000 \cdot 10^3}\right)^2 + 5,4^2 + 3^2} = 6,2''. \end{aligned}$$

Погрешность ориентирования тахеометра на линии полигонометрии (2.15)

$$m_{\text{Ориент.}} = \sqrt{\left(\frac{m_{\text{Цент.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Виз.}}^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 206265}{315 \cdot 10^3}\right)^2 + 6,2^2} = 6,3''.$$

Погрешность отсчитывания по тахеометру (2.21):

$$m_{\text{От.}} = P \cdot \frac{\vartheta}{2} = 0,95 \cdot \frac{5}{2} = 2,4''.$$

Погрешность измерения примычного угла в соответствии с формулой (2.18)

$$m_{\beta} = \sqrt{m_{\text{От.}}^2 + \frac{1}{2} \cdot (m_{\text{Ориент.Б}}^2 + m_{\text{Ориент.}}^2)} =$$

$$= \sqrt{2,4^2 + \frac{1}{2} \cdot (6,2^2 + 6,3^2)} = 6,7''.$$

Погрешность измерения углов в полигонометрическом ходе (2.18)

$$m_{\beta} = \sqrt{m_{\text{От.}}^2 + \frac{1}{2} \cdot (m_{\text{Ориент.}}^2 + m_{\text{Ориент.}}^2)} =$$

$$= \sqrt{2,4^2 + \frac{1}{2} \cdot (6,3^2 + 6,3^2)} = 6,7''.$$

2.8. Погрешности разбивочных работ

Точность разбивочных работ зависит от ряда параметров:

- 1) погрешности определения координат опорной сети;
- 2) погрешности центрирования прибора;

- 3) погрешности центрирования (редуцирования) визирных сигналов;
- 4) погрешности геодезического прибора (инструментальная погрешность);
- 5) погрешности разбивочных элементов;
- 6) погрешности, определяемой способом разбивки.

Первые четыре погрешности нами рассмотрены в предыдущих разделах, и в дальнейшем мы будем ссылаться на них. Погрешности разбивочных элементов сегодня могут быть приняты равными нулю, так как проекты сегодня выполняются с применением компьютерных технологий, и координаты разбивочных точек относительно опорных осей или точек определяются с необходимой (любой степени высокой) точностью. Поэтому в конечном итоге следует оценить погрешности, зависящие непосредственно от выбираемого способа разбивки.

Наиболее распространённым в геодезической и маркшейдерской практике является способ полярных координат (рис. 2.22).

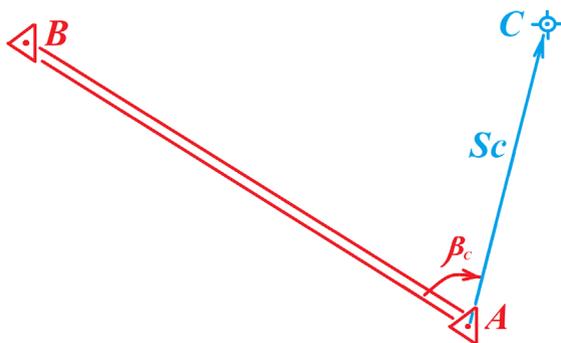


Рис. 2.22. Способ полярных координат

В способе полярных координат погрешность разбивочных работ зависит от:

- погрешности построения угла;
- погрешности построения расстояния. Погрешность разбивочных работ может быть вычислена по формуле [23; 40]:

$$m_C = \sqrt{m_S^2 + \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 \cdot (S \cdot 10^3)^2}, \quad (2.22)$$

где m_C – среднеквадратическая погрешность выноса координаты разбивочной точки C , мм;

m_S – среднеквадратическая погрешность построения расстояния, мм;

m_β – среднеквадратическая погрешность построения угла, с;
 S – проектное расстояние, м.

При использовании электронного тахеометра погрешность построения расстояния можно вычислить по формуле

$$m_S = \sqrt{m_{\text{Цент.}}^2 + m_{\text{Ред.}}^2 + m_{\text{Расст.}}^2}, \quad (2.23)$$

где m_S – среднеквадратическая погрешность построения расстояния, мм;

$m_{\text{Цент.}}$ – среднеквадратическая погрешность центрирования тахеометра на станции, мм;

$m_{\text{Ред.}}$ – среднеквадратическая погрешность редуцирования (центрирования) визирной марки над точкой, мм;

$m_{\text{Расст.}}$ – среднеквадратическая погрешность измерения расстояния тахеометром, мм.

Среднеквадратическая погрешность измерения расстояния тахеометром берётся согласно паспортным данным прибора и обычно вычисляется по формуле

$$m_{\text{Расст.}} = 3 \text{ мм} + 2 \text{ мм} \cdot S \text{ км}, \quad (2.24)$$

где $m_{\text{Расст.}}$ – среднеквадратическая погрешность измерения расстояния, мм;

S – проектное расстояние, км.

Среднеквадратическая погрешность построения угла складывается из:

– погрешности ориентирования тахеометра на базовой стороне;

– погрешности установки проектного отсчёта;

– погрешности редукиции (установки) сигнала.

Она может быть вычислена по формуле

$$m_{\beta}^2 = m_{\text{Ориент.}}^2 + m_{\text{От.}}^2 + \left(\frac{m_{\text{ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho \right)^2, \quad (2.25)$$

где m_{β} – среднеквадратическая погрешность построения угла, с;

$m_{\text{Ориент.}}$ – среднеквадратическая погрешность ориентирования тахеометра на линии визирования (2.15), с;

$m_{\text{От.}}$ – среднеквадратическая погрешность отсчёта тахеометра (2.21), с;

$m_{\text{ред.}}$ – среднеквадратическая погрешность редуцирования (центрирования) визирной марки над выставленной точкой, мм;

S – длина проектной линии, м.

Если возникает необходимость учесть погрешность определения координат точек опорной стороны А-В (рис. 2.22), то вместо погрешности ориентирования тахеометра на линии визирования $m_{\text{Ориент.}}$ (2.15) используют формулу (2.16), $m_{\text{Ориент.Б}}$ – погрешность ориентирования тахеометра на станции базовой линии

$$m_{\beta}^2 = m_{\text{Ориент.Б}}^2 + m_{\text{От.}}^2 + \left(\frac{m_{\text{ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho \right)^2. \quad (2.26)$$

Заметим, что погрешность установки нулевого отсчета при визировании на сигнал опорной (базовой) стороны добавлять не надо, так как электронные тахеометры обнуляют этот отсчёт с высокой точностью. Если построение угла выполняют при двух кругах (2 раза, как рекомендуют инструкции), то среднеквадратическую погрешность построения угла, вычисленную по формулам (2.25) или (2.26), необходимо уменьшить в $\sqrt{2}$.

Разбивка объектов может также выполняться *способом линейной или прямой угловой засечки* (рис. 2.23).

Так как эти способы используют те же методы отложения расстояний или углов, приведём окончательные формулы вычисления их среднеквадратических погрешностей [23; 40].

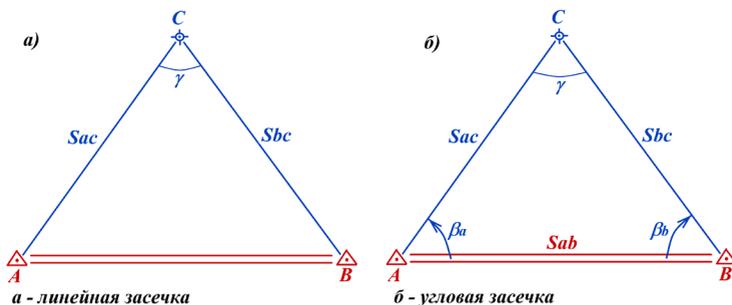


Рис. 2.23. Способы засечек

Способ *линейной засечки*:

$$m_C = \frac{\sqrt{m_{S_{ac}}^2 + m_{S_{bc}}^2}}{\sin \gamma}, \quad (2.27)$$

где m_C – среднеквадратическая погрешность выноса координаты разбивочной точки C , мм;

$m_{S_{ac}}, m_{S_{bc}}$ – среднеквадратические погрешности построения расстояний, мм;

γ – внутренний угол при разбивочной точке C , градус.

Способ *прямой угловой засечки*.

Вычисления можно выполнять по любой из формул

$$m_C = m_\beta \cdot \frac{S_{ab} \cdot 10^3}{\rho \cdot \sin \gamma} \cdot \sqrt{\sin^2 \beta_a + \sin^2 \beta_b}, \quad (2.28)$$

$$m_C = m_\beta \cdot \frac{10^3}{\rho \cdot \sin \gamma} \cdot \sqrt{S_{ac}^2 + S_{bc}^2}, \quad (2.29)$$

где m_C – среднеквадратическая погрешность выноса координаты разбивочной точки C , мм;

m_β – среднеквадратическая погрешность построения угла (2.25), с;

γ – внутренний угол при разбивочной точке C , градус;

S_{ab}, S_{ac}, S_{bc} – длины сторон в треугольнике, м;

β_a, β_b – откладываемые значения углов в точках A и B , градус.

За окончательную величину погрешности разбивочных работ принимают утроенное значение среднеквадратической погрешности

$$m_{\text{Пред.}} = \pm 3 \cdot m_c \quad (2.30)$$

Пример расчёта. Проектом предполагается вынос на местность двух контрольных точек c и d будущей разведочной линии. Разбивочный чертёж представлен на рис. 2.24.

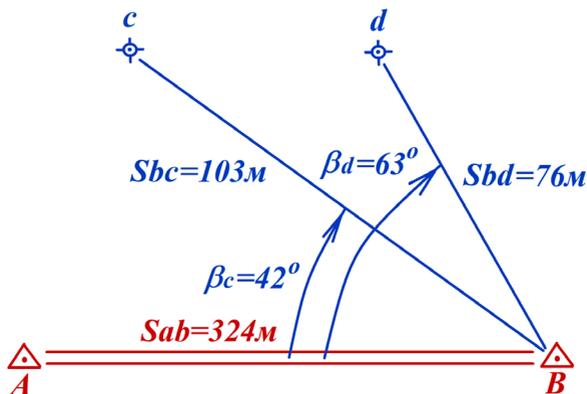


Рис. 2.24. Разбивочный чертёж точек разбивочной линии $c-d$

Разбивку разведочной линии предполагается выполнить способом полярных координат с помощью электронного тахеометра, имеющего следующие характеристики:

- 1) увеличение зрительной трубы $V = 31^x$;
- 2) точность отсчитывания по горизонтальному кругу $\vartheta = 5''$;
- 3) точностью центрирования тахеометра $m_{\text{Цент.}} = 2$ мм;
- 4) точность измерения расстояния дальномером ;
- 5) построение проектного угла выполняют при одном круге;
- 6) в точке A визирная марка установлена на телескопический штатив, имеющий круглый уровень с чувствительностью $\tau = 6' / 2$ мм. Высота визирной цели $h = 1,7$ м;

7) в качестве визирной марки используется веха с чувствительностью уровня $\tau = 8' / 2$ мм, устанавливаемая вручную. Высота визирной цели $h = 1,5$ м;

8) наведение на марки выполняют по биссектору с $D = 60''$;

9) условия измерения (видимость) хорошие $\varphi = 60''$.

Вычисление погрешности выполним для точки C с наибольшим расстоянием 103 м.

Погрешность редуцирования визирной марки над точкой визирования A (2.6)

$$m_{\text{ред.}} = \frac{\tau \cdot h}{\rho} = \frac{6 \cdot 60 \cdot 1,7 \cdot 10^3}{206265} = 3,0 \text{ мм.}$$

Погрешность редуцирования визирной марки над выставленной точкой C , удерживаемой вручную (2.6)

$$m_{\text{ред.}} = \frac{\tau \cdot h}{\rho} = \frac{8 \cdot 60 \cdot 1,5 \cdot 10^3}{206265} = 3,5 \text{ мм.}$$

Погрешность измерения расстояний (2.23)

$$\begin{aligned} m_S &= \sqrt{m_{\text{Цент.}}^2 + m_{\text{ред.}}^2 + m_{\text{расст.}}^2} = \\ &= \sqrt{2^2 + 3,5^2 + (3 + 2 \cdot 0,103)^2} = 5,1 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Погрешность, определяемая разрешающей способностью человеческого глаза и увеличением зрительной трубы на дневной поверхности (2.7)

$$m_{\text{раз.}} = \varphi / V = 60'' / 31^X = 2''.$$

Погрешность, определяемая конструкцией сетки нитей зрительной трубы биссектором (2.9)

$$m_{\text{Нав.}} = D / 12 = 60'' / 12 = 5''.$$

Погрешность визирования тахеометра на марку точки A базовой стороны (2.11)

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Виз.А}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{Раз.}}^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 206265}{324 \cdot 10^3}\right)^2 + 5^2 + 2^2} = 5,7''.
 \end{aligned}$$

Погрешность визирования тахеометра на выставленную марку точки С (2.11)

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Виз.С}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{Раз.}}^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{3,5 \cdot 206265}{103 \cdot 10^3}\right)^2 + 5^2 + 2^2} = 8,8''.
 \end{aligned}$$

Погрешность ориентирования тахеометра на базовой линии А–В (2.15)

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Ориент.}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{Центр.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Виз.}}^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 206265}{324 \cdot 10^3}\right)^2 + 5,7^2} = 5,8''.
 \end{aligned}$$

Погрешность отсчитывания по тахеометру (2.21)

$$m_{\text{От.}} = P \cdot \frac{\vartheta}{2} = 0,95 \cdot \frac{5}{2} = 2,4''.$$

Погрешность построения угла β_C (2.25)

$$\begin{aligned}
 m_{\beta} &= \sqrt{m_{\text{Ориент.}}^2 + m_{\text{От.}}^2 + \left(\frac{m_{\text{ред.}}}{S \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2} = \\
 &= \sqrt{5,8^2 + 2,4^2 + \left(\frac{3,5 \cdot 206265}{103 \cdot 10^3}\right)^2} = 9,4''.
 \end{aligned}$$

Среднеквадратическая погрешность выноса точки C (2.22)

$$\begin{aligned} m_C &= \sqrt{m_s^2 + \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 \cdot (S \cdot 10^3)^2} = \\ &= \sqrt{5,1^2 + \left(\frac{9,4 \cdot 103 \cdot 10^3}{206\,265}\right)^2} = 6,9 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Предельная погрешность разбивочных работ определяется как тройная среднеквадратическая (2.30)

$$m_{\text{Пред.}} = \pm 3 \cdot m_C = \pm 3 \cdot 6,9 = \pm 21 \text{ мм.}$$

Контрольные вопросы

1. Какие погрешности оказывают влияние на точность измерения угла?
2. Как учитывать погрешность определения исходных базовых координат?
3. От чего зависит точность центрирования геодезического прибора над точкой?
4. Что такое бипод?
5. Перечислите виды уровней.
6. От каких параметров зависит погрешность визирования?
7. Что такое биссектор?
8. Какие погрешности влияют на точность разбивочных работ?

Рекомендуемая литература

1. Вержбицкий В. М. Основы численных методов. – М.: Высш. шк., 2002. – 840 с.
2. ГКИНП (ОНТА)-01-271-03. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. – М.: ЦНИИГАиК, 2003. – 66 с.
3. Калиткин Н. Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

4. Мазмишвили А. И. Теория ошибок и метод наименьших квадратов. – М.: Недра, 1978. – 311 с.
5. Оглоблин Д. Н. Маркшейдерские работы при подземной разработке месторождений. Ч. 1. Подземные маркшейдерские съёмки. – М.: Металлургиздат, 1959. – 478 с.
6. Папазов М. Г., Могильный С. Г. Теория ошибок и способ наименьших квадратов. – М.: Недра, 1968. – 304 с.
7. Попов В. Н., Чекалин С. И. Геодезия: учебник для вузов. – М.: Горная книга, 2007. – 518 с.
8. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ / Госгортехнадзор России. – М., 2004. – 60 с.
9. Чекалин С. И. Геодезия в маркшейдерском деле: учебник для вузов. – М.: Акад. Проект, 2011. – 500 с.

ГЛАВА 3

ОСОБЕННОСТИ ГНСС (GNSS)-ТЕХНОЛОГИЙ

Спутниковые технологии всё шире внедряются в маркшейдерское обеспечение открытых горных работ, создание опорных геодезических сетей на этапе изысканий, строительства и дальнейшей эксплуатации различных промышленных и гражданских объектов. Они всё чаще вытесняют традиционные геодезические методы измерений в связи с универсальностью, мобильностью и достаточной точностью. Преимущество проведения геодезических съёмок там, где местность допускает выполнение спутниковых наблюдений, заключается в том, что при её осуществлении отпадает необходимость создания опорных геодезических сетей и создания съёмочного обоснования. Современные методы спутниковых определений по дальности и точности принципиально обеспечивают возможность проведения съёмочных работ непосредственно на основе государственной геодезической и нивелирной сети [7].

3.1. Проект производства маркшейдерских работ с применением глобальных спутниковых систем

Проект производства маркшейдерских или геодезических работ (ППМР, ППГР) с применением глобальных спутниковых систем (ГНСС) выполняют в соответствии с «Инструкцией по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS» [5]. Основанием для

составления проекта должны являться техническое задание или программы выполнения топографо-геодезических работ на объекте, которые должны быть составлены в соответствии с указаниями (инструкциями) отраслевого назначения на проектирование маркшейдерских, топографо-геодезических и картографических работ.

Согласно СП 126.13330.2017 «СНиП 3.01.03-84. Геодезические работы в строительстве», в полном объеме ППГР должен разрабатываться с использованием решений, принятых в проекте организации геодезических работ (ПОГР) [34].

Даже при незначительных объемах работ и простом их техническом решении необходимо составлять программу работ, в которую применительно к использованию ГНСС необходимо включать краткое изложение назначения работ, их состав, сведения об исходных данных и использовании имеющихся материалов, а также схемы размещения проектируемых работ, их объем и сметные расчёты.

В ППМР или ППГР все материалы, касающиеся применения ГНСС для выполнения съёмочных работ, должны полно описывать порядок получения конечных результатов – съёмочного обоснования или плана спутниковой съёмки (полевого оригинала плана, полученного в результате съёмки ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем). Обязательным в техническом проекте является обоснование выбора масштаба съёмки и высоты сечения рельефа.

В материалы проекта должны быть включены следующие разделы:

1. Текстовая часть:

- целевое назначение проектируемых работ;
- краткая физико-географическая характеристика района работ;
- сведения о топографо-геодезической обеспеченности района работ;
- обоснование необходимости и способов построения планово-высотной основы и выбор масштаба съёмки;
- организация и сроки выполнения работ, мероприятия по технике безопасности и охране труда;

– перечень топографо-геодезических, картографических и других материалов, подлежащих сдаче по окончании работ.

2. Графическая часть:

– схема обеспечения района работ исходными геодезическими данными, топографическими и картографическими материалами с указанием границ проектируемой съёмки;

– проект планово-высотных геодезических построений;

– картограмма расположения участков топографических съёмок с разграфкой листов карт и планов.

3. Сметная часть: расчёт необходимых затрат на выполнение проектируемых работ.

При использовании глобальных навигационных спутниковых систем местоположение точки может быть получено как из абсолютных, так и из относительных определений (иногда называемых дифференциальным методом).

Абсолютные определения выполняются по принципу пространственной обратной линейной засечки, образованной измеренными псевдодальностями до четырёх и более спутников с одной точки, на которой размещён спутниковый приёмник (рис. 3.1).

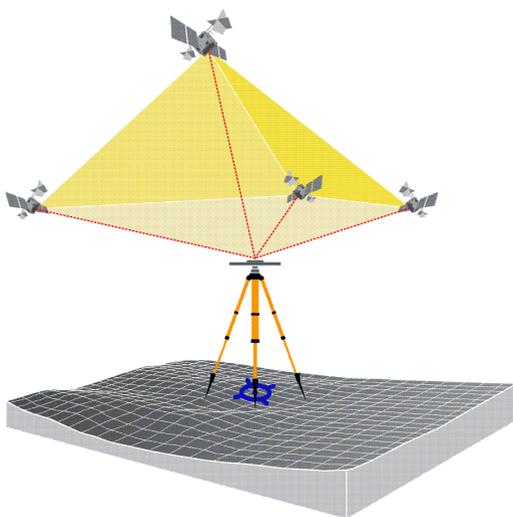


Рис. 3.1. Абсолютный метод измерения координат

Точность абсолютных определений местоположения ограничена рядом факторов: а) погрешностью спутниковых часов; б) погрешностью эфемеридных данных; в) геометрией созвездия спутников; г) многолучевой интерференцией и другими погрешностями (рис. 3.2).

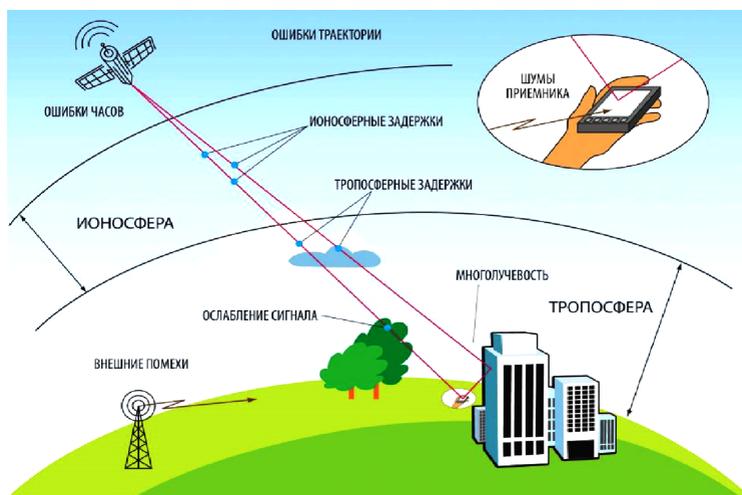


Рис. 3.2. Источники погрешностей измерения

Среди перечисленных погрешностей основными являются погрешности эфемерид спутников. Эфемеридные погрешности – это ошибки, обусловленные расхождением между фактическим положением спутника и его расчётным положением, которое устанавливается по данным навигационного сигнала, передаваемого с борта спутника. Значение погрешности обычно не больше 3 м (рис. 3.3).

Стандартная точность определения местоположения абсолютным методом, с учетом коррекции всех погрешностей определения, не превышает 5 м, что не позволяет использовать этот метод при развитии съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа. Абсолютные определения используются в бытовых навигаторах и телефонах. На рис. 3.4 показано,

как приёмник определяет координаты искомой точки, выполняя измерения и соответствующие вычисления большое число раз.

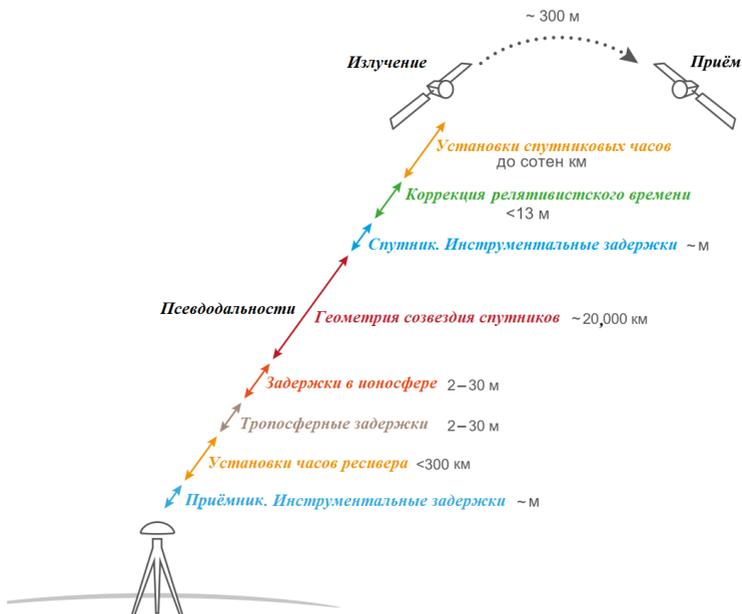


Рис. 3.3. Источники погрешностей измерения псевдодальностей

Из рис. 3.4 видно, что отдельные измерения координат X и Y отклоняются от среднего значения до 30 м, хотя у 50 % точек определения координаты укладываются в отклонение 7,1 м.

Для высокоточного определения координат требуется длительное стояние GPS-приёмника на точке, которое определяется двумя-тремя часами. Отметим также, что при абсолютных измерениях значения координат мы получаем в геоцентрической системе координат, практически не используемой в современной картографии, поэтому требуются дополнительные преобразования для перехода к плоской местной системе координат. К сожалению, такие преобразования не всегда

гарантируют качественный пересчёт координат из геоцентрической системы к прямоугольным плоским координатам. Особенно это касается пересчёта высотных отметок.

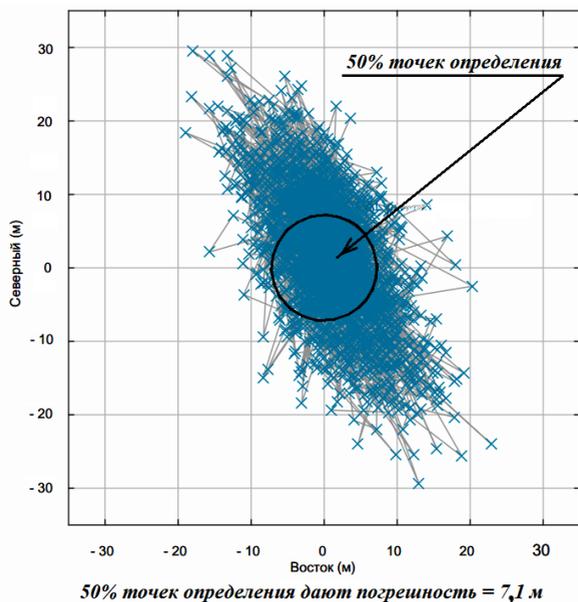


Рис. 3.4. Погрешность позиционирования ГНСС «Галилео» (*Galileo*)

Методы относительных определений основаны на принципе компенсации сильно коррелированных погрешностей (к которым относятся и эфемеридные погрешности) при одновременном определении кодовых и фазовых псевдодальностей до спутников одного и того же созвездия с двух точек *A* и *B* (рис. 3.5, 3.6).

При относительном методе измерений один из приёмников (например, в точке *A*, называемой «базовой») устанавливаются на точке с известными координатами, что позволяет постоянно отслеживать изменения вектора суммарной погрешности определения координат этой точки и вводить их в виде поправок в наблюдения на точке *B*.

В качестве базовой точки могут использоваться как государственные и муниципальные «Референсные» станции, так и индивидуальные профессиональные приёмники, устанавливаемые в качестве базовых. К сожалению, станции космического геодезического комплекса (КГС) в качестве базовых в РФ использоваться не могут, так как их координаты являются секретными. Передача корректирующих поправок возможна как через внутренний радиомодем (рис. 3.5), так и через внешний радиопередатчик (трансмиттер), что отражено на рис. 3.6.

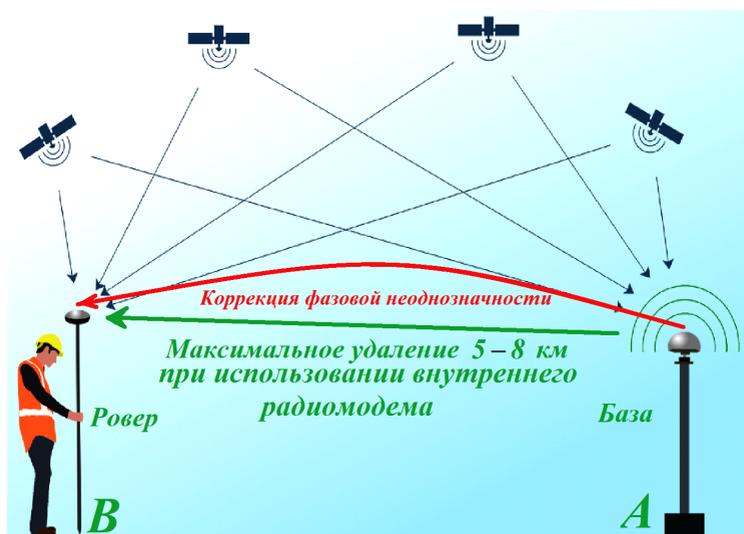


Рис. 3.5. Относительный метод измерения координат с использованием внутреннего радиомодема

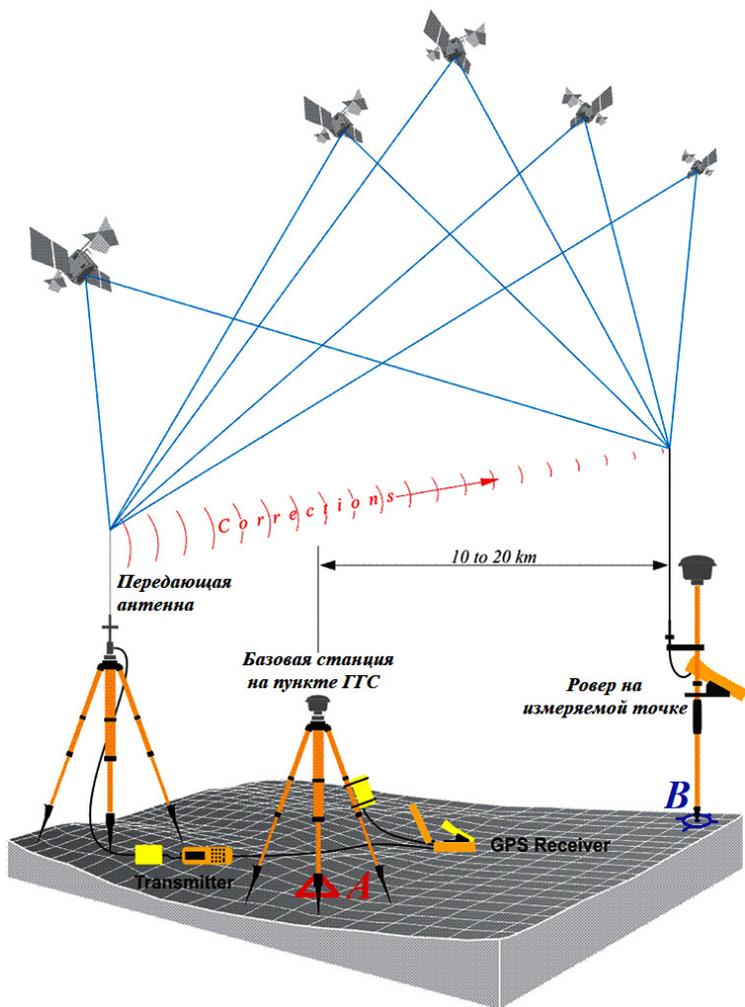


Рис. 3.6. Относительный метод измерения координат (используются внешние радиопередатчики)

3.2. Целевое назначение проектируемых работ

Целью проекта в маркшейдерско-геодезической практике обычно может быть три вида работ: а) создание опорной геодезической сети; б) создание съёмочной сети; в) создание сетей специального назначения.

К сетям специального назначения на горных предприятиях обычно относят сети для строительно-монтажных работ – геодезическое разбивочное обоснование (ГРО) и сети для наблюдений за сдвижением горных пород и земной поверхностью.

Конкретный вид работ выбирают согласно инструкции на маркшейдерские или геодезические работы [15; 31], исходя из конечной цели работ с учётом необходимых масштабов будущих съёмок. Здесь же могут быть оговорены абсолютные и относительные точности измерений, минимальные и максимальные расстояния между создаваемыми (определяемыми) пунктами.

3.3. Краткая физико-географическая характеристика района работ

Физико-географическая характеристика района работ предопределяет выбор дальнейшей методики полевых измерений и камеральной обработки полученных данных.

В этом разделе должны быть описаны: размеры участка работ, температурный режим района работ, преобладающие формы рельефа, перепады высот, наличие и характеристика лесного покрова, влияющего на видимость созвездия спутников. Могут быть даны рекомендации благоприятного периода работ.

3.4. Сведения о топографо-геодезической обеспеченности района работ

В данном разделе даётся полное описание и характеристика имеющихся пунктов государственной геодезической сети (ГГС) и сетей сгущения, с указанием их класса точно-

сти. При этом пункты ГГС как правило должны образовывать внешний каркас, а вновь определяемые пункты находиться внутри этого каркаса. В соответствии с методическими указаниями, пункты вновь создаваемой сети должны располагаться в безопасных зонах с учётом 10-летнего развития горных работ либо в зонах отработанных участков с законченным процессом сдвижения [15]. При этом исходных пунктов ГГС должно быть не менее трёх.

«Инструкция по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS», п. 6.2.4 требует иметь:

- не менее четырех пунктов с известными плановыми координатами;
- не менее пяти пунктов с известными высотами [5].

Это позволяет обеспечить приведение создаваемого съёмочного обоснования в местную систему координат (МСК) и высот пунктов геодезической основы.

3.5. Обоснование необходимости и способов построения планово-высотной основы и выбор масштаба съёмки

Данный раздел проекта является основным наиболее значимым и объёмным. Прежде чем переходить к выбору методов измерений, следует решить вопрос выбора применяемого оборудования, так как именно от типа оборудования зависит выбор способов и методов, применяемых при ГНСС-измерениях.

3.5.1. Выбор оборудования и метода съёмки

Профессиональных GPS-приёмников существует всего два типа: одночастотные и двухчастотные. Одночастотные (L1) GPS – это приборы, которые работают только по первой базовой частоте. С них начиналась эра GPS-приёмников. Эти приёмники работают медленнее и подходят только для из-

мерений по созданию геодезической основы. Работают ими в основном методом «Статика» и на расстоянии от базовой станции не более 15 км. Время наблюдения зависит от длины базовой линии (расстояния от базового до подвижного приёмника), количества видимых спутников и т. п.

Двухчастотные GPS-приёмники (L1+L2) – более совершенные приборы. Используются для того же, что и приборы на L1, но работают быстрее и точнее.

Во-первых, двухчастотный приёмник может учитывать и устранять влияние ионосферы на кодовые и фазовые измерения, обеспечивая на длинных базовых линиях, или в условиях магнитных бурь более высокую точность измерений по сравнению с одночастотным приёмником.

Во-вторых, двухчастотный приёмник требует гораздо меньшего времени наблюдения, чтобы получить требуемую точность.

В табл. 3.1 приведены минимальные требования и примерные затраты времени для различных видов съёмки. Напомним, что все данные, приведённые в таблице, предполагают наличие двух измерительных приборов (база и ровер – относительный метод измерения). В качестве базового прибора могут быть использованы как государственные или муниципальные «Референсные» станции, так и индивидуальные.

Съёмка «Статика» обеспечивает максимально достижимую точность. Она используется при длинных базовых линиях (большом расстоянии между приёмниками, свыше 15 км). Но она же требует и максимального времени для своего выполнения – около часа и более. В режиме «Статика» одновременные измерения на двух или нескольких пунктах выполняются неподвижными приёмниками. Один из приёмников принимают за базовый. Положение остальных приёмников определяется относительно базового.

Таблица 3.1

Виды съёмов и их характеристики

| <i>Вид съёмки</i> | <i>Минимальное число объектов спутников</i> | <i>Минимальное время наблюдений</i> | <i>Типичная плановая точность*</i> | <i>Характеристика</i> |
|-------------------|---|---|--|--|
| Статика | 4 | 1 час | Одночастотная: $\pm 5 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$ Двухчастотная: $\pm 5 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$ | Для одночастотной аппаратуры измерения ограничиваются базисными линиями до 10 км. Для двухчастотных приёмников ограничений на длину базовых линий нет |
| Быстрая статика | 4 | 8–30 мин | Варируется между точностью статики и точностью кинематической съёмки, в зависимости от отношения времени стояния к длине базовой линии | Всё то же, что и при обычной статической съёмке, но с более короткими временами стояния |

Окончание табл. 3.1

| <i>Вид съёмки</i> | <i>Минимальное число обзоров спутников</i> | <i>Минимальное время наблюдений</i> | <i>Типичная плановая точность*</i> | <i>Характеристика</i> |
|-----------------------------------|--|---|--|--|
| Кинематика в режиме «Стою/иду» | 4 | 30 с – 1 мин | $\pm 1-2$ см + 1 ppm | Предел длины базовой линии составляет 10 км. Необходимы 5 и более общих спутников для выполнения инициализации на ходу |
| Кинематика с постобработкой | 4 | 2 эпохи** | ± 5 см + 1 ppm | Предел длины базовой линии составляет 50 км. Необходимы 5 и более общих спутников для выполнения инициализации на ходу |

* – точность высотного положения определяемой точки обычно принимается в 2 раза ниже плановой.
 ** – Эпоха (*epoch*) – момент времени получения единичного измерения, выполненного и зафиксированного спутниковым приёмником

Съёмка «*Быстрая статика*» обеспечивает сантиметровой уровень точности при времени стояния на пунктах от 8 минут и дольше. Точное время стояния на пункте зависит от длины базовой линии, числа видимых спутников и их геометрического расположения (PDOP). Режим «*Быстрая статика*» позволяет сократить продолжительность измерений, благодаря возможности применения на линиях до 15 км активных алгоритмов разрешения неоднозначности.

Съёмка «*Реокупация*» используется, когда нет одновременной видимости на необходимое число спутников. Тогда измерения выполняют за несколько сеансов, накапливая нужный объём данных. На этапе компьютерной обработки все данные объединяют для выработки одного решения. В данном режиме съёмки на снимаемую точку ровер устанавливают несколько раз через определённые промежутки времени, пока не наберут определённое количество данных.

Съёмка «*Кинематика*» служит для определения координат передвижной станции в ходе её перемещения. Работа в этом режиме требует, чтобы приёмники на базовой и передвижной станциях поддерживали непрерывный контакт со спутниками в течение всего времени измерений. До начала движения выполняют инициализацию (разрешение неоднозначности фазовых измерений).

Съёмка «*Кинематика*» в режиме «*Стою/иду*» использует фазовые измерения от четырёх или более спутников, общих для приёмников, работающих в качестве базовой станции и подвижного приёмника. Базовая станция при такой съёмке записывает данные постоянно, находясь на неподвижной точке с известными координатами. Приёмник, работающий как подвижный приёмник, для достижения сантиметровой точности вначале должен быть инициализирован (для успешного разрешения фазовой неоднозначности при постобработке). Передвижную станцию (ровер) перемещают с точки на точку, делая на каждой точке остановку и выполняя для повышения точности несколько эпох измерений в течение 5–30 с.

Оборудование и метод измерений (съёмки) выбирают, исходя из поставленной задачи и требований основных инструкций [5; 7; 17; 31].

Например, «Инструкция по производству маркшейдерских работ» (РД 07-603-03) (п. 27, табл. 2) при проведении полигонометрического хода 4-го класса требует предельную относительную невязку хода 1:25 000 при максимальной его длине 30 км, что соответствует погрешности определения координат 4 см на 1 км хода (табл. 3.2) [31]. Данная точность может быть получена при любом методе съёмки за исключением кинематики в чистом виде, но при использовании двух частотных GPS-приёмников. Даже метод «Стою/иду» даёт нам такую точность при работе в пределах 10 км.

Таблица 3.2

**Характеристика сетей
полигонометрии 4-го класса, 1-го и 2-го разрядов**

| <i>Показатели</i> | <i>4-й класс</i> | <i>1-й разряд</i> | <i>2-й разряд</i> |
|--|------------------|-------------------|-------------------|
| Предельная длина хода, км: | | | |
| отдельного | 10 | 5 | 3 |
| между исходной и узловой точками | 7 | 3 | 2 |
| между узловыми точками | 5 | 2 | 1,5 |
| Предельный периметр полигона, км | 30 | 15 | 9 |
| Длина сторон хода, км: | | | |
| наибольшая | 2 | 0,8 | 0,35 |
| наименьшая | 0,25 | 0,12 | 0,08 |
| средняя расчётная | 0,50 | 0,30 | 0,20 |
| Число сторон в ходе, не более | 15 | 15 | 15 |
| Предельная относительная невязка хода | 1:25 000 | 1:10 000 | 1:5000 |
| Средняя квадратическая погрешность измерения угла (по невязкам в ходах и полигонах), с | 2 | 5 | 10 |
| Угловая невязка хода или полигона, не более, где n – число углов в ходе, с | $5\sqrt{n}$ | $10\sqrt{n}$ | $20\sqrt{n}$ |

Примечание: 1. В отдельных случаях при привязке ходов полигонометрии к пунктам государственной геодезической сети с использованием светодальномеров длины примычных сторон хода могут быть увеличены на 30 %.

2. В порядке исключения в ходах полигонометрии 1-го разряда длиной до 1 км и в ходах полигонометрии 2-го разряда длиной до 0,5 км допускается абсолютная линейная невязка 10 см.

3. Число угловых и линейных невязок, близких к предельным, допускается не более 10 %.

4. Допускается увеличение длин ходов полигонометрии 1-го и 2-го разрядов на 30 % при условии определения дирекционных углов сторон хода с точностью 5–7" не реже чем через 15 сторон и не реже чем через 3 км.

«Методические указания по созданию, контролю и реконструкции маркшейдерско-геодезических сетей на горных предприятиях с использованием спутниковой аппаратуры» (п. 2.4, табл. 2) для создания опорных маркшейдерских сетей рекомендуют только «Быструю статику» [15]. Это можно объяснить тем, что в 1998 году промышленностью изготавливались GPS-приёмники только на одну частоту (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Выбор режима съёмки, способа измерений и количества GPS-приёмников

| <i>Средняя квадратическая погрешность горизонтального угла</i> | <i>Длина сторон</i> | <i>Режим съёмки</i> | <i>Способ измерений</i> | <i>Количество станций</i> |
|--|---------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Удовлетворительные условия радиовидимости $R = 1$ | | | | |
| 10–20" | Более 100 м | «Стою/иду», «Быстрая статика» | Лучевой | 2 |
| 10" | 100–200 м | «Быстрая статика» | Непосредственный | 2 |
| 10" | Более 200 м | -"- | Лучевой | 2 |
| 5" | 120–300 м | -"- | Непосредственный | 2 |
| 5" | Более 300 м | -"- | Лучевой | 2 |
| 2" | 250–500 м | -"- | Непосредственный | 2–3 |
| 2" | Более 500 м | -"- | Лучевой | 2 |
| Триангуляция 4-го класса, 1-го и 2-го разрядов | Стороны любой длины | -"- | -"- | 2 |

| <i>Средняя квадратическая погрешность горизонтального угла</i> | <i>Длина сторон</i> | <i>Режим съёмки</i> | <i>Способ измерений</i> | <i>Количество станций</i> |
|--|---------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Неудовлетворительные условия радиовидимости $R = 2$ | | | | |
| | Более 100 | «Стою/иду», «Быстрая статика» | Лучевой | 2 |
| 10" | 100–200 м | «Быстрая статика» | Непосредственный | 2 |
| 10" | Более 200 м | –"– | –"– | 2 |
| 5" | 120–300 м | –"– | –"– | 2 |
| 5" | Более 300 м | –"– | –"– | 2 |
| 2" | 250–500 м | –"– | –"– | 2–3 |
| 2" | Более 500 м | –"– | –"– | 2–3 |
| Триангуляция 4-го класса, 1-го и 2-го разрядов | Выше средней | –"– | Лучевой | 2 |
| Триангуляция 4-го класса, 1-го и 2-го разрядов | Средняя и менее | –"– | Непосредственный | 2–3 |

При оценке необходимой точности маркшейдерско-геодезических работ может быть использовано «ГКИНП (ОНТА)-01-271-03 Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS» [4] (п. 2.1.2, табл. 1), что отражено в табл. 3.4.

Таблица 3.4

**Точность взаимного положения пунктов
городской геодезической сети**

| <i>Класс триангуляции, полигонометрии (ПГС) сети</i> | <i>Разряд триангуляции городов</i> | <i>Разряд (класс) городской полигонометрии</i> | <i>Относительная ошибка стороны (хода городской полигонометрии)</i> | |
|--|--|--|---|---------------------------|
| | | | <i>базисной стороны сети</i> | <i>слабой стороны</i> |
| 1-й | | | 1:400 000 | 1:150 000 |
| 2-й | I | | 1:300 000 | 1:250 000 |
| 3-й | II | | 1:200 000 | 1:120 000 |
| 4-й | III | | 1:200 000 | 1:70 000 |
| | | 4-й класс | 1:25 000 | |
| | | 1-й разряд | 1:10 000 | |
| | | 2-й разряд | 1:5000 | |

Согласно данным табл. 3.4 полностью совпадают с таблицей из инструкции по производству маркшейдерских работ.

Инструктивные указания «Инструкции по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS» (п. 6.2.7, табл. 6) рекомендуют следующие методы для развития съёмочного обоснования в зависимости от масштаба съёмки (табл. 3.5) [5].

Более жёсткие требования к построению опорных сетей предъявляет одна из последних инструкций свод правил «СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» (п. 51.1 и 5.1.4), что отражено в табл. 3.6 [35].

Таблица 3.5

**Рекомендации по применению методов развития съёмочного обоснования
и методов спутниковых определений для различных масштабов съёмки и высот сечения рельефа**

| <i>Масштаб съёмки; высота сечения рельефа</i> | <i>Плановое обоснование</i> | | <i>Плано-высотное или высотное обоснование</i> | |
|---|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| | <i>метод развития съёмочного обоснования с использованием спутниковой технологии</i> | <i>метод спутниковых определений</i> | <i>метод развития съёмочного обоснования с использованием спутниковой технологии</i> | <i>метод спутниковых определений</i> |
| 1:10 000, 1:5000; 1 м | Определение висячих пунктов | Быстрый статический или реокупация | Построение сети | Быстрый статический или реокупация |
| 1:2000, 1:1000, 1:500; 1 м и более | Построение сети | Быстрый статический или реокупация | Построение сети | Быстрый статический или реокупация |
| 1:5000; 0,5 м | Определение висячих пунктов | Быстрый статический или реокупация | Построение сети | статический |
| 1:2000, 1:1000, 1:500; 0,5 м | Построение сети | Быстрый статический или реокупация | Построение сети | Статический |

Таблица 3.6

**Основные требования к точности определения положения пунктов
в плановой опорной геодезической сети**

| <i>№ п/п</i> | <i>Вид сети</i> | <i>СКП определения координат относительно исходных пунктов, мм, не более</i> | <i>СКП взаимного положения смежных пунктов в плане, мм, не более</i> | <i>СКП взаимного положения смежных пунктов по высоте, мм, не более</i> |
|------------------|--|--|--|--|
| 1 | КСГС и (или) сеть постоянно действующих базовых (референционных) станций ГНСС | 20 | 15 | 20 |
| 2 | СГСС; сеть постоянно действующих базовых (референционных) станций ГНСС | 20 | 20 | 25 |
| 3 | Полигонометрия, триангуляция, трилатерация 4-го класса; сети, создаваемые спутниковыми определениями | 20 | 25 | - |
| 4 | Полигонометрия, триангуляция, трилатерация 1-го разряда, сети сгущения, создаваемые спутниковыми определениями | 50 | 30 | - |
| 5 | Полигонометрия, триангуляция, трилатерация 2-го разряда, сети сгущения, создаваемые спутниковыми определениями | 50 | 40 | - |

Примечание.

1 При применении спутниковых технологий СКП определения координат пунктов ОГС относительно исходных пунктов применяют, когда исходными являются пункты высокоточной геодезической сети или спутниковой геодезической сети 1-го класса, если иное не предусмотрено заданием или программой.

2. В случае использования в качестве исходных пунктов, точность планового положения которых ниже точности измерений, выполняемых современными геодезическими приборами, при уравнивании рекомендуется применять обоснованные в программе методы, позволяющие предотвратить снижение точности взаимного положения пунктов создаваемой ОГС (или ГССН) вследствие влияния недостаточной точности исходной геодезической сети.

Хотя данные различных руководств и отличаются, практически основным методом построения опорных съёмочных сетей остаётся метод «Быстрая статика» и только для высокоточных специальных построений следует применять метод «Статика». Однако на небольших участках, при соответствующей конфигурации расположения точек сети, вполне можно применить метод «Стою/иду».

3.5.2. О конфигурации опорных геодезических сетей, создаваемых с применением технологии ГНСС

Проектирование геодезических сетей заключается в выборе местоположения пунктов на земной поверхности при условии соблюдения определённых общих требований:

- плотность пунктов должна соответствовать назначению сети и целям её дальнейшего использования;
- взаимное расположение пунктов (форма сети) должна быть такой, чтобы обеспечить определение элементов сети с необходимой точностью;
- построение сети должно выполняться с минимальными трудовыми и материальными затратами.

Геодезические сети, построенные с помощью технологии ГНСС, имеют особенности, отличающие их от обычных геодезических сетей. Поэтому проектирование геодезической сети нельзя сводить только к выбору мест расположения наземных пунктов.

Не менее важно обеспечить оптимальное расположение наземных пунктов и наблюдаемых положений спутников на небосводе относительно друг друга, так называемой геометрии созвездия спутников.

Планово высотное обоснование для съёмок создаётся на основе общего принципа построения геодезических сетей – от общего к частному. Оно опирается на пункты государственной геодезической сети (ГГС) и сетей сгущения, погрешности которых считаются пренебрежительно малыми.

Согласно «Методическим указаниям по созданию, контролю и реконструкции маркшейдерско-геодезических сетей на горных предприятиях с использованием спутниковой ап-

паратуры» [15], измерения могут производиться двумя методами: 1) косвенные измерения – «лучевой» метод – (рис. 3.7); 2) непосредственные измерения (рис. 3.8).

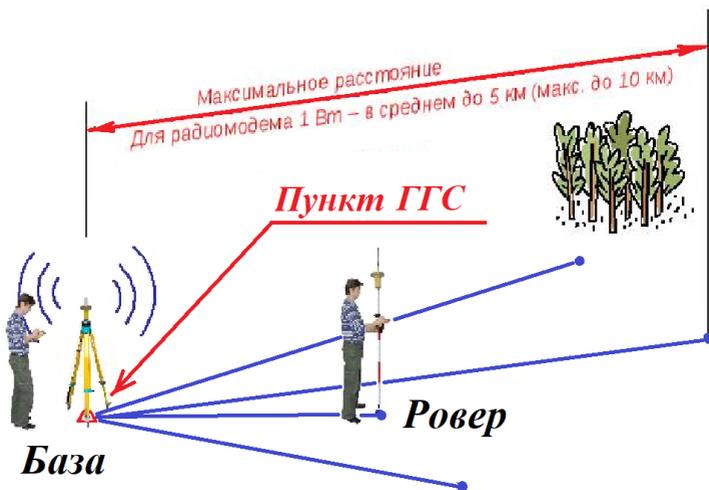


Рис. 3.7. Лучевой метод измерения

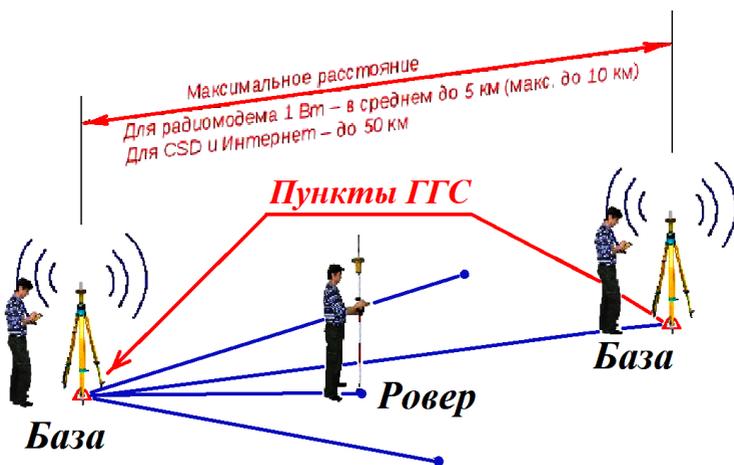


Рис. 3.8. Непосредственный метод измерения

Метод непосредственных измерений является самым точным, так как съёмочные точки находятся между двумя базовыми станциями и поправки в координаты ровера вводятся обратно пропорционально расстояниям до базовых станций. Самое лучшее, когда съёмочные точки находятся между несколькими станциями, установленными на пунктах государственной геодезической сети (рис. 3.9).

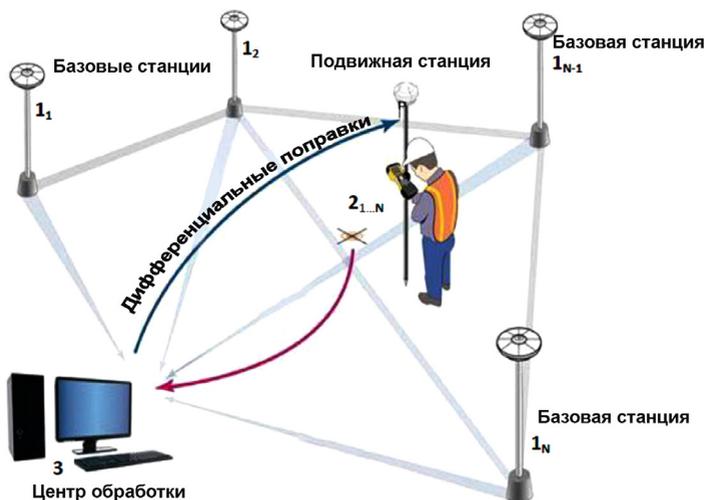


Рис. 3.9. Непосредственный метод измерения с несколькими базовыми станциями, расположенными на пунктах ГГС

Однако такой метод измерений является очень дорогим. В то же время лучевой метод обладает ещё одним недостатком – трудностью пересчёта координат из WGS84 в местную систему координат (МСК). И практически не позволяет выполнить надёжную высотную увязку. Поэтому на практике чаще используют сетевой метод, когда съёмочные точки находятся внутри каркаса из нескольких, трёх и более, пунктов ГГС. При этом базовый приёмник располагается на одном из пунктов ГГС, а с ровером проходят по всем съёмочным точкам, включая остальные пункты ГГС (рис. 3.10).

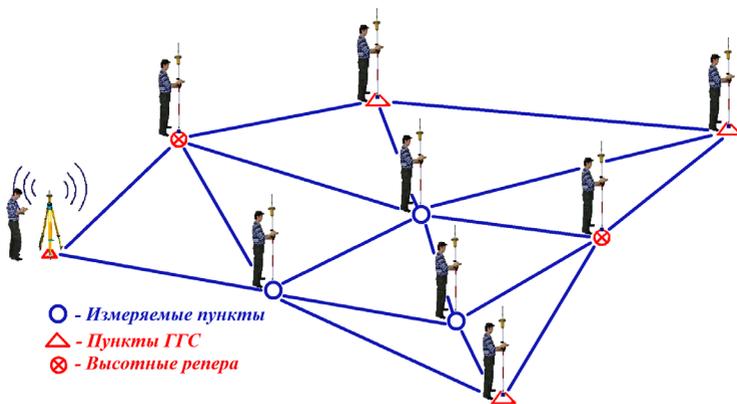


Рис. 3.10. Сетевой метод измерения

Сетевой метод измерения по своим точностным параметрам находится между лучевым и непосредственным методами измерения. Единственным недостатком этого метода является то, что измерения на опорных пунктах ГГС и вновь создаваемых пунктах сети сгущения выполняются в разные промежутки времени, что, конечно, приводит к небольшому увеличению погрешностей измерений.

На рис. 3.10. приведён пример наилучшей геометрии сети. Все вновь измеряемые пункты находятся внутри каркаса из пунктов ГГС, координаты которых используются для уравнивания всей съёмочной сети. Кроме того, измерения выполняют ещё на двух высотных реперах, что позволяет выполнить и высотную увязку вновь создаваемой сети. Такая сеть полностью удовлетворяет требованиям «Инструкции по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS», п. 6.2.4 [5]:

- иметь не менее четырёх пунктов с известными плановыми координатами;
- иметь не менее пяти пунктов с известными высотами.

Это позволяет обеспечить приведение создаваемого съёмочного обоснования в местную систему координат (МСК) и высот пунктов геодезической основы.

3.5.3. О необходимости иметь пять базовых опорных пунктов

Необходимость иметь более четырёх точек исходных ГГС-пунктов, расположенных по внешнему контуру вновь создаваемой сети вызвано тем, что координаты точек, измерения на которых выполняются с использованием GPS-приёмника, определяются в системе геоцентрических координат: WGS84 – при использовании ГНСС американской NAVSTAR (система геоцентрических координат 1984 г.); и ПЗ-90 – при использовании ГНСС ГЛОНАСС РФ (система геоцентрических координат 1990 г.). Точнее, так как через некоторый период времени выполняются уточнения этих систем, в РФ с 2012 г. (Постановлением Правительства Российской Федерации от 28.12.2012 г. № 1463) принята в качестве государственной системы координат общеземная геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) [38]. Последняя система координат практически соответствует американской WGS-84 и международной земной системе координат International Terrestrial Reference System (ITRF). Для геодезических и картографических работ используется с 1 января 2017 года геоцентрическая геодезическая система координат ГСК-2011 [17]. Параметры пересчёта в государственную систему координат 2011 года из других систем координат приведены в приложении к приказу Росреестра «Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года» от 23.03.2016 г. № П/0134 (табл. 3.7) [20]. В таблице приведены параметры пересчёта только для наиболее распространённых систем координат в ГСК-2011.

Таблица 3.7

**Значения элементов трансформирования для основных систем координат,
используемых на территории Российской Федерации**

| <i>№ n/n</i> | <i>Исходная система (А)</i> | <i>Конечная система (Б)</i> | $\Delta X, м$ | $\Delta Y, м$ | $\Delta Z, м$ | ω_x <i>103 угл. с</i> | ω_y <i>103 угл. с</i> | ω_z <i>103 угл. с</i> | $m \times 10^6$ |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 1 | СК-42 | ГСК-2011 | + 23,56 В± 2,00 | -140,86 В± 2,00 | - 79,77 В± 3,00 | - 2 В± 10 | - 346 В± 10 | - 794 В± 10 | - 0,227 В± 0,25 |
| 2 | СК-95 | ГСК-2011 | + 24,65 В± 0,43 | - 129,14 В± 0,37 | - 83,06 В± 0,54 | - 67 В± 10 | + 4 В± 10 | + 129 В± 10 | - 0,175 В± 0,2 |
| 3 | ПЗ-90 | ГСК-2011 | - 1,44 В± 0,2 | + 0,17 В± 0,2 | + 0,23 В± 0,3 | - 1,738 В± 1 | + 3,559 В± 1 | - 134,263 В± 1 | - 0,2274 В± 0,06 |
| 4 | ПЗ-90.02 | ГСК-2011 | - 0,37 В± 0,1 | + 0,2 В± 0,1 | + 0,21 В± 0,2 | - 1,738 В± 1 | + 3,559 В± 0,5 | - 4,263 В± 0,5 | - 0,0074 В± 0,05 |
| 5 | ПЗ-90.11 | ГСК-2011 | + 0,000 В± 0,01 | - 0,014 В± 0,02 | + 0,008 В± 0,01 | + 0,562 В± 0,7 | + 0,019 В± 0,26 | - 0,053 В± 0,23 | + 0,0006 В± 0,001 |
| 6 | WGS-84 (G1150) | ГСК-2011 | - 0,34 В± 0,1 | + 0,47 В± 0,1 | + 1,13 В± 0,2 | - 1,738 В± 1 | + 3,559 В± 0,5 | + 65,737 В± 0,5 | - 0,1074 В± 0,05 |
| 7 | ITRF-2008 | ГСК-2011 | + 0,002 В± 0,01 | - 0,003 В± 0,02 | - 0,003 В± 0,01 | + 0,053 В± 0,7 | + 0,093 В± 0,26 | - 0,012 В± 0,23 | + 0,0008 В± 0,001 |

В практической деятельности на топографических картах применяются местные системы прямоугольных координат (МСК), которые приняты на основании Постановления Правительства РФ «Об утверждении Правил установления местных систем координат» от 03.03.2007 г. № 139 [22]. Данное постановление потребовало от региональных властей для ведения кадастровых и других видов геодезических работ ввести местные системы координат, заменив тем самым ранее применявшиеся системы координат СК-42 (система координат 1942 года) и СК-63 (система координат 1963 года). Данные системы были отменены как неудовлетворяющие современным требованиям, так как в 2011 году было выполнено новое уравнивание всех пунктов ГГС РФ.

Так как большинство картографического материала в регионах было накоплено в системе координат 1963 года СК-63, то МСК были созданы на основе СК-63, но с упрощением. Дело в том, что СК-63 года создавалась на основе трёх градусных зон, но по отдельным блокам, которых в отдельном регионе могло быть 5 и более. Поэтому во многих регионах были приняты исходные данные одного из таких блоков, а координаты геодезических пунктов других блоков были приведены к координатам блока, принятого за основу [25]. При этом была сохранена надёжная связь с государственной системой СК-42 с помощью ключей перехода, в качестве которых использовали [18]:

- долготу осевого меридиана первой координатной зоны L_1 ;
- ширину координатной зоны ΔL ;
- плоские прямоугольные координаты условного начала

X и Y .

Долгота осевого меридиана вычисляется по формуле

$$L_n = L_1 + \Delta Lx (n - 1),$$

где n – номер координатной зоны.

Долгота осевого меридиана МСК в большинстве случаев совмещалась с долготой осевого меридиана СК-63.

Координаты точек в МСК не являются секретными, но ключи перехода хранятся в органах Росреестра и его структурных подразделениях.

Сложности пересчёта координат в практике маркшейдерских работ могут возникать не только из-за незнания ключей перехода (элементов трансформации), но и из-за высотной неувязки.

Напомним, что в РФ высоты точек (отметки) определялись при помощи геометрического нивелирования относительно среднего уровня Балтийского моря – поверхности геоида. В настоящее время действует Балтийская система высот 1977 года. В геоцентрических системах WGS-84 и ГЛОНАСС высоты, определяются от центра Земли, а затем пересчитываются на высоты измеряемые от поверхности квазигеоида (референцного эллипсоида).

Почему возникают такие сложности? В разделах, посвящённых геодезии упоминается, что Земля имеет форму «*геоида*». Это очень сложная поверхность, форма которой определяется гравитационным полем Земли, с которой неудобно работать (рис. 3.11).

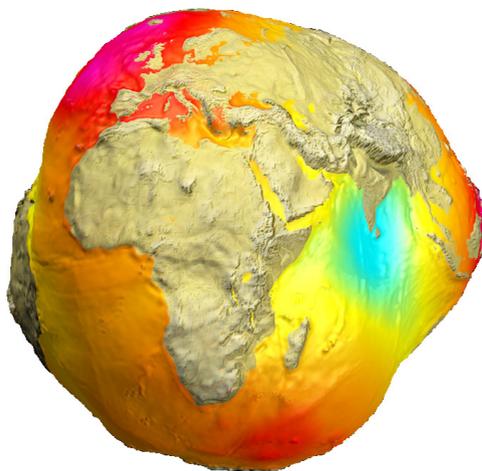
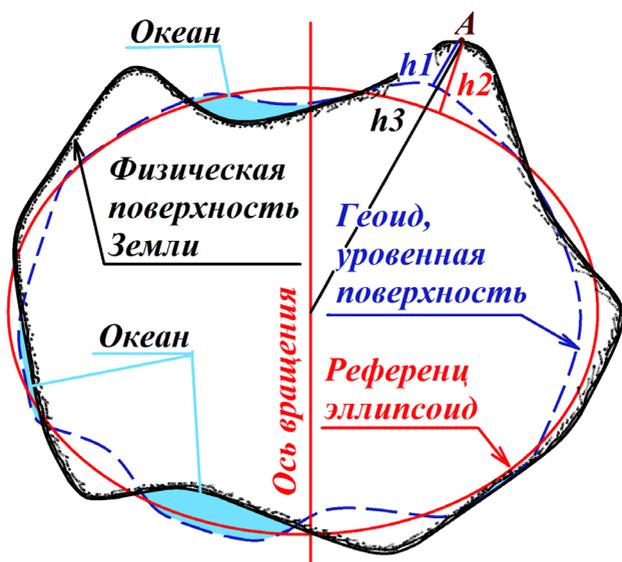


Рис. 3.11. Поверхность геоида, построенная по данным гравиметрической съёмки

Если построить разрез Земного шара, можно увидеть, как отличаются существующие поверхности друг от друга (рис. 3.12).

Обратите внимание, что «*Геоид*», или уровенная поверхность, – «*поверхность морей и океанов в спокойном состоянии, продолженная под материками*», имеет очень сложную форму. Поэтому советским учёным М. С. Молоденским в 1950-х годах было предложено в качестве формы Земли использовать «*Квазигеоид*», форма которого определяется на основе гравиметрических измерений.



h_1 - высота относительно уровенной поверхности
 h_2 - высота относительно поверхности референц эллипсоида
 h_3 - высота относительно геоцентрической системы координат (WGS-84, ПЗ-90.11)

Рис. 3.12. Схема соотношения поверхностей Земли

Отклонения поверхностей квазигеоида и геоида могут достигать двух метров. М. С. Молоденским были также разработаны формулы пересчёта координат из одной системы координат в другую.

Все картографические материалы строятся путём проектирования физической поверхности Земли на поверхность «*Референц эллипсоида – эллипсоида Красовского 1942 г.*» – математически правильной фигуры эллипсоида вращения, размеры которого подобраны по специальным критериям (минимальные отклонения от физической поверхности Земли на территории РФ). Из рисунка видно, что высоты точки A (h_1 , h_2 и h_3) будут различны в зависимости от метода измерения.

Для полной компенсации всех погрешностей в геодезической и маркшейдерской практике необходимо применение не только специальных профессиональных спутниковых приёмников, но и применение соответствующих методик измерения.

Выполнение измерений в пяти и более базовых точках позволяет нам построить поверхность разности высот между поверхностями геоида и эллипсоида. Это в свою очередь позволяет выполнить более точную трансформацию (пересчёт) высотных отметок, определённых по GPS-измерениям в ортометрические высоты от уровенной поверхности в пределах участка измерений. Такие преобразования обычно выполняются методом калибровки на специализированном программном обеспечении. Метод калибровки по четырём-пяти базовым точкам также позволяет выполнить трансформацию прямоугольных координат, определённых GPS-измерениями на референц-эллипсоиде в координаты местной системы МСК, без знания элементов трансформации (рис. 3.13).

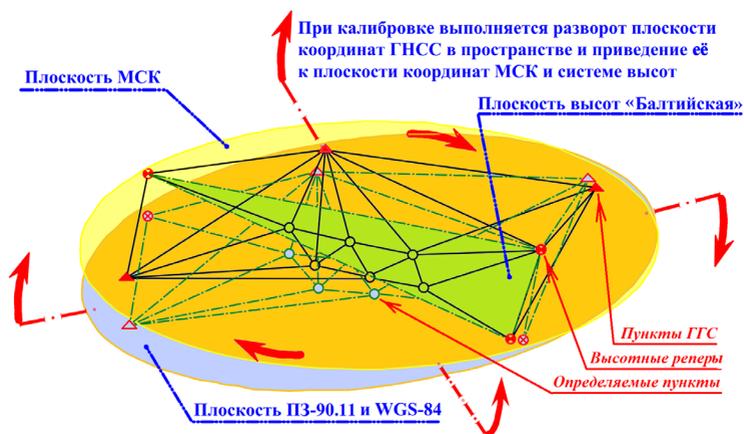


Рис. 3.13. Трансформация (калибровка) GPS-измерений к МСК

3.5.4. Предрасчёт погрешности определения координат пунктов геодезической сети, полученных с помощью ГНСС-технологий

Любой проект производства маркшейдерских или геодезических работ должен сопровождаться предрасчётом погрешностей пространственного положения отдельных пунктов, на основании уровня которых выполняется окончательный выбор применяемого оборудования и методов измерения. Сегодня достаточно во многих литературных источниках приводятся методы предрасчёта погрешности определения координат с использованием ГНСС-технологии [1; 3; 8; 15]. Однако, как правило, в них приводятся формулы и методы расчёта без достаточного пояснения к их применимости на практике. Кроме того, в конечном итоге результаты GPS-измерений обрабатываются в специализированных программах, алгоритм решений которых нам может не всегда быть известен, хотя данные программы в конце дают оценку точности выполненных работ. Предварительная же оценка точности будущих работ у большинства маркшейдеров практиков вызывает сложности.

При оценке точности GPS-измерений необходимо использовать те же методы, что используются при расчёте и уравнивании триангуляции, или трилатерации. Дело в том, что при выполнении GPS-измерений маркшейдер сразу получает координаты измеряемой точки и оценить точность их получения напрямую не представляется возможным. Поэтому оценке могут подлежать только векторы (расстояния) между соседними точками измерения. В конечном итоге точность выполненных работ должна оцениваться по точности определения расстояния наиболее слабой стороны. Под наиболее слабой стороной при GPS-измерениях понимают сторону сети, наиболее удалённую от базовых точек ГГС, или сторону, точки которой имели условия низкой радиовидимости созвездия спутников (часть небосвода закрыта окружающими предметами: лес, здания, глубокие выемки). Как и в любых геодезических измерениях при выполнении GPS-измерений должны быть так называемые избыточные измерения: опорных пунктов ГГС должно быть не менее двух, хотя согласно инструкции их должно быть не менее четырёх плюс и хотя бы один высотный репер. Поэтому предрасчёт погрешности измерений, выполняемых например «лучевым» методом, да и дальнейшее уравнивание можно выполнить только косвенным способом без полной гарантии точности реальных измерений. Следует отметить, что на практике часто применяют лучевой метод для съёмки ситуации, особенно если ключи трансформации на данный участок известны, но это ни в коем случае не гарантирует точность выполненных работ.

В практике уравнивания сетей трилатерации используют два способа: коррелятный и параметрический. Для предрасчёта погрешностей GPS-измерений нами предлагается использовать именно параметрический способ, так как он использует векторы расстояний, поправки к ним и свободные члены уравнения, а также может быть легко представлен в матричной форме.

Приведём несколько примеров таких предрасчётов для разной геометрии геодезической сети. В качестве основного программного продукта мы предлагаем использовать матема-

никовое созвездие (*satellite constellation*) – это конфигурация группы спутников, видимых с точки наблюдений, в проекции на небесную сферу.

Ниже представлена полная версия программы расчёта в терминах и символики математического процессора Mathcad. Расчёт проведём в матричной форме. Для удобства работы с матрицами изменим номер первой ячейки матрицы с 0 на 1, изменив значение системной переменной ORIGIN на единицу

ORIGIN := 1.

Полагаем, что координаты пунктов ГГС определены без ошибок, так как они имеют более высокий класс точности, зададим начальные значения, в соответствии с приведённой схемой сети (рис. 3.14):

Количество векторов уравнивания = 10.
 Количество определяемых пунктов = 4 $pp := 4.$
 Высота антенны приёмника над пунктом, мм $h := 1700.$
 Точность уровня оптического центрира, мин $\tau := 8.$
 Коэффициенты аппаратной точности MS (мм) = $a + b \times D$ (км)
 $a := 10$ $b := 1.$

Создаём две матрицы размерности 10×1 (строк – 10; столбцов – 1): расстояний векторов – D (км) и видимости созвездий ГНСС – R .

Количество строк матрицы соответствует числу векторов на схеме. В матрицу Di вносим длины векторов в км, в соответствии с их нумерацией на схеме, где $i = 1, 2, \dots, n$ – номер вектора. Матрицу Ri заполняем согласно схеме и условиям наблюдения созвездий на небосводе. Значения коэффициента радиовидимости R выбираем согласно табл. 3.8.

Таблица 3.8

Значения коэффициента R для категорий радиовидимости созвездия спутников

| <i>Категория радиовидимости</i> | <i>Коэффициент радиовидимости, R</i> | <i>Примечание</i> |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| I | 1 | Удовлетворительные условия видимости |

| <i>Категория радиовидимости</i> | <i>Коэффициент радиовидимости, R</i> | <i>Примечание</i> |
|---------------------------------|--------------------------------------|--|
| II | 2 | Неудовлетворительная видимость |
| III | 1,5 | Работа в режиме «Реокупация» |
| IV | 5 | Нет стабильного приёма от трёх спутников |

Так как только три вектора измеряются при идеальных условиях видимости спутников: вектор 1, 5 и вектор 6, – присваиваем им значение видимости 1. Остальным векторам присваиваем значение 2, так как они контактируют с пунктами П-2 и П-4, расположенными рядом с лесным массивом, уменьшающим обзор небосвода.

Создаём конфигурационную матрицу A направлений

$$D_i = \begin{pmatrix} 3.43 \\ 4.60 \\ 3.52 \\ 3.67 \\ 4.35 \\ 4.38 \\ 3.69 \\ 3.36 \\ 6.14 \\ 4.24 \end{pmatrix}, \quad R_i = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

векторов, размерностью 10×4 (строка – номер вектора; столбец – номер определяемого пункта).

Заполнение строк матрицы A выполняют согласно схеме векторов (рис. 3.14) по следующим правилам: 1 – единица ставится, если данный вектор входит в данный пункт; –1 – минус единица ставится, если данный вектор выходит из данного пункта; 0 – нуль ставится, если данный вектор не связан с данным пунктом.

Пункты 1 2 3 4

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Остальные вычисления в программном комплексе Mathcad ведутся в автоматическом режиме, согласно инструкции [15] и руководству [1; 37]. Матрицы меняют свою размерность автоматически.

Вычисляем погрешности измерения векторов согласно формуле аппаратной точности GPS-приёмника

$$MS_i = a + b \times D_i \quad (3.1)$$

где MS – аппаратная погрешность, мм;
 a, b – коэффициенты аппаратной точности;
 D – длина вектора, км;
 $i = 1, 2, \dots, n$ – номер вектора;

$$MS_i^{(1)} = a + b \cdot D_i,$$

выводим их значения.

| | |
|----|-------|
| | 1 |
| 1 | 13,43 |
| 2 | 14,60 |
| 3 | 13,52 |
| 4 | 13,67 |
| 5 | 14,35 |
| 6 | 14,38 |
| 7 | 13,69 |
| 8 | 13,36 |
| 9 | 16,14 |
| 10 | 14,24 |

Вычисляем величину аппаратурной погрешности измерения длины базовых линий

$$Mmes_i = 2 \cdot MS_p \quad (3.2)$$

где $Mmes$ – погрешность определения длины вектора, мм;
 MS – аппаратурная погрешность определения координаты, мм;
 $i = 1, 2, \dots, n$ – номер вектора.

$$Mmes_i^{(1)} := 2 \cdot MS_i,$$

Вычисляем погрешность центрирования аппаратуры над точкой стояния, полагая, что приёмник устанавливается на штативе, имеющем уровень с точностью $\tau = 8$ мин. Высота установки антенны приёмника $h = 1700$ мм. Вычисления ведём по формуле

$$M_C^2 = \left(\frac{h \cdot \tau}{\rho'} \right)^2 + 2^2, \quad (3.3)$$

где M_C – погрешность центрирования аппаратуры над точкой стояния, мм;

h – высота установки антенны GPS-приёмника, мм;
 τ – чувствительность уровня на штативе, мин;
 ρ – значение радиана, выраженное в минутах (3437,747);
 2 – погрешность измерения высоты инструмента, мм

$$M_{C2} := \left(\frac{h \cdot \tau}{3438} \right)^2 + (2)^2.$$

Погрешность центрирования аппаратуры над точкой, мм

$$\sqrt{M_{C2}} = 4,433.$$

Погрешность трансформирования M_{tr} (обусловлена погрешностью взаимного положения трансформационных пунктов) полагаем равной погрешности центрирования M_C , так как ранее была принята неизменность координат исходных пунктов ГГС

$$M_{tr} = M_C; \quad (3.4)$$

$$M_{tr2} := M_{C2}.$$

Общую погрешность измерения длины вектора вычисляют по формуле

$$M_i = \sqrt{R_i^2 \cdot M_{MESi}^2 + M_{TR}^2 + M_C^2} \quad (3.5)$$

где M – погрешность измерения длины вектора, мм;

R – коэффициент радиовидимости созвездия спутников;

M_{MES} – аппаратурная погрешность измерения длины векторов, мм;

M_{TR} – погрешность трансформирования, мм;

M_C – погрешность центрирования аппаратуры над точкой стояния, мм;

$i = 1, 2, \dots, n$ – номер вектора

$$M_i^{(1)} := \sqrt{(R^2 \cdot M_{MESi}^2) + M_{TR}^2 + M_C^2}$$

Выводим её значения.

| | |
|----|--------|
| | 1 |
| 1 | 27,582 |
| 2 | 58,735 |
| 3 | 54,442 |
| 4 | 55,038 |
| 5 | 29,377 |
| 6 | 29,435 |
| 7 | 55,118 |
| 8 | 53,806 |
| 9 | 64,864 |
| 10 | 57,304 |

$M_i =$

Для начала решения задачи уравнивания необходимо найти погрешность единицы веса μ_0 .

Так как погрешности определения векторов пропорциональны их длинам (данные паспорта приёмника), за единицу веса можно принять среднюю длину вектора, взвешенную по погрешностям, вычислив её по формуле

$$\mu_0 = \frac{\sum (d_i \times M_{Si})}{\sum M_{Si}} \quad (3.6)$$

где μ_0 – погрешность единицы веса, отн. ед.;

D – длина вектора, км;
 MS – аппаратурная погрешность измерения длины векторов, мм;

$i = 1, 2, \dots, n$ – номер вектора

$$\mu_0 := \frac{\sum [(D_i \cdot MS_i)]}{\sum MS_i}$$

$$\mu_0 = 4,182.$$

Формируют матрицу весовых коэффициентов по формуле

$$P_i = \mu_0^2 / M_i^2, \quad (3.7)$$

где μ_0 – погрешность единицы веса, отн. ед.;

M – погрешность измерения длины вектора, мм;

$i = 1, 2, \dots, n$ – номер вектора

$$P_i^{(1)} := \mu_0^2 / M_i^2$$

$P_i =$

| | |
|----|-------|
| | 1 |
| 1 | 0,023 |
| 2 | 0,005 |
| 3 | 0,006 |
| 4 | 0,006 |
| 5 | 0,020 |
| 6 | 0,020 |
| 7 | 0,006 |
| 8 | 0,006 |
| 9 | 0,004 |
| 10 | 0,005 |

Создают диагональную матрицу P весовых коэффициентов P_i

$$P := \text{diag}(P_i). \quad (3.8)$$

Выводим её для просмотра.

| | | | | | | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 0,023 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0,005 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0,006 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0,006 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $P =$ 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,006 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,006 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,004 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,005 |

Вычисляют квадратную, симметричную матрицу относительно главной диагонали, матрицу обратных весовых коэффициентов Q

$$Q := (A^T \cdot P \cdot A)^{-1}. \quad (3.9)$$

| | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| | 26,135 | 13,187 | 12,947 | 12,101 |
| $Q =$ | 13,187 | 57,941 | 13,646 | 21,907 |
| | 12,947 | 13,646 | 27,339 | 13,693 |
| | 12,101 | 21,907 | 13,693 | 57,709 |

Вычисляют среднеквадратические погрешности определения координат пунктов относительно исходных пунктов ГГС в горизонтальной (план) и вертикальной (по высоте) плоскостях по формулам

$$M_{\text{план}}_i = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{ii}}; \quad (3.10)$$

$$M_{\text{высота}}_i = 2 \times m_{\text{план}} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{ii}}; \quad (3.11)$$

где $M_{\text{план}}$ – погрешность определения координат пунктов относительно исходных пунктов ГГС в плане, мм;

$M_{\text{высота}}$ – погрешность определения высоты пунктов относительно исходных пунктов ГГС, мм;

μ_0 – погрешность единицы веса, отн. ед.;
 Q – матрица обратных весовых коэффициентов, отн. ед.;
 $i = 1, 2, \dots, n$ – номер пункта

$$i := 1..pp;$$

$$M_{\text{план}}(i) := \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{i,i}}; \quad M_{\text{высота}}(i) := 2 \cdot m_{\text{план}} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{i,i}}$$

Выражения ниже необходимо записать самим, в зависимости от числа пунктов.

| Пункт | $M_{\text{план}}$, мм | $M_{\text{высота}}$, мм |
|-------|-------------------------------|---------------------------------|
| П-1 | $M_{\text{план}}(1) = 21,380$ | $M_{\text{высота}}(1) = 42,761$ |
| П-2 | $M_{\text{план}}(2) = 31,834$ | $M_{\text{высота}}(2) = 63,669$ |
| П-3 | $M_{\text{план}}(3) = 21,867$ | $M_{\text{высота}}(3) = 43,734$ |
| П-4 | $M_{\text{план}}(4) = 31,770$ | $M_{\text{высота}}(4) = 63,541$ |

Для сравнения полученных величин с требованиями нормативных документов необходимо перейти от среднеквадратических погрешностей к предельным значениям, используя коэффициенты доверительной вероятности, равные $t = 2$ или $t = 3$ ($M_{\text{пред}} = t \cdot M_{\text{план}}$).

Значение коэффициента доверительной вероятности выбирают согласно инструкции по соответствующей съёмке.

Так как в данном примере наименее качественно определено положение пунктов П-2 и П-4 (они расположены возле леса), необходимо определить относительную погрешность длины стороны П2-П4 (рис. 3.14).

Точность взаимного положения пунктов П2-П4 определяют по формуле

$$M_{2-4} = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{2,2} - 2 \cdot Q_{2,4} + Q_{4,4}}, \quad (3.12)$$

где M_{2-4} – погрешность определения взаимного положения пунктов П2 и П4 в плане, мм;

μ_0 – погрешность единицы веса, отн. ед.;
 Q – матрица обратных весовых коэффициентов, отн. ед.;
 $i = 1, 2, \dots, n$ – номер пункта

$$M_{24} = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{2,2} - 2 \cdot Q_{2,4} + Q_{4,4}}; \quad M_{24} = 35,447.$$

Относительную погрешность вычисляют по формуле

$$F = [(D_i \cdot 10^6) / M_{2-4}], \quad (3.13)$$

где F – относительная погрешность измерения вектора, отн. ед.;

D – длина вектора, км;

M_{2-4} – погрешность определения взаимного положения пунктов П2 и П4 в плане, мм;

$i = 1, 2, \dots, n$ – номер вектора.

$$F = [(Di_{3,1} \cdot 10^6) / M24],$$

где $Di_{3,1}$ – длина вектора 3 между пунктами П2 и П4

$$F = 99304,313.$$

Относительная погрешность определения стороны П2-П4

$$1 / (F = 99304).$$

Остальные примеры расчёта будут приведены без пояснений используемых формул в тексте листинга программы Mathcad.

Пример расчёта 2. Требуется: выполнить предварительный расчёт погрешности определения планового и высотного положения пунктов сгущения геодезической сети относительно исходных пунктов ГГС (рис. 3.15). Все измерения предполагается выполнять GPS-приёмником JAVAD TRIUMPH-1 с паспортной точностью определения планового положения: MS (мм) = 10 (мм) + 1 (мм) · D (км).

Установку приёмников над пунктами принято выполнять на штативах с применением оптических центриров с ценой деления уровня $\tau = 8/2$ мм. Высота установки антенны приёмника $h = 1,7$ м.

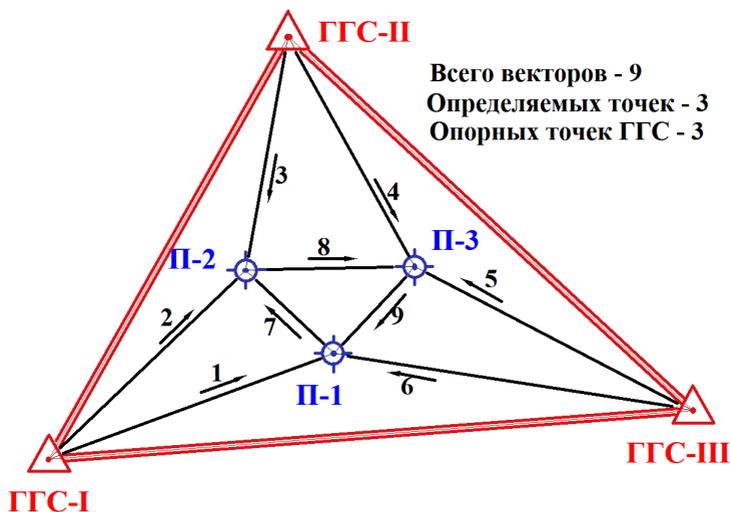


Рис. 3.15. Схема проектируемой геодезической сети сгущения

Пункты П-2 и П-3 расположены возле кромки лесного массива, ухудшающего видимость созвездия ГНСС

ORIGIN := 1.

Полагаем, что координаты пунктов ГГС определены без ошибок.

Количество векторов уравнивания = 9.

Количество определяемых пунктов = 3

$pp := 3.$

Высота антенны приёмника над пунктом, мм

$h := 1700.$

Точность уровня оптического центра, минуты

$\tau := 8.$

Коэффициенты аппаратной точности MS (мм) = $a + b \times D$ (км)

$a := 10$

$b := 1.$

Создаём две матрицы размерности 9×1 (строк – 9; столбцов – 1): расстояний векторов – D (км); видимости созвездий ГНСС – R .

В матрицу D_i вносим длины векторов в км, в соответствии с их нумерацией на схеме, где $i = 1, 2, \dots, n$ – номер вектора. Матрицу R_i заполняем согласно схеме и условиям наблюдения созвездий на небосводе. Значения коэффициента радиовидимости R выбираем согласно табл. 3.8.

Так как только два вектора измеряются при идеальных условиях видимости спутников: вектор 1 и вектор 6, присваиваем им значение видимости 1. Остальным векторам присваиваем значение 2, так как они контактируют с пунктами П-2 и П-3, расположенными рядом с лесным массивом, уменьшающим обзор небосвода.

$$Di: = \begin{pmatrix} 5,36 \\ 4,81 \\ 4,18 \\ 4,63 \\ 5,52 \\ 6,41 \\ 2,13 \\ 2,99 \\ 2,09 \end{pmatrix}, Ri: = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Создаём конфигурационную матрицу A направлений векторов, размерностью 9×4 (строка – номер вектора; столбец – номер определяемого пункта).

Заполнение строк матрицы A выполняем согласно схеме векторов (рис. 3.15).

| | | | |
|--------|---|---|---|
| Пункты | 1 | 2 | 3 |
|--------|---|---|---|

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Вычисляем погрешности измерения векторов согласно формуле аппаратной точности GPS-приёмника (3.1)

$$MSi^{(1)} = a + b \cdot Di,$$

| | |
|---|-------|
| | 1 |
| 1 | 15,36 |
| 2 | 14,81 |
| 3 | 14,18 |
| 4 | 14,63 |
| 5 | 15,52 |
| 6 | 16,41 |
| 7 | 12,13 |
| 8 | 12,99 |
| 9 | 12,09 |

$MSi =$

Вычисляем величину аппаратурной погрешности измерения длины базовых линий (3.2)

$$Mmes_i^{(1)} = 2 \cdot MSi.$$

Вычисляем погрешность центрирования аппаратуры над точкой стояния, полагая, что приёмник устанавливается на штативе, имеющем уровень с точностью $\tau = 8$ мин. Высота установки антенны приёмника $h = 1700$ мм. Вычисления ведём по формуле (3.3)

$$Mc2 = [(h \cdot \tau) / 3438]^2 + (2)^2; \quad \sqrt{Mc2} = 4,433.$$

Погрешность трансформирования Mtr (обусловлена погрешностью взаимного положения трансформационных пунктов) полагаем равной погрешности центрирования Mc , так как ранее была принята неизменность координат исходных пунктов ГГС (3.4)

$$Mtr2 = Mc2.$$

Общую погрешность измерения длины вектора вычисляем по формуле (3.5)

$$M_i^{(1)} := \sqrt{(R^2 \cdot Mmes_i^2) + Mtr2 + Mc2}.$$

| | |
|---|--------|
| | 1 |
| 1 | 31,353 |
| 2 | 59,571 |
| 3 | 57,065 |
| 4 | 58,855 |
| 5 | 62,396 |
| 6 | 33,413 |
| 7 | 48,923 |
| 8 | 52,337 |
| 9 | 48,765 |

Вычисляем погрешность единицы веса μ_0 по формуле (3.6)

$$\mu_0 = \frac{\sum [(D_i \cdot MS_i)]}{\sum MS_i}$$

$$\mu_0 = 4,382$$

Формируем матрицу весовых коэффициентов по формуле (3.7)

$$P_i^{(1)} := \mu_0^2 / M_i^2.$$

| | |
|---|-------|
| | 1 |
| 1 | 0,020 |
| 2 | 0,005 |
| 3 | 0,006 |
| 4 | 0,006 |
| 5 | 0,005 |
| 6 | 0,017 |
| 7 | 0,008 |
| 8 | 0,007 |
| 9 | 0,008 |

Создаём диагональную матрицу P весовых коэффициентов P_i (3.8)

$$P: = \text{diag}(P_i).$$

$$P =$$

| | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 0,020 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0,005 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0,006 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0,006 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,005 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,017 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,008 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,007 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,008 |

Вычисляем квадратную, симметричную матрицу относительно главной диагонали. Матрицу обратных весовых коэффициентов Q (3.9)

$$Q: = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1}$$

$$Q =$$

| | | | |
|--|--------|--------|--------|
| | 21,748 | 9,118 | 9,371 |
| | 9,118 | 44,783 | 15,163 |
| | 9,371 | 15,163 | 46,248 |

Вычисляем среднеквадратические погрешности определения координат пунктов относительно исходных пунктов ГТС в горизонтальной (план) и вертикальной (по высоте) плоскостях по формулам (3.10) и (3.11):

$$i: = 1..pp;$$

$$M_{\text{план}}(i): = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{i,i}}; \quad M_{\text{высота}}(i): = 2 \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{i,i}}.$$

Выражения ниже необходимо записать самим, в зависимости от числа пунктов.

| Пункт | $M_{\text{план}}, \text{мм}$ | $M_{\text{высота}}, \text{мм}$ |
|-------|-------------------------------|---------------------------------|
| П-1 | $M_{\text{план}}(1) = 20,434$ | $M_{\text{высота}}(1) = 40,868$ |
| П-2 | $M_{\text{план}}(2) = 29,322$ | $M_{\text{высота}}(2) = 58,644$ |
| П-3 | $M_{\text{план}}(3) = 29,798$ | $M_{\text{высота}}(3) = 59,595$ |

Для сравнения полученных величин с требованиями нормативных документов необходимо перейти от среднеквадратических погрешностей к предельным значениям, используя коэффициенты доверительной вероятности, равные $t = 2$ или $t = 3$. ($M_{\text{пред}} = t \times M_{\text{план}}$).

Значение коэффициента доверительной вероятности выбирают согласно инструкции по соответствующей съёмке.

Так как в данном примере наименее качественно определено положение пунктов П-2 и П-3 (они расположены возле леса), необходимо определить относительную погрешность длины стороны П2-П3 (рис. 3.15).

Точность взаимного положения пунктов П2-П3 определяем по формуле (3.12)

$$M_{23} = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{2,2} - 2 \cdot Q_{2,3} + Q_{3,3}}, \quad M_{23} = 34,139.$$

Относительную погрешность вычисляют по формуле (3.13)

$$F = (Di_{8,1} \cdot 10^6) / M_{23};$$

$$F = 87582,795.$$

Относительная погрешность определения стороны П2-П3

$$1 / (F = 87582,795).$$

Пример расчёта 3. Требуется: выполнить предварительный расчёт погрешности определения планового и высотного положения пунктов сгущения геодезической сети (рис. 3.16), относительно исходных пунктов ГГС. Все измерения предполагается выполнять GPS-приёмником JAVAD TRIUMPH-1 с паспортной точностью определения планового положения: $MS \text{ (мм)} = 10 \text{ (мм)} + 1 \text{ (мм)} \cdot D \text{ (км)}$.

Установку приёмников над пунктами принято выполнять на штативах с применением оптических центриров с ценой деления уровня $\tau = 8'/2$ мм. Высота установки антенны приёмника $h = 1,7$ м.

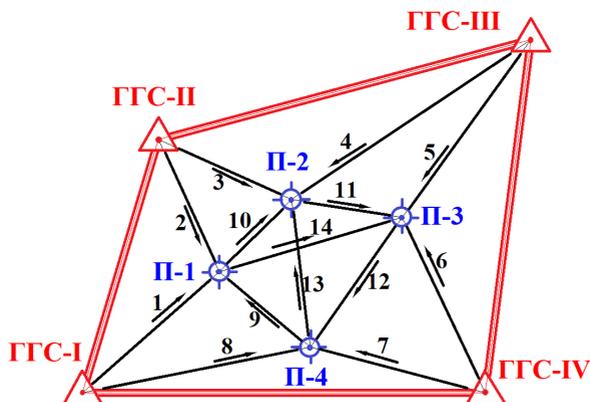


Рис. 3.16. Схема проектируемой геодезической сети сгущения: всего векторов – 14; определяемых точек – 4; опорных точек ГГС – 4

Пункты П-2 и П-3 расположены возле кромки лесного массива, ухудшающего видимость созвездия ГНСС

ORIGIN := 1.

Полагаем, что координаты пунктов ГГС определены без ошибок.

Количество векторов уравнивания = 14.

Количество определяемых пунктов = 4

Высота антенны приёмника над пунктом, мм

$pp := 4.$

$h := 1700.$

Точность уровня оптического центра, мин

$\tau := 8.$

Коэффициенты аппаратной точности MS (мм) = $a + b \times D$ (км)

$a := 10$

$b := 1.$

Создаём две матрицы размерности 14×1 (строк – 14; столбцов – 1): расстояний векторов – D (км); и видимости созвездий ГНСС – R .

В матрицу D_i вносим длины векторов в км, в соответствии с их нумерацией на схеме, где $i = 1, 2, \dots, n$ – номер вектора. Матрицу R_i заполняем согласно схеме и условиям наблюдения созвездий на небосводе. Значения коэффициента радиовидимости R выбираем согласно табл. 3.8.

Так как только пять векторов измеряются при идеальных условиях видимости спутников: векторы 1, 2, 7, 8 и вектор 9, присваиваем им значение видимости 1. Остальным векторам

присваиваем значение 2, так как они контактируют с пунктами П-2 и П-3, расположенными рядом с лесным массивом, уменьшающим обзор небосвода.

$$D_i = \begin{pmatrix} 3,55 \\ 2,83 \\ 2,84 \\ 5,60 \\ 4,26 \\ 377 \\ 3,53 \\ 4,52 \\ 2,30 \\ 1,99 \\ 2,19 \\ 3,10 \\ 2,90 \\ 3,72 \end{pmatrix}, \quad R_i = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Создаём конфигурационную матрицу A направлений векторов, размерностью 14×4 (строка – номер вектора; столбец – номер определяемого пункта).

Заполнение строк матрицы A выполняют согласно схеме векторов (рис. 3.16) по следующим правилам: 1 – единица ставится, если данный вектор входит в данный пункт; -1 – минус единица ставится, если данный вектор выходит из данного пункта; 0 – ноль ставится, если данный вектор не связан с данным пунктом.

$$A = \begin{matrix} \text{Пункты} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Вычисляем погрешности измерения векторов согласно формуле аппаратной точности GPS-приёмника (3.1):

$$MSi^{(1)} = a + b \cdot Di.$$

| | |
|---------|-------|
| | 1 |
| 1 | 13,55 |
| 2 | 12,83 |
| 3 | 12,84 |
| 4 | 15,60 |
| 5 | 14,26 |
| 6 | 13,77 |
| $MSi =$ | 7 |
| | 13,53 |
| | 8 |
| | 14,52 |
| | 9 |
| | 12,30 |
| | 10 |
| | 11,99 |
| | 11 |
| | 12,19 |
| | 12 |
| | 13,10 |
| | 13 |
| | 12,90 |
| | 14 |
| | 13,72 |

Вычисляем величину аппаратной погрешности измерения длины базовых линий (3.2)

$$Mmesi^{(1)} = 2 \cdot MSi.$$

Вычисляем погрешность центрирования аппаратуры над точкой стояния, полагая, что приёмник устанавливается на штативе имеющем уровень с точностью $\tau = 8$ мин. Высота установки антенны приёмника $h = 1700$ мм. Вычисления ведём по формуле (3.3)

$$Mc2 = [(h \cdot \tau) / 3438]^2 + (2)^2; \quad \sqrt{Mc2} = 4,433.$$

Погрешность трансформирования Mtr (обусловлена погрешностью взаимного положения трансформационных пунктов) полагаем равной погрешности центрирования Mc , так как ранее было принято неизменность координат исходных пунктов ГГС (3.4):

$$Mtr2 := Mc2.$$

Общую погрешность измерения длины вектора вычисляют по формуле (3.5):

$$M_i^{(1)} := \sqrt{(R^2 \cdot M_{mes_i}^2)} + M_{tr2} + M_{c2}.$$

Выводим её значения.

| | |
|---------|--------|
| | 1 |
| 1 | 27,816 |
| 2 | 26,415 |
| 3 | 51,741 |
| 4 | 62,714 |
| 5 | 57,383 |
| 6 | 55,436 |
| $M_i =$ | 7 |
| | 27,777 |
| | 8 |
| | 29,709 |
| | 9 |
| | 25,386 |
| | 10 |
| | 48,368 |
| | 11 |
| | 49,161 |
| | 12 |
| | 52,774 |
| | 13 |
| | 51,979 |
| | 14 |
| | 55,237 |

Вычисляем погрешность единицы веса μ_0 по формуле (3.6)

$$\mu_0 := \frac{\sum [(D_i \cdot M_{Si})]}{\sum M_{Si}};$$

$$\mu_0 = 3,432.$$

Формируем матрицу весовых коэффициентов по формуле (3.7)

$$P_i^{(1)} := \mu_0^2 / M_i^2.$$

| | |
|---------|-------|
| | 1 |
| 1 | 0,015 |
| 2 | 0,017 |
| 3 | 0,004 |
| 4 | 0,003 |
| 5 | 0,004 |
| 6 | 0,004 |
| $P_i =$ | 7 |
| | 0,015 |
| | 8 |
| | 0,013 |
| | 9 |
| | 0,018 |
| | 10 |
| | 0,005 |
| | 11 |
| | 0,005 |
| | 12 |
| | 0,004 |
| | 13 |
| | 0,004 |
| | 14 |
| | 0,004 |

Создаём диагональную матрицу P весовых коэффициентов P_i , (3.8)

$$P := \text{diag}(P_i).$$

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 1 | 0,015 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0,017 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0,004 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0,003 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,004 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,004 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,015 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,013 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,018 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,005 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,005 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,005 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,004 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,004 |

P =

Вычисляем квадратную, симметричную матрицу относительно главной диагонали. Матрицу обратных весовых коэффициентов Q (3.9)

$$Q = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1}$$

$$Q =$$

| | | | |
|--------|--------|--------|-------|
| 20,486 | 8,038 | 7,455 | 7,949 |
| 8,038 | 53,224 | 15,925 | 8,045 |
| 7,455 | 15,925 | 55,951 | 7,973 |
| 7,949 | 8,045 | 7,973 | 21,88 |

Вычисляем среднеквадратические погрешности определения координат пунктов относительно исходных пунктов ГГС в горизонтальной (план) и вертикальной (по высоте) плоскостях по формулам (3.10) и (3.11)

$$i: = 1..pp;$$

$$M_{\text{план}}(i) = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{i,i}}; \quad M_{\text{высота}}(i) = 2 \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{i,i}}$$

Выражения ниже необходимо записать самим, в зависимости от числа пунктов.

| Пункт | $M_{\text{план}}, \text{мм}$ | $M_{\text{высота}}, \text{мм}$ |
|-------|-------------------------------|---------------------------------|
| П-1 | $M_{\text{план}}(1) = 15,535$ | $M_{\text{высота}}(1) = 31,070$ |
| П-2 | $M_{\text{план}}(2) = 25,041$ | $M_{\text{высота}}(2) = 50,081$ |
| П-3 | $M_{\text{план}}(3) = 25,674$ | $M_{\text{высота}}(3) = 51,348$ |
| П-4 | $M_{\text{план}}(4) = 16,055$ | $M_{\text{высота}}(4) = 32,111$ |

Для сравнения полученных величин с требованиями нормативных документов необходимо перейти от среднеквадратических погрешностей к предельным значениям, используя коэффициенты доверительной вероятности, равные $t = 2$ или $t = 3$. ($M_{\text{пред}} = t \times M_{\text{план}}$). Значение коэффициента доверительной вероятности выбирают согласно инструкции по соответствующей съёмке.

Так как в данном примере наименее качественно определено положение пунктов П-2 и П-3 (они расположены возле леса), необходимо определить относительную погрешность длины стороны П2-П3 (рис. 3.16).

Точность взаимного положения пунктов П2-П3 определяют по формуле (3.12)

$$M23: = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{2,2} - 2 \cdot Q_{2,3} + Q_{3,3}}, \quad M23 = 30,182.$$

Относительную погрешность вычисляют по формуле (3.13):

$$F: = (Di_{11,1} \cdot 10^6) / M24,$$

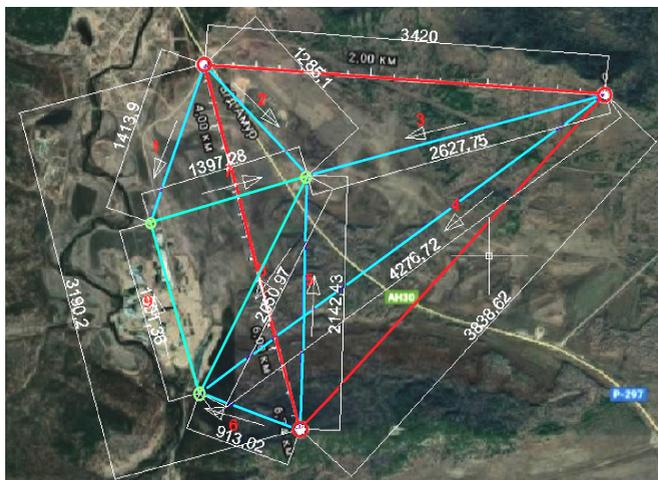
где $Di_{11,1}$ – длина вектора 11 между пунктами П2 и П3

$$F = 72559,135.$$

Относительная погрешность определения стороны П2-П3

$$1 / (F = 72559).$$

Сегодня проектирование и предрасчёт погрешностей возможно выполнить даже на основе карт Google Earth (рис. 3.17).



- Опорные пункты ГГС
- Новые создаваемые точки
- Векторы уравнения

Рис. 3.17. Схема сгущения опорной сети на основе карт Google Earth

3.6. Организация и сроки выполнения работ, мероприятия по технике безопасности и охране труда

В данном разделе описывается перечень и порядок выполнения полевых и камеральных работ с расчётом трудовых затрат и времени на их выполнение.

В полевые работы обычно входят:

1) обследование наличия и сохранности пунктов опорной геодезической основы и возможности проведения на них измерений;

2) рекогносцировка и закрепление пунктов сети сгущения. В процессе рекогносцировки необходимо вести журнал, в котором для каждого пункта должны фиксироваться азимуты и высоты границ нахождения препятствий, если высота препятствий над горизонтом более 15° . При этом высота препятствий над горизонтом должна определяться с учётом вероятной высоты расположения антенны приёмника;

3) подготовка к производству измерений, включающая проверку готовности аппаратуры и исполнителей к осуществлению работ по рабочей программе полевых работ, предусмотренной проектом;

4) выполнение измерений в соответствии с техническим проектом. при этом должны быть реализованы как метод развития съёмочного обоснования, предусмотренный проектом, так и методы спутниковых определений: быстрый статический, метод реокупации или статический, указанные в рабочей программе полевых работ для тех или иных сеансов. В сеансе для осуществления приёма на каждом пункте необходимо выполнить следующие операции:

- подготовить приёмник к работе;
- установить режим регистрации данных наблюдения спутников;
- провести приём наблюдений спутников в течение времени, указанного в рабочей программе полевых работ для применяемого метода спутниковых определений;
- выключить режим регистрации данных и выполнить свёртывание аппаратуры.

В камеральные работы обычно входят:

- 1) предварительная обработка – разрешение неоднозначностей фазовых псевдодальностей до наблюдаемых спутников, получение координат определяемых точек в системе координат глобальной навигационной спутниковой системы и оценка точности;
- 2) трансформация координат в принятую систему координат;
- 3) уравнивание геодезических построений и оценка точности.

Камеральные работы обычно выполняются на специализированном программном обеспечении, выбор которого также обоснован в рамках данного проекта.

3.7. Перечень топографо-геодезических, картографических и других материалов, подлежащих сдаче по окончании работ

Отчётные материалы должны быть составлены в полном соответствии с требованиями действующих «Инструкции по составлению технических отчётов о геодезических, астрономических, гравиметрических и топографических работах» [11] и «Инструкции о порядке осуществления государственного геодезического надзора в Российской Федерации» [10].

Отчётные материалы о создании съёмочного обоснования с применением ГНСС спутниковой технологии должны содержать:

- 1) общие сведения (название организации и год производства работ; перечень инструкций и других нормативных актов, которыми руководствовались при выполнении работ; физико-географические условия и административная принадлежность района работ; содержание и назначение работ; масштаб и сечение рельефа планируемой съёмки);
- 2) сведения о топографо-геодезических работах прошлых лет (перечень и год производства работ; название организа-

ции, производившей работы; точность и степень использования работ; сохранность геодезических пунктов по результатам обследования);

3) характеристику геодезической основы (принятая система координат и высот; плотность пунктов; постройка знаков и типы центров; точность и методы измерений; приборы; методы уравнивания);

4) сведения о выполненных работах (плотность съёмочного обоснования, порядок закрепления точек, методика измерений и точность результатов).

Контрольные вопросы

1. Какие погрешности оказывают влияние на точность измерения GPS-приёмника?

2. Как учитывается погрешность определения исходных базовых координат?

3. От чего зависит точность центрирования геодезического прибора над точкой?

4. Что такое геометрия созвездия?

5. Перечислите виды поверхностей для определения высот точек поверхности Земли.

6. От каких параметров зависит погрешность измерения в ГНСС-технологиях?

7. Какой метод следует применять для сгущения опорной сети при наличии двух двухчастотных GPS-приёмников?

8. Почему необходимо при GPS-измерениях иметь пять и более базовых точек?

Рекомендуемая литература

1. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. Т. 2 / Сибирская государственная геодезическая академия. – М.: Картгеоцентр, 2006. – 360 с.

2. ГКИНП (ОНТА)-01-271-03. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. – М.: ЦНИИ-ГАиК, 2003. – 66 с.

3. ГКИНП (ОНТА)-02-262-02. Инструкция по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 56 с.

4. ГОСТ Р 57371-2016. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Оценка точности определения местоположения. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 11 с.

5. Гришко С. В. Уравнивание спутниковых сетей. Предварительная оценка точности проектов спутниковых измерений: учеб.-метод. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 20 с.

6. Инструкция по составлению технических отчётов о геодезических, астрономических, гравиметрических и топографических работах (ГКИНП-5): утв. ГУГК, согласована с ВТУ. – 3-е изд., доп. и испр. – М.: Недра, 1971.

7. Методические указания по созданию, контролю и реконструкции маркшейдерско-геодезических сетей на горных предприятиях с использованием спутниковой аппаратуры. – СПб.: ВНИМИ, 1998. – 38 с.

8. О единых государственных системах координат: постановление Правительства РФ от 28.12.2012 г. № 1463.

9. Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года: приказ Росреестра от 23.03.2016 г. № П/0134.

10. СП 317.1325800.2017 Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – М.: Минстрой России, 2017. – 85 с.

ГЛАВА 4

ВЫПОЛНЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЛИНЕЙНО-УГЛОВЫХ ЗАСЕЧЕК ЭЛЕКТРОННЫМИ ТАХЕОМЕТРАМИ

В случае применения для геодезических и маркшейдерских измерений электронного тахеометра в практической работе может быть использовано два вида обратных засечек:

1) классический вариант при измерении двух горизонтальных углов α и β на три опорные точки 1, 2 и 3 (рис. 4.1);

2) вариант измерения двух расстояний $L2$ и $L3$ на две опорные точки 1 и 2 (рис. 4.2).

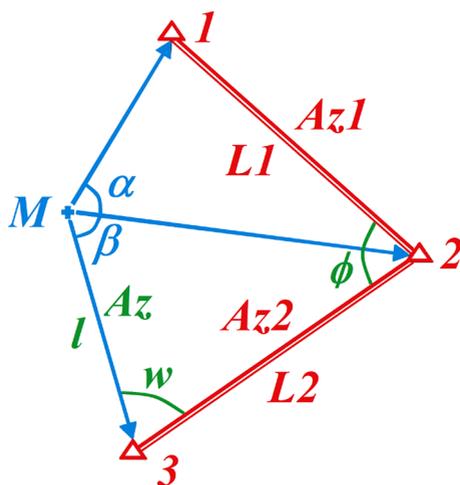


Рис. 4.1. Схема обратной угловой засечки

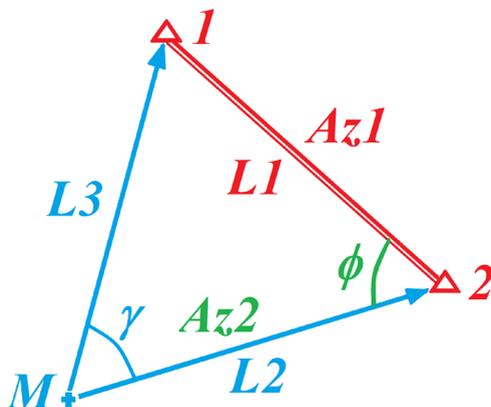


Рис. 4.2. Схема обратной линейной засечки

Чтобы правильно оценить возможности выполнения таких измерений, необходимо рассмотреть эти задачи с точки зрения решения их в самих приборах [41]. В данном руководстве в полном объеме представлены методы вычислений, реализованные в программном обеспечении электронных тахеометров Trimble. На рис. 4.1 и 4.2 все обозначения представлены в соответствии с данным руководством.

4.1. Классический способ, без учёта уравнивания измерений

Классический способ – это способ, когда используют основные формулы вычисления и путём их дифференцирования находят погрешность функции измеренных величин. Такой пример приведён в статье [6] в предположении, что кроме расстояний $L2$, $L3$ измеряется ещё и угол γ . Вычисления обратной линейно-угловой засечки выполняют по формулам

$$\begin{aligned} \Delta X_{2-1} &= X1 - X2; & \Delta Y_{2-1} &= Y1 - Y2; \\ \sin\phi &= L3 \cdot \sin\gamma / L1; \\ \alpha_{z1} &= \arctg(\Delta Y_{2-1} / \Delta X_{2-1}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_Z &= \alpha_{1-2} - \varphi; \\ \Delta X_{2-M} &= L2 \cdot \cos\alpha_Z; \\ \Delta Y_{2-M} &= L2 \cdot \sin\alpha_Z; \\ X_M &= X2 + \Delta X_{2-M}; \\ Y_M &= Y2 + \Delta Y_{2-M}.\end{aligned}$$

где $X1, Y1, X2, Y2$ – координаты базовых точек 1 и 2;

$\Delta X, \Delta Y$ – приращение координат;

$L3, L2$ – измеренные длины сторон $M-1$ и $M-2$;

$L1$ – длина базовой стороны 1–2;

α_{Z1} – азимут базовой стороны 2–1;

α_Z – азимут стороны 2– M ;

φ – вычисленный угол в треугольнике;

X_M, Y_M – координаты искомой точки.

Символика в формулах соответствует рис. 4.2, однако формулы приведены в соответствии с системой геодезических координат.

Последовательно продифференцировав выражения выше и сложив их по правилу сложения погрешностей [13; 26], найдём среднеквадратическую погрешность определения координат пункта M

$$\begin{aligned}m_M &= \sqrt{m_2^2 + m_{L2}^2 + L2^2 \cdot \left(\frac{m_2^2 \cdot \sin(\gamma)^2}{L1^4 \cdot \cos(\varphi)^2} \times \right.} \\ &\times \left. \left[\left(L3 \cdot \operatorname{ctg}(\gamma) \cdot \frac{m_\gamma}{\rho} \right)^2 + m_{L3}^2 + \left(\frac{L3}{L1} \cdot m_1 \right)^2 \right] \right), \quad (4.1)\end{aligned}$$

где m_M – погрешность определения координат пункта M , мм;

m_1, m_2 – погрешность определения координат базовых точек 1 и 2, мм;

m_{L2}, m_{L3} – погрешность измерения расстояний до точек 1 и 2, мм;

$L2, L3$ – измеряемые расстояния до точек 1 и 2, м;

$L1$ – расстояние между базовыми точками 1 и 2, м;

γ – значение измеряемого угла, градусы;

φ – значение вычисляемого угла, градусы;

m_γ – погрешность измерения горизонтального угла, с;

ρ – значение радиана, выраженное в секундах (206 264,806).

Иногда предполагают, что базовая сторона не имеет погрешностей, так как она определена более высоким классом точности. В этом случае формула примет вид

$$m_M = \sqrt{m_{L2}^2 + L2^2 \cdot \left(\frac{\sin(\gamma)^2}{L1^4 \cdot \cos(\varphi)^2} \times \left[\left(L3 \cdot ctg(\gamma) \cdot \frac{m_y}{\rho} \right)^2 + m_{L3}^2 + \left(\frac{L3}{L1} \right)^2 \right] \right)} \quad (4.2)$$

Пример расчёта. Предполагается выполнить обратную засечку с помощью электронного тахеометра Spectra Precision FOCUS 6 (рис. 4.2):

- 1) точность отсчитывания по горизонтальному и вертикальному кругу $\vartheta = 5''$;
- 2) точность измерения расстояний дальномером $m_{\text{Расс.}} = \pm 3 + 2 \text{ мм/км} \cdot D$;
- 3) точность центрирования на станции $m_{\text{цент.}} = 2 \text{ мм}$;
- 4) увеличение зрительной трубы $V = 30^{\times}$;
- 5) угловое расстояние биссектора $D = 30''$;
- 6) в качестве визирной марки используется призма, устанавливаемая на штативе с чувствительностью уровня $\tau = 8'/2 \text{ мм}$. Высота визирной цели $h = 1,7 \text{ м}$;
- 7) условия измерения (видимость) хорошие $\varphi = 60''$.

Базовая сторона представлена точками полигонометрии 1-го разряда с относительной точностью измерения 1:10 000. Длина базовой стороны $L1 = 800 \text{ м}$. Длины измеряемых сторон $L2 = 560 \text{ м}$, $L3 = 720 \text{ м}$. Величина измеряемого угла $\gamma = 60^\circ 56'26,6''$.

Погрешность определения координаты одной из базовых точек составит (2.1) и (2.2)

$$\begin{aligned} m_{\text{Баз.}} &= L1 \cdot 10^3 \cdot St; \\ m_{\text{Баз.}} &= 800 \cdot 10^3 / 10\ 000 = 80 \text{ мм}; \\ m_{xy} &= L1 / \sqrt{2} = 0,056 \text{ м}; \\ m_{xy} &= 80 / \sqrt{2} = 56 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Погрешность центрирования тахеометра над точкой стояния

$$m_{\text{Цент.}} = 2,0 \text{ мм.}$$

Погрешность редуцирования визирной марки над точками визирования 1 и 2 (2.6)

$$m_{\text{ред.}} = \frac{\tau \cdot h}{\rho} = \frac{8 \cdot 60 \cdot 1,7 \cdot 10^3}{206265} = 4,0 \text{ мм.}$$

Погрешность измерения расстояний (2.23)

$$\begin{aligned} m_{L2} &= \sqrt{m_{\text{Цент.}}^2 + m_{\text{ред.}}^2 + m_{\text{расст.}}^2} = \\ &= \sqrt{2^2 + 4^2 + (3 + 2 \cdot 0,560)^2} = 6,1 \text{ мм;} \\ m_{L3} &= \sqrt{m_{\text{Цент.}}^2 + m_{\text{ред.}}^2 + m_{\text{расст.}}^2} = \\ &= \sqrt{2^2 + 4^2 + (3 + 2 \cdot 0,720)^2} = 6,3 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Погрешность, определяемая разрешающей способностью человеческого глаза и увеличением зрительной трубы на дневной поверхности (2.7)

$$m_{\text{раз.}} = \frac{\varphi}{V} = \frac{60''}{30^{\times}} = 2''.$$

Погрешность, определяемая конструкцией сетки нитей зрительной трубы биссектором (2.9)

$$m_{\text{Нав.}} = \frac{D}{12} = \frac{30''}{12} = 2,5''.$$

Погрешность визирования на марки точек 1 и 2 (2.11)

$$\begin{aligned} m_{\text{Виз.2}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{ред.}}}{L \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{раз.}}^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{4 \cdot 206265}{560 \cdot 10^3}\right)^2 + 2,5^2 + 2^2} = 3,5''; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Виз.1}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{ред.}}}{L \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Нав.}}^2 + m_{\text{Раз.}}^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{4 \cdot 206265}{720 \cdot 10^3}\right)^2 + 2,5^2 + 2^2} = 3,4''.
 \end{aligned}$$

Погрешность ориентирования тахеометра на линии измерения (2.15)

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Ориент.1}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{цент.}}}{L \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Виз.}}^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 206265}{720 \cdot 10^3}\right)^2 + 3,4^2} = 3,4'';
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Ориент.1}} &= \sqrt{\left(\frac{m_{\text{цент.}}}{L \cdot 10^3} \cdot \rho\right)^2 + m_{\text{Виз.}}^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 206265}{560 \cdot 10^3}\right)^2 + 3,5^2} = 3,6''.
 \end{aligned}$$

Погрешность отсчитывания по тахеометру (2.21)

$$m_{\text{От.}} = P \cdot 9/2 = 0,95 \cdot 5/2 = 2,4''.$$

Погрешность измерения угла в обратной засечке одним полным приёмом (2.18)

$$\begin{aligned}
 m_{\gamma} &= \sqrt{m_{\text{От.}}^2 + \frac{1}{2} \cdot (m_{\text{Ориент.}}^2 + m_{\text{Ориент.}}^2)} = \\
 &= \sqrt{2,4^2 + \frac{1}{2} \cdot (3,4^2 + 3,6^2)} = 4,2''.
 \end{aligned}$$

Выполнив окончательные вычисления по формуле (4.1), получим среднеквадратическую погрешность определения координат искомой точки M .

$$m_M = \sqrt{56^2 + 6.1^2 + 560^2 \cdot \left(\frac{56^2 \cdot \sin(60,94)^2}{800^4 \cdot \cos(45,08)^2} \right) \times \left[\left(720 \cdot \operatorname{ctg}(60,94) \cdot \frac{4.2}{206\,265} \right)^2 + 6,3^2 + \left(\frac{720}{800} \cdot 56 \right)^2 \right]} = 57 \text{ мм.}$$

Если принять, что точки базовой стороны не имеют ошибок, т. е. $m_1 = m_2 = m_{XY} = 0$, то погрешность определения координат искомой точки станет равна

$$m_M = \sqrt{6,1^2 + 560^2 \cdot \left(\frac{\sin(60,94)^2}{800^4 \cdot \cos(45,08)^2} \right) \times \left[\left(720 \cdot \operatorname{ctg}(60,94) \cdot \frac{4.2}{206\,265} \right)^2 + 6,3^2 + \left(\frac{720}{800} \right)^2 \right]} = 6 \text{ мм.}$$

Таким образом, данная формула очень чувствительна к погрешностям исходных данных. Анализ формулы показывает, что на конечное значение погрешности в основном оказывают влияние первых два члена выражения, а остальные части выражения практически не влияют на результат. К тому же программное обеспечение электронных тахеометров пытается выполнить уравнивание измерений при любом количестве измерений, что указывает на не совсем корректность использования этих формул.

4.2. Предрасчёт погрешности обратной линейной засечки с учётом параметрического уравнивания

В руководстве “Resection Computations in the Trimble Access Software” [41] показано, что электронные тахеометры при выполнении измерений обратной засечки с измерением длин линий на две базовых точки выполняют уравнивание полученных данных параметрическим способом, выполняя до 15 итераций и таким образом оценивая результаты измерений. По-

этому предрасчёт точности выполнения обратной линейной засечки следует тоже выполнять параметрическим способом в предположении предстоящего уравнивания измеренных величин. Так как в уравнивании участвуют измеренные расстояния треугольника (вектора), для расчётов можно использовать методику, рассмотренную в главе 3.

Пример расчёта. Предполагается выполнить обратную линейную засечку с помощью электронного тахеометра Spectra Precision FOCUS 6 (рис. 4.3).

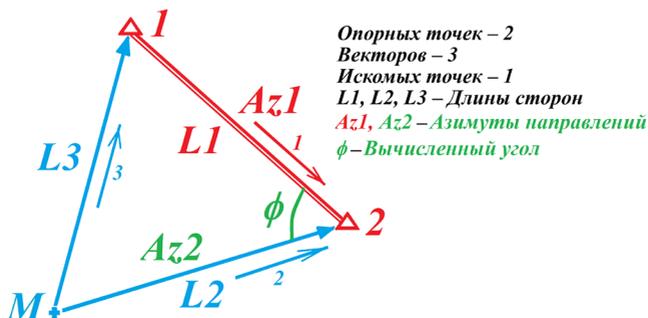


Рис. 4.3. Схема измерений при выполнении обратной линейной засечки

Основные характеристики выполнения обратной засечки:

- 1) точность отсчитывания по горизонтальному и вертикальному кругу $\vartheta = 5''$;
- 2) точность измерения расстояний дальномером $m_{\text{Расс.}} = \pm 3 + 2 \text{ мм/км} \cdot D$;
- 3) точность центрирования на станции $m_{\text{Цент.}} = 2 \text{ мм}$;
- 4) увеличение зрительной трубы $V = 30^{\times}$;
- 5) угловое расстояние биссектора $D = 30''$;
- 6) в качестве визирной марки используется призма, устанавливаемая на штативе с чувствительностью уровня $\tau = 8'/2 \text{ мм}$. Высота визирной цели $h = 1,7 \text{ м}$;
- 7) условия измерения (видимость) хорошие $\varphi = 60''$.

Базовая сторона представлена точками полигонометрии 1-го разряда с относительной точностью измерения 1:10 000. Длина базовой стороны $L1 = 800 \text{ м}$. Длины измеряемых сторон $L2 = 560 \text{ м}$, $L3 = 720 \text{ м}$.

4.2.1. Среднеквадратическая погрешность определения плановых координат пункта, измеренного обратной линейной засечкой

Ниже представлена полная версия программы расчёта в терминах и символике математического процессора Mathcad.

Расчёт выполнен в матричной форме. Для удобства работы с матрицами изменим номер первой ячейки матрицы с 0 на 1, изменив значение системной переменной ORIGIN на единицу

$$\text{ORIGIN} := 1.$$

Количество векторов уравнивания = 3.

Количество определяемых пунктов = 1

$$pp := 1.$$

Высота тахеометра над пунктом, мм

$$hi := 1500.$$

Точность отсчитывания угла в тахеометре, с

$$t := 5.$$

Точность центрирования тахеометра, мм

$$Mcent := 2.$$

Увеличение зрительной трубы тахеометра, крат

$$V := 30.$$

Разрешающая способность человеческого глаза, с

$$\varphi := 60.$$

Угловое расстояние биссектора, с

$$D := 30.$$

Погрешность компенсатора при вертикальном круге (обычно в 2 раза меньше точности отсчитывания тахеометра: 1", 2", 3", 5" или 7")

$$Mkom := 3.$$

Высота установки марки над пунктом, мм

$$hv := 1700.$$

Точность уровня телескопического штатива, мин

$$\tau := 8.$$

Коэффициенты аппаратной точности MS (мм) = $a + b \times D$ (км)

$$a := 3$$

$$b := 2.$$

Максимальный перепад высот между пунктами 1- M и 2- M , м

$$\Delta H1 := 120;$$

$$\Delta H2 := 120.$$

Длина базовой стороны, м

$$L1 := 800$$

Относительная погрешность определения длины базовой стороны, отн. ед.

$$Not := 1/10\ 000.$$

Высотные отметки базовых точек получены по результатам геометрического нивелирования IV класса с погрешностью определения превышения не более 20 мм на 1 км хода

$$dh := 20.$$

Измеренные длины сторон $L2$ и $L3$, м

$$L2 := 560; \quad L3 := 720.$$

Зададим значение радиана в секундах $\rho := 206\,264,806$.

Остальные вычисления в программном комплексе Mathcad ведутся в автоматическом режиме.

Заполняем матрицу расстояний Di и матрицу векторов A

$$Di_{1,1} := L1; \quad Di_{2,1} := L2; \quad Di_{3,1} := L3;$$

$$Di := \begin{pmatrix} 800 \\ 560 \\ 720 \end{pmatrix}; \quad A := \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}.$$

Матрица A заполнена согласно схеме векторов (рис. 4.3) по следующим правилам: 1 – единица ставится, если данный вектор входит в данный пункт; -1 – минус единица ставится, если данный вектор выходит из данного пункта; 0 – нуль ставится, если данный вектор не связан с данным пунктом.

Вычисляем погрешности измерения векторов: погрешность определения длины базовой стороны 1–2 (2.1)

$$ML1 := L1 \cdot 10^3 \cdot \text{Not}; \quad ML1 = 80 \text{ мм.}$$

Погрешность редуцирования визирной марки над точками визирования 1 и 2 (2.6)

$$Mred := (\tau \cdot 60 \cdot h) / \rho; \quad Mred = 4,0.$$

Погрешность измерения расстояний (2.23):

$$ML2 := \sqrt{Mcent^2 + Mred^2 + (a + b \cdot L2 \cdot 10^{-3})^2}; \quad ML2 = 6,0;$$

$$ML3 := \sqrt{Mcent^2 + Mred^2 + (a + b \cdot L3 \cdot 10^{-3})^2}; \quad ML3 = 6,3.$$

Заполняем матрицу погрешностей измерения векторов.

$$MSi_{1,1} := ML1; \quad MSi_{2,1} := ML2; \quad MSi_{3,1} := ML3.$$

Выводим её значения

$$MSi = \begin{pmatrix} 80,000 \\ 6,052 \\ 6,274 \end{pmatrix}.$$

Находим погрешность единицы веса

$$\mu_0 := \frac{\Sigma \left[\frac{1}{(Di \cdot MSi)} \right]}{\Sigma MSi};$$

$$\mu_0 = 778,832.$$

Формируем матрицу весовых коэффициентов

$$Pi^{(1)} := \frac{\mu_0^2}{MSi^2};$$
$$Pi = \begin{pmatrix} 97,778 \\ 16561,899 \\ 15409,421 \end{pmatrix}.$$

Трансформируем её в диагональную матрицу

$$P := \text{diag}(Pi);$$
$$P = \begin{pmatrix} 97,778 & 0 & 0 \\ 0 & 16561,899 & 0 \\ 0 & 0 & 15409,421 \end{pmatrix}.$$

Вычисляем квадратную, симметричную матрицу относительно главной диагонали, матрицу обратных весовых коэффициентов Q

$$Q := (A^T \cdot P \cdot A)^{-1};$$

$$Q = 0,0000313.$$

Вычисляем среднеквадратическую погрешность определения плановых координат пункта M

$$M_{\text{plan}} := \mu_0 \cdot \sqrt{Q};$$

$$M_{\text{plan}} = 4,4 \text{ мм}.$$

Для сравнения полученных величин с требованиями нормативных документов необходимо перейти от среднеквадра-

тических погрешностей к предельным значениям, используя коэффициенты доверительной вероятности, равные $t = 2$ или $t = 3$ ($M_{\text{pred}} = t \cdot M_{\text{plan}}$).

Значение коэффициента доверительной вероятности выбирают согласно инструкции по соответствующей съёмке.

4.2.2. Среднеквадратическая погрешность определения высотной отметки пункта, измеренного обратной линейной засечкой

При выполнении обратной засечки очень важно выполнить предрасчёт и определения высотной отметки определяемого пункта, так как правило, её значение используется для съёмки рельефа участка местности. Кроме того, маркшейдеры используют результаты такой съёмки для подсчёта объёмов горной массы, что может оказывать сильное влияние на точность выполняемых работ.

В этом разделе представлено продолжение предыдущего примера, так же в терминах и символике математического процессора Mathcad. В связи с этим здесь не приводятся исходные данные и часть вычислений, которые уже выполнены ранее.

Для правильной оценки точности обратной засечки по высоте необходимо ещё определить погрешность измерения вертикальных углов. Так как высота искомой точки определяется путём выполнения тригонометрического нивелирования, а истинное значение угла искажается за счёт действия атмосферной рефракции и кривизны Земли, рекомендуется измерять вертикальные углы в прямом и обратном направлениях. Однако в маркшейдерской и геодезической практике такое не всегда представляется возможным. Формулы вычисления поправок за атмосферную рефракцию и кривизну Земли хорошо известны [27], электронными тахеометрами они учитываются автоматически при соответствующих настройках. Однако погрешность их определения и её влияние на конечные значения остаются неизвестными.

Руководство “Resection Computations in the Trimble Access Software” рекомендует считать уровень погрешности измере-

ния вертикальных расстояний (превышений), вызванных погрешностью измерения вертикального угла, из расчёта 50 мм на 1 км расстояния [41]. Можно легко посчитать, что данная погрешность соответствует погрешности измерения угла, равной 10,3"; и погрешности измерения горизонтального расстояния 1,25 мм. Погрешность измерения горизонтального расстояния нами не учитывается, так как она введена в формулу паспортной точности измерения тахеометра, как 3 мм + 2 мм на 1 км длины, что значительно выше 1,25 мм, приведённых выше.

Определим погрешность измерения вертикального угла.

Погрешность, определяемая разрешающей способностью человеческого глаза и увеличением зрительной трубы на дневной поверхности (2.7), составит

$$M_{\text{raz}} := \varphi/v; \quad M_{\text{raz}} = 2.$$

Погрешность, определяемая конструкцией сетки нитей зрительной трубы с биссектором (2.9), равна

$$M_{\text{nav}} := D/12; \quad M_{\text{nav}} = 2,5.$$

Погрешность визирования на марки точек 1 и 2 вычисляются по следующим формулам:

$$M_h := 2;$$

$$M_{\text{viz1}} := \sqrt{M_{\text{raz}}^2 + M_{\text{nav}}^2 + 2 \cdot \left(\frac{M_h \cdot \rho}{L_3 \cdot 10^3}\right)^2};$$

$$M_{\text{viz1}} = 3,3;$$

$$M_{\text{viz2}} := \sqrt{M_{\text{raz}}^2 + M_{\text{nav}}^2 + 2 \cdot \left(\frac{M_h \cdot \rho}{L_2 \cdot 10^3}\right)^2};$$

$$M_{\text{viz2}} = 3,3,$$

где M_{viz} – погрешность визирования на марку, с;

M_{raz} – погрешность разрешения зрительной трубы и глаза, с;

M_{nav} – погрешность наведения биссектора на марку, с;

M_h – погрешность определения высоты инструмента и высоты визирования (обычно 2 мм), мм;

L_2, L_3 – расстояния визирования до базовых точек 1 и 2, м.

Погрешность отсчитывания по вертикальному кругу тахеометра (2.21), с

$$Mot := 0,95 \cdot t/2; \quad Mot = 2,4.$$

Общая погрешность измерения вертикального угла на базовые точки 1 и 2, без учёта погрешности от атмосферной рефракции, с

$$Mver1 := \sqrt{Mvir1^2 + Mot^2 + Mkom^2}; \quad Mver1 = 5,0;$$

$$Mver2 := \sqrt{Mvir2^2 + Mot^2 + Mkom^2}; \quad Mver2 = 5,1.$$

По данным перепада высот и расстояниям вычисляют приближённые значения измеряемых вертикальных углов (радианы, градусы)

$$\delta 1 := asin\left(\frac{\Delta H1}{L3}\right); \quad \delta 1 = 0,16745;$$

$$\delta 1g := \delta 1 \cdot \frac{180}{\pi}; \quad \delta 1g = 9,594068;$$

$$\delta 2 := asin\left(\frac{\Delta H2}{L2}\right); \quad \delta 2 = 0,21596;$$

$$\delta 2g := \delta 2 \cdot \frac{180}{\pi}; \quad \delta 2g = 12,373625.$$

Погрешность определения превышения между базовыми точками 1 и 2, мм

$$MHbaz := dh \cdot \sqrt{L1 \cdot 10^{-3}}; \quad MHbaz = 17,9.$$

Погрешность определения высотных отметок базовых точек 1 и 2, мм

$$MHbaz12 := MHbaz/\sqrt{2}; \quad MHbaz12 = 12,6.$$

Погрешность определения превышения, определяемая уровнем атмосферной рефракции, мм

$$MHv := 50$$

$$Mref1 := MHv \cdot L3 \cdot 10^{-3}; \quad Mref1 = 36;$$

$$Mref2 := MHv \cdot L2 \cdot 10^{-3}; \quad Mref2 = 28.$$

Общая погрешность определения превышений на исконую точку M определится по формулам, мм

$$M\Delta h1 := \sqrt{[(a + b \cdot L3 \cdot 10^{-3}) \cdot \sin(\delta1)]^2 + \left(\frac{Mver1 \cdot L3 \cdot 10^3}{\rho}\right)^2 + Mref1^2},$$

$$M\Delta h1 = 40,1;$$

$$M\Delta h2 := \sqrt{[(a + b \cdot L2 \cdot 10^{-3}) \cdot \sin(\delta2)]^2 + \left(\frac{Mver2 \cdot L2 \cdot 10^3}{\rho}\right)^2 + Mref2^2},$$

$$M\Delta h1 = 31,2.$$

Полученных нами значений погрешности определения высотной отметки точки M уже достаточно для принятия решения о возможности применения обратной линейной засечки. Однако, как мы уже отмечали, программное обеспечение электронного тахеометра выполняет уравнивание измерений и только потом выдаёт результаты определяемых координат и отметок высот. Поэтому лучше, используя найденные погрешности, продолжить вычисления по аналогии параметрического уравнивания координат, представленных в разделе 3.5.4.

Заполняем матрицу погрешностей измерения векторов превышений

$$MSi_{1,1} := MHbaz; \quad MSi_{2,1} := M\Delta h2; \quad MSi_{3,1} := M\Delta h1.$$

Выводим её значения

$$MSi = \begin{pmatrix} 17,889 \\ 31,245 \\ 40,098 \end{pmatrix}.$$

Находим погрешность единицы веса

$$\mu0 := \frac{\Sigma \left[\frac{\vec{Di} \cdot MSi}{\Sigma MSi} \right]}{\Sigma MSi},$$

$$\mu0 = 680,013.$$

Формируем матрицу весовых коэффициентов.

$$Pi^{(1)} := \frac{\mu0^2}{MSi^2};$$

$$Pi = \begin{pmatrix} 1445,054 \\ 473,668 \\ 287,603 \end{pmatrix}.$$

Трансформируем её в диагональную матрицу

$$P := \text{diag}(P_i)$$

$$P = \begin{pmatrix} 1445,054 & 0 & 0 \\ 0 & 473,668 & 0 \\ 0 & 0 & 287,603 \end{pmatrix}.$$

Вычисляем квадратную, симметричную матрицу относительно главной диагонали, матрицу обратных весовых коэффициентов Q

$$Q := (A^T \cdot P \cdot A)^{-1};$$

$$Q = 0,0013136.$$

Вычисляем среднеквадратическую погрешность определения высотной отметки пункта M

$$\text{Motmetka} := \mu_0 \cdot \sqrt{Q};$$

$$\text{Motmetka} = 24,6 \text{ мм.}$$

Как видно, в результате уравнивания погрешность определения высотной отметки снижается с 31–40 до 25 мм.

Для сравнения полученных величин с требованиями нормативных документов необходимо перейти от среднеквадратических погрешностей к предельным значениям, используя коэффициенты доверительной вероятности, равные $t = 2$ или $t = 3$ ($M_{\text{pred}} = t \cdot \text{Motmetka}$).

Значение коэффициента доверительной вероятности выбирают согласно инструкции по соответствующей съёмке.

Контрольные вопросы

1. Какие погрешности оказывают влияние на точность измерения угла?
2. Как учитывать погрешность определения высот базовых точек?
3. Как определяют погрешность атмосферной рефракции?
4. Как выполняется параметрическое уравнивание?
5. Почему вычисления лучше проводить с помощью математического процессора Mathcad?

6. От каких параметров зависит погрешность визирования?
7. Что такое биссектор?
8. Какие погрешности влияют на точность визирования?

Рекомендуемая литература

1. Горяинов И. В. Обратная линейно-угловая засечка: новый взгляд на геометрию геодезической засечки // Инженерные изыскания. – 2015. – № 7. – С. 62–65.
2. Мазмишвили А. И. Теория ошибок и метод наименьших квадратов. – М.: Недра, 1978. – 311 с.
3. Папазов М. Г., Могильный С. Г. Теория ошибок и способ наименьших квадратов. – М.: Недра, 1968. – 304 с.
4. Попов В. Н., Чекалин С. И. Геодезия: учебник для вузов. – М.: Горная книга, 2007. – 518 с.
5. Resection Computations in the Trimble Access Software. – New-York: Trimble Navigation Limited Engineering & Construction Division, 2013. – 19 p.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование геодезических приборов и инструментов, широкое внедрение цифровых способов получения исходных данных, специализированные программные продукты обработки и хранения данных революционно влияют на производство маркшейдерских работ на горных предприятиях. В то время, когда идёт бурное внедрение компьютерных технологий в области технических приложений, в РФ наблюдается значительное отставание в этом вопросе, что связано как с отсутствием собственных разработок, так и, в большей степени, с отставанием законодательной, нормативно-правовой и методической базы, особенно в области горной и геологической промышленности. В то время как почти каждый день появляются новые приборы, способы, методики и технологии измерений, обоснованность их применения в тех или иных условиях измерений маркшейдеру приходится принимать на свой страх и риск.

В данном учебном пособии излагаемый материал представлен и исторической справкой о маркшейдерских измерениях, и примерами современных методов измерения, проводимых как на Земной поверхности, так и её недрах. Достаточно подробно изложены основы современных измерений, необходимых маркшейдеру в процессе обеспечения строительства горных предприятий и проведении предпроектных изысканий.

В издании подробно рассмотрены особенности применения современных методик XXI века: маркшейдерских и геодезических измерений и съёмок, с которыми может столкнуться маркшейдер в своей практической деятельности. В этих разделах рассматриваются основные причины возникновения

погрешностей измерений, приводятся методы устранения или существенного их уменьшения. Уделено внимание методам предварительной оценки погрешностей измерений, которые необходимы при составлении проектов производства как геодезических, так и маркшейдерских работ. Приводятся ссылки на нормативные источники, выполнение которых обязательно при производстве маркшейдерских работ.

Данное пособие может быть рекомендовано для инженерно-технических работников маркшейдерских служб горных предприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. Т. 2 / К. М. Антонович; Сибирская государственная геодезическая академия. – Москва: Картгеоцентр, 2006. – 360 с.
2. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов / В. М. Вержбицкий. – Москва: Высш. шк., 2002. – 840 с.
3. Генике, А. А. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Картгеоцентр, 2004. – 355 с.
4. ГКИНП (ОНТА)-01-271-03. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. – Москва: ЦНИИГАиК, 2003. – 66 с.
5. ГКИНП (ОНТА)-02-262-02. Инструкция по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. – Москва: ЦНИИГАиК, 2002. – 56 с.
6. Горяинов, И. В. Обратная линейно-угловая засечка: новый взгляд на геометрию геодезической засечки / И. В. Горяинов // Инженерные изыскания. – 2015. – № 7. – С. 62–65.
7. ГОСТ Р 57371-2016. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Оценка точности определения местоположения. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 11 с.
8. Гришко, С. В. Уравнивание спутниковых сетей. Предварительная оценка точности проектов спутниковых измерений: учеб.-метод. пособие / С. В. Гришко. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 20 с.

9. Инструкции по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ. – Новосибирск. СНИИГГиМС, 1997. – 100 с.

10. Инструкция о порядке осуществления государственного геодезического надзора в Российской Федерации (ГКИНП-17-002-93): утв. Роскартографией 15.10.1993 г. (гос. рег. № 425 от 08.12.1993 г.). – Москва: Роскартография, 1993.

11. Инструкция по составлению технических отчётов о геодезических, астрономических, гравиметрических и топографических работах (ГКИНП-5): утв. ГУГК, согласована с ВТУ. – 3-е изд., доп. и испр. – Москва: Недра, 1971.

12. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – Москва: Наука, 1978. – 512 с.

13. Мазмишвили, А. И. Теория ошибок и метод наименьших квадратов / А. И. Мазмишвили. – Москва: Недра, 1978. – 311 с.

14. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Ленинград: ВНИМИ, 1987. – 119 с.

15. Методические указания по созданию, контролю и реконструкции маркшейдерско-геодезических сетей на горных предприятиях с использованием спутниковой аппаратуры. – Санкт-Петербург: ВНИМИ, 1998. – 38 с.

16. О внесении изменений в Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твёрдых полезных ископаемых»: приказ от 21.11.2018 г. № 580. – Москва: Ростехнадзор, 2018. – 52 с.

17. О единых государственных системах координат: постановление Правительства РФ от 28.12.2012 г. № 1463.

18. О местных системах координат и геодезической основе Государственного кадастра недвижимости / сост. А. В. Мельников, У. Д. Самратов, В. В. Хвостов // Геопрофи. – 2011. – № 4. – С. 18–20.

19. О недрах: федер. закон от 03.03.1995 г. № 27-ФЗ (с изм. от 03.08.2018 г.). – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=13077>. – Текст: электронный.

20. Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года: приказ Росреестра от 23.03.2016 г. № П/0134.

21. Об утверждении порядка установления местных систем координат: приказ от 28.07.2017 г. № 383. – Москва: Минэкономразвития России, 2017. – 6 с.

22. Об утверждении Правил установления местных систем координат: постановление Правительства РФ от 03.03.2007 г. № 139.

23. Оглоблин, Д. Н. Маркшейдерские работы при подземной разработке месторождений / Д. Н. Оглоблин. – Москва: Metallurgizdat, 1959. – Ч. 1. Подземные маркшейдерские съёмки. – 478 с.

24. О лицензировании производства маркшейдерских работ: постановление Правительства РФ от 28.03.2012 г. № 257.

25. Основные положения по применению местных систем координат при выполнении работ по государственному земельному кадастру, мониторингу земель и землеустройству: утв. Госкомземом России 27.06.1997 г. по согласованию с Военно-топографическим управлением Генерального штаба ВС РФ 07.03.1997 г. № 320/1/547.

26. Папазов, М. Г. Теория ошибок и способ наименьших квадратов / М. Г. Папазов, С. Г. Могильный. – Москва: Недра, 1968. – 304 с.

27. Попов, В. Н. Геодезия: учебник для вузов / В. Н. Попов, С. И. Чекалин. – Москва: Горная книга, 2007. – 518 с.

28. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твёрдых полезных ископаемых / Госгортехнадзор России. – Москва, 2013. – 273 с.

29. Правила безопасности при разработке угольных месторождений открытым способом / Госгортехнадзор России. – Москва, 2017. – 56 с.

30. Правила охраны недр (ПБ 07-601-03) . – Москва: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2003. – 64 с.

31. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ / Госгортехнадзор России. – Москва, 2004. – 60 с.

32. РД 07-604-03. Инструкция по маркшейдерскому учёту объёмов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом / Госгортехнадзор России. – Москва, 2003. – 13 с.

33. Рекомендации по подготовке проектной документации на производство маркшейдерских работ / Научный центр геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского государственного горного института (технического университета) имени Г. В. Плеханова. – Санкт-Петербург, 2009. – 11 с.

34. СП 126.13330.2017. СНиП 3.01.03-84. Геодезические работы в строительстве. – Москва: Минстрой России, 2017. – 72 с.

35. СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – Москва: Минстрой России, 2017. – 85 с.

36. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. – Москва: Минрегион России, 2012. – 293 с.

37. Справочник маркшейдера: в 3 ч. Ч. 2. – Москва: Горное дело: Киммерийский центр, 2015. – Т. 7. Охрана недр, кн. 1. – 432 с. – (Библиотека горного инженера).

38. Справочный документ «Параметры земли 1990 года» (ПЗ-90.11). – Москва: Минобороны России «27 ЦНИИ», 2014. 52 с.

39. Сученко, В. Н. Маркшейдерское обеспечение строительства тоннелей и метрополитенов: учеб. пособие / В. Н. Сученко. – Москва: Российский университет дружбы народов, 2008. – 207 с.

40. Чекалин, С. И. Геодезия в маркшейдерском деле: учебник для вузов / С. И. Чекалин. – Москва: Акад. Проект, 2011. – 500 с.

41. Resection Computations in the Trimble Access Software. – New-York: Trimble Navigation Limited Engineering & Construction Division, 2013. – 19 p.

Учебное издание

Смолич Сергей Вениаминович
Просекин Борис Александрович

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО

Часть 1

*На обложке использовано изображение гравюры XVI в.
из книги Георга Агриколы “De re metallica”, 1556 г.*

Редактор О. Ю. Гапченко
Вёрстка И. Н. Аргуновой

Подписано в печать 06.08.2019.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Times New Roman. Способ печати цифровой.
Усл. печ. л. 10,9. Уч.-изд. л. 5,5. Заказ № 19126.
Тираж 100 экз. (1-й з-д – 1–34 экз.).

ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30