

РЕФРАКТОМЕТРІЯ (досягнення та проблеми)

© Островський А.Л., 2007

Розглянуто досягнення та бар'єри у вирішенні проблем рефрактометрії – науки, що вивчає закони поширення електромагнітних хвиль (ЕМХ) в неоднорідній за густиною атмосфері Землі та планет. Описано внесок Львівської школи рефракції в цю науку та подальші завдання досліджень.

In work achievements and barriers on a way of the decision of problems refractometry – a science studying laws expansion of electromagnetic waves (EMV) in non-uniform for density to an atmosphere of the Earth and in interplanetary space are stated. The contribution of the Lvov school of a refraction to this science and the further research problems is described.

1. Суть рефрактометрії. Її зв'язок з науками про Землю. Рефрактометрія – наука про нерівномірне та непрямолінійне поширення електромагнітних хвиль (ЕМХ) у тривимірно неоднорідному за густиною середовищі та методах виключення систематичних помилок вимірювання кутів та довжин, викликаних цією неоднорідністю. Таким середовищем звичайно є ізотропна атмосфера Землі та міжпланетний простір.

Вже майже десяток років людство живе у третьому тисячолітті. Озираючись на минуле, можна з гордістю говорити, що минулі тисячоліття не пройшли для людей марно, а ознаменувалися значним розвитком науки, особливо таких наук про нашу планету Земля, як геофізика, геодезія, геодинаміка, астрономія, космічна геодезія та інші. Зокрема, статична геодезія, що визначає форму і розміри Землі та її гравітаційне поле, перетворилася з тривимірної на чотиривимірну, кінематичну, що вивчає зміни згаданих параметрів з часом та поступово перетворюється на геодинамічну, що досліджує причини цих змін.

Геодезія вивчає планетарний геоїд з точністю 0,2–0,3 м, регіональний – з точністю 0,07–0,1 м, локальний – з точністю 0,01–0,05 м [2]. Планетарний геоїд підтверджує гідростатичність Землі загалом. Крива розподілу потужності континентальної кори подібна до кривої розподілу висот геоїда. Від'ємні аномалії висот відповідають товщині земної кори $h > 50$ км. Загалом глобальна аномалія висот та товщини земної кори від'ємно корельовані. Однак це відкриття глобального характеру не стосується локальних геоструктур. Відомо, що відзначаються додатні кореляції локального геоїда з рельєфом. Наприклад, пік Евереста піднятий на 57 метрів над геоїдом Гімалайського регіону.

Припускають, що хвилі геоїда в декілька кілометрів, пов'язані з неоднорідністю земної кори, також мають додатну кореляцію з рельєфом. Очевидна роль геодезії для вивчення геологічних рухів земної поверхні, закономірностей розташування корисних копалин. Видається недалеким той час, коли геодезія проникне у таємниці тектонічних явищ і вивчатиме будову, рухи та розвиток Землі.

Хотілося б, однак, застерегти дослідників від деякого запаморочення від успіхів в геодинамічних дослідженнях, постановка яких має низку недоліків:

1) у геодинамічних дослідженнях за останні 30 років надається перевага формальному геометричному фактору деформацій і не враховується такий глобальний фізичний фактор, як часові зміни фігури та гравітаційного поля Землі і положення центра мас в тілі Землі. Ця методична похибка може спотворити саму суть досліджень глобальних деформацій Землі;

2) під час опрацювання геодформаційних даних нестрого виключаються припливні і не припливні деформації по широті, довготі і висоті, через відсутність наземних астрономо-геодезичних та геофізичних даних в районах розташування лабораторій;

3) проекти геодинамічних мереж математично не оптимізуються і не фільтруються коротко-

періодичні пульсації земної кори;

4) парадокс, але це реальність: висоти геодинамічних пунктів визначаються у 3–10 разів грубше, ніж їхні широти та довготи, тобто вертикальну складову, яка дає найбільшу інформацію, визначаємо найгрубше.

Об'єктивні розрахунки [5] показують, що навіть геометричне нівелювання I класу, яке виконується відповідно до вимог чинної інструкції, якщо точки рознесені на 100 км, то перевищення між ними визначається точніше ніж методами GPS. Між тим, сучасні тотальні нівелірні системи можуть забезпечити точність, у 2,5 – 3 рази вищу, ніж вимагає чинна інструкція. Тому, на наш погляд, найкращого результату досліджень можна досягти, раціонально комбінуючи наземні та космічні методи досліджень.

Споконвічною проблемою будь-якої науки є необхідність підвищення точності вимірювань, тобто скрупульозність досліджень. В наш час загальновизнаним є те, що найбільшими систематичними похибками просторових вимірювань кутів та ліній є неординарність атмосфери за її густиною. Звідси зрозуміла роль рефрактометрії в пізнанні Всесвіту.

Взагалі, строго кажучи, непрямолінійність та нерівномірність поширення світла та радіохвиль викликана просторовою неоднорідністю показника заломлення атмосфери – n , який є функцією її густини – ρ .

На швидкість поширення ЕМХ впливає саме показник заломлення повітря, а непрямолінійність поширення, рефракцію, викликають градієнти показника заломлення. Зміни швидкості поширення ЕМХ, що спотворюють виміряні віддалі, отримали назву *фазові затримки*.

Просторові (тривимірні) криві, якими поширюються ЕМХ, називають *рефракційними кривими*.

Залежно від того, чи з поверхні Землі спостерігаються віддалені земні предмети чи природні небесні тіла (зірки, планети), чи штучні небесні тіла (супутники) розрізняють *земну, супутникову та астрономічну* рефрактометрію.

Для дослідження просторові рефракційні криві поширення ЕМХ уявно проектують на вертикальну та горизонтальну площини і отримують складові просторової кривої. Ці складові показані на рис. 1 потовщеними лініями. Розрізняють *повні та часткові* кути рефракції. Часткові кути рефракції – кути з вершинами в точках приймання або випромінювання енергії (у точках А і С на рис. 1) між хордами і дотичними до проекцій просторової кривої на горизонтальну та вертикальну площини. Просторова крива поширення ЕМХ від точки С до А на рисунку не показана, оскільки вона проходить між вертикальною В та горизонтальною Г площинами. Відповідно до визначення кутів δ_{BA} , δ_{BC} – часткові кути вертикальної рефракції у точках А і С; кути δ_{GA} , δ_{GC} – часткові кути горизонтальної (бокової) рефракції у тих самих точках. Повні кути рефракції – кути між дотичними, побудованими в точках випромінювання та приймання енергії до проекцій просторової кривої на вертикальну та горизонтальну площини. Отже, σ_B – повний кут вертикальної, а σ_G – горизонтальної рефракції. Для урахування впливу рефракції на вимірювання вертикальних і горизонтальних кутів та азимутів необхідно знати часткові кути рефракції δ_{BA} , δ_{BC} , δ_{GA} , δ_{GC} . Нагадаємо, що на результати геометричного нівелювання діє лінійна рефракція – спотворення відліків нівелірних рейок. Проте, враховуючи малість цих спотворень, можна просто і майже безпомилково перейти від лінійної до кутової рефракції і навпаки:

$$r = \frac{\delta_B'' \cdot L}{\rho''}, \quad (1)$$

де r – лінійна вертикальна рефракція; δ_B'' – кутова вертикальна рефракція; L – віддаль між нівеліром та рейкою; ρ'' – кількість кутових секунд у радіані.

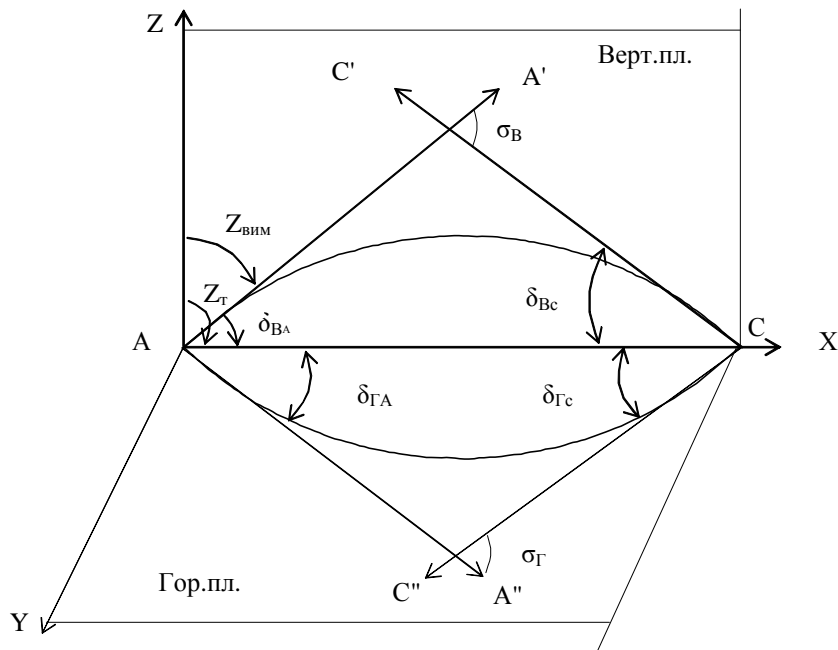


Рис. 1. До визначення повних та часткових кутів вертикальної та горизонтальної рефракції

Інші проблеми рефрактометрії пов'язані з вимірюванням довжин світло- та радіовіддалемірними системами, які працюють на безпосередньому або посередньому вимірюванні відрізків часу поширення ЕМХ тільки у прямому або в прямому і зворотному напрямках. В останньому випадку формула визначення довжини L має вигляд

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

де C_0 – швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі, а \bar{n} – середній інтегральний показник заломлення повітря на заданому шляху L . У вимірюваннях віддалей обмежуються визначенням показника заломлення на кінцевих пунктах траси.

Оскільки $\bar{n} \neq \frac{n_1 + n_2}{2}$, то виміряна віддаль обтяжена похибками ΔL_n .

Але, як ми вже знаємо, ЕМХ поширюється криволінійно. Це, своєю чергою, вносить систематичну похибку ΔL_K , оскільки нам потрібно знати довжину замикаючої хорди, яка коротша від просторової кривої.

Отже, коротко кажучи, наука *рефрактометрія* покликана розв'язувати складні проблеми визначення показника заломлення та його градієнтів у багатьох точках середовища, в якому поширюються ЕМХ.

Без цих даних неможливі високоточні просторові виміри.

2. Основні етапи розвитку та бар'єри на шляху розв'язання задач рефрактометрії.

Найстарішою небезпідставно вважають астрономічну рефрактометрію. Хоча перші згадування про астрономічну рефракцію, що дійшли до нас, належать до I ст.. нашої ери, ймовірно, що про неї було відомо значно раніше у давніх Єгипті та Китаї. Основою такої думки є те, що рефракційне спотворення сонячного диска спостерігаються озброєним оком під час сходу та заходу, про що і йдеться в працях Клеомеда і Птолемея.

Саме Клеомед звернув увагу на те, що завдяки непрямої лінійності поширення світла можна бачити небесні тіла і тоді, коли вони нижче від горизонту. Птоломей перший запропонував визначати кути рефракції, порівнюючи зенітні кути, що спостерігаються, з тими, що обчислюються.

Епоха середніх віків паралізувала думку людства. Людство не тільки не пізнало нічого нового

про світ, в якому жило, а, навпаки, як це не дивно, забуло те, що знало.

У вивченні рефракції настає більше ніж тисячолітня перерва. Тільки у 1489 році Б.Вальтер вперше визначає астрономічну рефракцію методом, запропонованим Птоломеем. Ним отримане значення кута рефракції на горизонті, що дорівнює половині градуса. Тихо Браге склав перші таблиці рефракції. Значення рефракції в таблицях Тихо Браге при $Z=90^{\circ}$ мало відрізняється від сучасних даних.

Першим спробував побудувати фізичну теорію рефракції Й. Копер (1604 р.). Він вважав, що атмосфера, яка огортає Землю, однорідна за густиною.

Зародження наземної рефрактометрії ми пов'язуємо з творцем законів заломлення світла голландським вченим Віллебродом Снелліусом (1580–1626), який, як відомо, також запропонував метод триангуляції для визначення великих довжин.

Першими продовжувачами цієї справи, напевне, можна вважати академіків французької Академії наук Кассіні, який перший застосував закони заломлення Снелліуса у теорії рефракції та Жана Пікара (1620–1682). Останній був одним із засновників Паризької астрономічної обсерваторії. Він по заслугах оцінив запропонований Снелліусом метод триангуляції і побудував триангуляційну мережу вздовж дороги з Парижа на Ам'єн для визначення розмірів Землі. Ж. Пікар значно підвищив точність кутових вимірів, застосувавши вперше сітку ниток в окулярі зорової труби. Це дало можливість зауважити вплив рефракції на кутові виміри.

Проте тоді дослідників цікавила тільки непрямолінійність поширення ЕМХ – рефракція. Ми вважаємо, що вперше в геодезичних дослідженнях термін “рефрактометрія” застосовано в роботі [9]. Тільки в наш час, коли мірою розвитку будь-якої країни в економіці, науці, культурі та обороноздатності є її успіхи в космічній науці, коли людство йде до нової організації суспільства, заснованої переважно саме на космічній науці, можна розглядати рефрактометрію як окрему науку. Дійсно, тільки з появою перших світло- та радіовіддалемірів (середина ХХ століття) з'явилася наземна рефрактометрія, а з появою перших супутників – супутникова рефрактометрія.

Тому саме у наш час можна говорити про рефрактометрію як окрему науку, оскільки розширилося коло питань, які розв'язує ця наука.

Отже, рефрактометрія є одночасно старою і молодою наукою.

Зародження будь-якої науки, що вивчає природні явища, починається з дискусій: чи взагалі існує таке явище в природі; якщо встановлено, що існує, тоді вивчаються його закономірності, встановлюється, чи корисне це явище для людства. Такі етапи пройшла й рефрактометрія.

Назвемо основні етапи її розвитку.

1. Встановлення якісних і кількісних характеристик впливу атмосфери на результати вимірювань кутів та довжин.

2. Розроблення загальної теорії непрямолінійності (рефракції) й нерівномірності (фазових затримок) поширення ЕМХ; виведення формул для визначення поправок у виміри.

На жаль, застосування цих формул, як правило, неможливе, оскільки потребує, передовсім, знання градієнтів температури в багатьох точках на шляху поширення ЕМХ, а ці градієнти невідомі.

Зрозуміло, однак, що без теорії рефрактометрії немислима.

3. Дослідження можливостей запровадження єдиного коефіцієнта рефракції.

Запровадження такого коефіцієнта, незалежного від довжини та висоти трас, призвело би до знешкодження атмосферних впливів на кутові вимірювання.

Нагадаємо, коефіцієнтом рефракції – K називають відношення радіуса Землі – R_3 до радіуса поширення ЕМХ – R_C

$$K = \frac{R_3}{R_C}. \quad (3)$$

Запровадження такого коефіцієнта розв'язало би, насамперед, проблему вертикальної рефракції. Дійсно, вплив кривини Землі – R_3 на перевищення між двома точками на поверхні Землі точно визначається за простою формулою

$$K_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{L^2}{R_3}, \quad (4)$$

де L – довжина траси.

Якщо коефіцієнт рефракції K – відомий і $K = \text{Const}$ (сталий), тоді вплив рефракції на перевищення – r – знаходять просто:

$$r = K \cdot K_3. \quad (5)$$

Століттями велись пошуки єдиного коефіцієнта рефракції K , і безуспішно. Сьогодні точно відомо, що про єдиний коефіцієнт K не тільки для держави, але навіть для окремого об'єкта робіт не може бути мови.

З певним наближенням можна говорити про єдиний коефіцієнт тільки для нормальної стратифікації атмосфери. Між тим, для такої стратифікації існують формули, за якими практично без додаткових вимірювань визначаються кути рефракції і розв'язується проблема рефракції без коефіцієнта рефракції. Іншими словами: сучасна рефрактометрія взагалі не потребує поняття коефіцієнта рефракції. Достатньо знати кути рефракції.

4. Розділення рефракції на нормальну та аномальну.

Проблема визначення нормальної вертикальної рефракції – розв'язана.

Головним об'єктом досліджень залишається аномальна вертикальна рефракція.

5. Введення О.О. Ізотовим та Л.П. Пеллінею поняття *еквівалентної висоти* – $h_{\text{екв}}$ поширення ЕМХ від випромінювача до приймача. Встановлено, що на кутові величини рефракції впливає не середня висота ЕМХ над підстильною поверхнею, а середня вагова висота, про яку ще йтиметься.

Було запропоновано, знаючи $h_{\text{екв}}$, визначити градієнт температури на будь-якій висоті за формулою

$$\gamma_i = \frac{\gamma_1}{h_{\text{екв}}}, \quad (6)$$

де γ_1 – градієнт температури на висоті 1 м, який можна виміряти; $h_{\text{екв}}$ – еквівалентна висота.

Здавалося, що проблема визначення γ_i в багатьох точках розв'язана. Однак це не так. Річ у тім, що над різними підстильними поверхнями γ_i в один фізичний момент – різні; крім цього, з'ясувалося, що за різних стратифікацій атмосфери ступінь $h_{\text{екв}}$ дорівнює не одиниці, а деякій змінній величині – e .

У результаті формули О.О. Ізотова та Л.П. Пеллінею, на жаль, дають тільки наближені результати.

6. Вивчення розподілу з висотою метеопараметрів, передовсім градієнтів температури та вологості, від яких функціонально залежить шуканий розподіл аномального показника заломлення.

Характер розподілу метеоелементів залежить від фізико-географічних особливостей районів, є дуже різноманітним і, тому до кінця не вивчений.

Подальше вивчення просторового розподілу показника заломлення – n залишається актуальним.

7. Власне рефрактометрія, тобто розроблення методів визначення та урахування дії рефракції та фазових затримок на шляху поширення ЕМХ.

Всі відомі методи можна поділити на дві групи: I – посередні (непрямі); II – безпосередні (прямі).

Перша група розвивається майже 400 років і відрізняється значною різноманітністю. Друга група – порівняно молода, налічує близько 100 років. Тому в першій групі виділимо декілька підгруп, а в другій – окремі методи.

Посередні методи: 1) метеорологічні; 2) геодезичні; 3) статистичні.

Прямі методи: дисперсійний, компенсаційний, зміни морського горизонту (придатний тільки для вертикальної рефракції), турбулентний.

8. Широке застосування теорії турбулентності атмосфери для визначення рефракції та інтегрального показника заломлення.

Більше ніж 50 років веде пошуки методів рефрактометрії львівська школа рефракції, яка досягла певних успіхів у розв'язанні цієї проблеми саме за турбулентними коливаннями фази візирних цілей. Про це детально буде йтися в окремому пункті цієї статті.

9. Останнім часом дослідники рефрактометрії, окрім флуктуацій фази, багато уваги приділяють іншим оптичним проявам турбулентності, а саме:

- флуктуації світла за інтенсивністю (за коливаннями амплітуди);
- змінам середнього розміру джерела світла у фокальній площині труби;
- розмиванню турбулентністю різкості зображення мір (спеціальних візирних марок).

Найпростіше технічно реалізується вимірювання флуктуацій яскравості (коливання амплітуди) світлових хвиль. Однак цей метод неможливо застосовувати для довгих приземних трас.

Метод флуктуації розміру зображення джерела світла обтяжений значними систематичними похибками.

Найперспективнішим виявився метод коливання візирних цілей (коливання фази).

10. На жаль, значні досягнення рефрактометрія має тільки в термічній турбулентності атмосфери. Рефрактометрія, на жаль, поки що не розробила кардинальних, автоматизованих методів для виключення впливу на просторові виміри неоднорідного за густиною середовища при інверсії температури та динамічній турбулентності.

3. Внесок львівської школи рефракції у розвиток рефрактометрії. Зародження львівської школи рефракції пов'язано з професорами тоді Львівського політехнічного інституту А.Д. Моторним та М.К. Мигалем.

А.Д. Моторний керував геодезичним факультетом ще до Вітчизняної війни 1941–45 рр. у Харківському будівельному інституті; організував і став першим деканом геодезичного факультету Львівського політехнічного інституту, одночасно завідував кафедрою геодезії, а М.К. Мигаль завідував кафедрою вищої геодезії та астрономії.

А.Д. Моторний прийняв на посаду асистентів кафедри геодезії 1950 та 1951 роках двох випускників геофаку, колишніх фронтівиків, відмінників навчання Д.І. Маслича та А.Л. Островського.

З 1952 та 1953 років ці асистенти почали працювати над темами кандидатських дисертацій: Д.І. Маслич “Дослідження вертикальної рефракції та точності тригонометричного нівелювання в гірських умовах” (науковий керівник М.К. Мигаль); А.Л. Островський “Дослідження бокової рефракції в полігонометрії” (науковий керівник А.Д. Моторний).

Співшукачі замість авторефератів написали дві монографії на теми дисертацій. Монографії отримали схвалення геодезичного виробництва та відомих професорів Московського геодезичного інституту – тоді головного ВНЗ геодезичних кадрів СРСР, О.О. Ізотова (лауреата державної премії, проректора з наукової роботи МІГАіК) та О.С. Чеботарьова (заслуженого діяча науки і техніки СРСР, завідувача кафедри геодезії МІГАіК). Так, проф. О.С. Чеботарьов відгукнувся на монографію А. Островського коротким листом, копія якого наведена нижче (рис. 2).

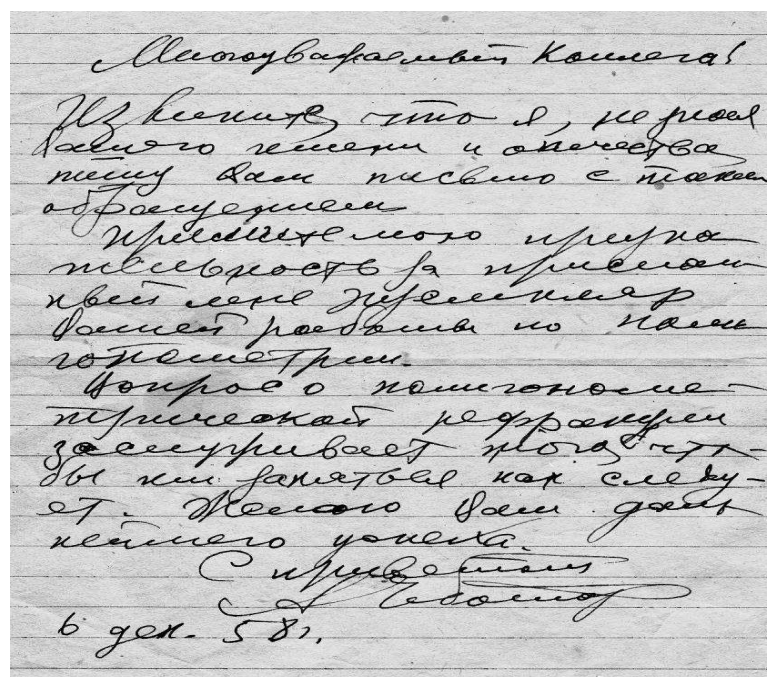


Рис. 2. Лист заслуженого діяча науки і техніки, проф. О.С. Чеботарьова

Захисти кандидатських дисертацій Д. Масличем та А. Островським відбулися в 1957 та 1959 роках. Починаючи з 1953 року і пізніше на кафедрах геофаку почали працювати молоді асистенти Л.С. Хижак, М.К. Дрок, Б.М. Джуман, І.Н. Кметко, Р.М. Тартачинський, М.І. Кравцов, С.І. Плахотний, І.С. Тревого та інші, які також почали займатися питаннями рефрактометрії, науковими керівниками яких був декан геофаку доцент А.В. Заводовський, а пізніше доценти А.Л. Островський, Д.І. Маслич. Всього до 1973 року на теми рефрактометрії було захищено близько 20 кандидатських дисертацій.

Геодезичний факультет став центром наукових досліджень СРСР у галузі рефрактометрії.

Ще в 1966 році спільним рішенням колишніх Міністерств геології СРСР та освіти УРСР створено галузеву лабораторію з вивчення атмосферних впливів на астрономо-геодезичні виміри. Першим науковим керівником лабораторії став проф. М.К. Мигаль; першими темоводами: Д.І. Маслич, А.Л. Островський та Л.С. Хижак.

У 1967 році лабораторія ГНДЛ-18 отримала листа від керівництва Центрального науково-дослідного інституту геодезії, аерофотозйомки і картографії (ЦНДІГАіК), в якому пропонувалось (цитуюмо в перекладі): “у зв’язку з покладеними на Вашу лабораторію обов’язками вивчення атмосферних впливів на точність геодезичних вимірів, просимо розглянути питання про створення в районі Карпат еталонного геодезичного полігону...”.

Оскільки ЦНДІГАіК фінансував лабораторію, то, по суті, це була вимога створити еталонний полігон.

На той час такий полігон можна було створити тільки лінійними, світловідалемірними вимірюваннями, в яких певним методом визначається середньоінтегральне значення показника заломлення повітря на шляху світлових хвиль. Такого методу, окрім дорогого аеростатного зондування атмосфери, тоді не існувало. У 1964 році доц. А.Л. Островський опублікував статтю: “Геодезичні методи врахування впливу атмосфери на результати світловідалемірних вимірів”. Запропонований в статті метод вперше використав Інститут фізики Землі АН СРСР для встановлення причин Ташкентського землетрусу перевіркою гіпотези насувів гірської системи Тянь-Шань на іншу систему – Памір. Для цього було необхідно високоточно вимірювати лінію, що з’єднує відроги цих систем, та стежити за змінами її довжини. Метод виявився придатним для такої мети.

... Довжини ліній на Карпатському еталонному полігоні (7 пунктів 18 сторін) були виміряні з похибкою $3 \cdot 10^{-7}$. Це дало можливість обчислити горизонтальні кути з похибками 0,1–0,2”. Завдання ЦНДІГАіК було успішно виконано.

В 1973 році А.Л. Островський захистив першу в Україні докторську дисертацію з рефрактометрії, а з 1974 року професор М.К. Мигаль передав йому наукове керівництво лабораторією.

У квітні 1974 року, у Львові, на базі геофаку та галузевої науково-дослідної лабораторії проходила перша в Радянському Союзі Всесоюзна нарада “Сучасні методи врахування та виключення рефракції світлових хвиль при геодезичних та астрономічних вимірах”. У її роботі брали участь 117 працівників з 45 провідних науково-дослідних інститутів, вищих навчальних закладів та виробничих організацій із 45 міст Радянського Союзу. На нараді була заслухана 51 доповідь.

За пропозицією О.О. Изотова д-ра техн. наук А.Л. Островського було обрано головою комісії з редагування рішень наради. У рішеннях вказувались:

– доцільні для виробничників методи урахування атмосферних впливів на астрономо-геодезичні виміри;

– подальші напрямки та завдання дослідження рефрактометрії.

Галузева лабораторія ГНДЛ-18 досягла визнаних успіхів в рефрактометрії. Достатньо сказати, що у галузі рефрактометрії захистили докторські дисертації 8 співшукачів: А.Л. Островський, П.В. Павлів, Б.М. Джуман, А.С. Суюнов, П.Г. Черняга, І.С. Тревого, Ф.Д. Заблоцький, О.І. Мороз. За тематикою рефрактометрії захищено більше ніж 40 кандидатських дисертацій. Це Б.Т. Глустьяк, В.Й. Літинський, І.І. Стащишин, С.С. Перій, М.Ф. Лісевич, В.А. Перваго, В.О. Сажин, С.Г. Савчук, С.А. Клим, М.Ф. Лісевич, В.Г. Гребенюк, О.І. Терещук, В.В. Киричук, О.І. Мороз, Ю.К. Успенський, Й.С. Матящук, В.М. Новосад, С.Г. Власенко, П.М. Шевчук, О.А. Островська, Б.Б. Паляниця, І.М. Торопа, О.В. Архангельський, А.С. Колос та багато інших. Отримано десятки авторських свідоцтв, опубліковано 4 монографії, близько 1000 наукових статей. Останні роки лабораторія працює

над створенням геодинамічних мереж на АЕС, математичної оптимізації геодезичних мереж. З цієї тематики захищена докторська дисертація директором Інституту геодезії Національного університету “Львівська політехніка” К.Р. Третяком, нині науковим керівником ГНДЛ-18.

У короткій статті важко описати більше ніж 50-річну діяльність лабораторії у галузі рефрактометрії. Назвемо тільки найважливіші, на нашу думку, етапи цієї діяльності (детальніше див. [3]).

1. У зв'язку з тим, що Міністерство геології СРСР виділяло упродовж 25 років кошти на науково-дослідні роботи, лабораторія ГНДЛ-18 організувала більше ніж 20 польових, науково-дослідних експедицій в різні райони СРСР: від Карпатських гір до пустель Середньої Азії та до Сибіру; від Нової Землі, Ямала та Північного Льодовитого океану до Кавказьких гір та Чорного моря, від Арктики до Антарктики. Експедиції вивчали нерівномірності розподілу показника заломлення та градієнтів показника заломлення атмосфери, перевіряли можливості застосування розроблених методів для мінімізації атмосферних впливів, визначали точність та економічну ефективність від застосування знайдених методів та пропозицій.

2. Значний обсяг зібраних даних про розподіл показника заломлення та його градієнтів привів до створення нової класифікації рефракційних полів, які до цього класифікувались тільки за розмірами на: загальноземні, регіональні, локальні. Нова класифікація дала можливість розділити рефракційні поля за характером їхнього впливу на результати вимірів на два види:

I. Поля, що змінюють протягом доби напрямки градієнтів показника заломлення на зворотний (на 180^0);

II. Поля зі сталими напрямками градієнтів, в яких протягом доби градієнти показника змінюються тільки за модулем (за абсолютною величиною).

3. Нова класифікація дала змогу знайти підказані самою природою методи мінімізації цих впливів: у разі полів I виду – симетрична програма спостережень щодо моментів, близьких до ізотермії (нульових радіаційних балансів); у разі полів II виду – спостереження в періоди найбільшої однорідності атмосфери.

4. Розроблені методи визначення моментів формування ізотермії:

4.1. Приладний (балансомірний) – за часом переходу через нуль радіаційного балансу.

4.2. Статичний – за багаторічними середніми даними метеостанцій.

4.3. Візуальний – за часом встановлення спокійних зображень візорних цілей при вітрі більше ніж 0,5 м/с.

5. Урахування атмосферних впливів на основі розв'язання обернених задач рефракції. Визначивши вертикальну рефракцію (наприклад, з одночасних, двосторонніх вимірів зенітних кутів), знаходять градієнт показника заломлення – dn/dz , а потім, знаючи точкові значення n_1 та n_2 на кінцях траси та перевищення між кінцевими точками – h , знаходять інтегральний показник – \bar{n} (з контролем).

$$\bar{n} = n_1 \pm \frac{1}{2} \frac{dn}{dz} \cdot h ; \quad (7)$$

$$\bar{n} = n_2 \mp \frac{1}{2} \frac{dn}{dz} \cdot h . \quad (8)$$

Метод має цілу низку уточнювальних модифікацій.

6. Метод рефракційного базису, оснований на формулі

$$\delta_i = \delta_B \cdot \frac{h_{ек.Б.}^e}{h_{ек.і}^e} \cdot \frac{L_i}{L_B} , \quad (9)$$

де δ_i – шуканий кут рефракції; δ_B – відомий кут рефракції; $h_{ек.Б.}^e$ та $h_{ек.і}^e$ – еквівалентні висоти променів; e – ступінь еквівалентних висот; L_i та L_B – довжини трас.

7. Урахування рефракції на основі метеопараметрів

8. Дослідження точності урахування вертикальної рефракції. Редукування результатів вимірів зенітних кутів на моменти нульових аномальних градієнтів температури (Б.М. Джуман).

9. Експериментальне доведення формули нівелірної рефракції (П.В. Павлів)

$$r = \frac{\sigma_{\max}}{2}, \quad (10)$$

де r – лінійна похибка відліку нівелірної рейки, викликані рефракцією; σ_{\max} – вимірний максимальний розмах коливань зображень ділень рейки.

Формула доведена на основі багаторічних експериментальних досліджень І.І. Стащишина [10].

10. Визначення бокової рефракції (під час вимірювання горизонтальних кутів та визначення азимутів з астрономічних спостережень), розв'язанням оберненої задачі рефракції, на основі формул

$$\delta_r = \frac{0,198}{L} \cdot \gamma \cdot \Sigma, \quad (11)$$

$$\text{де } \gamma = 0,1230 \frac{T^2}{B} \cdot \frac{\delta_B}{L} - 0,0342, \quad (12)$$

$$\text{а } \Sigma = \int_0^L \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \nu \cdot l \cdot dl, \quad (13)$$

де δ_B – вертикальна рефракція, Σ – рефракційна небезпечність напрямку; α – кути нахилу місцевості на відрізках траси dl ; α – визначається за картою за горизонталями (за масштабом закладення); ν – кути між лінією візування та горизонталями на відрізках dl . За значеннями Σ можна завчасно, користуючись картою, вибрати напрямки, за якими бокова рефракція не перевищуватиме 0,1–0,2".

11. Визначення дії бокової рефракції та методів її мінімізації під час створення міських геодезичних мереж (І.С. Тревого).

12. Доведено на основі закону пливучості елементарних частинок у турбулентно-термічній атмосфері, що максимальні коливання частинок повітря, видимі візуально як коливання візорних цілей, мають не випадковий, а систематичний характер (турбулентний рух гальмується, коли протилежні за напрямком сили тяжіння Ньютона і виштовхувальна сила Архімеда – однакові) [6].

Іншими словами – на основі теорії турбулентності доведена теорема: *середня аномальна вертикальна рефракція за 1–2 секунди дорівнює максимальній амплітуді ($\frac{\sigma_{\max}}{2}$) коливань візорної цілі за цей самий час*. Отже, аналітично отримана формула:

$$\delta_{\text{ан.сер.}} = \frac{1}{2} \sigma_{\max}. \quad (14)$$

Ця сама формула одержана в [4] складнішим шляхом – на основі теорії турбулентності. Формула справедлива тільки для термічної турбулентності.

13. Встановлені степені еквівалентних висот e при термічній та динамічній турбулентності атмосфери.

14. Встановлена можливість визначення аномальної рефракції цифровими камерами ПЗЗ при термічній турбулентності.

15. Визначення аномальної рефракції $\delta_{\text{ан.сер.}}$ та r електронними геодезичними приладами, оснащеними CCD-сенсорами (приладами зарядного зв'язку ПЗЗ), які визначають структурну характеристику турбулентності атмосфери – C_n , або середню квадратичну похибку відліку нівелірної рейки $m_{\text{кв}}$. Для визначення $\delta_{\text{ан.сер.}}$ та r отримано формули [7]

$$\delta_{\text{ан.сер.}} = \frac{1}{2} \rho'' \cdot C_n \cdot 10^{-6} \cdot L, \quad (15)$$

$$r = \frac{m_{\text{кв}} \cdot \sqrt{L}}{2}. \quad (16)$$

16. Розроблено диференційний метод визначення $\overline{n_p}$ – інтегрального показника заломлення

радіохвиль на основі залежності між градієнтами вологості та температури

$$\frac{de}{dz} = 19 \frac{e}{T} \frac{dT}{dZ}, \quad (17)$$

де $\frac{de}{dz}$ – вертикальний градієнт вологості, $\frac{dT}{dZ}$ – аномальний вертикальний градієнт температури, e – абсолютна вологість, T – абсолютна температура.

17. Отримана формула складової вертикальної рефракції, зумовленої вологістю повітря

$$\delta_{B.B.} = 79 \frac{e}{T^2} \cdot \frac{dT}{dZ} L \quad (18)$$

((18) не потребує знання градієнта вологості).

18. Розроблення методів визначення аномальної вертикальної рефракції та приладів автоматизованого визначення рефракції (О.І. Мороз).

19. Дослідження з рефрактометрії в Антарктиці. Встановлення впливу тропосфери на GPS-виміри [1] (Ф.Д. Заблоцький).

20. Методи урахування електромагнітних полів атмосфери на світловіддалемірні виміри, GPS-спостереження та прецизійне нівелювання [11] (П.Г. Черняга).

21. Розроблені методи визначення рефракційного видовження наземних світловіддалемірних трас. При довжині трас до 50 км поправки за рефракційне видовження для світлових хвиль можуть досягати 8 мм; для радіохвиль – 66 мм. Точність визначення поправок близько 0,5 мм.

4. Деякі, не розв'язані проблеми рефрактометрії. Висновки. 1. Головний бар'єр на шляху вирішення проблеми визначення аномальної рефракції принципово усунений тільки при нестійкій стратифікації атмосфери, тобто при термічній турбулентності, а ще раніше – при нормальній стратифікації.

Треба, однак, відзначити, що створені геодезичні методи визначення \bar{n} -інтегрального показника заломлення, оснований на розв'язанні обернених задач рефракції, можна застосовувати при будь-якій стратифікації атмосфери.

2. Сучасні автоматизовані методи рефрактометрії дають змогу визначати кути рефракції з точністю 0,7 – 1,5", а інтегральне значення показника заломлення з точністю близько $1 \cdot 10^{-7}$. Існує потреба зменшити ці похибки хоча б вдвічі.

3. При інверсії температури, що відзначається зранку, ввечері та вночі над сушею, а інколи цілодобово в нижніх прошарках атмосфери над водними поверхнями, наземна рефрактометрія не створила кардинальних, точних методів визначення рефракції, які дають змогу (без значних фізичних і матеріальних затрат) задовольняти вимоги до точності вимірів сучасної науки та техніки.

4. Розроблена теорія визначення вертикальної рефракції при динамічній турбулентності та інверсії температури не перевірена експериментально і не встановлено точності методів.

5. У наш час, коли супутникові радіонавігаційні системи (GPS, ГЛОНАСС) радіоінтерферометри з наддовгими базами, супутникові лазерні далекоміри та висотоміри, системи доплерівського визначення орбіт все ширше застосовуються в геодезії, геофізиці, астрометрії, навігації, метрології і в інших науках про Землю, важливе місце займають визначення групових, фазових затримок сигналів та рефракційне викривлення (видовження) трас. Як показано у [8], сумарна похибка визначення тропосферної затримки становить 3 см при $Z=0^\circ$ та біля 17 см при $Z=80^\circ$. У геодезії, наприклад, при еталонуванні GPS-приймачів, похибки атмосферних затримок необхідно знати з точністю 0,5 – 1,0 мм.

6. Недостатньо точна компенсація іоносферних фазових затримок радіохвиль двочастотними приймачами GPS. На це вказує уже той факт, що GPS-виміри вночі в 1,5 – 2 рази точніші від вимірів в світлий період доби. Тому, безперечно, значний інтерес викликають пошуки нових методів вирішення проблем супутникової рефрактометрії.

1. Заблоцький Ф.Д. Особливості формування вологої складової тропосферної затримки в різних регіонах // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва // Львів. – 200. – С. 121–127.

2. Машимов М.М. Геодезия, геотектоника, сейсмология: Предметы и проблемы их взаимодействия. // Геодезия и картография. – М. – 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. – М.: Недра, 1990. – 231 с. 4. Островський А.Л. Виведення формули визначення аномальної вертикальної рефракції на основі термічної турбулентності атмосфери // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів. – 2003. – № 64. – С. 59–72. 5. Островський А.Л., Мороз О.І. До проблеми оновлення державної висотної основи України // Геодезія, картографія і аерознімання. – Львів. – 2000. – №60. – С. 54–58. 6. 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 № (2) 25,1997, p. 21–33. 7. Островський А.Л., Островська О.А., Новосад В.М., Кіселик О.В. Порівняльні дослідження точності автоматизованого визначення та врахування аномальної вертикальної рефракції сантимоетром, відеотеодолітом, цифровим нівеліром // Геодинаміка. – Львів. – 2004. –1/(4). – С. 17–23. 8. Прокопов А.В., Ремезов Э. Регулярные тропосферные эффекты при оптических и радиотехнических наблюдениях ИСЗ в геодезии, геофизике, навигации, метеорологии // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів. – 2004. – С. 125–129. 9. Прилепин М.Т. „Исследования по геодезической рефрактометрии”. Авторефер. дисс. ... – М. – 1972. – 34 с. 10. Стацинин И.И. Разработка и исследование методов учета нивелирной рефракции в турбулентной атмосфере. Авторефер. дисс. ... – Львов. – 1988. 24 с. 11. Черняка П.Г. Влияние электричного поля на точність геодезичних вимірювань // Інженерна геодезія. – К. – 2000. – Вип. 42. – С. 209–227.