

А. В. АЛЕКСЕЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

1. Одним из основных источников погрешностей при определении местонахождения удаленных объектов является влияние земной рефракции. Учитывать это влияние очень трудно, так как параметры атмосферы, от которых зависит угол рефракции, изменяются во времени и пространстве. В ряде работ показано, что основным фактором, влияющим на значение угла рефракции, является распределение температуры в слоях воздуха, через которые проходит световой луч [1, 2].

Поскольку больше половины солнечного излучения, достигая поверхности, поступает в атмосферу путем теплообмена, распределение температуры в низких слоях атмосферы в значительной мере зависит от структуры и типа подстилающей поверхности. Вследствие этого, каждому району присущ тот или иной суточный и годовой ход угла рефракции. Наиболее существенны различия между суточным ходом угла рефракции над сушей и над морской поверхностью.

2. Чтобы определить суточный ход угла рефракции над морской поверхностью в прибрежной зоне, а также выяснить зависимость величины угла рефракции от градиента температуры воздуха, были проведены измерения в районе города Феодосии.

Объектом наблюдения служил точечный светящийся источник, который находился на расстоянии 8046 м от наблюдателя. В качестве источника использовали лампу-фару, позволившую получить достаточно интенсивное направленное излучение, которое можно было наблюдать круглосуточно. Измерительным инструментом служил высокоточный астрономический универсал УВ 2"/2". Он был установлен на штативе и защищен от воздействия солнечных лучей. Высота пункта наблюдения над уровнем моря составляла 42,4 м, а высота источника — 23,5 м. Высоты определяли геометрическим нивелированием с ошибкой ± 5 см. Угол рефракции вычисляли как разность между истинным и измеренным зенитными расстояниями:

$$\rho = Z - Z' \quad (1)$$

Зенитное расстояние Z' находили по следующей формуле:

$$Z' = \frac{\text{кл} - \text{кп} \pm 180^\circ}{2}, \quad (2)$$

где кл — показания прибора при круге слева; кп — показания при круге справа.

Средняя квадратическая инструментальная ошибка универсального инструмента складывалась из визирования на удаленную неподвижную точку, отсчетов по двум микроскопам и уровню, погрешности делений вертикального круга и составляла $\pm 2,1''$.

Измерения зенитных расстояний проводили с 13 июня по 1 июля 1973 г., причем 15, 17, 20, 22 и 27 июня — круглосуточно. Отсчеты во время круглосуточных измерений ночью брали каждый час, днем — каждые полчаса. Снимали показания микроскопов при кругах слева и справа. В полученные значения вносили поправку за уровень, определенную по способу Комстока [5]. Величину поправки вычисляли по формуле:

$$\Delta\tau = [50 - (l + n)] \frac{\tau}{2}, \quad (3)$$

где τ — цена деления уровня для данного прибора, равная $1'',23$. Одновременно с определением зенитных расстояний измеряли метеопараметры атмосферы: температуру, давление, скорость и направление ветра. Температуру определяли при помощи датчиков типа ТСП-351 (точность измерения $\pm 0,1^\circ\text{C}$) на высотах 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25 м 25-метровой мачты, установленной у самой кромки воды на расстоянии примерно 50 м от источника излучения. Показания регистрировали на самопишущем потенциометре. Кроме того, в непосредственной близости от объекта наблюдения и измерительного прибора было установлено по двухметровой мачте, на которых помещали психрометры и анемометры на высоте 0,5 и 2 м. Давление воздуха определяли как у объекта наблюдения, так и возле измерительного прибора. Перед началом и по окончании работ были проверены все приборы и определены необходимые поправки.

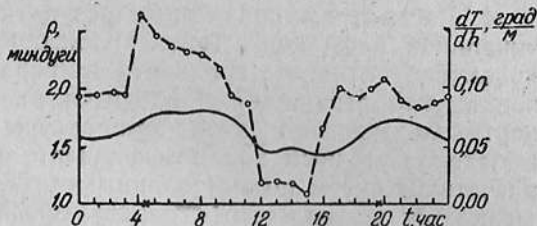
3. Обработка материала заключалась в следующем. Были вычислены зенитные расстояния с учетом поправки за уровень и введены поправки в отсчеты по метеорологическим приборам. Вычисляли вертикальные градиенты по полученным измерениям разностей температур для слоя воздуха 15—25 м по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta T}{h}, \quad (4)$$

где ΔT — разность в показаниях термометров, перепад высот расположения которых равен h . Поскольку во время проведе-

Рис. 1. Усредненные значения суточных ходов вертикальной рефракции и температуры:

пунктирная линия — среднесуточные изменения градиента температуры; сплошная — суточный ход вертикальной рефракции.



ния измерений резких изменений погоды не было, на основе наблюдений за 5 суток были определены средние значения градиента температуры (рис. 1). На рис. 2 изображен график изменения зенитных расстояний до, во время и после дождя. В течение данного периода измерения проводили через каждые 15 мин.

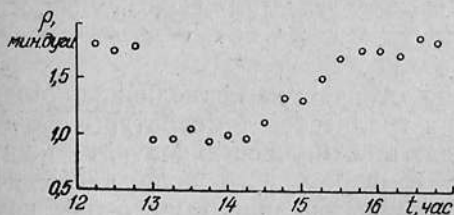


Рис. 2. Значения вертикальной рефракции во время дождя.

По полученным значениям метеорологических параметров атмосферы был вычислен коэффициент рефракции по следующей формуле [1]:

$$k = 668,7 \frac{P}{T^2} (0,0342 + \gamma) + \Delta k_e, \quad (5)$$

где $\Delta k_e = -0,000292R \frac{e}{P_0} \frac{T_0}{T^2} \left(0,52 \frac{g}{R} + 0,14\gamma \right) + 0,000041 \frac{T_0}{P_0 T} \frac{de}{dh}$,

e — упругость водяного пара, мм рт. ст.; P — давление воздуха на высоте h , мм рт. ст.; $P_0 = 760$ мм рт. ст.; R_d — газовая постоянная $= 286,86$ м/с² град; R — радиус Земли $= 6371$ км; g — ускорение силы тяжести $= 9,81$ м/с²; T_0 и T — температура воздуха соответственно на уровне моря и на высоте h .

Полученные в результате расчетов значения коэффициента рефракции сопоставляли с экспериментальными. Для этого был определен коэффициент рефракции по формуле:

$$k = \frac{2\rho}{D}, \quad (6)$$

где ρ — значение угла вертикальной рефракции; D — длина трассы в угловых единицах, определяемая из расчета, что $1' = 1852$ м (рис. 3).

Было проведено также сравнение полученного суточного хода вертикальной рефракции с суточным ходом над морской поверхностью и над сушей (рис. 4).

4. Рассмотрим полученные результаты. Суточный ход вертикальной рефракции (рис. 1) вообще следует за суточным ходом вертикального градиента температуры. Наибольшие значения угла рефракции приходятся на время, когда значения вертикальных градиентов температуры достигают 0,1 град/м и более. Суточный ход коэффициента рефракции, полученный расчетным путем по метеоданным (рис. 3), хотя и имеет примерно тот же вид, что и определенный по измерениям зенит-

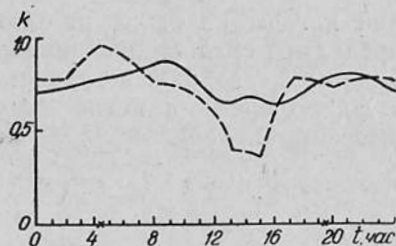
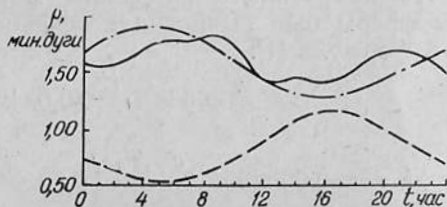


Рис. 3. Сравнение коэффициента рефракции, полученного расчетным путем из метеоданных, с определенным из наблюдений зенитных расстояний:

сплошная линия — значения коэффициента рефракции, полученные путем измерения зенитных расстояний; штриховая — значения, вычисленные по формуле (5).

ных² расстояний, значительно отличается по величине. Можно предположить, что измерения градиентов температуры в одной или нескольких точках не дают возможности получить точную информацию о состоянии температурного поля вдоль всей трассы, что приводит к погрешностям при вычислении коэффициента рефракции.

Рис. 4. Сравнение полученного суточного хода вертикальной рефракции с суточными ходами над сушей и морем: штриховая кривая — результаты, полученные Селивановым [4] для мая месяца измерениями над Финским заливом; штрих-пунктирная — суточный ход рефракции над сушей.



Сравнивая полученные результаты с литературными данными (рис. 4), можно сделать вывод, что суточный ход вертикальной рефракции над заливом более близок к суточному ходу над сушей, что объясняется влиянием температурного поля суши. Однако есть существенное отличие. У суточного хода рефракции над заливом два ярко выраженных максимума: около 8 ч и 21 ч. Время восхода и захода солнца при проведении измерений было соответственно около 4 ч 20 мин и 19 ч 50 мин (отмечено крестиками на рисунке). Заметим, что примерно на эти же периоды приходятся наибольшие значения вертикального градиента температуры (рис. 1), хотя вечером γ достигает максимума в 17 ч, что можно объяснить заходом солнца в это время за мыс.

Время же максимумов рефракционной кривой сдвинуто относительно времени восхода и захода солнца вправо примерно на 3 ч. Вероятно, это можно объяснить следующим образом.

С восходом солнца воздух постепенно прогревается, на что требуется определенное время. Вертикальный градиент в этот период начинает уменьшаться, хотя еще довольно значителен. К полудню происходит относительное выравнивание слоев воздуха по температуре, чему способствует и турбулентное перемешивание атмосферы. В период с 12 до 16 ч температура моря у берегов и температура воздуха над ним отличается (в период производимых измерений) всего на два—три градуса, что значительно снижает теплообмен между водой и воздухом. Поэтому значения вертикальных градиентов температуры и вертикальной рефракции в это время минимальны. Затем верхние слои воздуха с заходом солнца начинают быстро охлаждаться, вертикальный градиент увеличивается, что приводит к увеличению значений угла рефракции. Необходимо отметить, что в этот период наблюдается расплывание изображений в результате сильной турбулентности, что затрудняет определение зенитного расстояния. Однако на данных высотах эти явления выражаются в значительно меньшей степени, чем при наблюдениях на трассах, расположенных ближе к морской поверхности.

Поскольку при дожде были проведены единичные измерения, на основании их данных (рис. 2) нельзя сделать правильных выводов. Однако несомненен тот факт, что вскоре после начала дождя происходит выравнивание температуры воздуха в нижних слоях атмосферы и дробление крупных турбулентных неоднородностей, а это приводит к резкому уменьшению значения угла рефракции. Когда дождь прекращается, начинает увеличиваться вертикальный градиент температуры, что приводит к увеличению угла рефракции.

5. Итак, в результате можно отметить следующее:

Знание вертикальных градиентов температуры воздуха позволяет судить о значениях и суточном ходе коэффициента рефракции лишь с определенной степенью точности.

Суточный ход значений вертикальной рефракции над заливом имеет два максимума, сдвинутых относительно времени захода и восхода солнца вправо на 3-4 ч, и определяется суммарным воздействием температурных полей над морем и суши с особенностями, определяющимися местными условиями.

Наиболее благоприятным временем для определения зенитных расстояний является период с 12 до 16 ч.

Дождь приводит к уменьшению значений угла вертикальной рефракции примерно на 50%.

При прохождении луча на высоте более 15 м над поверхностью воды отрицательных значений вертикальных рефракций не наблюдается и в ночное время, хотя при более низких траекториях этого следует ожидать, как указано в работе [3].

В заключение автор выражает искреннюю признательность Н. А. Василенко за полезные консультации и помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изотов А. А., Пеллинен Л. П. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования. — «Труды ЦНИИГАиК», 1955, вып. 102.
2. Казанский К. В. Земная рефракция над обширными водными поверхностями. Л., Гидрометеониздат, 1966.
3. Маслич Д. И. Влияние рефракционного поля обширных водоемов на геодезические измерения. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1966, вып. 5.
4. Селиванов С. Исследование земной рефракции на Финском заливе. — «Записки по гидрографии», 1936, № 2.
- 5 «Труды ЦНИИГАиК», 1962, вып. 148.

Работа поступила в редколлегию 15 мая 1975 года. Рекомендована научным семинаром лаборатории РОВ Сибирского физико-технического института.
