Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Московский государственный университет геодезии и картографии»

(МИИГАиК)

Учебно-методическое пособие по дисциплине

**ФИЗИКА ЗЕМЛИ И АТМОСФЕРЫ**

методические указания по выполнению Контрольной работы № 1

**Влияние нейтральной атмосферы на результаты геодезических измерений**

для студентов заочной формы обучения

по специальности 21.05.01 Прикладная геодезия и

направлению подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование

|  |  |
| --- | --- |
| Составитель: | Вшивкова О.В., д.т.н. |
|  | *Рекомендовано к использованию в учебном процессе МИИГАиК*  *решением Редакционно-издательского совета (протокол № ­­­ от*  *« » 2020 г.)* |
| Рецензенты: | Литвиненко М.В., декан факультета дистанционных форм обучения МИИГАиК, д.п.н. |

Москва 2020 г.

**Оглавление**

|  |  |
| --- | --- |
|  | стр. |
| 1. Требования к знаниям, умениям, которые студент должен будет продемонстрировать по результатам самостоятельной учебно-познавательной деятельности в ходе выполнения работы | 3 |
| 1. Критерии оценивания Контрольной работы № 1 | 4 |
| 1. Задание Контрольной работы № 1 | 5 |
| 1. Методические указания по выполнению Контрольной работы № 1 | 7 |
| * 1. Показатель преломления и его градиент в качестве «геодезических» параметров атмосферы | 7 |
| * 1. Требования к точности определения показателя преломления и его градиента при геодезических измерениях | 10 |
| Примеры решения задач | 12 |
| * 1. Показатель преломления и его градиент как функции метеопараметров. Требования к точности определения метеопараметров и их градиентов при геодезических измерениях | 14 |
| Примеры решения задач | 16 |
| * 1. Некоторые практические рекомендации по решению задач Контрольной работы № 1 | 19 |
| 1. Методические указания по оформлению Контрольной работы № 1 | 22 |
| 1. Вопросы для самоконтроля | 22 |
| 1. Перечень рекомендуемой литературы | 22 |
| 1. Приложения: |  |
| * 1. Индивидуальные исходные данные | 23 |
| * 1. Точность нивелирования I, II, III и IV классов | 25 |
| * 1. Образец оформления задач Контрольной работы № 1 | 26 |

1. **Требования к знаниям, умениям, которые студент должен будет продемонстрировать по результатам самостоятельной учебно-познавательной деятельности в ходе выполнения работы**

|  |  |
| --- | --- |
| **Знать** | каков физический смысл показателя преломления, каким образом его используют в линейных геодезических измерениях, в чем заключается проблема определения показателя преломления в неоднородной атмосфере; |
| как связаны изменчивость показателя преломления и точность его определения с точностью линейных геодезических измерений; |
| в чем заключается явление угловой рефракции, каким образом угловая рефракция влияет на точность геодезических измерений, что такое угол рефракции, и как он связан с градиентом показателя преломления; |
| как связаны величина угла рефракции и градиента показателя преломления, как связана точность их определения с точностью угловых измерений; |
| каким образом показатель преломления и его градиент связаны с температурой, давлением, влажностью воздуха и их градиентами. |
| **Уметь** | оценивать требования к точности определения показателя преломления и метеопараметров, если заданы требования к точности линейных измерений; |
| оценивать требования к точности определения угла рефракции, градиента показателя преломления и метеопараметров, если заданы требования к точности угловых измерений. |

1. **Критерии оценивания Контрольной работы № 1:**

Для допуска к экзамену должны быть зачтены обе контрольные работы, предусмотренные учебным планом, и пройден тест по материалу Раздела 1 «Физика Земли». Окончательная оценка за пройденный курс «Физика Земли и атмосферы» формируется из четырех оценок:

1. Тест по Разделу 1.
2. Контрольная работа № 1.
3. Контрольная работа № 2.
4. Экзамен.

Контрольные работы считаются зачтенными, если оценка за их выполнение лежит в диапазоне 3-5 баллов.

Параметры, учитываемые при оценивании Контрольной работы № 1:

1. Умение использовать математический аппарат, изложенный в данном учебно-методическом пособии.
2. Умение выполнять расчеты, грамотно переходить от одних единиц измерений к другим.
3. Умение формулировать развернутый вывод (ответ) по результатам решения задачи.
4. Владение терминологией, используемой в геодезии, ТМОГИ, изучаемой дисциплине.
5. Соответствие оформления работы требованиям, изложенным в пункте 4.4, разделе 5 и Приложении 8.3 данного пособия.
6. Качество оформления.
7. **Задание контрольной работы № 1**

Исходные данные к задачам Контрольной работы № 1 приведены в Приложении 8.1. Номер варианта – две последние цифры шифра студента.

*Например*, если шифр заканчивается на 08, то номер варианта – 8.

**Линейные измерения**

***Задача 1.*** С какой средней квадратической ошибкой *mn* следует определять показатель преломления, если расстояние требуется измерить с относительной ошибкой 1/*M*.

***Задача 2.*** В условиях предыдущей задачи оценить требования к точности измерения температуры *mT*, давления *mp* и влажности *me* воздуха, если измерения выполнены светодальномером.

***Задача 3***. К какой истинной ошибке Δ*D* определения расстояния *D* приведет неучет изменения температуры на Δ*T*, если значения других метеопараметров были постоянными, т.е. Δ*p*=Δ*e*=0. Измерения выполнены светодальномером.

***Задача 4.*** Сравнить ошибки определения расстояния *D* свето- Δ*D*св и радиодальномером Δ*D*радио, обусловленные неучетом влияния влажности, если на момент измерений на высоте измерений абсолютная влажность *e* была равна Δ*e*.

**Угловые измерения**

***Задача 5.*** К какой ошибке определения превышения Δ*h* приведет угол вертикальной рефракции *r*=10" на трассе протяженностью *D*, если измеренное зенитное расстояние равно *z*? Считать, что ошибка определения зенитного расстояния обусловлена только влиянием рефракции: Δ*Z*=*r*, а точность определения превышения зависит только от точности угловых измерений. Сравнить полученное значение с предельной случайной средней квадратической ошибкой нивелирования I, II, III и IV классов (предельную ошибку принять равной **утроенной случайной средней квадратической ошибке** (Приложение 8.2)). Сделать вывод о соответствии полученной точности требованиям инструкции по геометрическому нивелированию.

***Задача 6.*** В условиях предыдущей задачи определить соответствующее значение вертикального градиента показателя преломления.

***Задача 7***. Используя исходные данные *Задачи 5* и результаты, полученные в *Задаче 6*, вычислить вертикальный градиент температуры, который мог привести к формированию угла рефракции *r*, если градиент давления равен его нормальному значению 0,12 гПа/м, а градиент влажности пренебрежимо мал.

***Задача 8.*** Вычислить углы горизонтальной рефракции для визирных линий длиной *D*, расположенных на расстояниях 0,5; 1,0 и 3,0 м от нагретой бетонной стены, если горизонтальные температурные градиенты на этих расстояниях от стены равны

,

а горизонтальные градиенты давления и влажности пренебрежимо малы. На каком расстоянии от стены (из трех указанных выше) следует располагать визирную линию, если измерения выполняют в полигонометрии IV класса (предельная ошибка угловых измерений – 5״)?

1. **Методические указания по выполнению контрольной работы № 1**

**4.1 Показатель преломления и его градиент в качестве «геодезических» параметров атмосферы**

С достаточной степенью подробности этот материал изложен в [1]. Здесь приведем лишь некоторые сведения, необходимые для решения задач Контрольной работы № 1.

**Линейные измерения.** В *свето-* и *радиодальнометрии* расстояние *D* получают как произведение скорости распространения электромагнитного сигнала *v* на время τ:

. (1)

Скорость сигнала зависит от оптической плотности среды распространения. Оптическую плотность среды характеризует ее *показатель преломления* *n*:

 (2)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| где | *c* | – | скорость света в вакууме, равная 299 792 458 м/с. |

В соответствии с формулами (1) и (2):

 (3)

Атмосфера, в которой полностью или частично выполняют все геодезические измерения, является средой неоднородной. Показатель преломления в ней меняется от точки к точке. Поэтому формула (3) является упрощенной формой записи более строгой зависимости (4):

 (4)

где  – среднеинтегральное для дистанции значение показателя преломления:



здесь *nx* – значение показателя преломления в текущей точке траектории.

В вакууме показатель преломления равен единице. В газообразных средах он больше единицы на величину порядка (100-300)·10-6, поэтому в электронной дальнометрии чаще используют *индекс преломления* *N*, который представляет собой отличие показателя преломления от единицы, увеличенное в миллион раз:

.

Индекс преломления выражают в *N*-единицах:

1 *N*-ед.=10-6.

**Вывод:** Ни один электронный дальномер, будь то электронный тахеометр или спутниковый приемник, не сможет определить расстояние, если не задано значение показателя преломления. На этом основании показатель преломления можно считать «геодезическим» параметром атмосферы.

**Угловые измерения**. При угловых геодезических измерениях объектом измерения служит направление распространения электромагнитного излучения. Исходя из этого определения, к угловым измерениям можно отнести измерения углов электронными тахеометрами и оптическими теодолитами, а также геометрическое нивелирование, при котором визирный луч в направлении на рейку должен быть горизонтальным.

В неоднородной атмосфере электромагнитный сигнал неоднократно меняет направление распространения, отклоняясь в сторону слоев с меньшей оптической плотностью (с меньшим показателем преломления). Явление преломления электромагнитных лучей в атмосфере, обусловленное ее неоднородностью, называют *угловой рефракцией*. Траектория распространения электромагнитного сигнала от визирной цели до наблюдателя представляет собой пространственную кривую, которую называют *рефракционной кривой*.

Наблюдатель видит объект по касательной к последнему элементу рефракционной кривой в точке наблюдения *A* (Рис.). Угол между направлением на истинное *B* и кажущееся *B՛* положение объекта наблюдений называют *угол рефракции*. Угол рефракции *r* используют в качестве основной количественной характеристики угловой рефракции. Геодезиста интересуют проекции угла рефракции на горизонтальную и вертикальную плоскость – углы горизонтальной (боковой) и вертикальной рефракции.

Угол рефракции зависит от интенсивности изменения показателя преломления в плоскости измерений по нормали к визирному лучу. Интенсивность изменения показателя преломления в пространстве характеризует его *градиент**.*

**Рис.** – Угол рефракции

*r*

*А*

*В*

*В՛׳ʹʹʹʹ*

По определению, градиент – это первая производная. На практике производную заменяют отношением конечных приращений:

 (5)

где  – изменение показателя преломления на отрезке .

*Примечание.* Градиент показателя преломления имеет размерность м-1. Градиент показателя преломления равен градиенту индекса преломления, если его выражать в N-ед./м.

Угол рефракции связан с градиентом показателя преломления формулой вида:

, (6)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| где | *ρ"* | – | число секунд в радиане, |
|  |  | – | градиент показателя преломления в текущей точке траектории, расположенной на расстоянии *x* от объекта наблюдений. |

В формуле (6) под градиентом показателя преломления при измерениях *вертикального* угла подразумевают проекцию градиента показателя преломления на ось, лежащую в вертикальной плоскости и нормальную к траектории в текущей точке луча, при измерениях *горизонтальных* углов градиент показателя преломления проецируют на горизонтальную плоскость.

**Вывод:** При наличии градиента показателя преломления в плоскости измерений по нормали к визирному лучу результаты угловых измерений содержат ошибку за влияние угловой рефракции. Величина угла рефракции зависит от градиента показателя преломления. На этом основании градиент показателя преломления можно считать «геодезическим» параметром атмосферы.

**4.2 Требования к точности определения показателя преломления и его градиента при геодезических измерениях**

**Линейные измерения.** Для простоты будем считать, что показатель преломления вдоль визирного луча не меняется, т.е. . Тогда в качестве рабочей формулы можно использовать зависимость (3). Представив зависимость (3) в дифференциальном виде, выразим истинную ошибку расстояния  через истинную ошибку показателя преломления . Для простоты и наглядности прочие аргументы функции (3) будем считать безошибочными (т.е. при дифференцировании будем считать их константами):

 (7)

*Примечание.* Формулу (7) можно использовать для определения истинной ошибки в расстоянии, если известна истинная ошибка определения показателя преломления, или вернуться к исходному математическому пониманию , как изменения (приращения) показателя преломления. Тогда вопрос можно ставить по-другому: показатель преломления изменился на , а мы не учли это при вычислении расстояния, какова в этом случае будет ошибка определения расстояния?

Воспользовавшись формулой средней квадратической ошибки функции общего вида, получим формулу, связывающую средние квадратические ошибки определения показателя преломления  и расстояния :

 (8)

Для измерения расстояния с точностью  показатель преломления следует определять со средней квадратической ошибкой

 (9)

**Угловые измерения.** Будем считать градиент показателя преломления в плоскости измерений в направлении, нормальном к визирному лучу, постоянным, т.е., что позволит упростить формулу (6):



В окончательном виде имеем:

 (10)

В соответствии с формулой средней квадратической ошибки функции общего вида и зависимостью (10):

 (11)

где  и  – средние квадратические ошибки определения угла рефракции и градиента показателя преломления. Тогда:

 (12)

Формула (12) позволяет оценить требования к точности определения градиента показателя преломления, если требования к точности угловых геодезических измерений заданы.

**Примеры решения задач**

***Пример 1.*** С какой средней квадратической ошибкой должен быть известен показатель преломления, если расстояние *D*≈1 км требуется получить с точностью 1 мм. Влиянием других источников погрешностей пренебречь.

*Решение.* Воспользуемся формулой (9):



*Вывод:* для определения расстояния с относительной ошибкой 1/1 000 000 показатель преломления должен быть известен с точностью до миллионных долей (до 1 N-ед).

***Пример 2.*** С какой точностью следует определять угол рефракции и градиент показателя преломления, если тригонометрическое нивелирование на линии длиной 1 км требуется выполнить с точностью геометрического нивелирования III класса, а влияние других источников погрешностей пренебрежимо мало? Дистанцию считать горизонтальной.

*Решение.* В соответствии с Инструкцией по нивелированию I, II, III и IV классов (Приложение 8.2) случайная средняя квадратическая ошибка определения превышения в нивелирной сети III класса равна 5 мм на 1 км хода. Превышение *h* вычисляют по формуле:

, (13)

где *z* – измеренное зенитное расстояние, *i* и *u* – высота инструмента и визирной цели, а *R*З – средний радиус кривизны Земли. Последний элемент в формуле (13) представляет собой поправку за кривизну Земли.

По условию, на точность определения превышения влияет только ошибка угловых измерений. В этом случае ошибка  определения превышения связана с ошибкой  измерения зенитного расстояния формулой вида:

 (14)

а связь средних квадратических ошибок определения превышения  и зенитного расстояния  характеризует следующая зависимость:



Тогда

 (15)

Для нашего случая:



Если считать, что ошибка измерения вертикального угла целиком обусловлена влиянием ошибки определения угла рефракции: , то, воспользовавшись формулой (12), получим требования к точности определения градиента показателя преломления:



*Вывод:* для определения превышения методом тригонометрического нивелирования на линии длиной 1 км с точностью геометрического нивелирования III класса угол рефракции должен быть известен с точностью , а градиент показателя преломления – со средней квадратической ошибкой .

**4.3 Показатель преломления и его градиент как функции метеопараметров. Требования к точности определения метеопараметров и их градиентов при геодезических измерениях**

**Линейные измерения.** Линейные геодезические измерения выполняют в оптическом диапазоне (электронная тахеометрия) и радиодиапазоне (спутниковые измерения). В оптическом диапазоне показатель преломления и индекс преломления, связанный с ним функционально, являются функциями температуры, давления, влажности воздуха и длины волны излучения. При измерениях в световом диапазоне (видимая часть спектра) для определения индекса преломления используют формулу Сирса-Баррела в виде:

 (16)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| где | *T*, *p* и *e* | – | температура, давление и влажность (парциальное давление водяного пара) воздуха в К и гПа. |

Зависимость индекса преломления от метеопараметров в радиодиапазоне описывает формула Фрума-Эссена:

 (17)

Изменение метеопараметров приведет к изменению показателя преломления:

 (18)

Точность определения показателя преломления в точке зависит от точности измерения температуры, давления и влажности воздуха. Воспользуемся формулой средней квадратической ошибки функции общего вида для того чтобы выразить ошибку определения индекса преломления через ошибки определения аргументов *T*, *p* и *e*:

. (19)

*Примечание.* В формулах (16) и (17) используется абсолютная температура *T*, выраженная в Кельвинах, для перехода от температуры *t* в градусах Цельсия к абсолютной температуре используют соотношение:

*T*=*t*+273,15.

Однако цена деления на шкалах Цельсия и Кельвина одинаковая. Поэтому в тех случаях, когда речь идет не о температуре, а об ее изменении (истинной ошибке) или ее средней квадратической ошибке, используемая размерность не имеет значения и переход от одной шкалы к другой не требуется:



В Таблице приведены значения частных производных функций (16) и (17), вычисленные для нормальных условий (*T* – 293,15 К, *p –* 1013,25 гПа, *e – *).

**Таблица** – Значения частных производных показателя преломления в оптическом и радио- диапазонах

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Производная** | **Оптический диапазон** | **Радиодиапазон** |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

*Примечание.* Согласно данным Таблицы, изменение температуры на 1 К приведет к изменению показателя преломления на 1 N-ед., если пренебречь таким изменением состояния атмосферы ошибка определения расстояния составит 1 мм/км (см. *Пример 1* на стр. 12). Изменение давления на 1 гПа приведет к ошибкам определения показателя преломления и расстояния, равным 0,3 N-ед. и 1 мм/км, соответственно. Неучтенная ошибка во влажности, равная 1 гПа, в оптическом диапазоне приведет к ошибке определения расстояния, равной 0,04 мм/км, в радиодиапазоне соответствующая ошибка в расстоянии будет равна 4,3 мм/км.

На основании данных Таблицы и приведенных рассуждений можно сделать вывод о пренебрежимо малом влиянии влажности в оптическом диапазоне.

**Угловые измерения.** Разделив все члены формулы (18) на Δ*y*, получим приближенную формулу, выражающую градиент показателя преломления световых волн через градиенты метеопараметров при нормальных условиях (воспользуемся второй колонкой Таблицы):

 (20)

*Примечания:*

1. Формулу (20) можно использовать только для приближенных точностных расчетов. Использовать ее для вычисления градиента показателя преломления и последующей коррекции угловых измерений за влияние рефракции нельзя! Она не отвечает геодезическим требованиям к точности определения градиента показателя преломления (см. *Пример 2* на стр. 12-13).
2. В физике атмосферы *горизонтальные* градиенты считают положительными, если они направлены в сторону уменьшения метеопараметра. *Вертикальный* градиент всегда направлен вверх. Если метеопараметр с высотой уменьшается (нормальный ход) – вертикальный градиент положительный, если метеопараметр растет с высотой (инверсия) – градиент отрицательный.

Выразим среднюю квадратическую ошибку определения градиента показателя преломления  через ошибки градиентов метеопараметров:

 (21)

Частные производные в формуле (21) равны коэффициентам при аргументах линейной функции (20):

 (22)

**Примеры решения задач**

***Пример 3.*** С какой точностью следует определять температуру, давление и влажность воздуха, если измеренное светодальномером расстояние требуется получить со средней квадратической ошибкой 1 мм на км дистанции?

*Решение.* Согласно выводам, полученным при решении *Примера 1* (стр. 12), для измерения расстояния с точностью 1 мм на км показатель преломления следует определять с точностью 1 N-ед., т.е.:



Воспользуемся принципом равных влияний:



Тогда

 (23)

Подставив в формулы (23) значение средней квадратической ошибки показателя преломления, полученное при решении *Примера 1*(стр. 12), и частные производные для светового диапазона (Таблица), получим:



*Вывод:* при измерении расстояний светодальномером с относительной ошибкой 1/1 000 000 температуру, давление и влажность следует определять с точностью 0,6 К, 1,9 гПа и 14 гПа, соответственно.

*Примечание.* Согласно полученным результатам, современные полевые метеодатчики позволяют определять температуру, давление и влажность в точке стояния прибора с требуемой точностью.

***Пример 4.*** С какой точностью следует определять градиенты температуры, давления и влажности воздуха, если измеренное методом тригонометрического нивелирования превышение требуется получить с точностью геометрического нивелирования III класса?

*Решение.* При решении *Примера 2* (стр. 12-13) мы показали, что для определения превышения со средней квадратической ошибкой 5 мм/км (III класс) угол рефракции на линии длиной 1 км должен быть известен с точностью 1̋, а градиент показателя преломления с точностью – 10-8/м. Воспользуемся формулой (22):



По принципу равных влияний:



Тогда



*Вывод:* для определения превышения со средней квадратической ошибкой  (III класс) на линии длиной 1 км градиенты температуры, давления и влажности следует определять со средними квадратическими ошибками ,  и , соответственно.

*Примечание.* Согласно полученным результатам, требования к точности определения градиентов метеопараметров при угловых геодезических измерениях лежат за пределами точностных возможностей современных полевых метеодатчиков.

**4.4 Некоторые практические рекомендации по решению задач Контрольной работы № 1**

1. ***Задача 1.*** Воспользуйтесь известным из курса геодезии определением относительной ошибки, согласно которому, относительная ошибка измерения расстояния представляет собой отношение абсолютной ошибки  к измеренному расстоянию :



1. В ***Задаче 5*** прежде чем сравнивать полученную ошибку с допусками, предусмотренными Инструкцией, следует привести фактическую и предельную ошибки к одному расстоянию.
2. В ***Задачах 5-8*** речь идет об угле рефракции, градиенте показателя преломления, градиентах метеопараметров, а не об их ошибках!
3. ***Задача 8.*** Не путайте длину дистанции *D*, входящую в формулу (10), с расстоянием до бетонной стены.
4. В задачах на определение средних квадратических ошибок все числа представлять в нормализованном виде, сохранять в процессе вычислений (3-4) значащих цифры (четыре – если первая цифра равна 1), в итоговом значении средней квадратической ошибки сохранять (1-2) значащих цифры (две – если первая цифра равна 1) (см. примеры решения задач на стр. 12-13, 16-18 и образец оформления задач в Приложении 8.3).
5. В остальных случаях количество значащих цифр в процессе вычислений и в полученных результатах определяется, исходя из точности данного вида геодезических измерений.
6. **Методические рекомендации по оформлению Контрольной работы № 1**

Задание Контрольной работы № 1 следует оформить в текстовом редакторе *WORD* и представить на проверку в виде файла с расширением *doc* или *docx*.

*Примечание.* При отсутствии у студента навыков работы в *WORD* или в редакторах формул допускается полное или частичное (в части формул и вычислений) оформление контрольной работы в виде рукописи с соблюдением прочих изложенных требований к оформлению. В этом случае рукопись может быть отсканирована и представлена в виде ОДНОГО файла в формате *pdf* или ОДНОГО файла в форматах *doc* или *docx*, в который фотографии отдельных страниц рукописи вставлены в текстовом редакторе *WORD* в качестве РИСУНКОВ.

На титульном листе указать

1. номер и название контрольной работы (см. титульный лист данного учебно-методического пособия);
2. название дисциплины;
3. ФИО студента и номер группы;
4. шифр студента.

Оформление каждой задачи включает:

1. Полный текст условия задачи.
2. Сокращенную форму записи условия в принятых обозначениях.
3. Процесс вычислений, изложенный в следующей последовательности:

формула (в принятых обозначениях) – формула с подставленными численными значениями – этапы вычислений (можно опустить) – полученный результат.

*Примечание.* Численные значения при необходимости округлять с учетом практических рекомендаций 4-5 пункта 4.4 данного пособия.

1. Развернутый ответ (вывод).

Образец оформления задач контрольной работы представлен в Приложении 8.3.

1. **Вопросы для самоконтроля**
2. На каком основании показатель преломления и его градиент можно назвать «геодезическими» параметрами атмосферы?
3. Почему проблема учета влияния атмосферы на результаты геодезических измерений возникает только при условии неоднородности атмосферы?
4. С какой точностью должен быть известен среднеинтегральный показатель преломления, если расстояние требуется измерить с точностью 1 мм/ км?
5. К какой ошибке в измеренном расстоянии приведет неучтенное изменение температуры воздуха на 1 К? изменение давления на 1 гПа?
6. Почему в электронной тахеометрии влиянием влажности пренебрегают?
7. С какой точностью следует определять влажность воздуха при измерениях в радиодиапазоне, если индекс преломления требуется получить с точностью 1 N-ед.?
8. Чему равен градиент температуры, если сформированный им угол рефракции равен 1״?
9. **Перечень рекомендуемой литературы:**
10. Вшивкова О.В. Физика Земли и атмосферы. Влияние атмосферы на результаты геодезических измерений: Учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2017. – 88 с. лекции

<http://www.miigaik.ru/upload/iblock/122/1229544d453c8322928cfe9bca7fb6b1.pdf>

1. Вшивкова О.В. Физика Земли и атмосферы. Раздел 2. Физика атмосферы: учебно-методическое пособие и контрольные работы № 1, № 2. – М.: МИИГАиК, – 2017. – 38 с.

<http://www.miigaik.ru/upload/iblock/1b5/1b5fee26997a6c6b38e4a2a5473d4c58.pdf>

1. **Приложения**

**8.1** Индивидуальные исходные данные

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **вариант** | ***D***, в км | ***M*** | **Δ*T***, в оС | ***e***, в гПа | *z*o |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | 6 |
| 0 | 3,7 | 25000 | 2 | 5 | 85 |
| 1 | 0,9 | 35000 | -10 | 8 | 83 |
| 2 | 4,6 | 45000 | -3 | 8 | 86 |
| 3 | 1,2 | 55000 | 3 | 2 | 88 |
| 4 | 0,5 | 80000 | -7 | 3 | 87 |
| 5 | 0,7 | 85000 | 4 | 6 | 79 |
| 6 | 2,4 | 90000 | 2 | 8 | 84 |
| 7 | 1,2 | 115000 | 10 | 8 | 87 |
| 8 | 0,7 | 140000 | 8 | 16 | 90 |
| 9 | 2,1 | 150000 | 9 | 2 | 86 |
| 10 | 2,3 | 175000 | 5 | 7 | 92 |
| 11 | 1,0 | 200000 | 14 | 14 | 77 |
| 12 | 2,2 | 200000 | -6 | 5 | 95 |
| 13 | 4,8 | 225000 | -3 | 11 | 81 |
| 14 | 0,7 | 250000 | 6 | 9 | 99 |
| 15 | 5,5 | 275000 | -9 | 11 | 89 |
| 16 | 0,6 | 300000 | 4 | 15 | 79 |
| 17 | 3,3 | 305000 | 3 | 2 | 81 |
| 18 | 4,5 | 330000 | -10 | 8 | 82 |
| 19 | 4,5 | 355000 | 11 | 4 | 78 |
| 20 | 3,0 | 380000 | -12 | 6 | 90 |
| 21 | 4,7 | 390000 | 10 | 2 | 90 |
| 22 | 3,8 | 395000 | 9 | 2 | 74 |
| 23 | 4,3 | 420000 | 4 | 12 | 69 |
| 24 | 3,0 | 445000 | -2 | 4 | 77 |
| 25 | 1,9 | 455000 | 5 | 7 | 84 |
| 26 | 0,9 | 480000 | 3 | 14 | 85 |
| 27 | 5,5 | 485000 | -6 | 12 | 95 |
| 28 | 0,5 | 510000 | 9 | 4 | 78 |
| 29 | 1,7 | 520000 | 3 | 5 | 79 |
| 30 | 1,5 | 5000 | -14 | 11 | 87 |
| 31 | 0,6 | 15000 | -2 | 14 | 94 |
| 32 | 0,6 | 25000 | 3 | 7 | 85 |
| 33 | 2,4 | 50000 | 5 | 2 | 76 |
| 34 | 2,0 | 75000 | 7 | 11 | 88 |
| 35 | 4,4 | 100000 | -6 | 11 | 75 |

Продолжение таблицы Приложения 8.1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | 6 |
| 36 | 2,3 | 125000 | 4 | 18 | 77 |
| 37 | 1,7 | 150000 | -4 | 15 | 88 |
| 38 | 3,8 | 175000 | -11 | 12 | 88 |
| 39 | 3,1 | 180000 | 9 | 9 | 92 |
| 40 | 3,0 | 205000 | -17 | 13 | 78 |
| 41 | 1,0 | 230000 | 4 | 20 | 89 |
| 42 | 1,1 | 240000 | 5 | 12 | 82 |
| 43 | 5,9 | 265000 | -5 | 7 | 79 |
| 44 | 3,1 | 290000 | 11 | 14 | 86 |
| 45 | 5,5 | 315000 | -13 | 9 | 74 |
| 46 | 1,5 | 325000 | 8 | 2 | 91 |
| 47 | 2,9 | 330000 | 2 | 15 | 79 |
| 48 | 0,4 | 355000 | 7 | 2 | 89 |
| 49 | 0,8 | 380000 | 3 | 7 | 85 |
| 50 | 5,1 | 405000 | 2 | 14 | 87 |
| 51 | 5,9 | 415000 | -9 | 11 | 82 |
| 52 | 0,6 | 425000 | -7 | 8 | 88 |
| 53 | 2,9 | 435000 | 9 | 6 | 91 |
| 54 | 0,7 | 460000 | 2 | 13 | 91 |
| 55 | 3,0 | 485000 | 2 | 6 | 81 |
| 56 | 1,7 | 510000 | 2 | 19 | 100 |
| 57 | 3,5 | 535000 | 8 | 15 | 90 |
| 58 | 2,2 | 560000 | 10 | 7 | 85 |
| 59 | 6,2 | 585000 | 2 | 10 | 83 |
| 60 | 2,3 | 590000 | 13 | 17 | 88 |
| 61 | 4,3 | 615000 | 14 | 7 | 89 |
| 62 | 1,4 | 620000 | 2 | 19 | 78 |
| 63 | 2,9 | 630000 | -3 | 24 | 92 |
| 64 | 0,8 | 635000 | 5 | 9 | 80 |
| 65 | 1,1 | 685000 | 4 | 7 | 90 |
| 66 | 1,5 | 690000 | -5 | 8 | 91 |
| 67 | 2,7 | 715000 | 8 | 2 | 92 |
| 68 | 0,6 | 740000 | -9 | 2 | 96 |
| 69 | 2,1 | 750000 | 4 | 12 | 88 |
| 70 | 0,6 | 775000 | -7 | 2 | 87 |
| 71 | 2,7 | 780000 | 12 | 4 | 85 |
| 72 | 1,1 | 805000 | 3 | 11 | 88 |
| 73 | 4,4 | 830000 | -6 | 10 | 83 |
| 74 | 5,0 | 5000 | 2 | 10 | 78 |
| 75 | 0,8 | 10000 | 4 | 20 | 75 |

Продолжение таблицы Приложения 8.1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | 6 |
| 76 | 6,3 | 35000 | -3 | 10 | 88 |
| 77 | 2,2 | 40000 | -4 | 16 | 93 |
| 78 | 3,2 | 65000 | 3 | 6 | 83 |
| 79 | 0,7 | 115000 | -10 | 7 | 79 |
| 80 | 4,7 | 120000 | -6 | 21 | 88 |
| 81 | 0,7 | 125000 | 6 | 12 | 96 |
| 82 | 2,3 | 135000 | 7 | 15 | 79 |
| 83 | 2,8 | 140000 | 10 | 2 | 79 |
| 84 | 2,2 | 150000 | -8 | 5 | 89 |
| 85 | 2,6 | 175000 | 4 | 13 | 85 |
| 86 | 1,0 | 185000 | -4 | 7 | 92 |
| 87 | 0,6 | 190000 | -4 | 9 | 82 |
| 88 | 1,3 | 215000 | 8 | 14 | 86 |
| 89 | 3,4 | 240000 | -5 | 17 | 86 |
| 90 | 6,2 | 265000 | 10 | 26 | 90 |
| 91 | 0,5 | 10000 | -5 | 9 | 94 |
| 92 | 1,2 | 35000 | -7 | 8 | 82 |
| 93 | 1,8 | 60000 | -6 | 8 | 89 |
| 94 | 1,7 | 85000 | -3 | 2 | 85 |
| 95 | 3,2 | 110000 | 8 | 11 | 81 |
| 96 | 0,6 | 120000 | -2 | 2 | 86 |
| 97 | 0,6 | 145000 | 6 | 2 | 81 |
| 98 | 0,6 | 170000 | 9 | 11 | 78 |
| 99 | 1,9 | 195000 | -3 | 16 | 84 |

**8.2** Точность нивелирования I, II, III и IV классов[[1]](#footnote-1)

| **Класс нивелирования** | **Случайная средняя**  **квадратическая ошибка, мм/км** |
| --- | --- |
| I | 0,8 |
| II | 2,0 |
| III | 5,0 |
| IV | 10,0 |

**8.3 Образец оформления задач Контрольной работы № 1**

***Задача 2.*** С какой точностью следует определять угол рефракции и градиент показателя преломления, если тригонометрическое нивелирование на линии длиной 1 км требуется выполнить с точностью геометрического нивелирования III класса, а влияние других источников погрешностей пренебрежимо мало? Дистанцию считать горизонтальной.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *D* | = |  | |
| *mh* | = | 5 мм/км | |
| *z* | = | 90° | |
|  | | | |
| *mr* | | = | ? |
| *mgrad n* | | = | ? |







*Вывод:* для определения превышения методом тригонометрического нивелирования на линии длиной 1 км с точностью геометрического нивелирования III класса угол рефракции должен быть известен с точностью , а градиент показателя преломления – со средней квадратической ошибкой .

1. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. М.: ЦНИИГАиК, 2003. 135 с. [↑](#footnote-ref-1)