

19 января 2008 г. доктору технических наук, профессору Аполлинарию Львовичу Островскому исполнилось 85 лет. Он прошел суровую военную школу, сражаясь с оружием в руках против немецко-фашистских захватчиков, и только после окончания Великой Отечественной войны (1941–1945) поступил на геодезический факультет Львовского политехнического института, в котором и занимается преподавательской и научной деятельностью вот уже более 60 лет.

Его педагогический талант, профессиональные качества, плодотворная творческая работа, умелое руководство преподавательским и научным коллективами позволили ему не только создать теорию «единства рефракции и турбулентности атмосферы», но и сформировать львовскую школу изучения влияния атмосферной рефракции на геодезические измерения. Под его руководством защищено около 30 кандидатских и докторских диссертаций.

В последние годы одним из новых научных направлений А.Л. Островского является геодинамика и разработка эффективных геодезических методов исследования деформаций инженерных сооружений. Он является создателем и главным редактором научного журнала «Геодинамика», одним из организаторов международного симпозиума «Геодезический мониторинг окружающей среды», который ежегодно проходит в г. Алушта (Украина, Крым).

Редакция журнала поздравляет А.Л. Островского с юбилейной датой и желает ему крепкого здоровья, неувядающей энергии, новых научных достижений и талантливых учеников!

ДОСТИЖЕНИЯ И ЗАДАЧИ РЕФРАКТОМЕТРИИ

А.Л. Островский (Национальный университет «Львовская политехника», Украина)

В 1951 г. окончил геодезический факультет Львовского политехнического университета (в настоящее время — Национальный университет «Львовская политехника»). После его окончания до настоящего времени работает в университете. Доктор технических наук, профессор. Автор более 200 научных статей, монографий, учебных пособий.



▼ Сущность рефрактометрии. Ее связь с науками о Земле

Рефрактометрия — это наука о неравномерном и непрямолинейном распространении электромагнитных волн (ЭМВ) в трехмерной неоднородной по плот-

ности среде и о методах исключения систематических погрешностей измерений углов и длин, вызванных этой неоднородностью. Такой средой обычно является изотропная атмосфера Земли и межпланетные пространства. Полагаем, что впервые термин «рефрактометрия» применен в работе [1], где под таким названием имелись в виду исследования исключительно неравномерности распространения ЭМВ.

Скоро будет десять лет, как мы живем в третьем тысячелетии. Оглядываясь на предыдущие тысячелетия, можно с гордостью утверждать, что они не прошли даром для человечества, а ознаменовались значительным развитием наук, особенно наук о планете Земля, таких как геодезия, геофизика, геодинамика, астрономия, космическая

геодезия и другие. В частности, статическая геодезия, изучающая форму и размеры Земли и ее гравитационное поле, преобразовалась из трехмерной в четырехмерную, кинематическую, изучающую изменения вышеупомянутых параметров во времени и, постепенно, превращается в динамическую, изучающую причины этих изменений.

Как известно [2], геодезия изучает планетарный геоид с точностью 0,2–0,3 м, региональный — с точностью 0,07–0,1 м, локальный — с точностью 0,01–0,05 м. При этом планетарный геоид подтверждает гидростатичность Земли в целом. Кривая распределения мощности континентальной коры подобна кривой распределения высот геоида. Отрицательные аномалии высот соответствуют толще земной коры $h > 50$ км. В

целом глобальная аномалия высот и толща земной коры отрицательно коррелированы. Между тем, это открытие глобального характера не свойственно локальным геоструктурам. Имеют место положительные корреляции геоида с рельефом, например, пик Эвереста, поднятый на 57 м над геоидом Гималайского региона. Есть предположения, что волны геоида в десятки километров, обусловленные неоднородностью земной коры, также имеют положительную корреляцию с рельефом.

Очевидна роль геодезии в изучении движения земной коры, прогнозировании землетрясений, выявлении закономерностей размещения полезных ископаемых. Недалеко то время, когда геодезия проникнет в тайны тектонических явлений и будет изучать строение, движение и развитие Земли.

Заметим, что обычно, основную надежду дальнейшего развития геодезии исследователи возлагают на космическую геодезию. Между тем, парадокс, но реальный факт: высоты геодинамических пунктов определяются с использованием глобальных навигационных спут-

никовых систем (ГНСС) в 3–10 раз грубее, чем их широты и долготы. Другими словами, вертикальную составляющую, несущую важную информацию, мы определяем наиболее грубо. По существу, если в плановом отношении технологии ГНСС обеспечивают миллиметровую точность, то в высотном отношении — только сантиметровую.

Объективные расчеты показывают, что если пункты разнесены на расстояние до 100 км, то высоты с помощью геометрического нивелирования I класса, выполняемого в соответствии с действующей инструкцией, определяются точнее, чем при использовании приемников ГНСС. Между тем, современные электронные нивелиры могут обеспечить точность в 2,5–3 раза выше, чем этого требует действующая инструкция. Возможности усовершенствованных методов геометрического нивелирования превышают точность спутниковых методов при расстояниях между пунктами до 400 км. Поэтому наилучшего результата можно достичь, рационально комбинируя наземные и космические методы при исследовании планетарных и региональных процессов.

Извечной проблемой любой науки является необходимость повышения точности измерений, т. е. повышения скрупулезности исследований. В настоящее время общепризнано, что наибольшими систематическими погрешностями пространственных измерений углов и линий является неоднородность атмосферы по плотности. Отсюда понятна значимость рефрактометрии в познании Вселенной. Вообще, строго говоря, непрямолинейность и неравномерность распространения света и радиоволн вызваны пространственной неоднородностью показателя преломления атмосферы n , который является функцией плотности атмосферы

ρ . При этом, на скорость распространения ЭМВ влияет именно показатель преломления воздуха, а непрямолинейность распространения (рефракцию) вызывают градиенты показателя преломления. Изменения скорости распространения ЭМВ, искажающие измеренные дальности, получили название фазовых задержек. Пространственные кривые распространения ЭМВ называют рефракционными кривыми.

В зависимости от того, наблюдаются ли с поверхности Земли удаленные земные предметы, естественные небесные тела (звезды, планеты) или искусственные небесные тела (спутники) различают земную, спутниковую и астрономическую рефрактометрию.

В целях исследований пространственные кривые распространения ЭМВ условно проектируют на вертикальную и горизонтальную плоскости, и получают составляющие (проекции) пространственной кривой, показанные на рис. 1. Различают полные σ и частичные δ углы рефракции. Для учета влияния рефракции на измерения вертикальных углов, горизонтальных углов и азимутов необходимо и достаточно знать частичные углы рефракции δ_{BA} , δ_{BC} , δ_{CA} , δ_{CB} .

Напомним, что на результаты геометрического нивелирования оказывает влияние линейная рефракция r , искажающая отсчеты с нивелирных реек. По малости этих искажений можно просто и почти безошибочно перейти от угловой к линейной рефракции или наоборот:

$$r = \delta_B'' L / \rho'' \quad (1)$$

где L — расстояние от рейки до нивелира; ρ'' — число угловых секунд в радиане.

Не менее важные проблемы рефрактометрии связаны с измерением длин свето- и радиодальномерными системами, в которых расстояние определя-

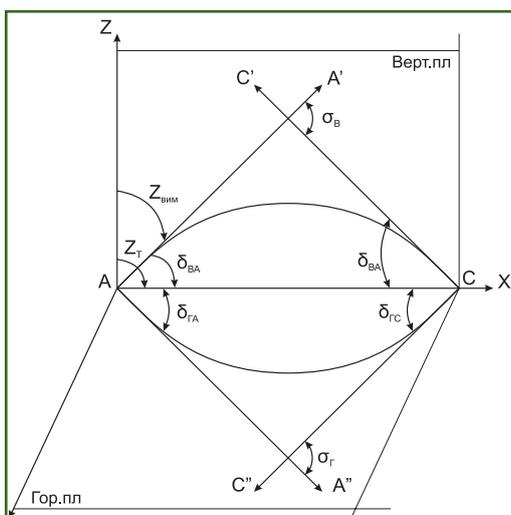


Рис. 1
Определение частных и полных углов вертикальной и горизонтальной рефракции

ется посредством измерения отрезков времени τ распространения ЭМВ только в прямом или в прямом и обратном направлениях. В последнем случае формула определения длины отрезка L имеет вид:

$$L = (C_0/\bar{n}) \cdot (\tau/2), \quad (2)$$

где C_0 — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме, а \bar{n} — средний интегральный показатель преломления воздуха на заданном пути L . При измерениях длин ограничиваются определением показателя преломления воздуха на конечных точках трассы.

Так как $\bar{n} \neq (n_1 + n_2)/2$, то измеренные расстояния искажены погрешностями ΔL_n .

Поскольку ЭМВ распространяются криволинейно, это, в свою очередь, вносит систематическую погрешность ΔL_k , так как необходимо знать длину замыкающей хорды, которая короче пространственной кривой.

Таким образом, суммируя сказанное, наука рефрактометрии призвана решать сложные проблемы определения показателя преломления и его градиентов во множестве точек среды, в которой распространяются ЭМВ. Без этих данных невозможны высокоточные пространственные измерения.

▼ Основные этапы развития и барьеры на пути решения задач рефрактометрии

Обосновано старейшей рефрактометрией считается астрономическая рефрактометрия. Хотя первые сведения, дошедшие до нас, об астрономической рефракции относятся к I столетию нашей эры, вероятно, что о ней было известно значительно раньше, в древнем Египте и Китае. Это естественно, так как рефракционное искажение солнечного диска видно невооруженным глазом при восходе и заходе Солнца, о чем, собственно, и говорится в работах Клеомена и Птолемея.

Именно Клеоменем было привлечено внимание на то, что, ввиду непрямолинейности распространения света можно видеть небесные тела даже тогда, когда они расположены ниже горизонта. Птоломей первый предложил определить углы астрономической рефракции путем сравнения зенитных углов, наблюдаемых с теми, которые рассчитываются теоретически. Эпоха средневековья более чем на тысячелетие парализовала мысль человечества.

Только в 1489 г. Б. Вальтер впервые определил астрономическую рефракцию методом, предложенным Птоломеем, и установил, что у горизонта угол рефракции приблизительно равен полградуса. Первую теорию рефракции создал И. Кеплер в 1604 г. Он ошибочно считал, что атмосфера, окутывающая Землю, однородна по плотности. Зарождение наземной рефрактометрии мы связываем с творцом законов преломления света голландским ученым В. Снеллиусом (1580–1626), предложившим, как известно, также метод триангуляции для определения больших длин.

Дальнейшими продолжателями изучения рефракции, вероятно, следует считать французских академиков Ж.-Д. Кассини (1625–1712), который первый применил законы преломления в теории рефракции, и Ж. Пикара (1620–1682), достойно оценившего предложенный В. Снеллиусом метод триангуляции и построившего триангуляционную сеть вдоль дороги из Парижа на Амьен для определения размеров Земли. Интересно, что эти данные использовал Ньютон, подтверждая свои гениальные открытия. Ж. Пикар первый установил сетку нитей в окуляре зрительной трубы, чем значительно повысил точность угловых измерений, и не мог не заметить действия рефракции на эти измерения.

Однако тогда исследователей интересовала непрямолинейность распространения ЭМВ. Только с появлением первых свето- и радиодальномеров (середина XX века) возникла наземная рефрактометрия, а с появлением первых искусственных спутников — спутниковая рефрактометрия.

Именно поэтому в настоящее время следует говорить о рефрактометрии, как об отдельной области знаний, так как круг задач, которые она призвана решать, существенно расширился. Таким образом, рефрактометрия одновременно является старой и молодой наукой.

Зарождение любой науки, изучающей явления природы, начинается с дискуссий: существует или нет некоторое явление в природе; если установлено, что явление существует — изучаются его закономерности, устанавливается полезно или нет это явление для человечества. Такие же этапы развития прошла и рефрактометрия.

Назовем более поздние этапы ее развития.

1. Установление качественных и количественных характеристик влияния атмосферы на результаты измерений углов и длин [3].

2. Разработка общей теории непрямолинейности (рефракции) и неравномерности (фазовых задержек) распространения ЭМВ; вывод формул для определения поправок в результаты измерений.

К сожалению, применение этих формул, как правило, невозможно, прежде всего потому, что требует знания мгновенных градиентов температуры и значения n во многих точках на пути распространения ЭМВ, а эти параметры — не известны. Это является главным барьером на пути развития рефрактометрии.

Понятно, все же, что без теории рефрактометрии немыслима.

3. Поиск единого коэффициента вертикальной рефракции.

Введение коэффициента, независимого от длины и высоты луча вдоль трассы над поверхностью Земли, привело бы к исключению атмосферных влияний на измерения разности высот точек (превышений).

Известно, что коэффициентом рефракции K называют отношение радиуса Земли R_3 к радиусу световой кривой R_c , т. е.:

$$K = R_3/R_c. \quad (3)$$

При $K = \text{Const}$ проблема вертикальной рефракции была бы решена. Действительно, влияние кривизны Земли K_3 на превышение точно определяется простой формулой:

$$K_3 = (1/2) \cdot (L^2/R_3), \quad (4)$$

и если $K = \text{Const}$ и известно (например, $K = 0,145$), тогда влияние рефракции на превышение находится просто:

$$r = 0,145 \cdot K_3. \quad (5)$$

Столетиями велись поиски единого коэффициента рефракции K , и безуспешно.

В настоящее время точно известно, что о едином коэффициенте рефракции не только для государства, но и для отдельного участка работ не может быть и речи. Коэффициент рефракции изменяется в пределах от +6 до -6.

С некоторым приближением можно вести речь о едином коэффициенте только для нормальной (безразличной) стратификации атмосферы. Такое состояние длится при ясной погоде утром и вечером, максимум по полчаса. В это время $K = 0,145$. С такой же точностью известен и угол нормальной рефракции, который равен:

$$\delta_n = 2,35 \cdot 10^{-3} L. \quad (6)$$

На основе (6) и (1) получим формулу поправки за нормальную рефракцию в превышения без коэффициента рефракции:

$$r_n = 0,11 \cdot 10^{-7} L^2. \quad (7)$$

Отсюда видно, что достаточно знать длину трассы L . Заметим, что точность формулы (7)

при нормальной стратификации такая же, как в формуле (5). Иными словами, понятие коэффициента рефракции в современной рефрактометрии потеряло смысл.

4. Разделение рефракции на нормальную и аномальную.

Проблема определения нормальной вертикальной рефракции решается (что понятно из вышеизложенного).

Главным объектом исследований остается аномальная вертикальная рефракция, которая на один-два порядка больше нормальной.

5. Введение А.А. Изотовым и Л.П. Пеллиным понятия эквивалентной высоты $h_{эkv}$ [4]. Установлено, что на угловые величины рефракции влияют не средние высоты луча над земной поверхностью, а средние весовые, о чем еще будет идти речь.

Имея в виду и зная $h_{эkv}$, можно определять γ -градиенты температуры на любой высоте по формуле:

$$\gamma = \gamma_1/h_{эkv}, \quad (8)$$

где γ_1 — градиент температуры на высоте 1 м, который всегда можно измерить; $h_{эkv}$ — эквивалентная высота.

Казалось бы, проблема определения γ во множестве точек решена, однако это не так. Дело в том, что над различными подстилающими поверхностями градиент температуры γ в один и тот же момент — разный; кроме того, выяснилось, что при различных стратификациях воздуха степень $h_{эkv}$ равна не единице, а некоторой переменной.

В результате формулы А.А. Изотова и Л.П. Пеллины, к сожалению, дают только приблизительные результаты.

6. Изучение распределения метеорологических параметров с высотой. Прежде всего, исследование градиентов температуры и влажности, от которых функционально зависит искомое распределение аномального показателя преломления. Ха-

раактер градиентов температуры и влажности зависит от физико-географических особенностей регионов, которые очень разнообразны и поэтому до конца не изучены.

Дальнейшее изучение пространственного распределения показателя преломления n остается актуальным.

7. Разработка методов определения и учет действия рефракции и фазовых задержек на угловые и линейные измерения — собственно рефрактометрия.

Существующие методы можно разделить на две группы: косвенные (не прямые) и прямые. Первая группа развивается почти 400 лет и отличается большим разнообразием. Вторая — сравнительно молодая, насчитывает приблизительно 100 лет. В первой группе можно выделить несколько подгрупп, а во второй — только отдельные методы.

К косвенным методам относятся: метеорологический, геодезический и статистический, к прямым — дисперсионный, компенсационный, изменения морского горизонта (пригодный только для вертикальной рефракции), турбулентный.

8. Широкое применение теории турбулентности атмосферы для определения рефракции и интегрального показателя преломления.

Более 50 лет львовская школа рефракции ведет исследования в этой области и достигла определенных успехов, прежде всего, изучая именно турбулентные колебания фазы визирных целей. Об этом подробнее остановимся ниже.

9. Исследования, кроме флуктуаций фазы, других оптических проявлений турбулентности, а именно:

— флуктуации света по яркости (по колебаниям амплитуды);

— изменениям среднего размера источника излучения у

фокальной плоскости зрительной трубы;

— размытию турбулентностью резкости изображений специальных визирных марок.

Наиболее просто технически реализуется измерение флуктуаций яркости (колебания амплитуды). Однако этот метод невозможно применять для длинных приземных трасс.

Метод исследования флуктуации размера изображения обременен значительными систематическими погрешностями.

Наиболее перспективным оказался метод исследования колебания визирных целей (колебания фазы).

10. Исследования в области рефрактометрии, к сожалению, имеют значительные достижения только для термической турбулентности атмосферы. В то же время, пока не разработаны кардинальные, автоматизированные методы исключения влияния на пространственные измерения неоднородной плотности атмосферы при инверсии температуры и динамической турбулентности.

▼ Львовская школа рефракции и ее вклад в развитие рефрактометрии

Профессора Львовского политехнического института А.Д. Моторный и М.К. Мигаль стоят у истоков зарождения львовской школы рефракции. Под их руководством ассистенты кафедры геодезии Д.И. Маслич и А.Л. Островский в 1952–1953 гг. выполнили первые исследования в области рефрактометрии и написали монографии по темам кандидатских диссертаций: «Исследование вертикальной рефракции и точности тригонометрического нивелирования в горных условиях» (автор Д.И. Маслич, научный руководитель М.К. Мигаль) и «Исследование боковой рефракции в полигонометрии» (автор А.Л. Островский, научный руководитель

А.Д. Моторный), которые успешно защитили. Монографии были одобрены профессорами А.А. Изотовым и А.С. Чеботаревым. Более того, А.С. Чеботарев в кратком письме от 6 декабря 1958 г., адресованном автору данной статьи, писал: «Вопрос полигонометрической рефракции заслуживает того, чтобы заняться им как следует». В 1964 г. была опубликована статья «Геодезический метод учета влияния атмосферы на результаты светодальномерных измерений» (автор А.Л. Островский). Предложенный в статье метод впервые использовался институтом физики Земли АН СССР для выяснения причин землетрясения в Ташкенте путем проверки гипотезы надвигов горной системы Тянь-Шань на систему Памир. Для этого было необходимо с высокой точностью измерять линию, которая соединяет отроги этих систем, и следить за изменениями ее длины. Метод оказался пригодным для такой цели.

В 1966 г. совместным решением Министерства геологии СССР и Министерства образования УССР была создана отраслевая лаборатория по изучению атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения (ОНИЛ-18). Первым научным руководителем этой лаборатории стал М.К. Мыгаль, а первыми руководителями тем научных исследований — Д.И. Маслич, А.Л. Островский и Л.С. Хижак.

В 1967 г. руководство лаборатории ОНИЛ-18 получило письмо от ЦНИИГАиК, в котором, в частности, предлагалось: «... в связи с возложенными на лабораторию обязательствами изучения атмосферных влияний на точность геодезических измерений, просим рассмотреть вопрос о создании в районе Карпат эталонного геодезического полигона...». Такой полигон можно было создать, только используя светодально-

мерные измерения, при которых, каким-то образом, определять средне-интегральные значения показателя преломления воздуха на пути световых волн. Такого метода, кроме дорогостоящего аэростатного зондирования, в то время не было. Длины линий на Карпатском эталонном полигоне (9 пунктов 25 сторон) были измерены с погрешностью 3×10^{-7} . Это дало возможность вычислить горизонтальные углы с погрешностями 0,1–0,2".

В 1973 г. автор этой статьи защитил докторскую диссертацию, а в 1974 г. возглавил руководство лабораторией. К этому времени по вопросам рефрактометрии во Львовском политехническом институте было защищено около 20 кандидатских диссертаций. Геодезический факультет стал центром исследования рефрактометрии в СССР.

В апреле 1974 г., во Львове, на базе геодезического факультета и ОНИЛ-18 состоялось первое Всесоюзное совещание «Современные методы учета и исключения рефракции световых волн при геодезических и астрономических измерениях». В решении этого совещания были указаны рациональные методы учета атмосферных влияний и дальнейшие направления и цели исследований в области рефрактометрии.

В последующем отраслевая лаборатория достигла признанных успехов в рефрактометрии. Достаточно сказать, что в области рефрактометрии защищены 8 докторских и более 40 кандидатских диссертаций, получены десятки патентов и авторских свидетельств, опубликовано 4 монографии, более 1000 научных статей. Последние годы лаборатория работает над проблемой создания геодинимических сетей на АЭС, их математической оптимизации. По этой тематике защитил докторскую



Рис. 2
Коллектив лаборатории ГНДЛ-18

диссертацию К.Р. Третьяк, который в настоящее время возглавляет ОНИЛ-18 (ГНДЛ-18) и является директором института геодезии НУ «Львовская политехника» (рис. 2).

В сравнительно короткой статье трудно изложить более чем пятидесятилетнюю историю деятельности лаборатории. Назовем только наиболее важные, по нашему мнению, этапы этой деятельности (подробнее см. в [3]).

1. Благодаря государственному финансированию научно-исследовательских работ за почти 25 лет лаборатория ОНИЛ-18 организовала более 20 полевых, научно-исследовательских экспедиций в различные районы СССР. Экспедиции изучали неравномерности распределения показателя преломления и градиентов показателя преломления атмосферы, вели проверку возможностей применения разработанных методов для минимизации атмосферных влияний, исследовали точность методов (рис. 3).

2. Значительный сбор данных о показателе преломления и его градиентов завершился новой классификацией рефракционных полей, которые до этого классифицировались только по размерам: общеземные, ре-

гиональные и локальные. Новая классификация дала возможность разделить рефракционные поля по характеру их влияния на результаты измерений на два вида:

I. Поля, изменяющие на протяжении суток градиенты показателя на обратные (на 180°);

II. Поля с постоянными направлениями градиентов, в которых на протяжении суток градиенты показателя изменяются только по модулю (по абсолютной величине).

3. Новая классификация позволила найти подсказанные природой методы минимизации этих влияний. Для полей I-го

вида пригодна симметричная программа наблюдений относительно моментов, близких к изотермии (нулевых радиационных балансов), а для полей II-го вида — наблюдения в периоды наибольшей однородности атмосферы.

4. Разработаны методы определения моментов формирования изотермии:

— приборный (балансомерный) — по времени перехода через нуль радиационного баланса;

— статический — по многолетним средним данным метеостанций;

— визуальный — по времени появления спокойных изображений визирных целей при ветре не менее $0,5$ м/с.

5. Учет атмосферных влияний на основании решения обратных задач рефракции. Определение вертикальную рефракцию (например, из одновременных двусторонних измерений зенитных углов), находят градиент показателя преломления dn/dz , а потом, зная точечные значения n_1 и n_2 на концах трассы и превышение между конечными точками h , находят интегральный показатель \bar{n} (с контролем):

$$\bar{n} = n_1 \pm (1/2) \cdot dn/dz \cdot h, \quad (9)$$

$$\bar{n} = n_2 \pm (1/2) \cdot dn/dz \cdot h. \quad (10)$$



Рис. 3
Наблюдения астрономической рефракции. Озеро Балхаш (1985 г.)



Рис. 4

Спутниковые GPS-наблюдения. Антарктида, архипелаг Аргентинские острова

Разработан ряд модификаций, уточняющих этот метод.

6. Метод рефракционного базиса, основанный на формуле:

$$\delta_i = \delta_b \cdot (h^{эkv.б.} / h^{эkv.i}) \cdot (L_i / L_b), \quad (11)$$

где δ_i — искомый угол рефракции; δ_b — известный угол рефракции (базис); $h^{эkv.б.}$ и $h^{эkv.i}$ — эквивалентные высоты соответствующих лучей; e — степень эквивалентных высот при данной стратификации атмосферы; L_i и L_b — длины трасс.

7. Определена рефракция на основе измеренных метеорологических параметров.

8. Исследована точность методов учета рефракции. Редуцированы результаты измерения зенитных углов на моменты нулевых аномальных градиентов температуры (автор Б.М. Джуман).

9. Экспериментально доказана формула нивелирной рефракции (автор П.В. Павлив).

$$r = \sigma_{max} / 2, \quad (12)$$

где σ_{max} — максимальный размах колебаний делений нивелирной рейки.

Формула доказана на основании многолетних экспериментальных исследований, выполненных И.И. Стащенишом [5].

10. Определена боковая рефракция δ_r (при измерении горизонтальных углов и вычисле-

нии азимутов из астрономических наблюдений) решением обратной задачи рефракции [3], на основании формулы:

$$\delta_r = -0,198 / L \cdot \gamma \cdot \Sigma, \quad (13)$$

$$\text{где } \gamma = 0,1230 (T^2 / B) \cdot (\delta_v / L) - 0,0342, \quad (14)$$

$$\text{а } \Sigma = \int_0^L \alpha_i \cdot \cos \nu_i \cdot l \cdot dl. \quad (15)$$

В этих формулах δ_v — вертикальная рефракция, Σ — рефракционная опасность направления; α_i — углы наклона местности на отрезках dl ; ν_i — определяется по карте (по масштабу заложений); ν_i — углы между линией визирования и горизонталями на отрезках dl . Зная Σ , можно заранее, используя карту, избрать направления для азимутальных измерений, по которым боковая рефракция не будет превышать 0,1–0,2".

11. Определено действие боковой рефракции и методов ее минимизации при создании городских геодезических сетей (автор И.С. Тревого) [6].

12. На основе теории турбулентности доказана теорема [7]: средняя аномальная вертикальная рефракция за 1–2 секунды равна максимальной амплитуде $\sigma_{max} / 2$ колебаний визирной цели за это же время. Таким образом, аналитически получена формула:

$$\delta''_{ан.сер.} = 1/2 \sigma''_{max}. \quad (16)$$

Формулы (12) и (16) справедливы только при термической турбулентности атмосферы.

13. Установлены степени эквивалентных высот $h^{эkv}$ при термической и динамической турбулентности атмосферы.

14. Установлены возможность и точность определения аномальной рефракции цифровыми камерами с ПЗС-датчиками при термической турбулентности.

15. Разработаны методы нахождения аномальной рефракции $\delta_{ан.сер.}$ и r электронными тахеометрами и нивелирами, которые определяют структурную характеристику турбулентности атмосферы Cn^2 или среднюю квадратическую погрешность отсчета по нивелирной рейке m_{kv} .

16. Разработан [3] дифференциальный метод определения n_r интегрального показателя преломления радиоволн на основании зависимости между градиентами влажности и температуры:

$$de/dz = 19 \cdot (e/T) \cdot (dT/dz), \quad (17)$$

где de/dz — вертикальный градиент влажности; dT/dz — вертикальный градиент температуры; e — абсолютная влажность; T — абсолютная температура.

17. Получена формула составляющей вертикальной рефракции, обусловленная влажностью воздуха:

$$\delta_{в.в.} = 79 \cdot (e/T^2) \cdot (dT/dz) \cdot L. \quad (18)$$

Формула не требует знания градиентов влажности.

18. Разработаны специальные приборы автоматизированного определения аномальной вертикальной рефракции (автор А.И. Мороз).

19. Выполнены исследования в области рефрактометрии в Антарктиде (рис. 4). Разработаны методы определения и учета влияния тропосферы на спутниковые измерения [8] (автор Ф.Д. Заболоцкий).

20. Разработаны методы определения и учета электромаг-

нитных полей на измерения, выполненные светодальномерами, спутниковыми приемниками GPS и прецизионными нивелирами (автор П.Г. Черняга).

21. Разработаны методы нахождения рефракционного удлинения трасс, длины которых определены из наземных свето- и радиодальномерных измерений. При длине трасс до 50 км поправки за рефракционное удлинение световых волн могут достигать 8 мм, для радиоволн — 66 мм. Точность определения поправок в пределах 0,5 мм [3].

▼ Некоторые нерешенные проблемы рефрактометрии

1. Главный барьер на пути решения проблемы определения аномальной рефракции принципиально устранен только при неустойчивой стратификации атмосферы, т. е. при термической турбулентности, а еще ранее — при нормальной стратификации атмосферы.

Однако следует отметить, что разработанные геодезические методы определения интегрального показателя преломления n , основанные на решении обратных задач рефракции, можно применять при любой стратификации атмосферы.

2. Современные автоматизированные методы рефрактометрии разрешают определять углы рефракции с точностью 0,7–1,5", а интегральное значение показателя преломления — с точностью $1 \cdot 10^{-7}$. Необходимо разработать методы, уменьшающие эти погрешности хотя бы в два раза.

3. Для инверсии температуры, что имеет место утром, вечером и ночью над сушей, а иногда круглосуточно в нижних слоях атмосферы над водными поверхностями, не разработаны автоматизированные, точные методы определения рефракции, которые позволяли бы (без значительных физических и материальных затрат) удовлетво-

рять требования науки и техники к точности астрономо-геодезических измерений.

4. Разработанная теория определения вертикальной рефракции при динамической турбулентности атмосферы и инверсии температуры не проверена экспериментально и поэтому не установлена точность измерений при ее реализации.

5. В настоящее время, когда спутниковые радионавигационные системы (ГНСС, радиointерферометры со сверхдлинными базами, спутниковые лазерные дальнометры и высотомеры, системы доплеровского определения орбит) все шире применяются в геодезии, геофизике, астрономии, навигации, метрологии и в других науках о Земле, становится необходимым определение групповых фазовых задержек сигналов и рефракционных искривлений (удлинения) трасс. Как показано в работе [9], суммарная погрешность определения тропосферных задержек составляет 3 см при $Z = 0^\circ$ и около 17 см при $Z = 80^\circ$. В геодезии, например, при эталонировании спутниковых приемников ГНСС, погрешности атмосферных задержек необходимо знать с точностью 0,5–1,0 мм.

6. Недостаточно точна компенсация ионосферных фазовых задержек радиоволн двухчастотными приемниками GPS. На это, безусловно, указывает уже тот факт, что точность измерения с помощью этих приемников ночью в 1,5–2 раза выше, чем днем. Поэтому, несомненно, поиск новых методов решения проблем спутниковой, астрономической и наземной рефрактометрии имеет значительный интерес.

▼ Список литературы

1. Прилепин М.Т. Исследования по геодезической рефрактометрии // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора

технических наук. — 1972. — 34 с.

2. Машимов М.М. Геодезия, геотектоника, сейсмология: Предметы и проблемы их взаимодействия // Геодезия и картография. — 1995. — № 1. — С. 17–28.

3. Островский А.Л., Джуман Б.М., Заблоцкий Ф.Д., Кравцов Н.И. Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения. — Недра, 1990. — 231 с.

4. Изотов А.А., Пеллинен Л.П. Исследования земной рефракции и методов геодезического нивелирования // Тр. ЦНИИГАиК. — 1955. — Вып. 102. — 120 с.

5. Стациниш И.И. Разработка и исследование методов учета нивелирной рефракции в турбулентной атмосфере // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Львов, 1988. — 24 с.

6. Тревого И.С., Шевчук П.М. Городская полигонометрия. — Недра, 1986. — 157 с.

7. Ostrovskiy A. Regularities of fluctuations and determination of vertical gradients of temperature and anomalous refraction of the light beam in thermally turbulent atmosphere // Reports on Geodesy Warsaw university of technology. — 1997. — № (2)25. — P. 21–33.

8. Заблоцкий Ф.Д. Особенности формирования влажной составляющей тропосферной задержки в разных регионах // Современные достижения геодезической науки и производства. — Львов, 2002. — С. 121–127.

9. Прокопов А.В., Ремезов Э. Регулярные тропосферные эффекты при оптических и радиотехнических наблюдениях ИСЗ в геодезии, геофизике, навигации, метеорологии // Современные достижения геодезической науки и производства. — Львов, 2004. — С. 125–129.

RESUME

There given theoretical basics on the refractometry as a scientific discipline and its evolution stages with due consideration to solving applied tasks of the Earth sciences. The Lviv geodetic school contribution to the refraction studies within the recent fifty years is described in detail. Several problems in the field of refractometry needing solution are stated.