

Работа выполнена
в Самаркандском Государственном архитектурно-строительном
институте и

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00761308 (P)

Научный консультант -

Украины, доктор технических наук,
профессор А.Л.Островский

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Х.К.Ямбаев

доктор технических наук, профессор
Б.М.Джуман

доктор технических наук, профессор
С.П.Войтенко

Ведущая организация:


Самаркандское предприятие
"Аэрогеодезия" при КМ РУзб.

Защита состоится "20" октября 1995 г. в 12 час.
на заседании специализированного совета Д 01.18.02 при Киевском
Государственном техническом университете строительства и архи-
тектуры (КГТУСиА) по адресу: 252037, Киев-37, Воздухофлотский
проспект, 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУСиА

Автореферат разослан "13" сентября 1995 года.

Ученый секретарь специализированного совета

 О.П.Исаев

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современная геодезическая наука немыслима без прецизионных пространственных угловых и линейных измерений, которые широко используются при решении многих проблем в народном хозяйстве и научных исследованиях. Выделим некоторые, наиболее важные, проблемы: изучение пространственно-временных закономерностей движения земной коры, прогноз землетрясений, поиск и добыча полезных ископаемых, изучение эволюции планеты Земля; строительство и обеспечение безаварийной работы инженерных, особенно уникальных, сооружений; авиастроение, судостроение, турбостроение, развитие наземной, космической и морской геодезии.

Потребности науки, промышленности и строительства, предъявляемые к точности измерений длин и перемещений, возросли с $1 \cdot 10^{-6}$ в прошлом десятилетии до $1 \cdot 10^{-7}$ в наши дни.

При соответствии точности линейных и угловых измерений легко подсчитать, что потребности к точности угловых измерений соответствуют $0.02''$. Следовательно, есть основания заявить о стремительной эволюции требований к точности измерений.

К сожалению, в геодезии наблюдается отставание достигнутой от требуемой точности измерений. Поэтому особую значимость приобретают исследования, направленные на преодоление наметившегося отставания.

На современном уровне геодезического приборостроения дальнейшее повышение точности измерений сдерживается не приборными погрешностями, а неоднородностью пространственного распределения плотности, и, следовательно, показателя преломления атмосферы. Приборы и методы измерения зенитных расстояний (**Z**) позволяют опрелять эти углы с точностью, равной примерно $1''$, тогда как вертикальная рефракция часто искажает измерения углов до нескольких минут.

Построение пространственных геодезических сетей, определение уклонов отвеса невозможно без измеренных, примерно с одинаковым весом, горизонтальных и вертикальных углов и определения поправок за рефракцию с точностью, по меньшей мере, не грубее $0.5''$.

Сложность проблемы учета атмосферных влияний на геодезические измерения, как и прогнозирование погоды, объясняется быстрыми, трудно предсказуемыми изменениями метеопараметров во времени и пространстве.

Трудность решения этой физической задачи усугубляется еще и тем, что неоднородность плотности атмосферы зависит от множества факторов и, прежде всего, от распределения температуры (**T**), давления (**P**), и влажности (**e**) воздуха в околоземном пространстве. Распределение **T**, **P**, **e**, в

свою очередь, зависит от времени дня, сезона года, погоды, физических свойств подстилающих поверхностей и др.

Особенно актуальна проблема учета атмосферных влияний для условий Центральной Азии, так как:

- при существенных достижениях в решении рассматриваемой проблемы в средних широтах она остается не решенной в условиях Центральной Азии;
- суточные изменения метеопараметров, особенно T , в Центральной Азии значительно больше, чем в средних широтах, что неминуемо приводит к большим градиентам метеопараметров, а значит, к большим искажениям атмосферой геодезических измерений;
- закономерности действия и учет рефракции над поливными территориями Центральной Азии практически вообще не изучались;
- различные методы учета атмосферных влияний на геодезические измерения прошли достаточную проверку в средних широтах, а их эффективность и возможность применения на юге не исследованы.

Таким образом, определение и учет рефракции при геодезических измерениях является одной из важнейших проблем геодезической науки, особенно в условиях Центральной Азии, решение которой не только ликвидирует отставание существующей точности измерений от требуемой, но и принесет существенный экономический эффект, так как позволит сократить программы наиболее трудоемких полевых измерений.

Цель работы. Диссертационная работа имеет своей целью:

- Разработать обобщенную теорию вертикальной и горизонтальной рефракции и неравномерности распространения оптических волн в атмосфере.
- Исследовать закономерности рефракционного поля - поля показателя преломления n или индекса рефракции N , (где $N = (n-1) \cdot 10^6$) для оптического диапазона электромагнитных волн (ЭМВ) в нижних слоях атмосферы в различное время суток и периоды года в условиях Центральной Азии.
- Разработать новые, наиболее подходящие для условий Центральной Азии, методы определения и учета вертикальной и боковой рефракции.
- Разработать новые или модернизировать существующие методы определения и учета нивелирной рефракции, обеспечив их приемлемость для условий Центральной Азии.
- Повысить точность светодальномерных измерений в условиях Центральной Азии до относительных погрешностей порядка $1 + 2 \cdot 10^{-7}$.
- Разработать методы минимизации атмосферных влияний на геодезические измерения в условиях Центральной Азии, основанные на выборе методов и времени производства измерений.
- Установить экономическую эффективность от внедрения в производство

результатов исследований, выполненных в диссертации.

Методика исследований. Решение поставленных задач выполнено путем теоретических и экспериментальных исследований с последующей всесторонней проверкой на основании специальных экспериментальных и производственных наблюдений.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней:

- Сделан обобщенный вывод дифференциальных и интегральных уравнений земной рефракции для ее вертикальной и горизонтальной составляющих.
- Разработана теория и выведены формулы учета влияния атмосферы при светодальнометрии.
- Доказано, что турбулентность атмосферы, проявляющаяся в колебаниях изображений визирных целей, несет ценную информацию об атмосферной рефракции.
- Установлены закономерности распределения основных метеозлементов воздуха с высотой в условиях Центральной Азии.
- Предложен новый вариант метеорологического метода учета вертикальной рефракции.
- Разработан новый метод учета вертикальной рефракции с вычислением среднеинтегрального значения зенитного расстояния.
- Разработан новый флюктуационный метод учета вертикальной рефракции, требующий только измерений амплитуды колебаний визирных целей.
- Установлены пределы вертикальных градиентов температуры (амплитуды колебаний штрихов нивелирной рейки), при которых возможно применять первый или второй варианты флюктуационного метода учета рефракции при геометрическом нивелировании в турбулентной атмосфере.
- Доказано, что метеорологический метод учета нивелирной рефракции следует применять только при инверсии в приземном слое атмосферы.
- Выведена формула учета боковой рефракции с учетом влажности воздуха и показана ее эффективность при проложении полигонометрических ходов вдоль водоемов.

• Разработан усовершенствованный геодезический метод определения среднего интегрального показателя преломления воздуха n и фазовых задержек при светодальномерных измерениях, обеспечивающий их точность $1+2 \cdot 10^{-7}$.

Достоверность и обоснованность научных результатов обеспечивается сравнением теоретических разработок с экспериментальными и опытно-производственными данными.

Практическое значение работы состоит в рекомендациях по повышению точности геодезических измерений, в разработанных новых методах учета атмосферных влияний на угловые, азимутальные, линейные измерения, а

также при геометрическом нивелировании. Полученная точность учета атмосферы предлагаемыми методами позволяет создавать пространственные геодезические сети, вести точные створные измерения, строить лазерные трилатерационные сети, вести определение уклонов отвеса, вести тригонометрическое нивелирование взамен геометрического III - IV классов, а также исключать систематические погрешности высокоточного нивелирования, вызванные рефракцией, особенно на затяжных уклонах местности.

Реализация работы. Результаты исследований в настоящее время используются в геодезических предприятиях республик Центральной Азии при производстве тригонометрического нивелирования и дают экономический эффект. В перспективе эти методы найдут применение при производстве геометрического нивелирования, при измерениях вертикальных и горизонтальных углов, при светодальномерных определениях.

Апробация работы. Основные положения и результаты, приведенные в диссертации, докладывались и обсуждались на:

1. Научных семинарах кафедры инженерной геодезии архитектурно-строительного института (г. Самарканд), 1988 - 1994 г.г.
2. Научно-технических конференциях Государственного университета "Львовская политехника" (г. Львов), 1993- 1995 г.г.
3. Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава инженерно-строительного института (г. Ростов-на-Дону), 1989 г.
4. Научно-технической конференции (г. Ташкент), 1990 г.
5. Научном семинаре-совещании геодезической экспедиции N 226 (г. Самарканд), 1993 г.
6. Международном симпозиуме по Геодинамике горных систем Европы (г. Яремче), 1994 г.
7. Семинаре-совещании в Украинском АГП (г. Киев) 1994 г.

На защиту выносятся следующие основные положения и разработки

1. Найденные на основании теоретических и экспериментальных исследований закономерности, количественные и качественные характеристики действия атмосферы на геодезические измерения в условиях Центральной Азии.
2. Обобщенная теория непрямолинейности и неравномерности распространения электромагнитных волн (ЭМВ).
3. Разработанный флюктуационный метод учета вертикальной рефракции в турбулентной атмосфере, основанный только на колебаниях изображений визирной цели.
4. Метод учета вертикальной рефракции, основанный на вычислении среднеинтегрального значения зенитного расстояния (угла).

5. Установленные закономерности действия нивелирной рефракции над поливными территориями.

6. Рекомендации по применению различных методов учета нивелирной рефракции в зависимости от вертикальных градиентов температуры.

7. Уточненные формулы поправок за боковую рефракцию, учитывающие горизонтальные влажностные градиенты воздуха.

8. Усовершенствованный геодезический метод определения среднеинтегрального показателя преломления (n) воздуха и фазовых задержек при светодальномерных измерениях.

Вносясь на защиту положения (при их полной реализации) позволят повысить точность всего состава геодезических измерений до современных требований производства.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы освещены в 16 научных статьях, одной монографии, по результатам исследований получен патент.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы 141 наименований. Объем диссертации 249 страниц машинописного текста, включая 26 рисунков и 42 таблицы. Приложение к диссертации содержит акт и справки о внедрении, а также копию патента, всего на 6 страницах.

СО Д Е Р Ж А Н И Е Р А Б О Т Ы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, коротко излагается современное состояние проблемы учета рефракции, формулируются цели исследований и приводятся основные защищаемые положения.

Г л а в а 1. Т Е О Р И Я З Е М Н О Й Р Е Ф Р А К Ц И И И Н Е Р А В Н О М Е Р Н О С Т И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН

В 1.1 рассматривается показатель преломления атмосферы и причины его изменчивости.

Показатель преломления в соответствии с волновой теорией

$$n = c_0 / c, \quad (1)$$

где c_0 и c - соответственно скорости распространения света в вакууме и в атмосфере.

Свет распространяется на отрезке dl между точками **A** и **B** оптически кратчайшим путем:

$$\int_{AB} n dl = \min \quad (2)$$

Подставив в формулу (2) значение n из формулы (1), имеем

$$\int_{AB} n dl = \int_{AB} \frac{c_0}{c} dl = c_0 \int_{AB} dt = \min. \quad (3)$$

Формула (3) подтверждает принцип Ферма, согласно которому свет распространяется по такому пути, на который затрачивается наименьшее время. Из-за неоднородности атмосферы по показателю преломления ($n \cdot (X, Y, Z) = \text{Const}$) свет будет распространяться не прямолинейно, а по некоторой пространственной кривой, выбирая в соответствии с (2) и (3) кратчайший путь и, следовательно, минимальное время распространения. Согласно электромагнитной теории Максвелла:

$$n = \sqrt{\epsilon \mu} \quad (4)$$

Здесь ϵ и μ - диэлектрическая и магнитная проницаемости, характеризующие взаимодействие излучения со средой.

Для атмосферы Земли значение μ практически совпадает с единицей. Диэлектрическая проницаемость воздуха ϵ больше единицы и зависит от длины волны излучения. Для воздуха можем записать

$$n = c_0 / c = \sqrt{\epsilon} \quad (5)$$

Формула (5) указывает на электромагнитную природу света.

Для вакуума понятие скорости ЭМВ - едино, но для атмосферы необходимо ввести два понятия скоростей ЭМВ: фазовую и групповую. Понятие фазовой скорости относится к монохроматической волне. Фазовую скорость можно выразить через длину волны λ и период или частоту колебаний $T(f)$

$$c_0 = \lambda / T = \lambda f \quad (6)$$

Фазовой скорости c_0 соответствует фазовый показатель преломления

$$n_0 = c_0 / c \quad (7)$$

Зависимость фазового показателя преломления от длины волны λ , называемая дисперсией, которая особенно резко выражена в тропосфере у световых волн.

Реальное электромагнитное излучение не является монохроматическим. Скорость света в воздухе, как видно из (6), уменьшается с уменьшением длины волны. Переход от скорости света в вакууме к групповой скорости света $c_{гр}$ в атмосфере выполняется по формуле

$$c_{гр} = c_0 / n_{гр} \quad (8)$$

Групповой и фазовый показатели преломления $n_{гр}$ воздуха связаны соотношением Рэлея

$$n_{гр} = n_0 - \lambda \cdot dn_0 / d\lambda \quad (9)$$

Зависимость n или N от λ многократно изучалась при стандартных и нестандартных условиях. Стандартные значения метеопараметров обычно обозначают T_0 , P_0 , e_0 . За международные стандартные условия принято: $T_0 = 273.16 + t$, ($t = 15^\circ\text{C}$); $P = 1010.8$ ГПа; $e_0 = 0$ и содержание углекислого газа = 0.03%. Дисперсионную зависимость $N_{0,0}$ - фазового индекса преломления в стандартных условиях чаще всего представляют фор-

мулой Коши

$$N_{0\phi} = A + B / \lambda^2 + C / \lambda^4 \quad (10)$$

Формула Коши с коэффициентами Эдлена при международных стандартных условиях имеет вид

$$N_{0(15; 1010.8)} = 272.613 + 3 \frac{1.5294}{\lambda^2} + 5 \frac{0.01367}{\lambda^4} \quad (11)$$

Переходя от стандартных условий к условиям Центральной Азии, где $P = 957.6$ ГПа = 720 мм рт.ст. формуле (11) придадим вид:

$$N_{0(25; 957.6)} = 297.583 + 3 \frac{1.6694}{\lambda^2} + 5 \frac{0.01489}{\lambda^4} \quad (12)$$

Точность этих формул порядка $5 \cdot 10^{-8}$.

Далее поясняется физический смысл зависимости между n и метеопараметрами (P, T, e), а также между показателем преломления n и плотностью воздуха ρ .

Как известно из физики, для смеси газов, каким является и воздух, справедливо равенство $n \cdot \rho = \sum n_i \cdot \rho_i$. Выражая плотность сухого воздуха и водяных паров в миллиметрах с учетом значений n_i - для сухого воздуха и водяных паров, можно получить

$$n - 1 = [(78.85 P) / T - (10.92 e) / T] \cdot 10^{-6} \quad (13)$$

Наиболее общей, точной и поэтому применяемой для высокоточных светодальномерных измерений является формула Баррелла и Сирса, которую можно упростить, если привести к виду $N = N_c + N_v$ (первое слагаемое N_c - для сухого воздуха, второе N_v - для водяного пара). Тогда формула Баррелла и Сирса запишется так

$$N_L = N_0 \frac{T_0}{P_0} \frac{P - e}{T} + \left[N_0 \frac{T_0}{P_0} - \left(17.045 - \frac{0.5572}{\lambda^2} \right) \right] \frac{e}{T} \quad (14)$$

Здесь значения коэффициентов даны для случаев, когда P и e выражены в мм.рт.ст., так как большинство таблиц, используемых на производстве для вычисления N_L , имеет входные параметры, выраженные в мм.рт.ст.: N_0 - находится по формуле (12), $T_0 = 273.16$, $P_0 = 760$ мм рт.ст.

Затем в параграфе описываются причины изменчивости $n_L (N_L)$. Оценены погрешности n под влиянием ошибок измерения метеопараметров.

В 1.2 дан обобщенный вывод дифференциальных уравнений земной рефракции, ее вертикальной и горизонтальной составляющих. Свет распространяется в неоднородной атмосфере по некоторой пространственной кривой. Так как направление отвесной линии не совпадает с направлением $\text{grad } n$, то между горизонтальной и изодиоптрической плоскостями имеет место некоторый угол γ . В этой связи дифференциальный угол db и соответствующий

шая ему дуга dl расположены в наклонной плоскости. В результате проектирования этой плоскости на вертикальную и горизонтальную соответственно находим составляющие земной рефракции $d\delta_B$ и $d\delta_T$.

$$d\delta_B = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn'}{dz'} \cdot dl \cdot \cos\alpha \cdot \cos\gamma, \quad (15)$$

где α - угол между изодиоптрической плоскостью и дифференциально малым отрезком визирного луча. Так как $(dn'/dz') \cdot \cos\gamma = dn/dz$, то имеем

$$d\delta_B = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dz} \cdot dl \cdot \cos\alpha. \quad (16)$$

Это преобразованное дифференциальное уравнение. Аналогично преобразовано дифференциальное уравнение для горизонтальной составляющей, которое принимает окончательный вид

$$d\delta_T = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dy} \cdot dl \cdot \cos\alpha. \quad (17)$$

Дифференциальное уравнение (17) позволяет находить полную горизонтальную рефракцию $d\delta_T$, как функцию горизонтального показателя преломления dn/dy .

В функции вертикального градиента n формула в окончательном виде запишется так

$$d\delta_T = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dz} \cdot dl \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot \cos\alpha. \quad (18)$$

где γ - угол в горизонтальной плоскости между непреломленным лучом и осью Y , причем ось Y совпадает с линией пересечения горизонтальной и изодиоптрической плоскостей.

В 1.3 выведены интегральные уравнения вертикальной и горизонтальной составляющих земной рефракции, которые имеют вид.

$$\delta_B = \frac{\cos\alpha}{L} \cdot \rho \int_0^L \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dz} \cdot l \cdot dl. \quad (19)$$

$$\delta_T = \frac{\cos\alpha}{L} \cdot \rho \int_0^L \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dz} \cdot l \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot \cos\alpha \cdot dl. \quad (20)$$

В этих формулах δ_B и δ_T - соответственно частные углы вертикальной и горизонтальной рефракции, L - длина линии.

В 1.4 дано определение точечного и эквивалентного значений коэффициента вертикальной рефракции (K). Показана зависимость между K и δ_B , связь между K и h_e (эквивалентной высотой луча).

В 1.5, исходя из принципа Ферма, выведены формулы фазовых задержек при светодальнометрии, которые в общем виде записываются так:

$$\Delta L = \int_0^L (n - n_1) \cdot dl . \quad (21)$$

$$\Delta L = 10^{-6} \int_0^L (N - N_1) \cdot dl . \quad (22)$$

Выведена также формула для вычисления поправок за рефракцию ΔL_K в длину линии.

$$\Delta L_K = \frac{1}{2 \cdot \rho^2} \int_0^L \delta^2_B \cdot dl . \quad (23)$$

Как видим, формулы (21), (22), и (23) требуют знания показателя (индекса) и углов рефракции во многих точках на пути ЭМВ; измерение которых затруднительно, особенно при значительной высоте луча света над поверхностью Земли.

Поиск приемлемых методов определения этих величин является важнейшей частью настоящей работы.

В 1.6 рассматривается турбулентность атмосферы и флуктуации показателя преломления, показано, что:

1. флуктуации n обладает теми же статистическими свойствами, что и скорость турбулентных движений; 2. флуктуации n обусловлены вариациями температуры; 3. наблюдаемые в трубу колебания изображений (изменения угла прихода) обусловлены вариациями n и подчинены таким же статистическим свойствам; 4. изменения атмосферной рефракции, обусловленные изменениями n , приводят к наблюдаемым в оптические трубы колебаниям изображений. На такую связь между колебаниями изображений и рефракцией впервые указал В. Я. Струве.

Суммируя, можно утверждать, что турбулентность атмосферы, колебания изображений визирных целей несут ценную информацию об атмосферной рефракции.

Г л а в а 2. РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ УЧЕТА ВЕРТИКАЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

В 2.1 описаны методы тригонометрического нивелирования и их точность.

В 2.2 дан анализ основных работ в области вертикальной рефракции. Отмечены наиболее важные исследования ученых С. Д. Рыльке, А. А. Изотова и Л. П. Пеллинина, А. Л. Островского, И. Ф. Куштина, Х. К. Ямбаева, Е. Б. Ключина,

Б. М. Джумана, В. Иордана, Г. И. Кристиансена, И. Грааффа-Хантера и др.

Выделены намеченные еще Ф. В. Бесселем два пути борьбы с рефракцией:

1. Определение угла (коэффициента) рефракции в момент наблюдения зенитных расстояний.

2. Наблюдения в периоды одинакового коэффициента вертикальной рефракции по всем направлениям.

Как показал проф. Б. М. Джуман, второй путь возможен только в периоды нейтральной стратификации приземного слоя атмосферы. Однако эти периоды (утром и вечером) крайне короткие и в условиях Центральной Азии составляют $20 - 30'$, что не устраивает геодезическое производство. Поэтому борьба с рефракцией идет в основном по первому пути. К настоящему времени разработано более 30 методов. Нами выделены 2 группы перспективных методов учета - геодезические и флюктуационные.

В параграфе проанализированы эти методы, показаны их преимущества и недостатки, возможность их применения в условиях Центральной Азии.

Резюмируя выполненный анализ, можно констатировать:

1) остается актуальным изыскание новых и совершенствование существующих методов учета вертикальной рефракции, особенно в условиях Центральной Азии; 2) дальнейшие исследования должны быть направлены, прежде всего, на разработку новых геодезических методов и новых методов, основанных на турбулентности атмосферы. Именно эти исследования представляются наиболее перспективными и такими, что позволят разрешить проблему учета вертикальной рефракции с точностью, удовлетворяющей науку и технику, причем без существенных дополнительных измерений и материальных затрат.

В 2.3. излагаются закономерности распределения основных метеозлементов воздуха с высотой и их особенности в условиях Центральной Азии. Закономерности установлены на основании обработки обширного материала метеоданных за 1955, 1959, 1968, 1982 и 1989 гг. Метеонаблюдения включали измерения T , P , e на высотах 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0 и 3.0 м над пашней и полями картофеля, риса, хлопчатника, кукурузы и люцерны, а также измерения T на высотах 8, 25, 50, 100, 200, 300, 400, 500 м. Построены по усредненным данным температурные профили воздуха. Получены значения γ в разных слоях воздуха, а также профили влажности (e) и скорости ветра (V) в различные часы суток. Выявлены особенности распределения e над поливными и неполивными полями:

- 1) над поливными землями влажность больше примерно в $2.0 - 2.5$ раза;
- 2) круглосуточно влажность падает с высотой;
- 3) ночью, при инверсионных градиентах температуры влажность уменьша-

ется с высотой в 2.5 - 3 раза медленнее чем, днем.

Распределение температуры крайне нестабильно и затрудняет учет земной рефракции. Сведения о различии в распределении температуры над разными сельскохозяйственными культурами использованы при прогнозировании действия рефракции в тригонометрическом и геометрическом нивелировании, в боковой рефракции, учете влияния атмосферы на светодальномерные измерения.

В 2.4 описаны геодезические сети и программы наблюдений экспериментальных исследований. В основном измерения выполнены на двух сетях I кл., расположенных в разных районах республики Узбекистан. Координаты пунктов определены из линейно-угловых построений по программе I кл. а высоты - из геометрического нивелирования I кл. Погрешности определения теоретических зенитных расстояний не более 0.4".

В 2.5 описан учет вертикальной рефракции метеорологическим методом и его точность в условиях Центральной Азии. Сущность метода заключается в использовании метеозлементов приземного слоя воздуха. Измерения метеозлементов во многих точках визирного луча - сложная проблема, поэтому ограничиваются измерениями в 1 - 2 точках.

Учитывая однородность подстилающей поверхности в пустынном районе Центральной Азии, можно надеяться на положительный эффект от применения этого метода. Тем более, если учитывать изменение градиента температуры с высотой на основании измерений температуры на высотах 1, 2, 4 м по концам нивелируемой линии. В основу положена формула Изотова - Пеллинена, учитывающая эквивалентные высоты

$$\delta_s = - 8.132 \cdot \frac{P}{T^2} \cdot L \cdot \left(0.0244 + \frac{Y_1}{h_2} \right) \quad (24)$$

Опираясь на результаты вычислений, сделаны следующие выводы:

1. Днем, в случае однородной подстилающей поверхности, точность учета вертикальной рефракции метеорологическим методом для расстояний 1-5 км составляет 3...5" и остаётся приблизительно одинаковой во всем исследуемом диапазоне эквивалентных высот от 5 до 40 м.

2. В ночной период при инверсии температуры эффективность метода по некоторым направлениям может ухудшаться в 2 и более раз, а погрешность определения угла рефракции достигать 10...12".

3. Измерение температуры не на двух, а на трех высотах с определением Y_1 (градиент на высоте 1 м) незначительно (на 13%) повышает точность учета рефракции метеорологическим методом.

4. Точность метеорологического метода в условиях Центральной Азии регламентируется не столько разнородными подстилающими поверхностями,

сколько недостаточной точностью измерения вертикальных градиентов температуры, которые психрометром Асмана измеряются с относительной ошибкой $1/3 - 1/4$ (35 - 25%) от измеряемой величины.

В 2.6 описан учет вертикальной рефракции при наблюдениях в периоды нейтральной стратификации. Рассматриваются изменения коэффициента рефракции в зависимости от погодных условий, высоты и длины луча в условиях Центральной Азии при нейтральной стратификации.

Показано, что для Центральной Азии, как и в умеренных широтах, при нейтральной стратификации K практически не зависит ни от h_2 , ни от L и ни от V , но зависит от абсолютной высоты. В умеренных широтах при нейтральной стратификации по данным Б.М. Джумана, $K^{\circ}_{ср} = 0.16$. Для условий Центральной Азии, имея $T=300^{\circ}K$ и P на уровне моря, равное 958 мб, получено $K_n = 0.134$, а $K^{\circ}_{ср} = K_n - 0.013 \cdot H$ (км), (25) где: H - средняя высота пунктов наблюдений над уровнем моря.

В 2.7 вычислена точность учета вертикальной рефракции при наблюдениях в периоды нейтральной стратификации (спокойных изображений) в условиях Центральной Азии. Точность метода показана в таблице 1.

Таблица 1

Вычисленные ошибки определения углов рефракции

Группа линий нивелирования	$h_2 = 5.3$ м	$h_2 = 10.7$ м	$h_2 = 14.8$ м	$h_2 = 19.3$ м	$h_2 = 26$ м
	погрешности	$L_1 \approx 1.5$ км	$L_1 \approx 3.7$ км	$L_1 \approx 1.0$ км	$L_1 \approx 3.6$ км
$\pm m_{\delta}$	0.52"	0.92"	0.46"	0.66"	0.78"

Главный недостаток рассматриваемого метода - короткие периоды нейтральной стратификации, в которые возможно его применять.

В 2.8 представлен учет вертикальной рефракции методом рефракционного базиса и точность этого метода в условиях Центральной Азии.

Метод получил широкую известность благодаря возможности определять рефракцию из односторонних наблюдений зенитных углов.

Экспериментальная проверка метода выполнена на основании данных тригонометрического нивелирования в условиях Центральной Азии. Так как все пункты сети имели отметки из геометрического нивелирования, то это позволило провести обработку данных в сети, избирая в качестве эталонного направления последовательно все направления экспериментальной сети. На основании выполненных полевых измерений и обработки можно сделать следующие выводы:

1. При длинах 1 - 5 км метод рефракционного базиса можно рекомендо-

вать днем при неустойчивой стратификации воздуха: средняя квадратическая ошибка определения b_B составляет около $3.5'' - 4''$ (соответственно $7 - 8$ см).

2. Погрешность определения K методом рефракционного базиса тем больше, чем больше отличается по эквивалентной высоте определяемое направление от эталонного.

3. Точность учета вертикальной рефракции методом рефракционного базиса мало зависит от того, используются ли эквивалентные высоты или амплитуды колебания изображений. Следовательно, метод рефракционного базиса с использованием амплитуд колебаний изображений - предпочтительней, так как не требует вычисления h_3 .

4. Средние квадратические ошибки определения превышений и частных углов (коэффициентов) рефракции методом рефракционного базиса примерно $1.5 \dots 2$ раза грубее, чем при наблюдениях в периоды спокойных изображений визирных целей (нейтральной стратификации):

Раздел 2.9 посвящен учету вертикальной рефракции методом взаимных одновременных наблюдений зенитных расстояний и точности этого метода в условиях Центральной Азии.

При взаимном одновременном тригонометрическом нивелировании часто делается допущение, что взаимные углы рефракции - одинаковые, и действие рефракции исключается из результатов тригонометрического нивелирования. Фактически дело обстоит иначе. В настоящее время достоверно известно, что одинаковыми углы частной рефракции будут только при выполнении четырех условий: 1. одновременные взаимные наблюдения; 2. симметричный профиль; 3. однородная по всей трассе подстилающая поверхность; 4. одинаковый нагрев склонов солнечными лучами. Из взаимного одновременного нивелирования достаточно просто (без привлечения метеопараметров) определяется среднеинтегральный коэффициент рефракции \bar{K} по формуле:

$$\bar{K} = 1 - \frac{R_3}{L\rho^n} \cdot (Z_{A-B} + Z_{B-A} - 180^\circ) - \frac{R_3}{L^2} \cdot (v_A + v_B) - (i_A + i_B) \quad (26)$$

При этом
$$\bar{K} = (K_{A-B} + K_{B-A})/2 \quad (27)$$

Значения K_{A-B} и K_{B-A} будут найдены по формулам

$$K_{B-A} = \frac{2\bar{K} \cdot h_{3A-B} + K_n \cdot (h_{3B-A} - h_{3A-B})}{h_{3A-B} + h_{3B-A}}; \quad (28)$$

$$K_{A-B} = 2\bar{K} - K_{B-A} \quad (29)$$

Показано, что учет вертикальной рефракции с разделением K на частные K_{A-B} и K_{B-A} в зависимости от h_3 повышает точность взаимного тригоно-

метрического нивелирования на 40%.

В период инверсионного строения атмосферы для линий длиной до 10 км с симметричными и асимметричными профилями вертикальная рефракция учитывается в 1.5...2.2 раза грубее, чем при нормальной стратификации атмосферы.

В 2.10 описан новый метод взаимного одновременного тригонометрического нивелирования с вычислением среднеинтегральных значений зенитных расстояний.

Среднеинтегральные значения \bar{Z} вычисляются по формулам:

$$\bar{Z}_{A-B} = Z_{A-B} - \frac{\gamma}{2} + \frac{\delta}{2} \quad (30)$$

$$\bar{Z}_{B-A} = Z_{B-A} - \frac{\gamma}{2} + \frac{\delta}{2} \quad (31)$$

Здесь Z_{A-B} , Z_{B-A} - измеренные зенитные расстояния в конечных точках, γ - центральный угол, соответствующий дуге L на поверхности Земли, δ - полный угол рефракции.

Взаимообратные превышения h для линии нивелирования с использованием среднеинтегральных значений зенитных расстояний вычисляются:

$$h_{A-B} = L \cdot \text{ctg } \bar{Z}_{A-B} + i_A - v_B \quad (32)$$

$$h_{B-A} = L \cdot \text{ctg } \bar{Z}_{B-A} + i_B - v_A \quad (33)$$

$$h_{cp} = (h_{A-B} + h_{B-A})/2 \quad (34)$$

Теория метода и его точностные возможности, проверены по материалам экспериментальных измерений зенитных расстояний в двух регионах Евразийского континента, на территории Западной Украины и в республике Узбекистан.

Анализируя результаты, делаем следующие выводы:

- тригонометрическое нивелирование с использованием среднеинтегральных значений зенитных расстояний позволяет определять превышения в условиях Центральной Азии, как ночью, так и днем, с точностью, соответствующей геометрическому нивелированию IV класса при длинах линий нивелирования до 5 км;
- недостатком предложенного метода является необходимость постановки одновременных взаимных наблюдений Z , без которых невозможно определение среднеинтегральных значений зенитных углов.

2.11. "Теоретические основы флюктуационного метода учета вертикальной рефракции":

1. Приведен теоретический расчет нормального градиента температуры γ_n в сухом и влажном ненасыщенном воздухе.
2. Показано, что на каждом высотном уровне на воздушную частицу

действуют две силы: а) сила тяжести, направленная вниз и равная по величине $g\rho_1$ (ρ_1 - плотность воздушной частицы); б) выталкивающая сила Архимеда, направленная вертикально вверх и равная $g\rho_e$ (ρ_e - плотность воздуха, окружающего частицу). Результирующая этих двух сил называется силой плавучести или плавучестью; для нее можем записать формулу: $(dP_A - dP)/dh = g(\rho_e - \rho_1)$. (35)

Сила плавучести направлена вверх при $\rho_e > \rho_1$ или вниз при $\rho_e < \rho_1$. Под влиянием силы плавучести частицы воздуха получают ускорение

$$\frac{d^2h}{dt^2} = g \frac{\rho_e - \rho_1}{\rho_1} = g \frac{T_1 - T_e}{T_e} \quad (36)$$

Рассмотрено три случая стратификации атмосферы:

I. $\gamma < \gamma_n$. Пусть на исходном уровне $T_{e_0} = T_{i_0}$. При перемещении частицы вверх $T_{1_B} < T_{e_B}$, а $\rho_{1_B} > \rho_{e_B}$ и частица, согласно (36), получит отрицательное ускорение (замедление), и будет смещаться в исходное положение под действием силы тяжести. При перемещении частицы вниз $T_{1_H} > T_{e_H}$, а $\rho_{1_H} < \rho_{e_H}$, т.е. частица также будет возвращаться в исходное положение. Такая стратификация, когда $\gamma < \gamma_n$, называется устойчивой. Имеют место два частных случая устойчивой стратификации: изотермическая ($\gamma = 0$) и инверсионная ($\gamma > 0$). При устойчивой стратификации перемещение воздушных частиц по вертикали затруднено, а при глубокой инверсии вообще невозможно.

II. $\gamma = \gamma_n$. В этом случае на исходном, верхнем и нижнем уровнях $T_{i_0} = T_{e_0}$, $\rho_{i_0} = \rho_{e_0}$; $T_{1_B} = T_{e_B}$, $\rho_{1_B} = \rho_{e_B}$; $T_{1_H} = T_{e_H}$, $\rho_{1_H} = \rho_{e_H}$. Следовательно, на каком бы уровне частица не располагалась, ускорение ее движения всегда равно нулю. Термическое состояние атмосферы при $\gamma = \gamma_n$ называется безразличным (нейтральным) или равновесным.

III. $\gamma > \gamma_n$. Если переместим частицу адиабатически вверх, тогда $T_{1_B} > T_{e_B}$, а $\rho_{1_B} < \rho_{e_B}$. Частица приобретает положительное ускорение; наоборот, при перемещении вниз, $T_{1_H} < T_{e_H}$, $\rho_{1_H} > \rho_{e_H}$ и частица будет перемещаться вниз с нарастающей скоростью. Таким образом, частица, будучи выведена с исходного положения, всегда перемещается с ускорением в ту сторону, куда получила движение в начальный момент. Стратификация атмосферы, при которой $\gamma > \gamma_n$, называется неустойчивой.

При такой стратификации создаются благоприятные условия для вертикальных перемещений воздуха и развивается турбулентность атмосферы.

Ясно, что при неустойчивой стратификации частицы воздуха стремятся под действием силы тяжести и силы Архимеда вернуться в исходное устойчивое положение ($\gamma < \gamma_n$). Частицам воздуха длительное время удается на мгновения вернуться в безразличное, нейтральное состояние, при

котором $\gamma = \gamma_{ад} = \gamma_n$, так как именно при таком состоянии отсутствуют ускорения движения частиц (что доказано ранее на основании (36)).

4. В эти моменты сила плавучести равна нулю, $dP_A = -dP$, формулу (35) запишем так: $g(\rho_e - \rho_1) = 0$. Так как $g \neq 0$, то $\rho_e = \rho_1$.

Сила плавучести будет равна нулю и при условии $\rho_{e_0} = \rho_{e_B} = \rho_{e_H} = \rho_{1_0} = \rho_{1_B} = \rho_{1_H}$, т.е. при условии одинаковой плотности воздуха с высотой. Заметим, что речь идет о некоторой средней плотности, а мгновенные плотности будут флюктуировать, следуя за флюктуациями градиентов температуры (за мгновенными градиентами).

5. Рассчитаны средние градиенты температуры, при которых

$d\rho / dh = -dn / dh = 0$. Это сделано на основании формулы

$$\frac{d\rho}{dh} = \frac{\rho}{T} \cdot \left(-\frac{g}{R_B} - \frac{dT}{dh} \right). \quad (37)$$

Если

$$\left(-\frac{g}{R_B} - \frac{dT}{dh} \right) = 0, \text{ то, } -\frac{dT}{dh} = \frac{g}{R_B}. \quad (38)$$

Принимая $g = 9.80616 \text{ м/с}^2$ и $R_B = 287.05 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$, получим $\gamma = dT / dh = -0.0342 \text{ град/м}$. Так как $\gamma = \gamma_n + \gamma_a$, и, учитывая, что $\gamma_n = -0.0098 \text{ град/м}$, найдем аномальный градиент $\gamma_a = -0.0244 \text{ град/м}$.

Такой расчет можно выполнить и на основании формул частной вертикальной рефракции, имея в виду, что при $d\rho / dh = -dn / dh = 0$, рефракция $\delta_B = 0$. Получим тот же результат.

6. Таким образом, при среднем аномальном градиенте температуры $\gamma_a = 0.0244 \text{ град/м}$, мгновенные градиенты будут флюктуировать в пределах от 0 до 0.0488 град/м . Поэтому достаточно вести наблюдения не на среднее, а на верхнее мгновенное положение визирной цели (для зрительных труб с обратным изображением - на нижнее положение), чтобы избавиться от влияния аномальной части вертикальной рефракции.

Все сказанные теоретические положения получили экспериментальные подтверждения.

7. При дальнейшем росте средних градиентов, т.е. при росте плотности воздуха с высотой рефракция станет отрицательной. Сила плавучести перестанет быть равной нулю. Размах флюктуации вертикальных градиентов температуры увеличится и по размаху можно найти среднее значение градиента. Теперь аномальные градиенты уже не будут достигать мгновенного нулевого значения. Наведение трубы на верхние пики колеблющейся цели уже не полностью исключает аномальную рефракцию. Появятся так называемые "недокомпенсации" ($\Delta\delta_a$), равные отрицательной рефракции $\delta_{с.р}$. При $\gamma_a > 0.0244 \text{ град/м}$ следует вести наблюдения на среднее положение

колеблющейся цели и измерять амплитуду колебаний. На экспериментальной сети получены разности $\Delta\delta_a = \delta_b - \delta_n$;

где δ_b - измеренная рефракция, когда наблюдения велись на верхние пики колебаний. δ_n - вычисленная нормальная рефракция. Рефракции $\delta_{ср}$ получены как разности между теоретическими и измеренными зенитными углами. Таким образом, $\Delta\delta_a$ и $\delta_{ср}$ получены независимо и экспериментально проверено их равенство. В итоге получена формула

$$\delta_b = 0.198 \cdot (P/T^2) \cdot L - 8.13 \cdot (P/T^2) \cdot L \cdot \gamma_a \quad (39)$$

где первый член - нормальная рефракция, а второй член - аномальная и равная амплитуде колебаний визирных целей - A. Сокращенно формулу запишем так

$$\delta_b = \delta_n - A \quad (40)$$

В формуле (40) δ_n может быть заменено критическими амплитудами колебаний изображений $A_{кр}$, измеренными в те моменты времени, когда рефракция $\delta_{ср} = \Delta\delta_a = 0$ при $d\rho_b / dh = 0$ и $\delta_n = A_{кр}$, $\delta_b = 0$; при $A > \delta_n$ ($|\gamma_a| > 0.0244$ град/м).

При такой замене формула (40) примет вид $\delta_b = A_{кр} - A_{(aop)}$. В формуле (aop) - аномальная отрицательная рефракция, определяемая только по колебаниям изображений. При $A < \delta_n$ рефракция δ_b - положительная; в критический момент при

$$d\rho / dh = dn / dh = 0, \quad \delta_n = -A_{кр}, \quad \delta_b = 0;$$

при $A > \delta_n$ рефракция δ_b - отрицательная. Проверка формул (40) и (39) выполнена в трех вариантах.

В 2.12 - 2.13 сделаны предвычисления ожидаемой точности нового флюктуационного метода учета вертикальной рефракции и выполнена оценка точности этого метода в условиях Центральной Азии по экспериментальным данным. Предвычисления показали, что средняя квадратическая ошибка определения рефракции этим методом при длинах линий в 1 км составляет 0.3". Для линий 2, 5, 10 км получим соответственно 0.6", 1.5", 3.1".

Результаты оценки точности флюктуационного метода по экспериментальным данным приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения ошибок $m\delta$

Показатели ошибок	Группы линий нивелирования				
	$h_s = 5.3\text{м}$	$h_s = 10.7\text{м}$	$h_s = 14.8\text{м}$	$h_s = 19.3\text{м}$	$h_s = 26.3\text{м}$
	$L \approx 1.5\text{км}$	$L \approx 3.7\text{км}$	$L \approx 1.0\text{км}$	$L \approx 3.6\text{км}$	$L \approx 9.0\text{км}$
$\pm m\delta$	0.9"	0.7"	0.2"	0.9"	2.8"

Сравнивая данные экспериментальных исследований с теоретическими

расчетами ошибок за рефракцию, видим их удовлетворительное согласие. Точность определения рефракции предложенным методом не хуже точности учета рефракции в период нейтральной стратификации.

Г л а в а 3. УЧЕТ НИВЕЛИРНОЙ РЕФРАКЦИИ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ.

В 3.1 проведен анализ важнейших работ в области нивелирной рефракции. Первыми исследователями нивелирной рефракции были И. Н. Померанцев, Д. Д. Гедеев, Н. Я. Цингер, С. Д. Рыльке, Ш. Лаллеман, Т. Куккамьяки, В. Иордан. Дальнейшие исследования в этой области выполнены Н. П. Осиповым, Н. А. Павловым, Ф. Н. Красовским, И. И. Энтиным, А. Л. Островским, П. В. Павливым, Б. М. Джуманом, И. И. Стащиным, В. Хаком, М. Кнейсселем, Д. Чаткай и др.

В условиях Центральной Азии впервые исследовалась нивелирная рефракция Н. П. Осиповым. Он сделал ряд выводов:

- Рефракция уменьшает разности высот - сглаживает рельеф местности. Этот вывод справедлив для неустойчивой стратификации, днем, когда и выполнялись исследования.

- В течение светлого периода суток два раза наступают моменты, когда разности высот равны истинным: утром и вечером.

- Наблюдается хорошее соответствие между изменением температурных градиентов и величиной рефракции.

- Ошибка за рефракцию примерно пропорциональна квадрату расстояния от нивелира до рейки.

- Влияние рефракции в основном сказывается в ясную погоду.

- В пасмурную погоду, когда небо покрыто сплошь толстым слоем облаков, ошибки за рефракцию можно считать случайными.

Большинство выводов Н. П. Осипова согласуются с современными представлениями о нивелирной рефракции. Только первый и последний вывод требуют уточнения.

Рядом авторов предложены формулы определения поправок за нивелирную рефракцию, однако эти формулы, во-первых, требуют измерения большого числа метеоданных и, во-вторых, точность определения поправок по этим формулам не точнее 0.1 мм, что не всегда удовлетворяет требованиям науки и производства. К тому же внедрение в геодезическое производство методов учета нивелирной рефракции сдерживается, по нашему мнению, из-за различия мнений ученых о характере действия нивелирной рефракции: случайное оно или систематическое?

В этой связи возникает необходимость в разработке новых формул и методов учета нивелирной рефракции.

В 3.2 рассмотрены метеорологические методы учета нивелирной рефракции, являющейся не случайной, а систематической погрешностью бы-

сокоточного геометрического нивелирования, особенно на наклонных участках местности, когда имеет место различие высот визирных лучей до задней и передней реек. Следовательно, градиенты температуры на пути этих лучей будут различны. При геометрическом нивелировании, когда линии визирования коротки, можно предположить, что точечные измерения метеозлементов позволяют достаточно точно учитывать рефракцию. Нивелирная рефракция γ в отсчете по рейке достаточно точно определяется формулой, вытекающей из обобщенной теории

$$\gamma = \int_0^L \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dh} \cdot l \, dl \quad (41)$$

Выражая градиент dn/dh в функции градиентов dP/dh , dT/dh , γ в мм, а L - в метрах, имеем после интегрирования

$$\gamma = 0.000962 \frac{P}{T^2} \cdot L^2 + 0.039425 \frac{P}{T^2} \cdot \frac{\gamma_1}{h_3^v} \cdot L^2 \quad (42)$$

Формула (42) является формулой поправки в отсчет по рейке за нивелирную рефракцию для сухого воздуха. Здесь первый член в правой части формулы - поправка за нормальную рефракцию, а второй - за аномальную. На основании формулы (42) видно, что нормальная рефракция при равенстве плеч не действует на результаты геометрического нивелирования.

Иначе обстоит дело с аномальной рефракцией. Составляющие γ_3 и γ_n , обусловленные аномальной рефракцией, будут различны, так как обычно h_{33}^v и h_{3n}^v не одинаковы.

Именно эта причина вызывает дифференциальную рефракцию $\Delta\gamma$.

С учетом всего вышесказанного можем записать, пренебрегая первым членом формулы (42) и учитывая, что $T = (T_1 + T_2) / 2$:

$$\Delta\gamma = 0.0394 \frac{P}{T^2} \gamma_1 \cdot L^2 \cdot \left(\frac{1}{h_{33}^v} - \frac{1}{h_{3n}^v} \right) \quad (43)$$

γ_1 определяется из температурных измерений.

Трудность определения h_{33}^v и h_{3n}^v делает эту формулу приемлемой только при стационарных исследовательских работах на отдельной станции. При производственных работах придется переходить от h_3 к $h_{ср}$ - средним высотам луча:

$$h_{ср3} = \frac{h_n + h_3}{2} ; \quad h_{срn} = \frac{h_n + h_n}{2}$$

С переходом к средним высотам луча на заднюю и переднюю рейку формулу запишем так

$$\Delta\gamma = 0.0394 \frac{P}{T^2} \cdot L^2 \cdot \frac{[\Delta T - \gamma_n \cdot (h_b - h_n)]}{\ln(h_n / h_n)} \cdot \left(\frac{1}{h_{ср3}} - \frac{1}{h_{срn}} \right) \quad (44)$$

Далее утверждается, что все приведенные здесь формулы определения рефракции по метеозлементам имеет смысл использовать при устойчивой стратификации атмосферы.

При неустойчивой стратификации более перспективными представляются методы учета нивелирной рефракции, основанные на колебании угла прихода светового луча (колебании изображений штрихов реек).

В 3.3 выполнена оценка точности метеорологического метода учета нивелирной рефракции. Задаваясь обычными для условий Центральной Азии - значениями $T = 300^\circ\text{K}$, $P = 958 \text{ мб}$, и полагая $h_{\text{э}} = 1 \text{ м}$, $h_{\text{н}} = 2 \text{ м}$, рассчитаем ошибки нивелирной рефракции на станции при разных длинах плеч и разных γ_1 . При этом примем вероятные средние квадратические ошибки $\sigma_{\gamma_1} = 0.15 \text{ град/м}$ и $\sigma_{h_{\text{э}}} = 0.10 \text{ м}$. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения ошибок нивелирной рефракции в мм

γ_1 , град/м	Длина плеча L, м				
	30	40	50	60	70
0.25	0.071	0.118	0.182	0.259	0.352
0.50	0.084	0.126	0.187	0.263	0.355
0.75	0.105	0.138	0.195	0.268	0.359
1.00	0.126	0.155	0.207	0.277	0.366
2.00	0.217	0.237	0.272	0.329	0.406

При длинах плеч до 50 м ошибки не превышают 0.27 мм.

Однако измерение эквивалентных высот на каждой станции нивелирования слишком снизило бы продвиг работ, и как уже отмечалось, возникает необходимость перехода от $h_{\text{э}}$ к $h_{\text{ср}}$. Для определения $h_{\text{ср}}$ достаточно измерять высоту нивелира - $h_{\text{н}}$ и использовать отсчеты по задней и передней рейкам. Разумеется, при переходе к средним высотам значительно возрастут ошибки $\sigma_{h_{\text{э}}}$.

Далее приведены результаты количественной оценки систематических рефракционных погрешностей геометрического нивелирования в условиях поливных и неполивных территорий, которые моделировались для двух вариантов высокоточного нивелирования на затяжном склоне с превышениями на станциях 1 и 2 м. Величина эквивалентного γ определялась путем интерполирования на эквивалентные высоты визирного луча. Приведены ре-

зультаты вычислений рефракционных поправок в превышения на станции. Показано, что: поправки за нивелирную рефракцию над поливными полями практически всегда отрицательные и могут достигать до 1 мм, а над неполовными территориями на протяжении почти всего светлого периода суток - положительны и достигают 0.5 мм.

В 3.4 описаны турбулентный метод учета нивелирной рефракции и его точность в условиях Центральной Азии.

Сущность этого метода заключается в измерении во время производства нивелирования вертикальных колебаний изображений (двойных амплитуд - G) штрихов передней и задней рейки с помощью биссектора высокоточного нивелира.

Показано, что аномальная рефракция γ_a в отсчете по рейке

$$\gamma_a = G / 2 = A, \quad (45)$$

где A - амплитуда колебаний штрихов инварной рейки в мм.

Так как при геометрическом нивелировании превышение определяется как разность отсчетов по рейкам, то можем записать

$$\Delta\gamma_a = A_3 - A_n. \quad (46)$$

Если размах колебаний G или амплитуду A измерять не в мм, а в условных единицах - в баллах, как это предложил проф. П.В.Павлив, или в делениях шкалы микрометра, тогда (46) принимает вид

$$\Delta\gamma_a = Q \cdot (A_3 - A_n), \quad (47)$$

где Q - коэффициент перехода от условных единиц к мм.

Рассчитана ожидаемая точность метода. Пусть ширина биссектора 3.5 мм (1.75 мм). При разделении его на глаз на 10 частей (с точностью 0.1), получим ошибку однократного измерения размаха 0.35 мм (0.18 мм). При восьми измерениях ошибка среднего размаха будет 0.12 мм (0.06 мм). Так как амплитуда $A = (1/2) \cdot G$, то $m_A = (1/2) \cdot m_G$. Получим $m_A = 0.06$ мм (0.03 мм). Разность амплитуд измеряется с точностью 0.06 мм $\cdot \sqrt{2}$ (0.03 мм $\cdot \sqrt{2}$), или $m_{\Delta A} = 0.08$ мм (0.04 мм).

В Центральной Азии точность метода несколько ниже. Полагаем, что турбулентный метод является наиболее точным из всех существующих и к тому же перспективным. Точность метода будет повышена, если увеличить точность измерения колебаний.

В 3.5 сделаны некоторые предложения и выводы об учете нивелирной рефракции в условиях Центральной Азии.

1. Показано, что аномальная нивелирная рефракция при развитой турбулентности определяется при любых значениях отрицательных вертикальных градиентов по флуктуациям угла прихода светового луча (колебаниям изображений), причем не приближенно, как ранее утверждалось, а

точно.

2. Погрешности турбулентного метода связаны преимущественно не с погрешностями теоретической основы, а, практически, только с точностью измерения колебаний, которые ведутся, как и при отсчитывании штриховых микроскопов, делением на глаз ширины углового биссектора нивелира на десятые части.

3. Турбулентный метод, примененный в геометрическом нивелировании, не требует знаний эквивалентных высот, так как наблюдаемые в зрительной трубе нивелира колебания штрихов нивелирной рейки обусловлены эквивалентными градиентами температуры.

4. Из всех методов учета нивелирной рефракции при неустойчивой стратификации атмосферы наиболее точным и простым является вариант турбулентного метода, при котором биссектор наводим не на среднее, а на верхнее положение колеблющегося штриха нивелирной рейки. Этот вариант можно смело рекомендовать для условий Центральной Азии.

5. Получена формула для определения размаха колебаний штрихов рейки, при котором еще можно вести учет нивелирной рефракции вышеописанным вариантом турбулентного метода при разных длинах плеч. Формула имеет вид:

$$\gamma = 0.00192 P \cdot L^2 / T^2 \quad (48)$$

здесь γ - линейный размах колебаний штриха. Задаваясь значением L_1 на основании (48) получим

L_1 (м)	30	40	50	60	70
γ_1 (мм)	0.018	0.033	0.051	0.074	0.100

Как видим, к сожалению, этот вариант применим при сравнительно незначительных колебаниях штрихов рейки.

6. При больших размахах колебаний штрихов необходимо прибегать ко второму варианту турбулентного метода, то - есть измерять размах колебаний.

7. К учету нивелирной рефракции метеорологическим методом, как уже говорилось, следует прибегать только при производстве высокоточного нивелирования в условиях инверсионного строения трехметрового слоя атмосферы, когда термическая турбулентность отсутствует.

8. Точность учета нивелирной рефракции в условиях Центральной Азии турбулентным методом составляет 0.05 - 0.06 мм. Метеорологическим - в 2...4 раза грубее.

9. Важнейшая особенность нивелирной рефракции в условиях Центральной Азии - ее значительно большая величина, чем в умеренном климате. Так,

если в умеренном климате дифференциальная аномальная рефракция на отдельной станции достигает $0.3 - 0.4$ мм, то в условиях жаркого и сухого климата она соответственно может достигать $0.7 - 1.0$ мм. Особенно велики поправки в условиях Центральной Азии при инверсионном строении трехметрового слоя атмосферы. Поэтому при нивелировании в условиях Центральной Азии следует или избегать производства высокоточного нивелирования при инверсии, особенно в безветренную погоду, или же обязательно вести учет нивелирной рефракции метеорологическим методом.

10. Выявлены закономерности действия нивелирной рефракции в условиях Центральной Азии над поливными полями в вегетационный период года:

во-первых, на протяжении почти всего светлого периода суток имеет место положительные вертикальные градиенты температуры и, следовательно, отрицательные рефракции, достигающие 0.9 мм на станции;

во-вторых, вертикальные градиенты влажности на протяжении суток отрицательны и столь велики, особенно в нижнем метровом слое, что дают существенную добавку к поправке за рефракцию до $0.1 \dots 0.2$ мм.

Г л а в а 4. УЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ (БОКОВОЙ) РЕФРАКЦИИ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

В 4.1 дан анализ важнейших работ в области боковой рефракции.

К настоящему времени учеными В. Я. Струве, А. А. Аузаном, Б. Н. Рабиновичем, В. В. Даниловым, Н. А. Урмаевым, А. С. Звизиным, А. Л. Островским, Н. В. Яковлевым, Л. С. Юношевым, Г. Кристиансенем, Э. Сокобом, Т. Кузкамьяки, Г. Морицом и другими выполнены обширные исследования боковой рефракции.

На основании анализа выполненных теоретических и экспериментальных исследований в области боковой рефракции можно констатировать, что наиболее эффективными методами ее учета являются:

1. Геодезический метод определения поправок в горизонтальные направления за боковую рефракцию, разработанный профессором А. Л. Островским.

2. Учет боковой рефракции путем редуцирования угловых измерений на период нулевых градиентов температуры, разработанный профессором Н. Я. Яковлевым; излагается сущность этих методов.

На основании анализа работ сделаны следующие основные выводы:

1. Поправки за боковую рефракцию следует вводить только в первоклассных астрономо-геодезических и специальных сетях, создаваемых, например, на геодинамических полигонах, а также при азимутальных определениях на пунктах Лапласа.

2. При всех других геодезических измерениях, кроме перечисленных, следует минимизировать влияние боковой рефракции методическими приемами.

ми. Это возможно при условии знания законов действия различных полей боковой рефракции.

Поэтому дальнейшее содержание настоящей главы посвящено преимущественно изучению закономерностей действия рефракционных полей в условиях Центральной Азии и изысканию наиболее подходящих методов минимизации боковой рефракции.

В 4.2 рассмотрены характер и особенности рефракционных полей боковой рефракции в условиях Центральной Азии, и впервые экспериментально установлено, что, как и для средних широт, рефракционные поля в условиях Центральной Азии можно разделить на две группы:

1. Рефракционные поля, изменяющие в течение суток направления горизонтального градиента показателя преломления $n \cdot (\text{grad } n)$ на обратные;
2. Рефракционные поля, не меняющие направления $\text{grad } n$. В условиях Центральной Азии поля второй группы характеризуются в 1.5 - 2 раза большими горизонтальными градиентами температуры и влажности. Они особенно велики вблизи искусственных водохранилищ, где достигают соответственно 0.14 град/м и 0.16 мм.рт.ст/м.

Имеется существенная разница в суточном ходе горизонтальных градиентов температуры на границах берег - вода и плотина - вода.

На границе берег - вода значения dT / dy положительны в дневное время и отрицательны в ночное, здесь образуется рефракционное поле первого вида. Плотина действует как мощный накопитель тепла, не остывающий за ночь, и значения dT / dy на границе плотина - вода положительны круглосуточно, здесь имеет место рефракционное поле второго вида.

В 4.3 рассматривается суточный ход угловых невязок в замкнутых построениях полигонометрии, а также возможность минимизации действия боковой рефракции выбором времени наблюдений.

В условиях Центральной Азии боковая рефракция практически не исследовалась. Для изучения суточного характера воздействия рефракции на измеренные горизонтальные углы нами были поставлены специальные угловые и метеорологические экспериментальные измерения.

На основании погрешностей измерения углов на пунктах M_i найдена ожидаемая суммарная средняя квадратическая ошибка в полигоне M_n по формуле

$$M_n = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 + M_4^2 + M_5^2} \quad (49)$$

Угловые невязки полигонов в отдельные часы измерений можно рассматривать, как истинные ошибки. Они включают случайные M_n и систематические - M_{nc} части. Это дает нам право записать

$$f^2_{\beta} = M_n^2 + M_{nc}^2 \quad (50) \quad \text{отсюда} \quad M_{nc} = \sqrt{f^2_{\beta} - M_n^2} \quad (51)$$

Таблица 4

Вычисление угловых невязок в экспериментальном полигоне

Время, час	Средние значения горизонтальных углов					Угловая невязка f_{β}
	1	2	3	4	5	
8	219° 38' 06.2"	102° 47' 10.7"	70° 51' 37.0"	58° 25' 30.0"	88° 17' 29.1"	- 1 0"
20	06.8	18.5	36.8	30.2	28.8	+ 1.1
12	10.5	22.2	36.0	32.1	31.2	+12.0
14	12.5	22.8	36.5	32.4	31.5	+15.7
16	10.6	21.4	36.2	32.2	31.1	+11.5
0	05.0	19.2	33.2	26.6	27.2	- 9.9
2	04.4	19.5	33.0	26.7	27.1	- 9.3
4	04.3	19.8	32.0	27.5	27.3	- 9.4

$$\text{Допустимая невязка } f_{\beta_{\text{доп}}} = 2 \cdot 2.5'' \cdot \sqrt{5} = 8.9''$$

В таблице 4 приведены значения углов в разные часы суток и угловые невязки в экспериментальном полигоне, проложенном по берегу водохранилища. Как видно из таблицы, невязка достигает $15.7''$ при допустимой $8.9''$. Значения M_{nc} оказались близкими к угловым невязкам полигона. Если комбинировать ночные и дневные измерения то, как видно из таблицы 4, будет происходить минимизация рефракции.

В 4.4 детально рассмотрены экспериментальные исследования эффективности симметричной программы угловых измерений в условиях Центральной Азии.

Если программу наблюдения углов разделить примерно поровну на дневные и ночные наблюдения, то основная часть дневных измерений будет приходиться на вечерние видимость с инверсионным строением атмосферы. Ночные измерения также будут выполнены при инверсии. Следовательно, средние значения углов будут обременены ошибками рефракции. Для более полной компенсации рефракционных влияний следовало бы поставить требование - выполнять программу примерно равными частями относительно моментов изотермии воздушных масс, т.е. симметричную программу.

При этом ставилась задача выяснить - на всех ли широтах применение симметричной программы приведет к компенсации рефракционных ошибок. С этой целью ставились экспериментальные исследования на пунктах, образующих примерно равноугольный треугольник со сторонами до 4 км. На каждом пункте выполнены по три программы I класса (число приемов $n_p = 36$ - составляет одну программу). Первая программа выполнена при неустойчивой стратификации (отрицательные вертикальные градиенты тем-

пературы). Вторая программа - при устойчивой (положительные градиенты), а третья - при нулевых градиентах.

Значения невязки треугольника в зависимости от программы угловых измерений показаны в таблице 5.

Таблица 5

Результаты вычисления невязок треугольника

Программы	Средние значения углов на пунктах			Невязка треугольника
	1	2	3	
первая I	60° 19' 26.11"	61° 22' 56.26"	58° 17' 36.46"	-1.17"
вторая II	27.21	55.73	37.98	+0.92
третья III	27.03	55.92	36.52	-0.43
(I+II)/2	60° 19' 26.66"	61° 22' 55.84"	58° 17' 37.22"	-0.12"

На основании экспериментальных материалов, выполненных в условиях Центральной Азии, доказано, что применение симметричной программы позволит не только повысить точность угловых измерений, но и сократить число приемов измерения углов.

В 4.5 описываются результаты введения поправок за боковую рефракцию, определенных метеорологическим методом с учетом горизонтальных градиентов температуры и влажности. В начале описываются результаты введения поправок за боковую рефракцию δ_r с учетом только горизонтальных градиентов температуры. При этом оказалось, что углы не полностью освобождены от рефракционных влияний. Поэтому впервые были выведены формулы и введены поправки $\Delta\delta_r$, составляющие влажностную часть боковой рефракции. Формула имеет вид:

$$\Delta\delta_r = - \frac{2.81}{L} \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=j} \left(\frac{de}{dy} \right)_i \cdot l_i \cdot \Delta l_i \quad (52)$$

В таблице 6 приведены угловые невязки полигона в разное время суток, а также остаточные части ошибок полигона.

Таблица 6

Угловые невязки полигона после введения поправок δ_r и $\delta_r + \Delta\delta_r$

Время, ч	8		12			14			16		
	8	20	12	14	16	0	2	4	0	2	4
$f_{\beta}(\delta_r)$	-0.8"	+0.5"	+1.3"	+2.6"	+1.7"	-0.2"	+0.6"	-0.5"	-0.2"	+0.6"	-0.5"
$f_{\beta}(\delta_r + \Delta\delta_r)$	-0.8	+0.5	+0.6	+1.7	+1.0	+0.3	+1.1	+0.1	+0.3	+1.1	+0.1
M_n	0.4	0.2	1.5	1.5	1.3	0.9	1.0	0.8	0.9	1.0	0.8

Резюмируя сказанное в параграфе, сделаны следующие выводы:

4. В случае полигонометрических ходов, прокладываемых вдоль водохранилищ, рек, целесообразно вводить поправки за боковую рефракцию с учетом не только горизонтальных градиентов температуры, но и градиентов влажности.

5. Можно рекомендовать, как это принято, проводить измерения горизонтальных углов в утренние и вечерние периоды спокойных изображений, или симметрично относительно периодов спокойных изображений.

4.6 посвящен выбору оптимальных методов учета боковой рефракции в условиях Центральной Азии.

В рассматриваемых условиях при большом числе ясных, солнечных дней резко выражены поля первого вида. И, как правило, нулевые горизонтальные градиенты температуры на высоте луча от визирной цели до теодолита наступают дважды в течение суток: утром (спустя примерно два часа после восхода) и вечером (примерно за два часа до захода Солнца). Поэтому в условиях Центральной Азии наиболее целесообразен учет боковой рефракции при азимутальных определениях на пунктах Лапласа методом профессора Н.В. Яковлева.

Иначе обстоит дело с учетом боковой рефракции в триангуляции.

Различают, как известно, полевые и городские триангуляционные сети. В городах Центральной Азии, городская триангуляция обычно развивается в условиях рефракционных полей второго вида. Поэтому в таких условиях можно или минимизировать боковую рефракцию, проводя наблюдения ночью, когда горизонтальные градиенты между окраиной города и центром минимальны, или вести учет боковой рефракции метеорологическим методом.

Полевая триангуляция создается в условиях полей первого вида. Если речь идет о минимизации влияния боковой рефракции, то лучше всего выполнять её симметричной программой угловых измерений.

Если же требуется более точный учет боковой рефракции, т.е. необходимо введение поправок, тогда следует рекомендовать геодезический метод Островского. К сожалению, этот метод требует знания вертикальной рефракции по всем направлениям.

Однако, как следует из наших разработок (глава 2), при развитой турбулентности вертикальная рефракция определяется очень просто - по колебаниям изображений визирных целей. Поэтому можно рекомендовать видоизмененный метод учета боковой рефракции, сочетающий флюктуационный метод определения вертикальной рефракции и метод Островского. Такая модернизация метода даст возможность широко применять его не только в условиях Центральной Азии, но и в любых климатических условиях.

Г л а в а 5. УЧЕТ АТМОСФЕРНЫХ ВЛИЯНИЙ НА СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

В 5.1 сделан анализ основных работ в области учета атмосферных влияний на светодальномерные измерения, и рассмотрены 2 группы ошибок, возникающие при измерении расстояний с помощью светодальномеров.

I. Приборные ошибки и субъективные ошибки наблюдателя. Это: ошибки определения частоты в моменты измерения длин, ошибки определения фазы, постоянных дальномера, ошибки центрирования приемопередатчика и отражателя, и др.

II. Ошибки, обусловленные влиянием внешних факторов, точнее, влиянием атмосферы.

Реальная атмосфера неоднородна и в каждой ее точке значения T , P , e — неодинаковые. Следовательно, показатель преломления, а значит, и скорость распространения ЭМВ вдоль трассы меняются. Это приводит к неравномерности (фазовым задержкам) и непрямолинейности распространения ЭМВ, которые детально рассмотрены в этом разделе.

Отмечены работы М. Т. Прилепина; А. Л. Островского, Дж. Саастамойнена, В. Хопке и другие.

Для перехода от длины пространственной траектории луча к длине замыкающей оптимальной признана формула

$$\Delta L_T = - \frac{K}{24 \cdot R_s^2} \cdot L^3 \quad (53)$$

После анализа большого числа работ поставлены следующие задачи:

1. усовершенствовать геодезический метод определения среднего интегрального значения показателя преломления воздуха — \bar{n} ;
2. исследовать закономерности действия рефракции на светодальномерные измерения в условиях Центральной Азии;
3. наметить пути дальнейшего повышения точности светодальномерных измерений.

В 5.2 впервые описывается влияние рефракции на светодальномерные измерения в условиях Центральной Азии. Получены среднесезонные значения вертикального градиента индекса показателя преломления dn/dh , вычислены поправки за рефракцию — ΔL_T .

Анализируя погрешности непрямолинейности распространения световых волн, отмечено: суточный ход N над различными подстилающими поверхностями колеблется в вегетационные периоды года до 11.5 единиц шестого знака N . Максимальные рефракционные ошибки светодальномерных измерений приходятся на летний сезон года. Так, при длине линии 5 км и средней

высоте визирного луча $h_{ср} = 5$ м над поливными полями поправка достигает 4.1 мм, с увеличением h они резко уменьшаются. Подстилающая поверхность в условиях Центральной Азии оказывает существенное влияние на величину вертикального градиента N и, соответственно, на величину рефракционных ошибок при линейных измерениях.

В 5.3 отмечены особенности атмосферных влияний на светодальномерные измерения в условиях Центральной Азии и приведены экспериментальные определения фазовых задержек в этих условиях. Они являются одним из основных источников ошибок светодальномерных измерений. Для исследования фазовых задержек были использованы круглосуточные взаимные одновременные наблюдения зенитных расстояний и метеозмерения.

Вначале были определены коэффициенты вертикальной рефракции K и K_n . Затем были найдены Δn_1 и Δn_2 - разности среднеинтегральных показателей преломления и показателей преломления, измеренных соответственно в одной и двух точках трассы, а также соответствующие фазовые задержки δL_n и ΔL_n . Вычисления сведены в таблицу 7. Анализируя таблицу, видим:

- 1) погрешности δL_n и ΔL_n существенные и далеко не пренебрегаемые.
- 2) они возрастают с увеличением разности $h_{ср} - h_0$, где $h_{ср}$ и h_0 - средняя высота луча над подстилающей поверхностью и средняя высота точек измерения метеопараметров. Сравнивая ΔL_n и δL_n , видим, что измерение метеопараметров не в одной, а в двух точках уменьшает фазовые задержки более чем в 1.4 раза.

Таблица 7

Результаты вычисления фазовых задержек

Стратификации атмосферы	в 1 - й точке			в 2 - й точке	
	n_1	m_c , мм	m_c / L	m_c , мм	m_c / L
1	2	3	4	5	6
$dT / dh < 0$	32	7.44	$2.29 \cdot 10^{-6}$	3.62	$1.14 \cdot 10^{-6}$
$dT / dh = 0$	12	3.16	$0.98 \cdot 10^{-6}$	1.33	$0.42 \cdot 10^{-6}$
$dT / dh > 0$	38	5.79	$1.79 \cdot 10^{-6}$	3.91	$1.23 \cdot 10^{-6}$

Из таблицы видно, что максимальные погрешности имеют место при неустойчивой стратификации температуры. Ночью погрешности уменьшаются примерно на 20 - 22%. В периоды спокойных изображений погрешности в условиях Центральной Азии уменьшаются в 2.4 - 2.7 раза по сравнению с неустойчивой стратификацией. Если метеозлементы измеряются не в двух, а в одной точке, то погрешности возрастают в среднем в 2 раза. Отмечено, что если измерения метеопараметров ведутся в двух точках, то пог-

решность n_1 не превышает 1:1 000 000 и носит случайный характер. Следовательно, в условиях равнинной местности метеорологический метод с измерением метеоданных в двух точках удовлетворяет большинству требований к точности светодальномерных измерений даже в условиях жаркого и сухого климата Центральной Азии.

В 5.4 рассмотрены геодезический и усовершенствованный геодезический методы определения \bar{n} воздуха при светодальномерных измерениях.

Среднее интегральное значение \bar{n} на трассе получим из выражения

$$\bar{n} = \frac{1}{L} \int_0^L n_1 \cdot dl . \quad (54)$$

или

$$\bar{n} = \frac{1}{L} \int_0^L \left[n_1 - \left(\frac{dn}{dh} \right) \cdot h_1 \right] \cdot dl . \quad (55)$$

Выразив n_1 через расстояние L и измеренный зенитный угол Z_1 , получим

$$h_1 = L \cdot \text{ctg } Z_1 . \quad (56)$$

Поэтому:

$$\bar{n} = \frac{1}{L} \int_0^L \left[n_1 - \frac{b}{L} \cdot L \cdot \text{ctg } Z_1 \right] \cdot dl . \quad (57)$$

После интегрирования, перехода к угловым секундам, получим:

$$\bar{n} = n_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{\rho} \text{ctg } Z_1 . \quad (58)$$

Формула (58) – рабочая формула геодезического метода. Один из его недостатков – замена неизвестного интегрального значения зенитного расстояния \bar{Z} измеренным в точке 1 – углом Z_1 . Как следствие, при $Z_1 = 90^\circ$ (горизонтальная трасса) задача определения \bar{n} вообще не решается. От этого недостатка можно избавиться, если знать среднее интегральное значение \bar{Z} на трассе и заменить в (58) Z_1 на \bar{Z} . До настоящего времени определить \bar{Z} для произвольной кривой распространения света не удавалось. Показано, как можно определить \bar{Z} , если реальную кривую заменить круговой кривой, близкой к реальной. Формула \bar{n} запишется:

$$\bar{n} = n_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{\rho} \text{ctg } Z_{1-2} . \quad (59)$$

В этом состоит усовершенствование метода в теоретическом отношении.

Кроме того, в соответствии с разработками (глава 2), вертикальная рефракция при развитой турбулентности может быть определена сравнительно просто – по измеренным колебаниям изображений, без взаимного

измерения зенитных расстояний. Это сокращает комплекс необходимых измерений (правда, только при неустойчивой стратификации атмосферы) и, таким образом, делает изначальный геодезический метод более приемлемым и реализуемым.

Так как n определяются в конечных точках линии, то можно определить два значения \bar{n} :

$$\bar{n}_1 = n_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{\rho} \operatorname{ctg} \bar{z}_{1-2} . \quad (60)$$

$$\bar{n}_2 = n_2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{\rho} \operatorname{ctg} \bar{z}_{2-1} . \quad (61)$$

За конечный результат принимаем

$$\bar{n} = \frac{\bar{n}_1 + \bar{n}_2}{2} . \quad (62)$$

Приведена формула фазовой задержки

$$\Delta L = - \frac{\Delta n}{n_{cp}} \cdot L . \quad (63)$$

где $\Delta n = \bar{n} - n_{cp}$ (64)

Так как $n_{cp} \approx 1$, то имеем еще более простую формулу $\Delta L = - \Delta n \cdot L$.

В 5.5 приведена точность усовершенствованного геодезического метода определения \bar{n} воздуха и фазовых задержек.

Для этого получена формула:

$$m^2 \Delta n = \frac{h^2}{4\rho^2 L^2} \cdot m_b^2 + \frac{b^2}{4\rho^2 L^2} \cdot m_h^2 + \frac{b^2}{4\rho^2 L^4} \cdot m_L^2 . \quad (65)$$

Третий член в правой части (65) мал и им можно пренебречь. Тогда, задаваясь $h = 1000$ м, $L = 10000$ м, $b = 60''$, $m_b = 1''$, $m_h = 1$ м, получим

$$m_{\Delta n} = 2.4 \cdot 10^{-7}$$

Обычный метод при таких же примерно условиях обеспечивал точность $m_{\Delta n} = 1 \cdot 10^{-6}$. Таким образом, имеем повышение точности приблизительно в 4 раза. В таблице 8 показано, как изменяется $m_{\Delta n}$ в зависимости от средней высоты луча h_1 .

Таблица 8

Средние квадратические ошибки определения n при разных средних высотах луча

h (м)	1000	500	250	100	50
$m_{\Delta n}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$	$1.2 \cdot 10^{-7}$	$0.62 \cdot 10^{-7}$	$0.28 \cdot 10^{-7}$	$0.18 \cdot 10^{-7}$

Расчеты показывают, что начиная с превышений $h \leq 500$ м усовершенствованный метод обеспечивает точность определения \bar{n} не грубее $1 \cdot 10^{-7}$. Это подтверждают результаты вычислений, приведенные в таблице 8.

Представлены экспериментальные данные проверки точности усовершенствованного геодезического метода. Экспериментальные измерения велись во всхолмленной местности на трех линиях. В каждый четный час в течении трех суток измерялись взаимные зенитные расстояния (по три приема, из которых среднее значение Z принималось как отдельное измерение), а также измерения метеозлементов.

Результаты вычислений показали, что точность предложенного усовершенствованного геодезического метода не грубее $2 \cdot 10^{-7}$.

В 5.6 — "Теоретическая основа турбулентного метода учета атмосферных влияний при светодальномерных измерениях".

Рассмотрена турбулентность как стремление атмосферы вернуться (под действием силы тяжести) к устойчивому равновесию.

Определено, как изменяются мгновенные градиенты N_c в зависимости от γ градиентов температуры воздуха.

γ , град/м	0.000	-0.0098	-0.0244	-0.0342
dn_c / dh , ед/км	-30.29	-21.66	-8.60	0.00

Как видим, с увеличением по абсолютной величине градиентов температуры значения N_c на некоторой постоянной высоте растут (так как градиенты dn_c / dh уменьшаются по абсолютной величине) и мгновенным нулевым аномальным градиентам температуры будут соответствовать максимальные мгновенные значения длин линий L . Отсюда ясно, что турбулентный метод может быть реализован с помощью высокоточного светодальномера, который оснащен устройством, выделяющим мгновенные максимальные значения длин.

В параграфе отмечено, что: так как ни дисперсионный, ни турбулентный методы пока не нашли приемлемой для полевых работ инструментальной реализации, то наиболее подходящим, не только для условий Центральной Азии, но и для средних широт является усовершенствованный геодезический метод определения среднеинтегрального значения показателя преломления воздуха и фазовых задержек при светодальномерных измерениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований определены для условий Центральной Азии закономерности действия атмосферных влияний на геодезические измерения. Найден пути минимизации этих влияний и разработаны эффективные и точные

методы их учета. Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Впервые дана обобщенная теория непрямолинейности распространения (рефракции) электромагнитных волн оптического диапазона в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также неравномерности распространения (фазовых задержек) этих волн.

2. Выявлены закономерности распределения метеопараметров в условиях Центральной Азии. Важнейшей особенностью стратификации температуры в жарком климате является наличие вертикальных аномальных градиентов γ_a , больших по модулю, чем **0.0244 град/м** до эквивалентных высот **25 м**. Такие аномальные градиенты температуры присутствуют на протяжении значительной части дневного периода и приводят к отрицательным значениям рефракции. Положительная рефракция имеет место ночью, а также утром (не более **1.5** часов после восхода), и вечером (начиная с **1.5** часа до захода Солнца).

В условиях Центральной Азии при длинах сторон до **4 км** и эквивалентных высотах луча **10 ... 15 м** вертикальная рефракция изменяется в пределах от **-25"** до **+1'10"**.

3. Разработан для исключения вертикальной рефракции при неустойчивой стратификации атмосферы флюктуационный метод, открывающий широкие возможности надежного учета рефракции при развитой турбулентности воздушных масс. Метод не требует производства взаимных одновременных наблюдений, знания эквивалентных высот, достаточно определять основные метеопараметры в одной - двух точках и амплитуду колебаний изображений визирных целей. Точность учета вертикальной рефракции предложенным методом - не грубее **1.5"** при длинах сторон до **4 км**.

4. Предложен метод учета вертикальной рефракции для устойчивой стратификации атмосферы, основанный на взаимных одновременных измерениях зенитных расстояний с вычислением среднеинтегральных значений зенитных углов. В условиях Центральной Азии метод позволяет определять превышения с точностью геометрического нивелирования **III класса** при длинах линий до **4 км**. Метод пригоден и для неустойчивой стратификации атмосферы.

5. Определено, что в условиях Центральной Азии нивелирная рефракция достигает значительно больших величин, чем в умеренном климате. Если в средних широтах аномальная дифференциальная рефракция на станции достигает **0.3 ... 0.4 мм**, то в условиях жаркого климата она равна **0.7 ... 1.0 мм**. Особенно велика рефракция при инверсионном строении

трехметрового слоя атмосферы. Поэтому при инверсии не следует выполнять высокоточное геометрическое нивелирование, или, выполняя, нужно вводить поправки за рефракцию метеорологическим методом.

6. Впервые выявлены закономерности действия нивелирной рефракции в условиях Центральной Азии над поливными территориями в вегетационный период сельскохозяйственных культур:

во-первых, почти на протяжении всего светлого периода суток имеют место положительные вертикальные градиенты температуры и, следовательно, отрицательные рефракции, достигающие **0.9 мм** на станции;

во-вторых, вертикальные градиенты влажности на протяжении суток отрицательны и столь велики, особенно в нижнем метровом слое, что дают существенную добавку к поправке за рефракцию **до 0.1...0.2 мм**.

7. Показано, что наиболее точным и простым методом учета нивелирной рефракции является вариант флюктуационного метода, при котором биссектор нивелира наводится на верхнее положение колеблющегося штриха нивелирной рейки. Получена формула определения размаха колебаний штрихов рейки. На ее основе определяется возможность учета нивелирной рефракции вышеуказанным вариантом метода при разных длинах плеч. При больших размахах колебаний следует применять второй вариант метода, измеряя амплитуды колебаний изображений штрихов реек.

При инверсионном строении атмосферы нивелирную рефракцию следует учитывать метеорологическим методом с определением градиентов температуры.

Точность учета нивелирной рефракции флюктуационным методом в условиях Центральной Азии составляет **0.05...0.08 мм**, метеорологическим — **в 2...4** раза грубее.

8. Определено впервые в условиях Центральной Азии, что на границе искусственное сооружение — вода возникают рефракционные поля второго вида, не меняющие в течение суток направление горизонтального градиента температуры.

Впервые установлено, что при проложении полигонометрических ходов по берегам водохранилищ учет рефракции необходимо вести с использованием не только температурных, но и влажностных градиентов. Величины поправок за рефракцию в этих условиях достигают **10"**, причем влажностная составляющая равна **10...15 %**.

9. Показано, что при азимутальных определениях на пунктах Лапласа учет боковой рефракции в условиях Центральной Азии целесообразно вести методом профессора Н. В. Яковлева. В триангуляционных и полигонометрических сетях учет рефракции следует вести модернизированным нами мето-

дом профессора А. Л. Островского. Погрешность учета боковой рефракции указанными методами не превышает **10 %**.

10. Доказано, что одним из основных источников погрешностей светодальномерных измерений является неравномерность распространения световых волн (фазовые задержки). Если метеорологические измерения ведутся по концам линии на высотах **1.5 м**, а средняя высота луча над подстилающей поверхностью составляет **20 м**, то уже в таких, обычных условиях местности, фазовые задержки в ранние утренние часы могут достигать **53 мм** для линии длиной **10 км**.

11. Предложен усовершенствованный метод определения среднеинтегрального значения показателя преломления воздуха и фазовых задержек. Усовершенствование заключается в переходе от точечных значений зенитных расстояний, измеряемых по концам линии, к среднеинтегральным значениям Z . Это повысило точность определения среднеинтегрального значения показателя преломления с $1 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-7}$. Кроме того, при неустойчивой стратификации атмосферы, применяя флюктуационный метод учета вертикальной рефракции, можно значительно сократить объемы угловых измерений.

Таким образом, в настоящей работе, по нашему мнению, в значительной мере решена проблема учета атмосферных влияний на геодезические измерения в условиях Центральной Азии.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Суюнов А. С. (Монография). Об учете вертикальной рефракции при геодезических измерениях в условиях Центральной Азии. - К., 1995, 75с. - Рукопись деп. в ГНТБ Украины, № 898 - Ук 95.
2. Островский А. Л., Глустьяк Б. Т., Суюнов А. С. Об учете вертикальной рефракции в условиях Средней Азии. - Геодезия и картография. М., 1987, № 5. С. 19 - 21.
3. Суюнов А. С., Власенко С. Г., Колгунов В. М. Закономерности действия вертикальной рефракции в условиях Средней Азии. - Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов, 1988, Вып. 47. С. 61 - 66.
4. Островский А. Л., Суюнов А. С. Турбулентный метод учета вертикальной рефракции в условиях Средней Азии. - Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов, 1989, вып. 49. С. 112 - 120.
5. Суюнов А. С. Учет вертикальной рефракции в двустороннем тригонометрическом нивелировании в условиях Средней Азии. - Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов, 1989, вып. 50. С. 96-99.
6. Суюнов А. С. Выявление и учет боковой рефракции при угловых измерениях в условиях Центральной Азии - Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофо-

сьемка, М., 1995, N 4.

7. Островский А. Л., Суянов А. С., Власенко С. Г. Тригонометрическое нивелирование с вычислением среднеинтегральных значений зенитных расстояний. - Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов. 1995, N 56.

8. Суянов А. С., Учет атмосферных влияний при светодальномерных измерениях в условиях Центральной Азии. - Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Львов. 1995, N 56.

9. Suyunov A., Vlasenko S. Uwzględnienie bocznej refrakcji w poligonometrii w warunkach goracego klimatu. - Budownictwo i inzynieria srodowiska. Z - 22. Problemy budownictwa i inzynierii srodowiska. Rzeszow, 1995. 4 s.

10. Суянов А. С., Суянов С. С., Абдуваитов, А. А. (Патент). Способ учета рефракции при тригонометрическом нивелировании. - Ўз. Рес. Фан ва техника Давлат Кўмитаси. - Давлат патент идораси, расмий аҳборотномаси. Тошкент, 1994. 3-сон., N 2064.

11. Суянов А. С., Тлустяк Б. Т. О рефракционной систематической погрешности геометрического нивелирования на затяжных уклонах в условиях Средней Азии. К., 1986. 8 с. - Рукопись деп. в УкрНИИТИ. Ук. - N 2452.

12. Суянов А. С. Эффективность метеорологического метода вертикальной рефракции в условиях Средней Азии. - К., 1987. 8 с. - Рукопись деп. в УкрНИИТИ. Ук. N 2247.

13. Суянов А. С. Исследование сезонного и суточного хода индекса показателя преломления света над различными подстилающими поверхностями в условиях Средней Азии. К., 1987. 10 с. - Рукопись деп. в Укр. НИИТИ. Ук. - N 1583.

14. Островский А. Л., Власенко С. Г., Суянов А. С. Опыт учета вертикальной рефракции при тригонометрическом нивелировании в условиях Средней Азии без вычисления коэффициентов или углов рефракции. - К., 1988. 6 с. - Рукопись деп. в Укр. НИИТИ. Ук. 88, N 1667.

15. Суянов А. С. Выбор оптимальных методов учета боковой рефракции для условий Центральной Азии. - К., 1994, 13 с. - Рукопись деп. в ГНТБ Украины, N 920 - Ук 94.

16. Ostrovsky A., Suyunov A. Turbulence method of calculation of refraction at the results of lightdistance measurements in geodynamical polygons. - Abstracts. Yaremcha, 1994. P. 33 - 34.

17. Suyunov A., Vlasenko S. Earth refraction and geodynamical research in south latitudes. - Abstracts. Yaremcha, 1994. P. 45 - 46.

18. Суянов А. С. Земная рефракция в условиях Центральной Азии. - В сб.: Совершенствование строительства в условиях Узбекистана. Тез. докл. областной семинар-совещания. Самарканд, 1992. С. 27-28.

13/10/92
В. Виткин

SUYUNOV A.S. - Problem of accounting of the atmospheric influences on the geodetic measurements in Central Asia conditions.

Doctor of Engineering Dissertation. Geodesy (05.24.01).

Kiev State Technical University of Construction and Architecture.

The ideas described in 16 scientific papers and one monography are defended: some generalities of refraction action on the geodetic measurements, generalized theory of irrectilinear and irregular extention of electromagnetic waves, evaluated ways of minimization of the atmospheric influences, developed effective and precise methods of the refraction accounting under Central Asia conditions.

СУЮНОВ А.С. - Проблема учета атмосферных влияний на геодезические измерения в условиях Центральной Азии.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.24.01 - геодезия.

Киевский Государственный технический университет строительства и архитектуры, Киев, 1995.

Защищаются изложенные в 16 научных работах и одной монографии: определенные закономерности действия рефракции на геодезические измерения; обобщенная теория непрямолинейности и неравномерности распространения электромагнитных волн; найденные пути минимизации атмосферных влияний; разработанные эффективные и точные методы учета рефракции в условиях Центральной Азии.

Ключевые слова: рефракция, методы учета, метеорологические измерения, условия Центральной Азии.

СУЮНОВ А.С. - Проблема врахування атмосферних впливів на геодезичні виміри в умовах Центральної Азії.

Дисертація на здобування вченого ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.24.01 - геодезія.

Київський Державний університет будівництва і архітектури, Київ, 1995.

Захищаються викладені в 16 наукових роботах і одній монографії:

визначені закономірності дії рефракції на геодезичні виміри; узагальнена теорія непрямолінійності і нерівномірності розповсюдження електромагнітних хвиль; знайдені шляхи мінімізації атмосферних впливів; розроблені ефективні і точні методи врахування рефракції в умовах Центральної Азії.

Ключові слова: рефракція, методи врахування, метеорологічні виміри, умови Центральної Азії.

444412

Бесплатно

АВ 33.178

БД 10106 Подписано к печати 25.06.95 г. Формат 60x84/16 . Объем 2 печ
лист, Зак. 861. Тир. 100 . Бесплатно.

Отпечатано на ротапринте в Самаркандском Государственном архитектурно
- строительном институте имени МирзоУлугбека г.Самарканд,ул.Лялизар,70