

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Болатбек Кожаметулы Бектанов

Казахский национальный аграрный университет, 050010, Казахстан, г. Алматы, пр. Абая, 8, кандидат технических наук, профессор кафедры земельные ресурсы и кадастр, тел. 7(701)780-98-15, e-mail: bekbol53@yandex.ru

Омар Абдуллаевич Сарыбаев

Казахский национальный аграрный университет, 050010, Казахстан, г. Алматы, пр. Абая, 8, кандидат технических наук, профессор кафедры земельные ресурсы и кадастр, тел. 7(701)255-78-55, e-mail: sarybaev_o@mail.ru

Гаухар Каналбековна Серикбаева

Казахский национальный аграрный университет, 050010, Казахстан, г. Алматы, пр. Абая, 8, докторант кафедры земельные ресурсы и кадастр, тел. 7(707)345-47-24

Азамат Бескемпирович Калдыбеков

Казахский национальный аграрный университет, 050010, Казахстан, г. Алматы, пр. Абая, 8, докторант кафедры земельные ресурсы и кадастр, тел. 7(777)007-777-76

В статье описан метод, основанный на связи интегрального индекса преломления воздуха с его интегральным высотным градиентом. В условиях ограниченной по высоте атмосферы индекс преломления N и его высотный градиент dN/dH пропорциональны друг другу. Установлено, что градиенту индекса преломления можно найти сам индекс при известном коэффициенте связи между ними. При этом градиент легко найти по углу полной рефракции. Даны результаты экспериментальных исследований и рекомендации по его применению. Выполнен корреляционный анализ результатов синхронных измерений.

Ключевые слова: индекс преломления, высотный градиент, изотермия атмосферы, рефракционная траектория, корреляционный анализ, угол рефракции, светодальномерное измерение, безразмерные параметры.

STUDY OF ATMOSPHERE INFLUENCE ON RESULTS OF DISTANCE MEASUREMENTS

Bolatbek K. Bektanov

Kazakh National Agrarian University, 8, Prospect Abay St., Almaty, 050010, Kazakhstan, Ph. D., Professor, Land Resources and Cadastre Department, phone: 7(701)780-98-15, e-mail: bekbol53@yandex.ru

Omar A. Sarybayev

Kazakh National Agrarian University, 8, Prospect Abay St., Almaty, 050010, Kazakhstan, Ph. D., Professor, Land Resources and Cadastre Department, phone: 7(701)255-78-55, e-mail: sarybaev_o@mail.ru

Gauhar K. Serikbayeva

Kazakh National Agrarian University, 8, Prospect Abay St., Almaty, 050010, Kazakhstan, Postdoc, Land Resources and Cadastre Department, phone: 7(707)345-47-24

Azamat B. Kaldybekov

Kazakh National Agrarian university, 8, Prospect Abay St., Almaty, 050010, Kazakhstan, Postdoc, Land Resources and Cadastre Department, phone: 7(777)007-777-76

The article describes a method based on the relationship of the integral index of refraction of air with its integral altitude gradient. The refractive index N and its altitude gradient dN / dH are proportional to each other under conditions of limited atmospheric height. It has been established that the gradient of the refractive index can be found by the index itself with a known coefficient of coupling between them. Wherein, it is easy to find the gradient by the angle of complete refraction. Results of experimental studies and recommendations for its use are given. A correlation analysis of the results of synchronous measurements was performed.

Key words: refractive index, altitude gradient, atmospheric isothermy, refraction trajectory, correlation analysis, refraction angle, luminoscopic measurement, dimensionless parameters.

Воздействие атмосферы на распространение оптического излучения приводит уменьшению скорости электромагнитных волн, что в свою очередь сказывается на результатах светодальномерных измерений. В настоящее время известен ряд методов решения проблемы повышения точности линейных измерений тождественной проблеме определения интегрального показателя преломления атмосферной среды вдоль измеряемой дистанции [1,2]. Наиболее перспективными из них можно признать интенсивно разрабатываемые инструментальные методы.

Вместе с тем как с практической, так и с научной точки зрения целесообразен поиск и других технических решений указанной проблемы.

Одним из них может служить подход, основанный на явлении изотермии атмосферы или обращения радиационного баланса в нуль, давно известный и вновь привлечший внимание исследователи [3-5]. На этом пути возникает задача определения моментов наступления изотермии с точностью до нескольких минут, которую можно решить с привлечением временной зависимости угла полной рефракции, найденного по взаимнообратным синхронно измеренным расстоянием на концах трассы. Момент наступления изотермии атмосферы соответствует в данном случае моменту, в который угол полной рефракции принимает значение, вычисленное по метеопараметрам [5].

Недостатком такого подхода является низкая производительность и точность, в связи с тем, что момент изотермии может и не наступить. С другой стороны, известен метод определения интегрального индекса преломления, включающий измерение взаимно обратных зенитных расстояний одновременно с измерением дальности [2,11]. Ограничения его точности также известны и заключаются в недостаточно полном соответствии индекса преломления, вычисленного по зенитным расстояниям. Дело в том, что можно предложить аналогичный путь решения проблемы, в основе которого также измерения зенитных расстояний одновременно со светодальномерными измерениями. Как показывают эксперименты, он более эффективен.

Сущность метода основана на связи интегрального индекса преломления воздуха с его интегральным высотным градиентом. В условиях ограниченной по высоте атмосферы индекс преломления N и его высотный градиент dN/dH

пропорциональны друг другу. Рассмотрим зависимость индекса преломления от высоты

$$N(H) = N_0 \exp(-CH) \quad (1)$$

где N_0 - индекс преломления по высоте H_0 ; C - постоянный для данного N_0 коэффициент. После дифференцирования этого выражения будем иметь

$$\frac{dN(H)}{dH} = -CN(H) \quad (2)$$

Для угла полной рефракции можно записать уравнения:

$$\sigma = 10^{-6} L \int_0^1 \frac{dN(H)}{dH}(\xi) d\xi = -C 10^{-6} L \int_0^1 N(H)(\xi) d\xi = -10^{-6} CL \bar{N}; \quad (3)$$

Поскольку угол полной рефракции равен сумме частных углов рефракции r_1 и r_2 в точках излучения и приема волны, т.е. они связаны функционально

$$r_1 = 10^{-6} L \int_0^1 \frac{dN(H)}{dH}(\xi) \xi d\xi = \frac{1}{2} 10^{-6} L \frac{d\tilde{N}(H)}{dH}, \quad (4)$$

то можно получить и связь частных углов рефракции с индексом преломления в виде

$$r_1 = 10^{-6} C \frac{L}{2} \tilde{N}. \quad (5)$$

В уравнении (4) обозначено $\xi = x/L$.

Таким образом, изложенное приводит к выводу о том, что градиенту индекса преломления можно найти сам индекс при известном коэффициенте связи между ними. При этом градиент легко найти по углу полной рефракции. Имея в виду поведение безразмерных параметров рефракционной траектории, состоящее в их статистическом постоянстве во времени [3] можно прийти к выводу, что аналогичным образом должны вести себя и отношения индексов преломления т.е.

$$\frac{\sigma}{r_1} = 2 \frac{\bar{N}}{\tilde{N}} - const \quad (6)$$

С учетом (6), можно записать

$$\frac{Ni(t)}{Nj(t)} = C_N - const; \quad \frac{\tilde{N}(t)}{Nij(t)} = \tilde{C}_N, \quad (7)$$

что означает подобие законов изменения индексов преломления в двух выбранных точках.

Для экспериментального исследования отмеченного постоянства использованы результаты измерений, выполненных на Камчатке. На концах трассы различной длины измерялись метеопараметры, по которым по приближенной формуле вычислялись значения индексов преломления (табл. 1).

Таблица 1

Результаты расчета отношения индексов преломления

Время на- блюдения	N'_1/N_2	Время на- блюдения	N'_1/N_2	Время на- блюдения	N'_1/N_2
Центр-Колдун L=750 м		Караульный-Кратер L=11 793 м		Центр-Скала L=17 848 м	
11 ^h 45 ^m	0, 9923	6 ^h 00 ^m	1,0027	8 ^h 05 ^m	0, 924
12 05	0, 9949	6 23	1,0000	8 14	0,9170
12 22	0, 9958	6 53	1,0006	8 30	0,9091
12 45	0, 9998	7 06	0,9988	8 45	0,9004
13 00	0, 9994	7 23	1,0027	9 04	0,8940
13 40	0, 9946	7 40	0,9985	9 13	0,8896
13 56	0, 9946				
14 50	0, 9965				
17 10	0, 9930				

Из таблицы видно, что погрешность отношения показателя преломления C_n (C_N) колеблется от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-5}$. Этот факт подтверждает как гипотезу о сильной коррелированности или статистическом постоянстве во времени отношения индексов преломления.

Для нахождения коэффициента связи между $N(H)$ и $dN(H)/dH$ целесообразно использовать корреляционный анализ рядов синхронно измеренных параметров трассы. В этом случае коэффициент связи будет равен коэффициенту регрессии. Поскольку изменение измеряемого расстояния обусловлено изменением интегрального индекса преломления, а изменения угла полной рефракции обусловлено изменением среднего по трассе градиента индекса преломления. Поэтому естественным является нахождение коэффициента связи между L и σ , который будет тождествен коэффициенту связи между интегральными значениями $\tilde{N}(H)$ и $d\tilde{N}(H)/dH$. Таким образом, справедливо уравнение регрессии

$$L = \bar{L} + \hat{K}_{L\sigma}(\sigma - \bar{\sigma}), \quad (8)$$

где черта означает усреднение во времени, а для коэффициента регрессии уравнение

$$\hat{K}_{L\sigma} = \frac{\sum_{j=1}^i (L_j - \bar{L})(\sigma_j - \bar{\sigma})}{j \cdot m_{\sigma}^2}, \quad (9)$$

где m_{σ}^2 - дисперсия длиннопериодических изменений угла полной рефракции.

Уравнение (8) является основным и отражает физическую основу предлагаемой методики. По аналогии с этим уравнением можно также записать уравнение

$$L = \bar{L} + \hat{K}_{Lz} (Z' - \bar{Z}') \quad (10)$$

которое вследствие существования зависимости $Z = Z_0 - r$ (Z_0 - истинное значение зенитного расстояния Z) тождественно уравнению

$$L = \bar{L} + \hat{K}_{Lr} (r' - \bar{r}') \quad (11)$$

Для проверки справедливости уравнений (8) и (11) выполнен корреляционный анализ результатов синхронных измерений, проводившихся в различные годы на Камчатском геодезическом полигоне - «Ключевском» и на геодезическом полигоне – «Чкалов» Московской области. В обработку при этом включались пары L и Z (табл. 2). Приведенные данные убедительно свидетельствуют о наличии связи между индексом преломления и его градиентом.

Таблица 2

Взаимосвязь дальности и зенитных расстояний

Дальность \bar{L} , м	Зенитное расстояние Z	Коэффициент корреляции ρ_{ZL}	Число пар j	Вероятность P_0
8 135	89 ⁰ 33' 09",8	-0,74	5	0,80
4 232	98 35 27,8	-0,81	6	0,95
4 003	88 33 58,0	-0,68	10	0,99
14 346	88 35 18,2	-0,31	10	0,95
9 887	87 03 49,2	-0,76	8	0,99
15 869	89 42 06,6	-0,84	9	0,99

Уравнения (8) и (10) пока не позволяют решить проблему определения интегрального индекса преломления в связи с отсутствием информации об абсолютном отклонении измеряемой дальности от истинного ее значения. Дальнейший путь заключается в нахождении связи между вычисляемым и измеряемым метеопараметрам на концах трассы индексом преломления и углом полной рефракции с одной стороны и между индексом и дальностью с другой. Причем для вычисления индекса целесообразно использовать формулу Барелла-Сирса.

$$N = N_c \frac{T_c}{P_c} \frac{P}{T} + K \frac{e}{T}, \quad (12)$$

где T_c , P_c - температура и давление воздуха при стандартных условиях; K - известный коэффициент, зависящий от длины волны; e - влажность.

Для разрешения неоднозначности воспользуемся моментом наступления изотермии атмосферы, не истинным а гипотетическим моментом. Другими словами, используем адиабатические условия. С этой целью в приведенных уравнениях необходимо место σ использовать угол σ_u , соответствующий отмеченным условиям

$$\bar{\sigma}_u = 35,9 \cdot 10^{-4} \bar{P} \cdot \bar{T}^{-2} \cdot L. \quad (13)$$

Таким образом, реализация изложенного подхода включает следующие действия и условия.

1. Синхронные взаимно обратные измерения зенитных расстояний Z_1 и Z_2 одновременно с определением расстояния светодальномером, а также одновременным измерением метеопараметров на концах трассы.

2. Время измерений t должно быть таким, чтобы изменение L , σ и N было существенным. Практически это время с учетом их суточного хода может быть 0,5 до 2 ч.

3. Корреляционный анализ, составление уравнений (8) и нахождение L и N .

4. Вычисление метеорологической поправки в среднее значение расстояния \bar{L} по формуле

$$L_M = (N_0 - N_H) \cdot 10^{-6} \cdot \bar{L},$$

где L_0 – постоянная светодальномера.

Следует отметить, что возможно использование и лишь односторонних зенитных расстояний, но в этом случае сложнее получение информации об угле рефракции в пункте наблюдения.

Таким образом, сущностью методики является переход от среднего значения индекса преломления $\langle N \rangle$ к интегральному \tilde{N} через коэффициент связи между ними. Погрешность определения коэффициента регрессии является основной для излагаемого метода и для ее оценки по формуле

$$m_{K_{xy}} = \frac{m_x}{m_y} \frac{1 - \rho_{xy}^2}{\sqrt{j}}, \quad (14)$$

где j - число пар x и y .

Изложенное свидетельствует о возможности достижения точности $\sim (1 \div 3) \cdot 10^{-7}$ разработанным методом. Кроме того, еще раз подтверждена работоспособность метода определения угловой рефракции, основанного на корреляционной связи точечного и интегрального градиентов температур. Простое использование индексов \bar{N}_1 или \bar{N}_{cp} к точности лишь $\sim 1,3 \cdot 10^{-6}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения / Островский А. Л., Джуман Б. Н., Заблоцкий Ф. Д. и др. – М. : Недра, 1990.

2. Виноградов В. В. Влияние атмосферы на геодезические измерения. – М. : Недра, 1992.
3. Дементьев В. Е. Исследование вертикальной рефракции на горизонтальных трассах в аридной зоне // Геодезия и картография. - 2014, - №2, - С. 57-64. ISSN 0016 - 7126.
4. Вшивкова О.В. Повышение качества планировочных работ посредством учета влияния атмосферы // Изв. вузов Геодезия и картография. - 2010, - №5, - С. 3-5, ISSN 0536 - 101X.
5. Вшивкова О.В. Учет влияния атмосферы в электронной тахеометрии с использованием геодезического градиентометра // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2010. – № 3.
6. Ефимов В.О. Оптическая рефракция и модельные методы учета ее влияния на характеристики дальномерного тракта лазерного локатора слежения // Инженерный вестник Дона, 2017, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/2248/.
7. Федянин М.Р., Лазеров В.М. Фотограмметрическая рефракция в модели однородной атмосферы // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – №1(55).
8. Быкасов Д.А., Водкайло Е.Г. Устранение влияния атмосферной рефракции на примере определения широты места по Солнцу // Молодой ученый. – 2017. – № 19. – С. 10-13.
9. Ефимов В.О., Пикулев А.Н., Дорогов Н.В. и др. Оптическая рефракция и модельные методы учета ее влияния на характеристики дальномерного тракта лазерного локатора слежения // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3.
10. Островский А.Л. Достижения и задачи рефрактометрии. Геопрофи. – 2008. – № 1.
11. Бектанов Б.К., Есимова К.А., Балкожа М.А. Способ определения вертикальных углов рефракции. Патент на полезную модель. – №1737. – БИ №12. – 2016.
12. Nordblad E., Leyser T.B. Ray tracing analysis of L mode pumping of the ionosphere, with implication for magnetic zenith effect // Ann. Geophys. 2010. V. 28. P. 1749–1759.
13. Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagiveshenskaya N.F. et al. Ionospheric electron heating, aurora and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: aspect angle dependence // J. Geophys. Res. 2003. 108(A4). 1141.
14. Kosch M. J., Pedersen T., Mishin E. et al. Temporal Evolution of Pump Beam Self-Focusing at the High-Frequency Active Auroral Research Program // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A8 304.
15. Eugene Levin, Dmitry Mozer, Jessica Mc Carty. Comparative Analysis of Software Packages for RADAR Data Interferometric Processing from CIS Country View. Surveying and Land Information Systems (SaLIS), Ed. Steve Frank, (in Press for Nov 2017 -Issue). Impact factor=1.3.

© Б. К. Бектанов, О. А. Сарыбаев, Г. К. Серикбаева, А. Б. Калдыбеков, 2019