

Вертикальная рефракция света в приземном слое атмосферы: традиционные проблемы определения рефракции и новые технические достижения

В.П. Савиных, И.Ю. Васютинский, Д.В. Дементьев

Практически все используемые методы определения рефракции основаны на теории, созданной Ньютоном. Исследования Ньютона, Эйлера, Ориани, Бернулли и др. сводились к определению геометрического пути луча. Однако ввиду многообразия условий прохождения света в приземном слое атмосферы не представляется возможным с достаточной достоверностью определить рефракцию. Проведён анализ апробированных научной общественностью современных методов и средств эффективного определения рефракции, которые позволяют выполнять оптические измерения с инструментальной точностью используемого прибора.

Ключевые слова: градиент температуры, градиент показателя преломления воздуха, пульсации показателя преломления воздуха, угол прихода пучка лазерного излучения, неустойчивая температурная стратификация атмосферы, статистические характеристики волны, турбулентность, скорость ветра, радиус световой кривой, коэффициент рефракции, приземный слой атмосферы

PACS numbers: 42.15.-i, 42.25.Bs, 42.68.Bz

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.11.039100>

Содержание

1. Введение (926).

2. Вертикальная рефракция и её определение классическими методами (927).

2.1. Метеорологический метод определения вертикальной рефракции. 2.2. Определение вертикальной рефракции на основе измерения взаимных зенитных расстояний. 2.3. Метод М.М. Извекова. 2.4. Метод рефракционного базиса. Метод геодезической службы рефракции. 2.5. Метод учёта рефракции в периоды спокойных изображений. 2.6. Дисперсионный метод определения рефракции.

3. Радиофизические (турбулентные) методы определения рефракции (934).

3.1. Основы теории метода определения рефракции по флуктуациям параметров световой волны. 3.2. Теоретические основы радиофизических (турбулентных) методов определения рефракции по колебаниям светового пучка. 3.3. Экспериментальные исследования метода определения рефракции при безразличной температурной стратификации атмосферы по флуктуациям угла прихода. 3.4. Экспериментальные исследования турбулентного метода определения рефракции при неустойчивой температурной стратификации атмосферы.

4. Заключение (940).

Список литературы (941).

1. Введение

Ещё с глубокой древности траектория распространения света отождествлялась с прямой линией — фундаментальным понятием геометрии. Физическим эталоном прямой линии являлся луч света. Однако свет распространяется прямолинейно только в однородной изотропной среде. Большинство оптических наблюдений проводится в атмосфере, которая, как всякая реальная среда, неоднородна. При переходе из одной неоднородности в другую лучи света (в общем случае) меняют направление. Под *рефракцией* (позднелат. *refractio* — преломление) понимают отклонение луча света от прямолинейного направления распространения. О рефракции было известно ещё в глубокой древности. Первые письменные упоминания о рефракции света относятся к I в. нашей эры (Клеомед *Циклическая теория метеоров*). Несколько позднее (II век н.э.) Птолемей указывал, что рефракция должна отсутствовать для лучей, идущих от объекта, находящегося в зените, и должна увеличиваться по мере того, как объект приближается к линии горизонта (т.е. при увеличении зенитного расстояния).

В XI в. арабский учёный Ибн-Аль-Хайтан обратил внимание на то, что вследствие рефракции света длительность дневной части суток увеличивается. Датский астроном Тихо Браге, используя результаты астрономических наблюдений, составил первые таблицы количественных значений рефракции.

В.П. Савиных, И.Ю. Васютинский, Д.В. Дементьев (*)

Московский государственный университет геодезии и картографии,
Гороховский пер. 4, 105064 Москва, Российская Федерация
E-mail: (*) ddv@gis2000.ru

Статья поступила 10 мая 2021 г.,
после доработки 10 ноября 2021 г.

Теорию рефракции впервые разработал знаменитый немецкий учёный Иоганн Кеплер. Во времена Кеплера воздух считался невесомым. Используя закон преломления света на границе двух сред, Кеплер вычислил угол рефракции лишь для луча света, испытывающего преломление на верхней границе воздушного слоя. В самой атмосфере он принял прямолинейное распространение света. Поэтому Кеплер получил значение максимального угла рефракции для объекта, находящегося у горизонта, на $4'$ меньше, чем следовало ожидать на основе известных в то время экспериментальных данных.

Наибольший вклад в теорию рефракции внёс великий английский учёный Исаак Ньютон [1]. Практически все используемые в настоящее время классические методы определения рефракции основаны на теории Ньютона. Согласно этой теории для оценки величины рефракции, которая зависит от градиента показателя преломления воздуха, должны быть известны градиенты метеорологических величин (температуры, давления, влажности воздуха). Определение градиентов производится непосредственным или косвенным их измерением в атмосфере. В 1935 г. советский учёный А.Н. Крылов воспроизвёл выводы и доказательства великого учёного и изложил их в работе *Ньютонова теория астрономической рефракции* [1], где писал, что если сравнить теорию рефракции Ньютона с современными теориями, "то сразу можно будет заметить, насколько просто и естественно ньютоновское изложение и как мало по существу к нему за 240 лет прибавлено". Это утверждение справедливо и в настоящее время.

Теоретические исследования Ньютона, Эйлера, Ориани, Бернулли и др. сводились к тому, чтобы определить геометрический путь луча. В действительности атмосфера всегда находится в турбулентном движении и её оптические свойства всё время изменяются, однако указанные обстоятельства не учитываются при определении рефракции классическими методами. Это является главной причиной того, что, по мнению многих специалистов, "не случайно многолетние исследования не привели к окончательному решению поставленных задач, хотя вертикальная рефракция изучается более 300 лет" [2]. При использовании классических методов определения рефракции предполагается по умолчанию, что в момент измерений атмосфера находится в статически устойчивом состоянии. Из-за несоответствия принятых и реальных условий данное обстоятельство является причиной того, что рефракционные ошибки в 10–15 раз превышают инструментальные ошибки используемых приборов [2].

Вертикальная рефракция вносит существенные искажения в результаты угловых измерений, выполняемых с помощью оптических приборов в приземном слое атмосферы. Так как большинство геодезических и астрономических измерений проводится с помощью оптических приборов, установленных на земной поверхности, поиск путей эффективного определения рефракции и её учёта весьма актуален. Актуальность исследований рефракции связана с необходимостью решения различного рода траекторных задач распространения электромагнитных (ЭМ) волн в атмосфере в таких областях науки и техники, как связь, радиолокация, геодезия, навигация, астрономия, а также для решения обратных задач, связанных с определением высотных профилей коэффициента преломления, температуры, давления и влажности воздуха по измерению рефракции.

Считается, что теория рефракции является одной из труднейших проблем. Этой проблемой в настоящее время занимаются многие исследователи как в России, так и за рубежом. Так, например, во Львовском политехническом институте было предложено несколько методов определения рефракции и опубликовано свыше 1000 работ по данной тематике [3]. Тем не менее прогресс в изучении рефракции крайне незначителен. Только в последние годы в связи с развитием методов исследования оптики турбулентной атмосферы были разработаны новые радиофизические (турбулентные) методы точного определения рефракции [4–24]. Как отмечается в работах Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА) СО РАН, случайная рефракция, в отличие от регулярной, описывается не геометрической оптикой, а в общем случае теорией распространения волн в турбулентных средах, которая учитывает дифракцию. Методы, построенные на такой базе, называются радиофизическими. Несколько позднее А.Л. Островский предложил называть их турбулентными, так как при определении рефракции этими методами учитываются колебания визирного луча, вызванные турбулентностью [2, 3].

На создание указанных методов основополагающее влияние оказали работы по теории распространения волн в турбулентных средах, выполненные в ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН и в Институте физики атмосферы (ИФА) им. А.М. Обухова РАН [25–32]. Эффективность разработанной теории подтверждена результатами многочисленных экспериментов, выполненных с помощью роботизированных тахеометров в разных регионах в различные времена года.

Целью настоящей статьи являются анализ и выбор апробированных научной общественностью методов и средств эффективного определения рефракции, которые позволяют проводить оптические измерения в реальных условиях, т.е. в турбулентной атмосфере, с инструментальной точностью выпускаемых геодезических прецизионных приборов.

2. Вертикальная рефракция и её определение классическими методами

Различают несколько видов рефракции. Принятая в настоящее время международная терминология предложена Г. Телеки [33]:

- "астрономическая рефракция: объект вне атмосферы Земли, в большинстве случаев на больших расстояниях, а наблюдатель на поверхности Земли (рис. 1);
- атмосферная рефракция: объект в атмосфере Земли, а наблюдатель на поверхности Земли;
- земная рефракция: объект и наблюдатель на поверхности Земли (рис. 2);
- фотограмметрическая рефракция: объект на поверхности Земли, а наблюдатель в атмосфере Земли;
- космическая рефракция: объект на поверхности Земли, а наблюдатель вне атмосферы Земли".

Обычно земную рефракцию называют геодезической (см. рис. 2).

Остальные виды рефракции относятся к более детальной классификации астрономической рефракции, которую предлагается различать в зависимости от принятых моделей атмосферы на базе заложенных в основу вычислений либо от атмосферных условий, при которых выполняются наблюдения [34].

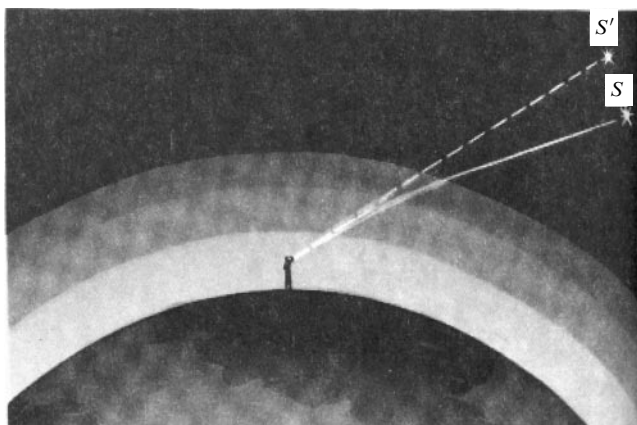


Рис. 1. Искривление луча света вследствие рефракции.

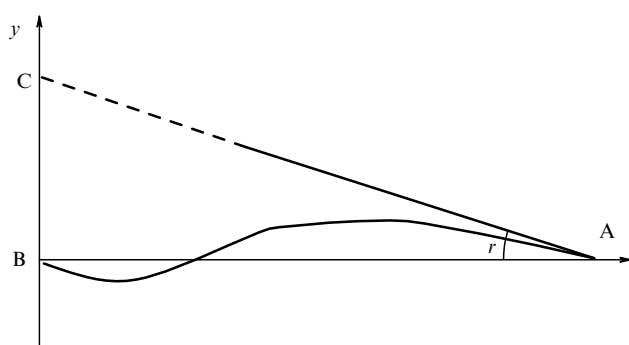


Рис. 2. Угол рефракции r между касательной AC к линии AB (к траектории луча) в точке приёма A и хордой, соединяющей точки A и B.

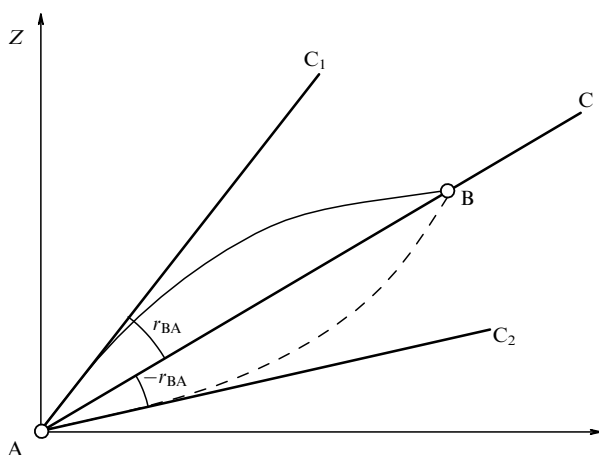


Рис. 3. Влияние положительной r_{BA} и отрицательной $-r_{BA}$ вертикальной рефракции на измеренные зенитные расстояния.

Углом рефракции при наземных наблюдениях является угол r между направлениями на видимое и действительное положение наблюдаемого предмета (рис. 3), т.е. угол r между касательной AC_1 (AC_2) к линии AB в точке приёма и хордой, соединяющей приёмник света A с его источником B.

Когда преломляющие свойства среды меняются постепенно, без резких скачков, световой луч искривляется плавно и его траектория представляет собой пространственную кривую двойкой кривизны.

Если спроецировать пространственную кривую (траекторию света) на вертикальную и горизонтальную плоскости, то получим вертикальную и горизонтальную составляющие этой кривой.

Отклонение луча света в вертикальной плоскости носит название вертикальной рефракции, а в горизонтальной — боковой рефракции. При наблюдениях на наземных трассах вертикальная рефракция искажает вертикальные углы, а боковая — горизонтальные.

При оценке рефракции необходимо принимать во внимание, что атмосфера неоднородна: её плотность изменяется с высотой и в значительно меньшей степени в горизонтальном направлении.

Поэтому боковая рефракция обычно в 3–40 раз меньше вертикальной [35]. Когда проекция световой кривой на вертикальную плоскость направлена выпуклостью вверх, вертикальная рефракция положительна (см. рис. 3), а если световая кривая направлена выпуклостью вниз, то рефракция отрицательна. В течение суток знак и величина рефракции для одного и того же направления могут изменяться.

Радиус кривизны ρ светового пучка в точке, отклоняющегося вследствие вертикальной рефракции, определяется как [2]

$$\rho = -\frac{n}{dn/dh \sin i}, \quad (1)$$

где n — показатель преломления воздуха для длины волны λ , dn/dh — называемый вектором рефракции градиент показателя преломления на высоте h прохождения светового пучка, характеризующий быстроту изменения показателя преломления с изменением высоты, i — угол падения лучей (для горизонтальных трасс $i \approx 90^\circ$).

Для практических расчётов вертикального градиента показателя преломления воздуха dn/dh обычно используется формула [2]

$$\frac{dn}{dh} = -\frac{78,85P}{T^2} 10^{-5} \left(0,0342 + \frac{dT}{dh} \right), \quad (2)$$

в которой температуру T следует выражать в градусах Кельвина, градиент температуры dT/dh — в единицах $[K \cdot m^{-1}]$, а давление P — в мбар. Знак минус в (2) означает, что показатель преломления уменьшается с увеличением высоты.

Для характеристики вертикальной рефракции часто используют такое понятие, как точечный коэффициент рефракции k , характеризующий отношение радиуса Земли R_E к радиусу кривизны ρ рефракционной кривой в конкретной точке

$$k = \frac{R_E}{\rho}, \quad (3)$$

а для вычисления угла вертикальной рефракции r используют приближённую формулу

$$r = \frac{kL}{2R_E}, \quad (4)$$

где L — расстояние между источником и приёмником, считая по дуге земной сферы.

Ошибки, обусловленные рефракцией ("ошибки за рефракцию" — выражение, принятое в геодезической литературе), в приземном слое атмосферы особенно возрастают при уменьшении высоты визирного луча. Например, в 1977 г. Э. Хюбнер (E. Hübner) в солнечные дни

наблюдал коэффициенты рефракции в диапазоне от -8 до 16 [36] при высоте визирного луча порядка 50 см, что соответствует отклонению луча в вертикальной плоскости от $-129,6''$ до $259,2''$ на каждый километр. Аналогичные результаты получил П.В. Ангус-Леппан (P.V. Angus-Leppan) [37].

Градиент температуры находят из соотношения

$$\frac{dT}{dh} \approx \frac{\Delta T}{\Delta h}, \quad (5)$$

где ΔT и Δh — разности температуры и высот установки датчиков температуры.

Различные авторы предлагают свои формулы для вычисления рефракции, основанные на различных моделях атмосферы для определения вертикального градиента температуры и показателя преломления воздуха [38–45]. При их использовании вносятся дополнительные искажения в определяемые величины, так как любая модель атмосферы является только приближением к реальной атмосфере, оптические свойства которой быстро изменяются. В то же время для точного определения рефракции требуется наличие информации о метеорологических элементах во многих точках траектории луча. Такие измерения дорогостоящи и практически невозможны, в связи с чем в полевых условиях ограничиваются измерениями в одной-двух точках трассы. По этой причине поиск средств и методов эффективного определения и учёта рефракции ведётся на протяжении многих лет. Однако, как утверждает О.А. Можухин, "проблема учёта рефракции в геодезических измерениях не получила даже удовлетворительного практического решения" [46].

2.1. Метеорологический метод определения вертикальной рефракции

Одним из наиболее известных методов определения рефракции является метеорологический, поэтому рассмотрим его более подробно. Метеорологический метод, как правило, применяется при научных исследованиях. Впервые метод определения рефракции по измерениям метеорологических элементов предложил В.Я. Струве [47] в 1843 г., выведя эмпирическую зависимость коэффициента рефракции k от температуры T , давления воздуха P и высоты визирного луча над поверхностью земли h , но в ней не учитывались значения градиентов метеорологических величин, на что обратил внимание Н.Я. Цингер [48] в 1873 г. Значительно позднее в работе [44] было предложено вычислять градиент температуры на основе измерений разности температуры воздуха на высоте 2 м и на "высоте шероховатости" подстилающей поверхности. Полученные данные предлагается затем использовать для вычисления значения среднего вертикального градиента температуры и рефракции для всей трассы. В развитие этой работы рекомендуется [44, 45] определять средний для трассы вертикальный градиент температуры $\bar{\gamma}$ на основе градиентных измерений γ_1 на высоте 1 м, используя эмпирическую формулу

$$\bar{\gamma} = \frac{a\gamma_1^{0,2}}{h_e}, \quad (6)$$

где a — коэффициент, найденный экспериментально, h_e — эквивалентная высота трассы.

Другие исследователи использовали ещё более сложный подход к решению данной проблемы [42], а именно, для повышения объективности условий оценки предлагают учитывать по мере возможности существенно большее многообразие факторов, влияющих на траекторию распространения электромагнитных волн в атмосфере.

Следует отметить, что в работе [49] предложена строгая формула для вычисления точечного коэффициента вертикальной рефракции k с использованием градиента температуры dT/dh , а также давления P и температуры T воздуха:

$$k = 502,4 \frac{P}{T^2} \left(0,0342 + \frac{dT}{dh} \right). \quad (7)$$

С помощью этой формулы можно достаточно точно определить коэффициент рефракции для однородной атмосферы.

В действительности атмосфера неоднородна, поэтому вычисление рефракции по результатам измерений метеорологических элементов в одной точке для всей трассы может привести к значительным искажениям получаемых данных.

Значительный интерес вызывают работы ИОА СО РАН [10–14], в которых были применены методы программной коррекции случайной рефракции на основе использования метеоданных. При этом принималась во внимание температурная стратификация атмосферы. При исследованиях были выделены различные условия неустойчивости атмосферы, влияющие на распространение оптического излучения. Исследования проводились с целью развития методов управления мощной землеройной техникой (при планировании протяжённых поверхностей для аэродромов, в сельском хозяйстве, мелиорации, строительстве) с использованием лазерных опорных систем (ЛОС), задающих направления или поверхность. В этих работах представлены результаты экспериментов на протяжённых атмосферных трассах. В работе [11] предлагается два варианта учёта рефракции при работе ЛОС. В первом варианте предлагается алгоритм программного изменения положения оси пучка посредством введения экспрессных метеоданных. Второй вариант предусматривает адаптивную коррекцию искажений посредством мгновенного отслеживания специальных опорных источников [14]. Как отмечают сами авторы упомянутых работ, сложность реализации первого варианта заключается в том, что полученные данные "могут служить лишь оценкой возможной величины дисперсии случайной компоненты" [11], которая быстро изменяется на значительную величину. Кроме того, рефракция лазерного излучения на коротких земных трассах имеет характерные особенности и нуждается в дальнейшем детальном изучении [13].

Сложность реализации метеорологического метода введения поправок за рефракцию подтверждается и в более поздней работе на аналогичную тему [50], а также тем, что до сих пор не удалось внедрить этот метод при использовании лазерных систем типа СКП и САУЛ, которые выпускались в СССР для вертикальной планировки аэродромов, рисовых чеков и т.д., а также и в настоящее время при применении новейших серийно выпускаемых подобных устройств типа LEICA iCON grade 2D (Швейцария) и т.п. [51]. Эти новейшие швейцарские лазерные системы широко используются, например,

для автоматизации контроля асфальтовых покрытий с точностью порядка 1 мм. Таким образом, проблема введения поправок за рефракцию при выполнении подобных работ весьма актуальна. Однако до сих пор для уменьшения влияния рефракции рекомендуют выполнять работы только короткими лучами — не более 50 м. Последнее объясняется тем, что реальная атмосфера неоднородна и поэтому вычисление рефракции по результатам измерений метеорологических элементов в одной точке для всей трассы может привести к значительным искажениям получаемых данных. Согласно [52], для трасс, проходящих в приземном слое воздуха на высотах 2–5 м, нельзя получить исчерпывающее выражение поправки, обусловленной рефракцией, выведенное теоретически или найденное эмпирически. Изменение коэффициента рефракции в течение дня в этом случае находится в широком диапазоне — от 4,28 до –4,40 и большей частью имеет знак минус.

Подобные методы коррекции рефракции с помощью метеоданных пытаются использовать на протяжении многих десятков лет [2, 3, 35, 38–49, 52–66]. Прежде всего практически все исследователи отмечают сложность реализации метеорологических методов определения рефракции. Это связано с тем, что для оценки рефракции с точностью 1" на трассе протяжённостью 1 км необходимо определять вертикальный градиент температуры с точностью $0,01\text{ }^{\circ}\text{C м}^{-1}$ [42]. В реальных условиях точность измерений градиента температуры порядка $0,01\text{ }^{\circ}\text{C м}^{-1}$ практически недостижима, так как температурное поле неоднородно и в приземном слое наблюдаются пульсации температуры, которые могут достигать $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в каждой точке поля [26]. Кроме того, технически достаточно сложно оценить температуру для всей трассы с точностью в несколько сотых градуса. Известно, что нередко вертикальный градиент температуры воздуха может резко изменяться, так как не является непрерывной функцией высоты, а изменяется скачком на границах слоёв [2, 52–54], поэтому метеорологические методы учёта недостаточно эффективны. Г. Бахнерт (G. Bahnert) в работе [64] утверждает, что метеорологические методы определения коэффициента рефракции дают менее точные значения k , чем геодезические. Делается вывод о нецелесообразности введения метеорологических поправок за рефракцию [65].

Таким образом, большинство исследователей отмечает несоответствие истинного и вычисленного значений коэффициента вертикальной рефракции по данным метеорологических измерений, поэтому метеорологические методы определения поправок на рефракцию не находят широкого практического применения при выполнении оптических наблюдений в приземном слое атмосферы.

2.2. Определение вертикальной рефракции на основе измерения взаимных зенитных расстояний

При выполнении практических работ наиболее часто используется метод, согласно которому коэффициент рефракции k может быть найден с помощью одновременных измерений прямого, z_1 , и обратного, z_2 , зенитных расстояний [2, 67, 68]:

$$k = 1 - \left\{ \frac{R_E}{L\rho''} [(z_1 + z_2) - 180^{\circ}] + \frac{R_E}{L^2} [(l_1 + l_2) - (i_1 + i_2)] \right\}, \quad (8)$$

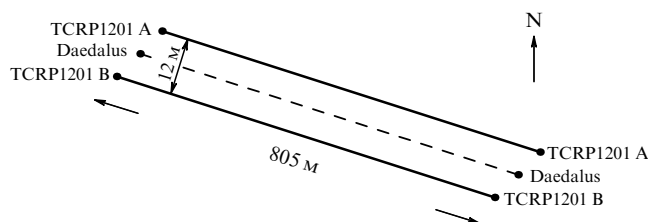


Рис. 4. Схема установки роботизированных электронных тахеометров на концах трёх параллельных трасс [69].

где i_1 , l_1 и i_2 , l_2 — соответственно высоты прибора и визирной цели, установленных в точках 1 и 2 на концах трассы, R_E — радиус Земли, L — расстояние между точками, $\rho'' = 206265''$.

Как показали исследования, метод не обеспечивает высокой точности измерений, так как значения k варьируются не только от направления к направлению, но и с течением времени в широких пределах.

В итоге выполненного анализа значительного объёма результатов тригонометрического нивелирования [68] сделан вывод о том, что "использование оценки разности превышений "прямо–обратно" может служить только в справочных целях для выявления грубых ошибок (промахов)". Однако, несмотря на такие важные практические выводы, сделанные в указанной работе, этот метод достаточно широко используется ввиду простоты его реализации. Особый интерес данный метод начал вызывать с появлением роботизированных электронных тахеометров, которые осуществляют автоматический поиск цели и наведение на неё [69].

С целью проверки точности рассматриваемого метода были выполнены синхронные измерения взаимных зенитных расстояний на трёх однородных параллельно расположенных трассах длиной 805 м в 100 км южнее Гамбурга (Германия). Расстояние между смежными параллельными трассами составляло 6 м (рис. 4). При этом предполагалось, что благодаря синхронности измерений с помощью тахеометров, установленных на концах трассы, проверялась возможность уменьшить ошибки определения рефракции, которые вызваны её быстрыми хаотическими изменениями. Исследования проводились одновременно на трёх трассах как в солнечную, так и в пасмурную погоду в течение трёх дней. На концах двух внешних трасс были установлены высокоточные роботизированные электронные тахеометры Leica TCRP1201 (рис. 5), имеющие инструментальную точность угловых измерений 1". На средней трассе на концах были установлены устройства Daedalus, имеющие такую же инструментальную точность. В общей сложности использовалось шесть приборов. Рядом с каждым тахеометром на горизонтальной пластине был закреплён угловой отражатель на высоте инструмента.

На рисунке 6 показан график дневного хода угла рефракции, полученный данным методом. Как показали результаты исследований, точность определения рефракции с помощью двух синхронно измеряющих электронных тахеометров несколько повышается, хотя и остаётся значительно меньшей инструментальной точности используемых приборов.

В ясную погоду амплитуда флуктуаций угла рефракции была больше, чем в пасмурную. Рассматриваемый метод не обеспечивает высокой точности измерений,



Рис. 5. Роботизированный электронный тахеометр Leica TCRP1201 с угловым отражателем, установленным на горизонтальной пластине на высоте инструмента [69].

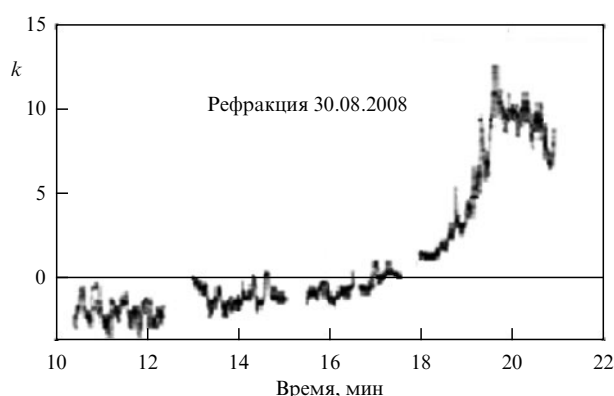


Рис. 6. График временного хода рефракции на трассах А и В в ясную погоду [69].

потому что в реальных условиях прямой и обратный углы рефракции не могут быть приняты равными, так как частота флуктуаций угла рефракции может составлять несколько десятков герц, а точность синхронизации работы двух электронных тахеометров порядка 2 с. Кроме того, нагрев подстилающей поверхности солнечными лучами должен происходить одинаково, что практически невыполнимо, хотя бы по той причине, что тени от облаков могут попадать на различные части трассы.

Таким образом, ошибки при определении рефракции данным методом, особенно на больших расстояниях, могут быть довольно значительными.

2.3. Метод М.М. Извекова

Определённое распространение получил метод оценки коэффициента k вертикальной рефракции, в основе которого лежит допущение о том, что во время измерения зенитных расстояний k на точке наблюдений практически одинаково для всех направлений. Этот метод полностью основывается на использовании результатов только тригонометрического нивелирования.

Рассматриваемый метод предложен для случая, когда имеется сеть триангуляции с измеренными по всем сторонам сети взаимными зенитными расстояниями [70]. В треугольнике $P_1P_2P_3$ (рис. 7) измеряются взаимнообратные зенитные расстояния z . Длины сторон L треуголь-

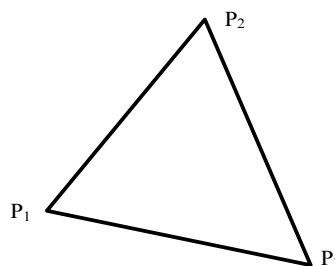


Рис. 7. Треугольник триангуляционной сети.

ника известны. Для превышений h по стороне P_1P_2 имеем

$$H_1 - H_2 = h_{1,2} + L_{1,2}f_1, \quad (9)$$

$$H_2 - H_1 = h_{2,1} + L_{1,2}f_2, \quad (10)$$

где $f_i = (1 - k_i^2)/(2R_E)$, $h_{1,2}$ и $h_{2,1}$ — превышения, вычисленные по измеренным зенитным расстояниям z , k_i — коэффициент рефракции.

Решая систему уравнений (9), (10), получим

$$f_1 - f_2 = \frac{h_{1,2} - h_{2,1}}{L_{1,2}}. \quad (11)$$

Составив уравнения для остальных сторон треугольника, найдём значения f_1 , f_2 и f_3 . По этим данным можно вычислить три значения k . Следовательно, если данный пункт является вершиной n -го треугольника, то можно получить n значений f . При избыточных измерениях задачу следует решать методом наименьших квадратов.

Данный способ определения рефракции не обеспечивает достаточной точности измерений по следующим причинам:

- лежащее в основе метода предположение о том, что во время измерения зенитных расстояний коэффициент рефракции на данном пункте практически одинаков для всех направлений, некорректно, так как в действительности атмосфера неоднородна и её оптические свойства постоянно изменяются, что в свою очередь обуславливает неравенство коэффициентов рефракции на различных направлениях;

- коэффициенты рефракции, полученные в результате измерения прямых и обратных зенитных расстояний, нерепрезентативны, так как они относятся только к определённому моменту наблюдений и к определённым точкам трассы. Поэтому нельзя считать, что такие же условия прохождения света будут наблюдаться на других трассах и в другие моменты времени или даже для той же самой трассы, но в другое время.

2.4. Метод рефракционного базиса.

Метод геодезической службы рефракции

Для выполнения работ в некоторых случаях используется метод рефракционного базиса, предложенный в работе [71]. Для реализации этого метода в сети (рис. 8) необходимо иметь отметки двух точек, например 1 и 2, определённые из геометрического нивелирования, а остальные отметки пунктов сети с учётом рефракции определяют из тригонометрического нивелирования. Эти два пункта сети используются в качестве рефрак-

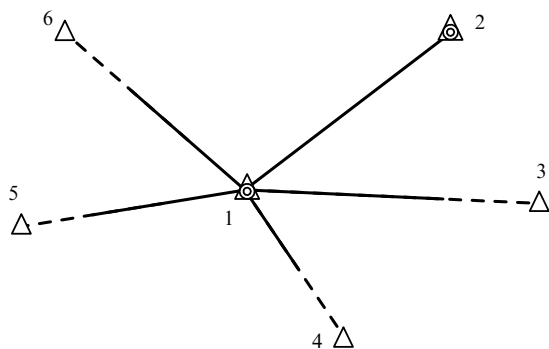


Рис. 8. К определению рефракции методом рефракционного базиса [71].

ционного базиса. Измерения ведутся со станции 1 по всем направлениям, включая и точку 2, отметка которой, как и станции, определена из геометрического нивелирования. Коэффициент рефракции для сети определяют на базисе 1, 2 посредством измерения взаимных зенитных расстояний и потом его используют для определения поправок для каждого измеренного направления сети.

Метод рефракционного базиса также не обеспечивает высокой точности, поскольку ему присущи те же недостатки, что и методу Извекова (см. раздел 2.3). Несмотря на указанные недостатки, метод рефракционного базиса иногда оказывается востребованным. Например, он использовался при выполнении наблюдений в Антарктиде на трассах протяжённостью в несколько километров [67]. Несколько позднее как развитие метода рефракционного базиса был предложен метод геодезической службы рефракции [2, 66].

Метод геодезической службы рефракции аналогичен методу рефракционного базиса, но при этом отдельная бригада одновременно с выполнением тригонометрического нивелирования геодезической сети на большой площади проводит комплекс наблюдений на специально подобранном участке, наиболее характерном для всей сети. На данном участке все пункты должны иметь отметки, полученные из геометрического нивелирования. На центральном пункте одновременно с измерением зенитных расстояний должны выполняться измерения температуры и давления воздуха. На основании полученных данных вычисляют эквивалентные вертикальные температурные градиенты γ_e по всем направлениям, выходящим из центрального пункта.

Коэффициенты рефракции определяют, используя вычисленные значения γ_{ef} по каждому направлению сети. Данный метод не нашёл практического применения из-за его невысокой точности и сложности реализации.

2.5. Метод учёта рефракции в периоды спокойных изображений

С целью уменьшения влияния рефракции на точность определения зенитных расстояний выдающиеся российские учёные В.Я. Струве, Н.Я. Цингер, И.И. Померанцев рекомендовали всегда выполнять наблюдения в периоды изотермии (т.е. в периоды спокойных изображений). В этот период вертикальная рефракция имеет значение, близкое к "нормальному". Исследованием данного метода учёта рефракции занимались различные учёные: Н.В. Яковлев, Д.И. Маслич, А.Л. Островский, Б.М. Джу-

ман, Г. Бахнерт (G. Bahnert), Ф.К. Бруннер (F.K. Brunner) и др. [2, 13, 22, 55, 72–77].

Температурный режим в нижних слоях атмосферы определяется главным образом теплообменом между подстилающей поверхностью и воздухом. Вертикальные градиенты температуры больше в засушливых районах, чем во влажных, и меньше над растительными покровами (лес, луг), чем над оголённой почвой.

Периоды безразличной температурной стратификации в приземном слое атмосферы, когда градиент вертикальной температуры близок к адиабатическому, в средней полосе России имеют малую длительность (несколько десятков минут) и наступают тогда, когда Солнце находится на высоте около 15° над горизонтом. На такой высоте Солнце бывает в летнее время примерно за 2–3 ч до захода и через 2–3 ч после восхода. Это время рекомендуется для выполнения угловых измерений. В пасмурную погоду колебания градиентов температуры происходят значительно медленнее, период благоприятного времени для измерения вертикальных углов увеличивается.

Выше приземного слоя атмосферы (более 100 м над поверхностью Земли) сверхадиабатические градиенты температуры встречаются крайне редко: как только они появляются, воздух перемешивается и возникает состояние, близкое к безразличной стратификации. По этой причине в высокогорных районах коэффициент рефракции близок к нормальному. Длительность такого периода возрастает в пасмурную и ветреную погоду.

Значительную часть времени на высотах в слое 100–700 м имеется область "штилевой" конвекции, в которой вертикальный градиент скорости ветра пренебрежимо мал и стратификация близка к безразличной. Время наступления этого периода может быть определено по эмпирическим формулам, предложенным Н.В. Яковлевым [74–76].

Для повышения точности определения момента изотермии предлагается применять способ одновременного двухстороннего тригонометрического нивелирования и вычислять коэффициенты рефракции на концах линии наблюдения. Согласно [77, 78] момент изотермии наступает тогда, когда прямой и обратный коэффициенты рефракции равны. Как показали последние исследования, даже высокая степень синхронизации наблюдений взаимных зенитных расстояний не исключает появления значительных ошибок из-за неоднородности условий прохождения света на трассе.

2.6. Дисперсионный метод определения рефракции

Дисперсионный метод определения рефракции был предложен в 1924 г. немецким геодезистом Небауэром и позднее получил развитие в работах И.А. Хвостикова, М.Т. Прилепина, А.Н. Голубева, В.С. Михайлова, Э. Тенгстрёма (E. Tengström), Г. Бахнерта, Ф.К. Бруннера, Б. Бокема (B. Bokem), П. Флэша (P. Flach) и др. [79–86]. Метод основан на том, что при прохождении света в атмосфере показатель преломления воздуха для различных длин волн различен, поэтому коэффициентов рефракции для лучей с большей длиной волны всегда меньше, чем для лучей с более короткой длиной волны. Схематически на рис. 9 показана рефракция света для волн различного диапазона.

Если источник света излучает два монохроматических луча: синий (длина волны λ_b) и красный (длина

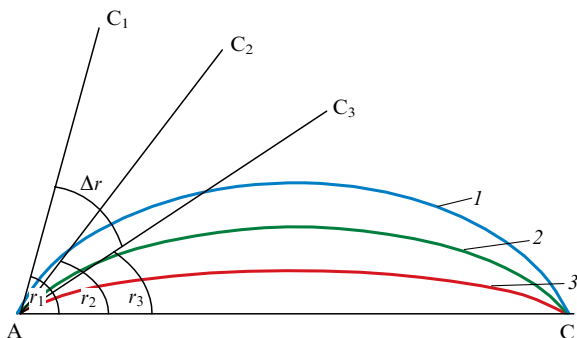


Рис. 9. (В цвете онлайн.) Рефракция света в атмосфере для длин волн различного диапазона: 1 — синий, 2 — зелёный, 3 — красный [81].

волны λ_r), то углы рефракции для этих лучей будут различными [81]:

$$r_b = \frac{\rho''}{L} (n_b - 1) \int_0^L \left(\frac{dP}{dh} \frac{1}{P} - \frac{dT}{dh} \frac{1}{T} \right) x dx, \quad (12)$$

$$r_r = \frac{\rho''}{L} (n_r - 1) \int_0^L \left(\frac{dP}{dh} \frac{1}{P} - \frac{dT}{dh} \frac{1}{T} \right) x dx, \quad (13)$$

где r_b и r_r — углы рефракции для длин волн λ_b и λ_r соответственно, L — длина трассы, $\rho'' = 206265''$, n_b и n_r — средние показатели преломления воздуха на трассе для длин волн λ_b и λ_r , x — текущие координаты луча.

Если измерена разность углов рефракции (дисперсия рефракции) $\Delta r = r_b - r_r$, то можно получить угол рефракции r_λ для длины волны λ :

$$r_\lambda = \frac{n_\lambda - 1}{n_b - n_r} \Delta r, \quad (14)$$

где n_λ — средний коэффициент преломления воздуха для средней длины волны λ .

При вычислении угла рефракции разности $n_\lambda - 1$ и $n_b - n_r$ получают, используя метеорологические измерения на конечных пунктах трассы. В том случае, если для определения величины Δr взяты такие длины волн на концах светового диапазона, при которых $n_b - n_r = 6 \times 10^{-6}$, погрешность определения угла рефракции m_r может оказаться примерно в 50 раз большей, чем погрешность измерения дисперсионного угла рефракции $m_{\Delta r}$:

$$m_r = 46 m_{\Delta r}.$$

При измерении дисперсии рефракции Δr с недостаточной точностью значение искомого угла рефракции r может быть значительно искажено. Поэтому для определения рефракции с точностью $0,1''$ угол дисперсии надо измерить с точностью $0,002''$, что является очень сложной технической проблемой при использовании дисперсионного метода определения рефракции.

Для реализации дисперсионного метода измерения рефракции обычно применяют лазеры, генерирующие на различных длинах волн. Угловую дисперсию для двух длин спектра определяют либо дифракционным, либо интерференционным способом. При дифракционном способе создают дифракционные изображения источников света. Величину угловой дисперсии определяют визуально, фотографическим или фотоэлектрическим спо-

собом по смещению энергетических центров дифракционных изображений источников света. Как известно, угловой размер ϕ дифракционного изображения (кружка Эри) незначительно превышает угловую дисперсию Δr и зависит от диаметра D объектива приёмной трубы и длины волны λ :

$$\phi = 1,22 \frac{\lambda}{D}. \quad (15)$$

Из-за невысокой точности визуальный способ определения относительного положения энергетических центров находит ограниченное применение. В основном используется фотоэлектрический способ регистрации с помощью ПЗС-матрицы (ПЗС — прибор с зарядовой связью) [81]. Эффективным является применение в качестве углового чувствительного элемента в дифракционном рефрактометре оптического кристалла, обладающего двойным лучепреломлением [79, 82].

Такой рефрактометр был разработан в Центральном научно-исследовательском институте геодезии, аэросъёмки и картографии (ЦНИИГАиК) [79]. Инструментальная точность измерения дисперсии рефракции этим прибором составляет $0,02 - 0,03''$. Необходимо отметить, что дисперсионный метод определения вертикальной рефракции пока не нашёл широкого применения в геодезической практике в связи, главным образом, со значительными трудностями определения угла дисперсии рефракции в условиях турбулентной атмосферы [82]. Кроме того, из-за турбулентности воздуха уже на расстоянии нескольких десятков метров разрушается интерференционная картина, что практически делает невозможным считывание информации в таких условиях вследствие флуктуаций показателя преломления воздуха на пути следования светового пучка.

Как отмечалось, для того чтобы определить угол рефракции величиной $0,1''$, необходимо выполнить измерения дисперсионного угла с точностью порядка $0,002''$, что в условиях турбулентной атмосферы является невыполнимой задачей [82]. Кроме того, флуктуации угла прихода светового пучка на трассе протяжённостью ~ 1 км при этом могут составлять несколько десятков угловых секунд с частотой в несколько десятков и даже сотен герц [82].

Таким образом, за очень короткий период в реальных условиях величина рефракции хаотически изменяется на два порядка больше, чем дисперсия рефракции. По этим причинам дисперсионные рефрактометры для полевых измерений не используются, так как они не вышли из стадии лабораторных разработок.

Как утверждается в работе [3], к настоящему времени предложено более 100 методов определения и учёта вертикальной рефракции, но всем им присущи те или иные недостатки, поэтому большинство из них не используется на практике. Следует учитывать, что даже если каким-либо из этих методов в определённый момент времени получено точное значение рефракции для данной трассы, то в момент времени, отстоящий буквально на несколько секунд, значение рефракции может значительно отличаться от ранее полученного.

Результаты экспериментальных исследований на наземных трассах с высотами визирного луча до нескольких десятков метров подтверждают, что характер суточного хода рефракции в деталях практически неповторим, но имеет некоторую схожесть для различных времён

года и для трасс различной длины. Следовательно, введение поправок за рефракцию на основе использования ранее выполненных измерений (даже на той же самой трассе), но в другое время некорректно, поскольку может привести к ухудшению полученных результатов. Поэтому определение поправок за рефракцию для наземных трасс на основе результатов длительных наблюдений рефракции в данном регионе и даже на конкретных трассах лишено каких-либо оснований.

Таким образом, классические методы определения рефракции не могут быть широко использованы при проведении точных оптических измерений на трассах протяженностью более 300–400 м, так как не позволяют достоверно оценить величину искажений, вызванных рефракцией в момент измерений на более длинной трассе.

Необходимо отметить, что даже применение электронных тахеометров с автоматическим наведением на визирную цель для одновременного измерения взаимных зенитных расстояний не позволяет полностью исключить влияние рефракции по указанным ранее причинам. Поэтому из всех рассмотренных методов учёта рефракции, как отмечалось, наиболее эффективным является метод, основанный на выборе времени наблюдений в периоды безразличной температурной стратификации атмосферы, когда колебания изображения визирной цели отсутствуют, а величина рефракции минимальна. Существенными недостатками указанного метода являются весьма короткий рабочий период безразличной температурной стратификации атмосферы (как правило, менее 1 ч) и сложность определения временных границ этого периода, которые не постоянны, а точность их определения весьма субъективна. Рассматриваемый метод практически не требует выполнения дополнительных измерений и основывается на том факте, что при температурном градиенте, близком к сухадиабатическому, рефракция мала и практически постоянна. Поэтому данный метод является наиболее востребованным. Однако необходимо обращать внимание на то, что период изомерии наступает в различных точках трассы и в разное время.

На основе анализа результатов многочисленных исследований, выполненных в разное время, в работе [52] сделаны весьма существенные выводы, которые актуальны и в настоящее время:

1. Обобщение условий прохождения света в более высоких слоях атмосферы и непосредственно прилегающих к земной поверхности является ошибочным. Введение поправки на совместное влияние кривизны Земли и рефракции по обычной формуле, принятой в практике, несостоятельны.

2. Для трасс, проходящих в приземном слое воздуха на высотах 2–5 м, нельзя получить исчерпывающее выражение поправки за рефракцию, выведенное теоретически или полученное эмпирически. Изменение коэффициента рефракции в течение дня в этом случае достигает значительных величин — от 4,28 до –4,40 и в дневное время имеет, как правило, знак минус.

Таким образом, проведённый обзор наиболее востребованных классических методов определения рефракции показывает, что "проблема учёта рефракции в геодезических измерениях не получила даже удовлетворительного практического решения" [46], что подтверждается практически всеми специалистами.

3. Радиофизические (турбулентные) методы определения рефракции

3.1. Основы теории метода определения рефракции по флуктуациям параметров световой волны

Все используемые в настоящее время методы определения рефракции основаны на теории, созданной Ньютоном для статической атмосферы. При этом атмосфера рассматривается в виде тонких статически устойчивых слоёв воздуха, плотность которых уменьшается при возрастании высоты. Как отмечено выше, большинство методов определения рефракции детально рассмотрено в известных монографиях и обзорах. Как правило, при использовании практически всех методов определения рефракции предполагается, по умолчанию, что атмосфера находится в статически устойчивом состоянии и её оптические свойства не изменяются, по крайней мере, на момент измерений, поэтому их можно с определённой степенью точности измерить либо вычислить и на основе этого оценить значение рефракции. Такой подход к решению проблемы рефракции можно назвать "классическим", а разработанные методы определения рефракции на основе теории Ньютона — "статическими". Однако, используя современные классические методы определения рефракции, весьма сложно с высокой степенью точности определить поправки за рефракцию "статическими" методами [2]. Последнее объясняется тем, что рефракция — случайный, быстротекущий процесс, зависящий от многих не поддающихся учёту факторов, поскольку атмосфера, как всякая реальная среда, неоднородна и, кроме того, всегда находится в турбулентном движении, поэтому её оптические свойства хаотически изменяются [2, 4–29]. Следовательно, таким же образом изменяется и рефракция. Для иллюстрации данного утверждения с помощью современного электронного тахеометра с автоматическим наведением на визирную цель можно получить тонкую структуру временного хода угла рефракции, отражающую его хаотические изменения с частотой порядка 1 Гц и ниже (рис. 10) [87].

Измерив расстояние между точками, отметки которых определены из прецизионного нивелирования, высоту инструмента и высоту цели, а также углы наклона с дискретностью 1 с, можно получить временной ход рефракции, который представлен на рис. 10. Как видно

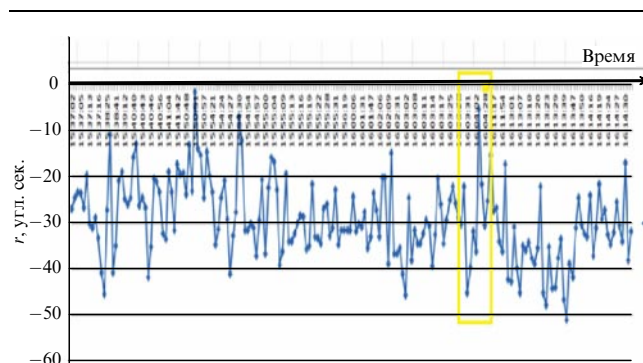


Рис. 10. (В цвете онлайн.) Временной ход угла вертикальной рефракции r , полученный из сравнения результатов высокоточного геометрического нивелирования и тригонометрического нивелирования с дискретностью 1 с [87].

из графика, рефракция в течение нескольких секунд может измениться на несколько десятков угловых секунд.

Из рисунка 10 видно, что рефракция быстро хаотически меняется, поэтому её сложно оценить каким-либо из классических методов в момент измерений, так как человеческое зрение инерционно — предел 10 Гц. Если частота колебаний выше, то изображение цели становится бесформенным или совсем исчезает, хотя на частоте даже в несколько герц уверенно вести визуальный отсчёт крайне затруднительно. При этом непонятно, к какому моменту времени относятся наведение на цель и отсчёт, а также результаты измерений, необходимые для получения величины рефракции. Кроме того, при визуальном наведении возникает неопределённость с оценкой положения цели, которая всегда колеблется.

Следовательно, получить достаточно точно временной ход истинной рефракции рассмотренными ранее классическими методами довольно сложно. Периоды определения рефракции могут не совпадать с временем выполнения измерений, в результаты которых необходимо вносить полученные поправки за рефракцию. Это является также одной из причин того, что значения полученных поправок за рефракцию могут значительно отличаться от реальных поправок. Таким образом, измерения необходимо проводить в реальном масштабе времени и конкретном месте.

График на рис. 10 наглядно показывает, что рефракция в момент отсчёта может значительно отличаться от полученной в другой момент времени. В работе [42] утверждается: "Все методы учёта влияния атмосферы, нашедшие применение в геодезическом производстве, опираются на статистические закономерности в пространственном и временном распределении параметров атмосферы. Учесть возможные изменения состояния атмосферы вдоль измеряемой дистанции они не позволяют". Этим и объясняется сложность решения проблемы рефракции, которой занимаются исследователи уже на протяжении ряда столетий. Ещё в 1975 г. А.А. Изотов обращал внимание на то, что "полное освобождение геодезических наблюдений от влияния турбулентных и флуктуационных процессов в атмосфере возможно только путём непосредственного измерения угла рефракции в момент наблюдений" [88].

Чтобы получить информацию об условиях прохождения света в момент измерений, должны быть установлены реальные оптические свойства атмосферы.

Согласно экспериментальным данным в двух точках, расположенных на одинаковой высоте h и расстоянии $0,4h$, пульсации вертикальной скорости ветра могут достигать 1 м с^{-1} , а пульсации температуры — 1°С в течение 1 с (рис. 11) [26], что в свою очередь приводит к существенным случайным искажениям световой волны.

Поэтому для решения проблемы рефракции требуется принципиально новый подход, который полностью независим от ранее принятых и до сих пор используемых "классических" методов определения рефракции. Классическое решение задачи определения рефракции, когда рассматриваются условия прохождения света в атмосфере, находящейся в статическом состоянии, для реальной земной атмосферы некорректно.

На современном этапе развития науки и техники данные об условиях прохождения света можно получить посредством измерения искажений в электромагнитной (звуковой) волне [25–29]. В основу турбулентных мето-

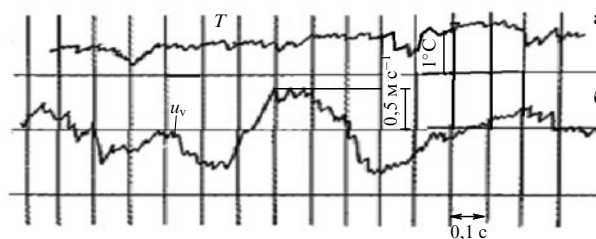


Рис. 11. Фрагменты синхронной записи: (а) температуры T воздуха, (б) вертикальной компоненты скорости ветра u_v [26].

дов определения рефракции положена ранее не известная физическая зависимость между такими явлениями, как флуктуации параметров световой волны, прошедшей слой турбулентной атмосферы, и детерминированным эффектом рефракции в поле температурного градиента. На этой базе разработаны радиофизические методы определения рефракции, основанные на измерении статистических характеристик Ψ электромагнитной волны, а также алгоритм решения задачи по определению угла рефракции $r(t)$, основанный на полуэмпирической теории турбулентности атмосферы [25–29, 89–91]. Согласно радиофизическим методам текущее значение угла вертикальной рефракции $r(t)$ определяют, измеряя статистические характеристики Ψ оптического излучения, прошедшего слой турбулентной атмосферы, а также температуру T и давление P на трассе, выполнив следующую последовательность преобразований:

$$\rightarrow C_n \rightarrow C_T \rightarrow \frac{dT}{dh} \rightarrow \frac{dn}{dh} \rightarrow r_v. \quad (16)$$

↗
 P, T

Основная задача при определении рефракции r_v турбулентным (динамическим) методом заключается в оценке структурной характеристики поля показателя преломления атмосферы — усреднённой для всей трассы величины $\bar{C}_n$, которая является важнейшим параметром оптического поля турбулентной атмосферы и функционально связана с Ψ [15].

Структурная характеристика поля температур C_T^2 в приземном слое атмосферы может быть связана с вертикальным градиентом температуры dT/dh соотношением [25–29]

$$C_T^2 = C^2 a^2(\text{Ri})(\chi h)^{4/3} \left(\frac{dT}{dh} - \gamma_a \right)^2. \quad (17)$$

Здесь $C^2 = 2,8$, $\chi = 0,4$ — постоянная Кармана, h — высота, на которой измеряют градиент температуры, $\gamma_a = -0,98^\circ/100 \text{ м}$ — адиабатический градиент, $a^2(\text{Ri})$ — универсальная функция, Ri — число Ричардсона, характеризующее степень температурной стратификации атмосферы.

На основании теоретических и экспериментальных исследований выведена формула зависимости между структурной характеристикой поля температур C_T^2 и структурной характеристикой поля показателя преломления атмосферы C_n^2 :

$$C_n = \frac{10^{-6} K(\lambda) \langle P \rangle}{\langle T \rangle^2} C_T, \quad (18)$$

где $\langle T \rangle$, $\langle P \rangle$ — средние значения температуры и давления, величина C_T выражена в единицах $[K \text{ см}^{-1/3}]$, C_n — в $[\text{см}^{-1/3}]$, P — в [мбар]. Величина $K(\lambda)$ выражена в $[K \text{ мбар}^{-1}]$ и может быть найдена из соотношения

$$K(\lambda) = N_\lambda \frac{T_0}{P_0}. \quad (19)$$

Здесь $N_\lambda = 77,6P/T + 0,584P/(T\lambda^2 - 0,06e)$, $T_0 = 288 \text{ K}$, $P_0 = 1013,25 \text{ мбар}$, $e = 16 \text{ мбар}$ — парциальное давление водяного пара.

Согласно экспериментальным данным, в приземном слое воздуха до высоты 10 м получены следующие типичные значения C_n^2 в зависимости от условия наблюдений [26]:

- наилучшие — $5,20 \times 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$;
- средние — $7,21 \times 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$;
- наихудшие — $1,00 \times 10^{-13} \text{ см}^{-2/3}$.

Необходимо отметить, что при наихудших условиях наблюдений, т.е. когда $C_n^2 = 1,00 \times 10^{-13} \text{ см}^{-2/3}$ или C_n^2 близко к этому значению, наблюдения визирных целей практически невозможны на расстояниях уже в несколько сотен метров, так как их изображения сильно размыты, дрожат, превращаются в размытое пятно и даже совсем исчезают. Подобные условия практически ежедневно наблюдаются летом в условиях жаркого климата.

Согласно [25, 26] зависимость между вертикальным градиентом температуры и структурной характеристикой поля показателя преломления характеризуется выражением

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dh} &= \pm \frac{10^6 C_n \langle T \rangle^2}{K(\lambda) \langle P \rangle Ca(\text{Ri}) (\chi h)^{2/3}} + \gamma_a = \\ &= \pm \frac{B(\lambda) C_n \langle T \rangle^2}{\langle P \rangle h^{2/3} a(\text{Ri})} + \gamma_a, \end{aligned} \quad (20)$$

где dT/dh — вертикальный градиент температуры, T — температура [K], P — давление [мбар], $C = 1,67$ — универсальная постоянная, $a(\text{Ri})$ — универсальная функция, которая может быть выбрана в зависимости от температурной стратификации атмосферы, $\chi = 0,4$ — постоянная Кармана, h — эквивалентная высота [см], $\gamma_a = -0,98^\circ/100 \text{ м}$ — сухоадиабатический градиент;

$$B(\lambda) = \frac{10^6}{K(\lambda) C \chi^{2/3}} [\text{мбар K}^{-1}]. \quad (21)$$

Поэтому измерение рефракции возможно только в реальном масштабе времени, что может быть реализовано в момент выполнения наблюдений посредством измерения статистических характеристик волны, прошедшей турбулентную трассу. Учитывая динамику атмосферы, угол вертикальной рефракции r_d можно вычислить, воспользовавшись выражением

$$r_d = r_n + r_{an} = 8,13L \left(0,000244 \frac{P}{T^2} \pm \frac{B(\lambda) \bar{C}_n}{h^{2/3} a(\text{Ri})} \right). \quad (22)$$

Здесь $r_n = 8,13L \times 0,000244P/T^2$ — нормальная составляющая угла рефракции, $r_{an} = \pm 8,13LC_n B(\lambda)/(h^{2/3} a(\text{Ri}))$ — аномальная составляющая угла рефракции, где L — длина трассы [см], P — давление [мбар], T — температура воздуха [K], $B(\lambda)$ [мбар K⁻¹] зависит от длины волны λ , $\bar{C}_n$ — структурная характеристика $[\text{м}^{-1/3}]$ поля показателя преломления, h — эквивалентная высота трассы [см], $a(\text{Ri})$ — универсальная безразмерная функция [25,

26], зависящая от температурной стратификации атмосферы.

3.2. Теоретические основы радиофизических (турбулентных) методов определения рефракции по колебаниям светового пучка

В равнинной местности средней полосы России в приземном слое атмосферы нормальная составляющая угла рефракции r_n обычно порядка $+2,5''$ на 1 км трассы [35]. В течение суток в периоды устойчивой и неустойчивой температурной стратификации атмосферы аномальная составляющая угла рефракции r_{an} может превосходить по модулю величину r_n на порядок и более.

Зависимость $\bar{C}_n^2$ от квадрата флуктуаций угла прихода пучка Δ^2 имеет вид [29]

$$\bar{C}_n^2 = 0,088 \langle \Delta^2 \rangle_{\text{refl}} \varphi^{-1}(\alpha_R) L^{-1} (2R)^{1/3}. \quad (23)$$

Здесь L — длина трассы, $2R$ — диаметр приёмной апертуры, $\varphi(\alpha_R)$ — числовая функция, характеризующая дисперсию дрожания светового пятна с учётом усредняющего действия объектива [26].

Эффект дрожания изображения, а также флуктуации угла прихода вызваны флуктуациями фазы световой волны [25, 26]. Случайный поворот фронта волны на угол α вызывает разность фаз [90, 91]:

$$\Delta S = kb \sin \alpha \approx kb\alpha,$$

где b — расстояние между двумя точками приёма световой волны (или база), k — волновое число.

Отсюда $\alpha = \Delta S/(kb)$, а средний квадрат флуктуаций угла прихода α выражается в виде

$$\langle \Delta^2 \rangle = \Delta^2 = \frac{\langle \Delta S^2 \rangle}{k^2 b^2}. \quad (24)$$

Если R — радиус приёмного объектива, то можно считать, что $b \approx 2R$, следовательно,

$$\langle \Delta^2 \rangle = \Delta^2 \approx \frac{\langle \Delta S^2 \rangle}{k^2 (2R)^2}. \quad (25)$$

Как отмечается в работах [15, 92–100], турбулентный метод определения рефракции по флуктуациям угла прихода неоднократно проходил апробацию на различных геодезических полигонах в Москве и на производственном объекте в европейской части России (за полярным кругом).

Как известно, периоды изотермии (безразличной температурной стратификации атмосферы) являются наиболее благоприятными в приземном слое атмосферы. В такие периоды коэффициент рефракции весьма незначителен и, как правило, соответствует нормальному, который может быть вычислен согласно выражению [2]

$$k = 17,24 \frac{P}{T^2}, \quad (26)$$

где P — давление [мбар], T — температура [K].

В остальное время суток коэффициент рефракции может отличаться от нормального и зависит от условий наблюдений. Поэтому практический интерес представляет оценка возможности применения метода определения рефракции при различных условиях температурной стратификации, в первую очередь, в светлое время

суток, т.е. при безразличной и неустойчивой температурной стратификации атмосферы.

3.3. Экспериментальные исследования метода определения рефракции при безразличной температурной стратификации атмосферы по флуктуациям угла прихода

Исследования проводились на трассах различной протяжённости, от 460 м до 760 м, в разные сезоны года. При этом использовались электронные тахеометры фирмы Trimble Navigation различных модификаций (SX8, SX9 и SX10), а также тахеометры фирмы Leica, имеющие инструментальную точность порядка $1''$. При оценке точности значений рефракции, полученных турбулентным методом, за эталонные значения принимались зенитные расстояния z_0 , которые определялись с учётом результатов геометрического нивелирования II класса.

Сравнивая истинное зенитное расстояние z_0 с измеренными z_m , получали истинные значения угла рефракции r на данной трассе для соответствующего момента измерений.

$$r = z_0 - z_m. \quad (27)$$

В дальнейшем полученные значения r использовались как эталонные при оценке точности определения рефракции турбулентным методом. Для вычисления угла рефракции r_d применялась формула (22). Используя значения Δr , характеризующие отклонения значений рефракции r_d , полученных турбулентным методом, от истинных значений рефракции r , т.е.

$$\Delta r = r - r_d, \quad (28)$$

можно вычислить среднюю квадратическую ошибку точечных измерений рефракции.

Так, например, 1 октября 2018 г. с помощью роботизированного электронного тахеометра Trimble SX9 были выполнены исследования рефракции по флуктуациям угла прихода в период изотермии, т.е. когда колебания визирной цели визуально не наблюдались [92]. Протяжённость горизонтальной трассы 741,42 м, температура воздуха $T = 1^\circ\text{C}$, скорость ветра $0,5 \text{ м с}^{-1}$, давление $P = 1025,8 \text{ мбар}$. Поскольку в данном случае условия наблюдений были благоприятными, т.е. близкими к безразличной температурной стратификации атмосферы, можно предположить, что аномальный вертикальный градиент температуры ~ 0 , поэтому нормальную составляющую угла рефракции можно оценить с помощью соотношения [2]

$$r_n = 0,198 \frac{P}{T^2} L. \quad (29)$$

Используя данные наблюдений на трассе ($P = 1025,8 \text{ мбар}$ и $T = 274,15 \text{ К}$), получим нормальное значение рефракции для безразличной температурной стратификации в момент наблюдений $r_n = 2,00''$, которое соответствует адиабатическому вертикальному градиенту температуры воздуха, т.е. $\gamma_a = -0,0098 \text{ К}$. В данном случае средняя квадратическая ошибка определения рефракции динамическим методом в период изотермии оказалась равной $m_d = 1,41''$.

Временной ход значений угла рефракции, полученный турбулентным методом, практически полностью анало-

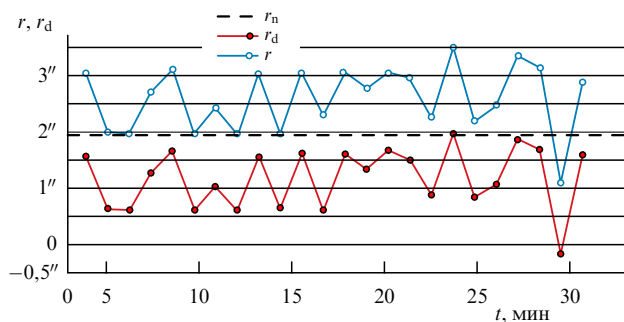


Рис. 12. (В цвете онлайн.) Ход рефракции 1 октября 2018 г. на ровной горизонтальной трассе протяжённостью 741,42 м [92].

гичен истинному ходу рефракции, но сдвинут от него на величину не более $1,5''$ (рис. 12).

Так как истинные значения угла рефракции определены с точностью порядка $2,2''$, о чём было сказано выше, можно полагать, что точность динамического метода определения рефракции в условиях безразличной температурной стратификации атмосферы соответствует инструментальной точности используемого роботизированного тахеометра.

Этот тахеометр может обеспечить инструментальную точность измерения направлений $1''$ с частотой 2,5 Гц, а также практически исключает субъективные ошибки наведения на визирную цель при измерении вертикальных углов, так как поиск цели и наведение на неё выполняются автоматически без участия оператора. Необходимо учитывать, что даже в период изотермии температурная стратификация в реальной атмосфере никогда не может длительное время точно соответствовать безразличной температурной стратификации атмосферы, т.е. практически всегда в момент взятия отсчёта температурный градиент хотя бы немного отличается от адиабатического из-за турбулентного движения воздуха.

При безразличной температурной стратификации атмосферы число Ричардсона достаточно мало и находится в диапазоне $-0,05 < Ri < 0,05$. Этим граничным значениям числа Ri соответствуют вертикальные градиенты температуры воздуха в диапазоне $-0,034 < dT/dh < +0,02 \text{ град м}^{-1}$, т.е. они несколько отличаются от адиабатического. По этой причине и возникают незначительные флуктуации показателя преломления воздуха, которые в данный период визуально по колебаниям изображений оценить весьма сложно. В момент наблюдений угол вертикальной рефракции r имел положительное значение. Полученные значения угла рефракции r в текущий момент измерений (на основании сравнения измеренных зенитных расстояний с истинным зенитным расстоянием) несколько отличаются от предварительно вычисленного значения угла нормальной рефракции для условий нейтральной температурной стратификации $r_n = 2,00''$. Из сравнения r_d и r можно заключить, что отклонение значений рефракции от истинных, полученных турбулентным методом, составляет не более $1,5''$. Так как истинные значения угла рефракции определены с точностью порядка $2,2''$, можно сделать вывод: точность турбулентного метода определения рефракции при безразличной температурной стратификации атмосферы примерно соответствует точности используемого прибора.

Выполненный эксперимент в очередной раз подтверждает, что самое благоприятное время для выполнения геодезических измерений соответствует условиям безразличной температурной стратификации атмосферы, когда угол вертикальной рефракции близок к нулю.

3.4. Экспериментальные исследования турбулентного метода определения рефракции при неустойчивой температурной стратификации атмосферы

Практический интерес представляют результаты исследований рефракции при неустойчивой температурной стратификации. Такие исследования проводились в 2018 и 2019 гг. в летнее время, т.е. при сильно развитой неустойчивой температурной стратификации атмосферы [98]. В 2018 г. на геодезическом полигоне (Москва) было выбрано несколько горизонтальных трасс различной длины, которые находились практически в одном створе параллельно Сходненскому каналу. Трассы имели различную протяжённость с подстилающей поверхностью — покрытый травой луг, по которому проходила пешеходная тропинка вдоль канала (рис. 13). Для сравнения на рис. 14 [92] показаны графики временного хода рефракции r и r_d . При этом среднеквадратичная ошибка угла рефракции практически составляла не более $\sim 2''$, т.е. соответствовала инструментальной точности используемого прибора.

Как видно из представленных графиков, полученные результаты практически совпадают — они сдвинуты относительно друг друга на незначительную величину порядка $1,5''$. Причём принятые за эталон значения рефракции нельзя считать безошибочными, так как на их определение влияют погрешности визирования, измерения высоты инструмента и знака, а также нивелирования II класса и определения места нуля (М0).

График хода рефракции, показанный на рис. 15, получен в более жаркую погоду. На нём отражена тонкая структура случайных изменений вертикального угла рефракции в дневное время 6.08.2019 с 15 ч 37 мин 02 с до 16 ч 13 мин 50 с. Температура воздуха $T = 27^\circ\text{C}$, давление $P = 767$ мм рт. ст., ветер южный, скорость $1,7$ м с^{-1} , солнечно и малооблачно. Наблюдения выполнялись с помощью роботизированного электронного тахеометра



Рис. 13. (В цвете онлайн.) Роботизированный электронный тахеометр Trimble SX10, установленный на трассе, проходящей параллельно Сходненскому каналу (на рисунке расположенном слева от трассы) [98].

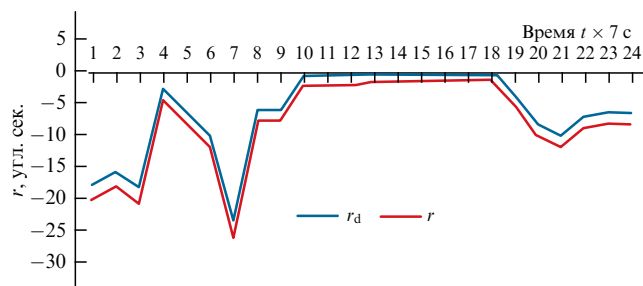


Рис. 14. (В цвете онлайн.) Дневной ход рефракции 13 августа 2018 г. на полигоне ГИС ($L = 625,22$ м) [92].

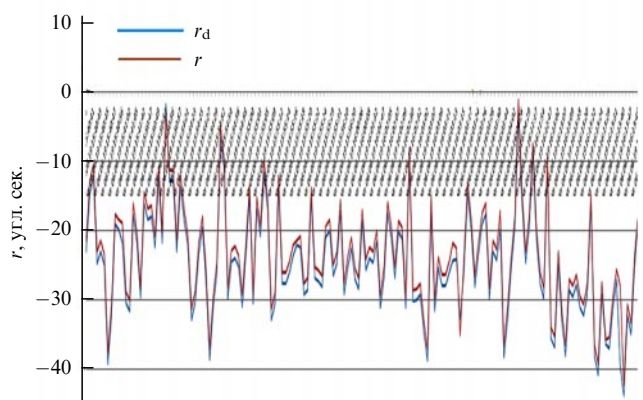


Рис. 15. (В цвете онлайн.) Дневной ход рефракции 6 июня 2019 г. на полигоне ГИС ($L = 759,67$ м) [100].

Trimble SX10 на полигоне Группы компаний ГИС (Москва) [97]. Протяжённость трассы 759,67 м, подстилающая поверхность — травяной покров равнинного берега Сходненского канала. Инструментальная точность прибора порядка $1''$. При этом скважность отсчётов составляла 1 с, а иногда увеличивалась и зависела от времени перекрытия отражателя прохожими.

При выполнении наблюдений осуществлялось изменение вертикальных направлений в следящем режиме на отражатель, установленный в конечной точке трассы. Как видно из рис. 15, рефракция в течение 2 с может измениться на $35''$, что очень сложно определить с точностью $1-2''$ традиционными оптическими приборами без автоматического наведения на визирную цель. Данное обстоятельство очередной раз позволяет сделать вывод: использование даже высокоточных приборов с визуальным наведением в период неустойчивой температурной стратификации атмосферы не обеспечивает получения высокоточных результатов наблюдений из-за быстрого хаотического изменения рефракции.

В настоящее время полагают, что результаты определения рефракции, полученные на одной трассе, можно после некоторой трансформации применить на другой трассе или даже в другом районе. Предполагается, что это направление работ может быть использовано для создания дополнительных путей решения проблемы рефракции, что весьма сложно.

Рисунок 15 [100] наглядно подтверждает всю сложность определения рефракции классическими методами, поскольку получаемые с их помощью результаты сложно привязать к моменту наблюдения того или иного

направления с требуемой точностью. Таким образом, можно полагать, что для достижения точности измерений рефракции, которая соответствовала бы инструментальной точности современных высокоточных приборов, необходимо выполнять измерения рефракции одновременно с измерениями направлений, для которых предназначена поправка за рефракцию. Если такие измерения выполняются не одновременно, то при введении поправки за рефракцию, найденной в другой момент времени, возможны значительные искажения получаемых результатов.

Аналогичный вывод напрашивается и для случая определения поправок с использованием базиса рефракции либо эталонных значений рефракции, полученных в другом районе работ, и т.п. Таким образом, ситуация полностью соответствует изречению древнегреческого философа Гераклита Эфесского (около 544–480 гг. до н. э.): *нельзя дважды войти в одну и ту же реку*.

Несколько позднее начали разрабатываться визуальные турбулентные методы определения рефракции по амплитуде колебаний изображений визирной цели [2, 16–24, 101–103] и по оценке размытия изображения регулярной миры [104–107], существенным достоинством которых являются простота и отсутствие необходимости использования для их реализации какой-либо дополнительной аппаратуры.

Метод определения рефракции по амплитуде колебаний визирной цели был предложен [16] в 1978 г. Рабочая формула для вычисления угла рефракции γ имеет вид

$$r = r_n + 0,05\sigma_{\max} L^{1/2} h_e^{-1/2}, \quad (30)$$

где $\sigma_{\max}$ — максимальная амплитуда колебаний визирной цели, r_n — нормальное значение рефракции, L — длина трассы, h_e — эквивалентная высота визирного луча.

Как отмечалось, несколько позднее был предложен другой турбулентный метод определения рефракции на основании визуальной оценки размытия миры, который разрабатывался в Нижегородском политехническом институте начиная с середины 1980-х годов [104–107]. При определении величины рефракции на основе оценки размытия миры вначале находят усреднённую структурную характеристику поля показателя преломления $\bar{C}_n$ атмосферы, визуально оценивая степень размытия изображения регулярной миры. Затем, используя найденную величину $\bar{C}_n$, вычисляют рефракцию. Эти визуальные турбулентные методы находятся на стадии лабораторных исследований. Проблемы их внедрения связаны с субъективными качествами человеческого зрения, так как значительные ошибки при измерении рефракции возникают из-за точности и длительности времени отсчитывания амплитуды колебаний или оценки периода миры.

Как видно из рис. 15, изменения рефракции происходят хаотически и с высокой скоростью, на что глаз наблюдателя из-за инерционности зрения реагирует с запаздыванием. Поэтому нельзя точно определить время отсчёта и получаемый результат, на основании которого следует вводить поправку за рефракцию. Следовательно, полученную поправку нельзя точно привязать к определённому направлению и использовать её для коррекции отсчёта наблюдаемого направления.

В последние годы определённый интерес за рубежом начали вызывать турбулентные методы определения

рефракции, что обусловлено производственными проблемами, связанными с работами над сложным проектом AlpTransit по созданию самого длинного железнодорожного туннеля в мире протяжённостью 57 км в Альпах. При его создании требовалась точная оптическая навигация туннельных машин. Рефракция является основным источником систематических ошибок при определении расстояний и направлений. Кроме того, растёт спрос на точные измерения в геодезическом мониторинге, промышленной метрологии, а также в авиационных производственных линиях и задачах точного выравнивания магнитов в ускорительных установках и т.д.

Примерно в этот же период в Институте оптики атмосферы СО РАН аналогичному направлению исследований была посвящена работа [108], которая содержит краткий обзор радиофизических методов в регулярной геодезической рефракции оптического излучения. В этой работе значительное внимание уделено методике измерения углов регулярной рефракции оптического излучения, распространяющегося в приземном слое атмосферы (см. [108, гл. 5]) как на однородных, так и неоднородных трассах. Кроме того, рассматриваются методы измерения углов рефракции в схемах с отражением.

Согласно работам, выполненным в Институте геодезии и фотограмметрии (Institute of Geodesy and Photogrammetry) Федерального технологического института Цюриха (Federal Institute of Technology Zürich) (Швейцария) [69, 86, 109–113], значительное внимание уделяется основанным на турбулентности методам определения рефракции, вызывающим эффекты искажения изображения, его дрожания флуктуациями интенсивности с использованием геодезических приборов с ПЗС или сцинтилляторов. Для изучения указанных эффектов в институте геодезии и фотограмметрии Цюрихского университета в течение последних нескольких лет интенсивно разрабатывались методы определения и коррекции влияния рефракции [109–113]. Один из подходов заключается в определении градиента показателя преломления при измерении турбулентности воздуха с помощью сцинтиллометрии или цифровой обработки изображений. Основываясь на теории турбулентности Монина–Обухова (Monin–Obukhov Similarity Theory, MOST), можно найти турбулентный чувствительный тепловой поток H и турбулентный импульсный поток M , используя структурную постоянную поля температуры C_T и скорость диссипации турбулентной кинетической энергии ϵ . Указанные операции можно выполнить с помощью безразмерных уравнений для C_T^2 и ϵ , которые приводят по численной итерационной схеме к масштабу Обухова L , являющемуся показателем стабильности атмосферы, необходимым для определения турбулентных потоков. Из осознанного теплового потока можно вывести градиент температуры dT/dz и градиент показателя преломления dn/dz для коррекции атмосферных отклонений при точных геодезических измерениях. Последовательность операций схематически представлена на рис. 16. Полагают, что преимущество подобных измерений является получение для трассы усреднённых параметров турбулентности приземного слоя атмосферы.

Было проведено несколько испытаний методов, учитывающих эффекты турбулентности [111]. Сравнение значений C_n^2 , полученных на основе измерений с помощью сцинтиллятора и с использованием метода ана-

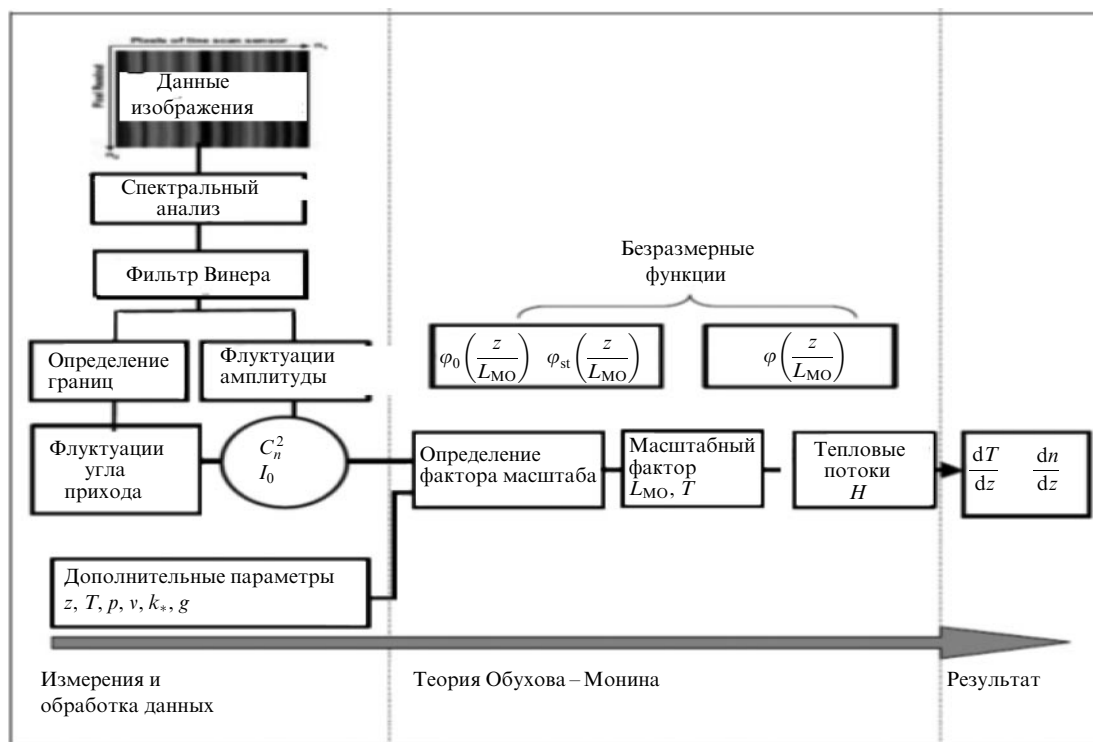


Рис. 16. Блок-схема измерения турбулентности, теории и расчёты для определения градиента показателя преломления атмосферы [111].

лиза изображений, показало их хорошее согласие. Одновременно были измерены температуры датчиком температуры и флуктуации интенсивности сигнала, на основании которых был вычислен ход вертикального градиента показателя преломления воздуха.

К недостаткам рассмотренных турбулентных методов определения рефракции следует отнести сложности, связанные с их использованием, и невысокую точность оценки величины рефракции. Значительные проблемы связаны также с необходимостью вычисления многих характеризующих турбулентность атмосферы параметров, которые имеют неопределённые масштабы, сложно поддающиеся учёту. По этой причине связь между случайными искажениями фронта световой волны и рефракцией функционально не установлена, хотя эмпирически такая зависимость на основе выполненных исследований выявлена.

В результате многолетних исследований в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН установлено, что определение C_n^2 на основании измерений флуктуаций амплитуды сигнала целесообразно только на коротких дистанциях ($\sim$ до 200 м), так как при увеличении длины трассы наступает насыщение и определяемая величина C_n^2 искажается [26], поэтому она не может быть использована для оценки рефракции.

4. Заключение

1. Рефракция была известна ещё в глубокой древности, так как люди сталкивались с этим явлением на протяжении всей своей жизни. Первые письменные упоминания о рефракции света относятся к I в. нашей эры (Клеомед). Наибольший вклад в развитие теории рефракции внёс И. Ньютон. Теория рефракции, разработанная Ньютоном, не утратила значения и в настоящее время.

2. Теория рефракции является одной из труднейших проблем современности. Теоретические исследования Ньютона, Эйлера, Ориани, Бернулли и др. сводились к тому, чтобы определить геометрический путь луча. На основе теоретических расчётов не представляется возможным с достаточной достоверностью определить величины локальных вертикальных градиентов температуры, давления и влажности воздуха, а следовательно, и траекторию луча, что обусловлено многообразием условий прохождения света в приземном слое атмосферы и быстрой их изменчивостью.

3. Так как наибольший объём геодезических и астрономических измерений выполняется с помощью оптических приборов, установленных на земной поверхности, поиск путей определения рефракции и её учёта в приземном слое атмосферы весьма актуален. Кроме того, решение задач точного наведения, локации, навигации и связи требуют наличия сведений о величине рефракции в текущий момент времени. Проблеме определения рефракции посвящён ряд книг, а также несколько сотен статей и диссертаций. Так, например, только в последние годы опубликовано свыше 1000 работ по данной тематике и предложено более 100 методов определения рефракции [3]. Например, в работе [114] отмечается: "Можно также восхищаться, с какой настойчивостью геодезисты изыскивали методы учёта рефракции. Предложенных формул не меньше, чем формул поправок за рефракцию. Однако задача учёта рефракции не нашла окончательного разрешения", так как "многолетние исследования не привели к окончательному решению проблемы, хотя вертикальная рефракция изучается более 300 лет" [2]. А.Н. Крылов в своё время также отмечал слабый прогресс в изучении рефракции [1].

4. Для успешного решения проблемы рефракции требуется принципиально новый подход, который пол-

ностью независим от ранее принятых и до сих пор используемых "классических" методов определения рефракции. Такое решение может быть найдено, если для определения реальных оптических свойств атмосферы и величины рефракции использовать информацию об условиях прохождения света в турбулентной атмосфере. Классическое решение задачи определения рефракции, когда рассматриваются условия прохождения света в атмосфере, находящейся в статическом состоянии, для реальной земной атмосферы некорректно для большей части времени суток. Современное решение проблемы рефракции основано на работах по изучению прохождения света в турбулентной атмосфере, выполненных в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН и в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН [25–32].

5. Как показывают исследования радиофизических методов, полученные результаты позволяют полагать, что в ближайшем будущем большинство оптических измерений в приземном слое атмосферы могут быть выполнены без существенных искажений результатов из-за рефракции [87, 92–100]. В настоящее время уже началось практическое применение турбулентного метода определения рефракции. Опыт использования электронных тахеометров с автоматическим наведением на визирную цель в различных климатических зонах и в разные сезоны года показывает высокую эффективность метода определения рефракции по флуктуациям угла прихода, простоту его реализации и высокую точность, соответствующую инструментальной точности используемого прибора.

6. Радиофизический (турбулентный) метод определения рефракции позволяет проводить измерения в неблагоприятных условиях наблюдений, что расширяет временные границы для выполнения оптических наблюдений без снижения их качества [87, 92–100]. Таким образом, последние разработки радиофизических методов позволяют на основании выполненных в последние годы исследований сделать вывод о том, что можно использовать эти методы определения рефракции, которые более эффективны, чем классические, опирающиеся на теорию Ньютона.

Список литературы

1. Крылов А Н *Ньютонова теория астрономической рефракции* (М.– Л.: АН СССР, 1935)
2. Островский А Л и др. *Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения* (М.: Недра, 1990)
3. Островский А Л *Геопрофи* (1) 6 (2008)
4. Виноградов В В и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **10** 1227 (1985); Vinogradov V V et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **28** 850 (1985)
5. Банах В А и др. *Оптика и спектроскопия* **62** (5) 1136 (1987)
6. Аксенов В П и др. *Влияние атмосферы на распространение лазерного излучения* (Отв. ред. В Е Зуев) (Томск: Томский филиал СО АН СССР, 1987)
7. Аксенов В П, Банах В А, Чен Б Н *Оптика атмосферы* **1** (1) 53 (1988)
8. Носов В В *Оптика атмосферы* **1** (1) 122 (1988)
9. Банах В А, Чен Б Н *Оптика атмосферы* **1** (2) 106 (1988)
10. Банах В А, Цвык Р Ш, Чен Б Н, в сб. *X Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. Тезисы докладов* (Томск: ТНЦ СО АН СССР, 1989) с. 101
11. Лукин В П, Меламуд А Э, Миронов В Л *Изв. вузов. Физика* (8) 51 (1985); Lukin V P, Melamud A É, Mironov V L *Sov. Phys. J.* **28** 648 (1985)
12. Меламуд А Э, Лукин В П "Способ измерения приращения угла рефракции", Авторское свидетельство № 1553828, приоритет от 26.06.85 (1985)
13. Лукин В П, Меламуд А Э *Оптика атмосферы* **3** (5) 451 (1990); Lukin V P, Melamud A E *Atmos. Ocean. Opt.* **3** (5) 411 (1990)
14. Лукин В П *Атмосферная адаптивная оптика* (Новосибирск: Наука, 1986); Пер. на англ. яз.: Lukin V P *Atmospheric Adaptive Optics* (Bellingham, WA: SPIE, 1995); Лукин В П *УФН* **173** 887 (2003); Lukin V P *Phys. Usp.* **46** 860 (2003); Лукин В П *УФН* **176** 1000 (2006); Lukin V P *Phys. Usp.* **49** 971 (2006); Лукин В П *УФН* **191** 292 (2021); Lukin V P *Phys. Usp.* **64** 280 (2021)
15. Дементьев В Е *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* (5) 29 (1973)
16. Джуман Б М *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (28) 17 (1978)
17. Джуман Б М *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (38) 16 (1983)
18. Джуман Б М, Павлив П В, Стащишин И И *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (30) 66 (1979)
19. Островский А Л, Кравцов Н И, Перий С И *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (45) 69 (1987)
20. Островский А П, Глусят Б Т, Суюнов А С *Геодезия и картография* (5) 19 (1987)
21. Островский А П, Суюнов А С *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (49) 112 (1989)
22. Островский А П, Мороз А И *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* **44** (3) 11 (2000)
23. Brunner F K, in *Refraction Influences in Astrometry and Geodesy, Symp. No. 89, Uppsala, Sweden, 1–5 August 1978* (Eds E Tengström, G Teleki) (Dordrecht: D. Reidel, 1979) p. 227
24. Brunner F K, in *Geodetic Refraction. Effects of Electromagnetic Wave Propagation Through the Atmosphere* (Ed. K Brunner) (Berlin: Springer-Verlag, 1984) p. 1, https://doi.org/10.1007/978-3-642-45583-4_1
25. Татарский В И *Распространение волн в турбулентной атмосфере* (М.: Наука, 1967)
26. Гурвич А С и др. *Лазерное излучение в турбулентной атмосфере* (М.: Наука, 1976)
27. Зуев В В *Распространение лазерного излучения в атмосфере* (М.: Радио и связь, 1981)
28. Зуев В Е, Банах В А, Покасов В В *Современные проблемы атмосферной оптики Т. 5 Оптика турбулентной атмосферы* (Л.: Гидрометеониздат, 1988)
29. Миронов В Л *Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере* (Новосибирск: Наука, 1981)
30. Алексеев А В, Генин В Н, Кабанов М В, в сб. *Рассеяние и рефракция оптических волн в атмосфере* (Науч. ред. М В Кабанов) (Томск.: Ин-т оптики атмосферы СО АН СССР, 1976)
31. Алексеев А В, Кабанов М В, Куштин И Ф *Оптическая рефракция в земной атмосфере (наклонные трассы)* (Новосибирск: Наука, 1983)
32. Алексеев А В, Кабанов М В, Куштин И Ф *Оптическая рефракция в земной атмосфере (горизонтальные трассы)* (Новосибирск: Наука, 1982)
33. Teleki G, in *Proc. of the Workshop on Refraction Determination in the Optical and Radio Astrometry, Leningrad, USSR, 1985* (Publikacije Astronomske opservatorije u Beogradu, Vol. 35, Ed. G Teleki) (Belgrade: Astronomical Observatory, Institute of Astronomical Research, 1987) p. 213
34. Яценко А Ю *Теория рефракции* (Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1990)
35. Юношев Л С *Боковая рефракция света при измерениях углов* (М.: Недра, 1969)
36. Hübner E *Vermessungstechnik* **25** (10) 349 (1977)
37. Angus-Leppan P V, in *Conf. on Refraction Effects in Geodesy. Conf. on Electronic Distance Measurement, 5–8 November 1968, New South Wales, Australia* (Ed. P V Angus-Leppan) (Kensington: Department of Surveying, Univ. of New South Wales, 1969) p. 74

38. Изотов А А, Пеллинен Л П, в сб. *Труды ЦНИИГАиК. 1952* (М.: Геодезиздат, 1955) с. 102
39. Вшивкова О В *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* (1) 3 (2010)
40. Вшивкова О В *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* (3) 17 (2007)
41. Вшивкова О В *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* (5) 22 (2005)
42. Вшивкова О В, Автореф. дисс. ... докт. техн. наук (М.: Моск. гос. ун-т геодезии и картографии, 2010)
43. Вшивкова О В, в сб. *Сборник статей по итогам Международной научно-технической конф., посвященной 230-летию основания МИИГАиК* (Приложение к журналу Известия вузов "Геодезия и аэрофотосъемка", № 6) Вып. 2, Ч. 2 (М.: Изд-во МИИГАиК, 2009) с. 17
44. Гордеевцев А В *Геодезия и картография* (4) 23 (2007)
45. Гордеевцев А В, Мозжухин О А *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* (1) 34 (2005)
46. Мозжухин О А, Деп. ВИНТИ 5.06.86, 412450 (Горький: Горьковский инженерно-строительный институт, 1986)
47. Struve W *Beschreibung der zur Ermittlung des hohenschiedes dem schwazzenund dem Caspischen Meer ausgefurten Messungen* (СПб.: Тип. Имп. акад. наук, 1849)
48. Цингер Н Я *Курс высшей геодезии* (СПб.: Тип. Имп. акад. наук, 1898)
49. Jordan W, Eggert O, Kneissl M *Handbuch der Vermessungskunde* (Stuttgart: J.B. Metzler, 1956); Пер. на русск. яз.: Иордан В, Эгерт О, Кнейссл М *Руководство по высшей геодезии* Т. 2 (М.: Госгеолтехиздат, 1963)
50. Галкин Ю С, Побединский Г Г *Геодезия и картография* (2) 16 (1986)
51. Герамов А "3D системы автоматического управления в дорожном строительстве", <https://dropdoc.ru/doc/297443/sistemy-avtomaticheskogo-upravleniya-dsm>
52. Маслич Д И *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (9) 33 (1969)
53. Островский А Л и др. *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (39) 81 (1984)
54. Cluzdak J, Rozprawa doctorska Wplyw turbulencji atmosferyznej na pomiary odleglosci dalmierzem optoelektronicznym (Warszawa: Politechnika Warszawska, 1982)
55. Веселы М, Витасек И *Геодезия и картография* (9) 27 (1983)
56. Менухов И И *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* (4) 36 (1980)
57. Менухов И И *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* (4) 48 (1983)
58. Менухов И И *Геодезия и картография* (9) 20 (1974)
59. Мозжухин О А, в сб. *Материалы IX Научной конф. Секция геофизики, геологии и разведки торфяных месторождений* (Калинин, 1977)
60. Мозжухин О А *Геодезия и картография* (6) 16 (1994)
61. Павлив П В, Мельничук И А *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (50) 79 (1989)
62. Юношев Л С, в сб. *Исследования в области измерений времени и частоты. Сборник научных трудов* (М.: ВНИИФТРИ, 1990) с. 89
63. Shedler A *Zum Problem der Seiten refraction* N 5 (Wien: Osterreichische z.f.v., 1933)
64. Bahnert G *Vermessungstechnik* **18** (7) 263 (1970)
65. Bahnert G *Vermessungstechnik* **35** (1) 14 (1987)
66. Вильнер Д Г *Геодезия и картография* (11) 13 (1976)
67. Лазарев Е Г *Тригонометрическое нивелирование и гравиметрические исследования в Антарктиде* (М.: Наука, 1970)
68. Лышко М В, Русак В М, Чадович Д В *Инженерные изыскания* (3) 60 (2010)
69. Hirt C et al. *J. Geophys. Res.* **115** D21102 (2010)
70. Извеков М М *Геодезия и картография* (12) 21 (1966)
71. Никольский Е К *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (18) 15 (1973)
72. Джуман Б М *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (47) 48 (1988)
73. Островский А Л, Власенко С Г *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (39) 81 (1984)
74. Яковлев Н В *Геодезия и картография* (3) 8 (1969)
75. Яковлев Н В, Дисс. ... докт. техн. наук (М.: МИИГАиК, 1971)
76. Яковлев Н В *Высшая геодезия* (М.: Недра, 1989)
77. Bahnert G *Vermessungstechnik* **4** 127 (1985)
78. Ковалев В И, Соломатов В И *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* (4) 17 (1987)
79. Михайлов В С, в сб. *Современные методы учета и исключения влияния рефракции световых волн при геодезических и астрономических измерениях. Тезисы докладов Всесоюзного совещания, 16–19 апреля 1974 г.* (Ред. коллегия: В А Коваленко и др.) (Львов: Львовский политехнический ин-т, 1974)
80. Tengstrom E, Osterr Z *Vermessungsw* **55** 292 (1967) Sonderh.25
81. Прилепин М Т, Голубев А Н, в сб. *Итоги науки и техники. Геодезия и аэрофотосъемка* Т. 15 (М.: ВИНТИ, 1979)
82. Сушков А С, в сб. *Современные методы учета и исключения влияния рефракции световых волн при геодезических и астрономических измерениях. Тезисы докладов Всесоюзного совещания, 16–19 апреля 1974 г.* (Ред. коллегия: В А Коваленко и др.) (Львов: Львовский политехнический ин-т, 1974)
83. Голубев А Н *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* (6) 16 (1981)
84. Bahnert G *Vermessungstechnik* **51** 156 (1983)
85. Bokem B *Mitt. Inst. Geod and Fotogram. Eidenoss Tech. Hochsch.* (73) 1 (2001)
86. Flach P, These No. 13844 (Zurich: ETH, 2000)
87. Дементьев Д В *Науки о Земле* (1) 46 (2020)
88. Изотов А А *Геодезия и картография* (1) 12 (1975)
89. Lumley J L, Panofsky H A *The Structure of Atmospheric Turbulence* (New York: Interscience Publ., 1964); Пер. на русск. яз.: Ламли Дж, Пановский Г *Структура атмосферной турбулентности* (М.: Мир, 1966)
90. Черемухин А М *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана* (11) 7 (1975)
91. Черемухин А М *Оптические методы измерения структурной характеристики поля показателя преломления в турбулентной атмосфере* (Горький: Изд-во ГГУ, 1982) Учебное пособие
92. Дементьев Д В и др. *Геодезия и картография* **80** (12) 2 (2019)
93. Дементьев Д В *Геодезия и картография* **80** (5) 2 (2019)
94. Дементьев Д В *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана* **56** 482 (2020); Dementiev D V *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* **56** 422 (2020)
95. Дементьев Д В, Жуков И М *Геопрофи* (5) 22 (2019)
96. Дементьев Д В *Изв. СО РАН. Оптика атмосферы и океана* **33** (1) 41 (2020)
97. Дементьев В Е *Рефракция и миражи* (М.: Галлея-Принт, 2009)
98. Дементьев Д В и др. *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* **64** 259 (2020)
99. Дементьев Д В *Маркшейдерский вестн.* (2) 38 (2020)
100. Дементьев В Е, Васютинский И Ю, Дементьев Д В *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* **65** (1) 20 (2021)
101. Суюнов А С, Власенко С Г, Колгунов В М *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (47) 112 (1988)
102. Суюнов А С *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (50) 96 (1989)
103. Суюнов А С, Дисс. ... докт. техн. наук (Киев: Киевский государственный технический ун-т строительства и архитектуры, 1995)
104. Виноградов В В и др. *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка* (3) 32 (1985)
105. Виноградов В В, Локотко М И *Геодезия и картография* (6) 18 (1988)
106. Виноградов В В, Медовиков А С, Никольский Е К *Геодезия и картография* (10) 11 (1986)
107. Виноградов В В *Геодезия и картография* (7) 18 (1986)
108. Копытин Ю Д и др. *Дистанционные методы прогноза нефтяных, рудных и техногенных аномалий по геоатмосферным*

- проявлениям (Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2000)
109. Huizer A M J, Gachter B F J. *Phys. D* **22** 1630 (1989)
110. Hennes, M., Döncke R, Christ H, Zur Bestimmung der temperatur gradienteninduzierten Richtungsverswenkung beim Tunnelvortrieb VPK (8) 418 (1999)
111. Ingensand Hilmar *Geod. Kartogr. (Lietuva)* **34** (2) 61 (2008) IIb, IVb
112. Troller M, Szintillometrie zur Refraktionskorrektur von Tachymetermessungen, VPK (9) 603 (2001)
113. Weiss A I *ETH Zürich Mitt. Inst. Geod. Fnd Fotogram.Ridenoss Tech. Hochsch Zürich* 75 (2002)
114. Островская С А *Геодезия, картография и аэрофотосъемка* (3) 51 (1984)

Vertical refraction of light in the atmospheric surface layer: traditional problems of determining refraction and new technical achievements

V.P. Savinykh, I.Yu. Vasyutinsky, D.V. Dement'ev^(*)

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Gorohovskii per. 4, 105064 Moscow, Russian Federation

E-mail: ^() ddy@gis2000.ru*

Almost all the methods of determining refraction are based on the theory created by Newton. Studies performed by Newton, Euler, Oriani, Bernoulli, et al. involved the determination of the geometrical path of a light ray. However, the refraction of light propagating in the atmospheric surface layer cannot be calculated reliably because of numerous conditions determining the propagation of light in the layer. Modern methods for determining the refraction of light providing optical measurements with an instrumental accuracy of the devices used are analyzed.

Keywords: temperature gradient, air refractive index gradient, air refractive index pulsations, angle of incidence of a laser beam, unstable temperature stratification of the atmosphere, statistical characteristics of a wave, turbulence, wind velocity, light curve radius, refractive index, atmospheric surface layer

PACS numbers: **42.15.** – i, 42.25.Bs, 42.68.Bz

Bibliography — 114 references

Received 10 May 2021, revised 10 November 2021

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **192** (8) 926–943 (2022)

Physics – Uspekhi **65** (8) (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.11.039100>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.11.039100>