

Д. И. МАСЛИЧ

ВЫБОР НАИВЫГОДНЕЙШЕГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЙ

Наивыгоднейшее время для измерения зенитных расстояний обычно определяют, учитывая или исключая рефракционные искажения, не принимая во внимание действие других факторов, от которых зависят условия видимости. Но при прохождении лучей происходят не только процессы преломления, а также поглощения, рассеивания или отражения электромагнитных волн. Эти процессы для различных длин волн проходят по разному. Для определения наивыгоднейшего времени рассмотрим основные факторы, обуславливающие дальность видимости. К ним относятся качество и колебание изображения, яркость и преломление лучей.

С развитием современной техники и широким использованием оптико-электронных систем при угловых измерениях выбор наивыгоднейшего времени имеет такое же значение, как и ранее при использовании оптических приборов.

Дальность видимости, качество и колебания изображений, яркость и преломление лучей зависят от состояния атмосферы, а точнее, ее приземных слоев, где, как правило, проходят визирные лучи при угловых измерениях. Состояние атмосферы определяется изменением ее температурного поля в пространстве и во времени, турбулентным обменом, наличием ветра, облачностью, туманом, дымкой. Все эти явления тесно связаны между собой и обусловлены временем суток и года, прохождением воздушных фронтов, характером подстилающей поверхности и некоторыми другими факторами. Рассмотрим влияние на состояние приземных слоев воздуха каждого фактора в отдельности.

Важнейшим фактором видимости является изменение температуры нижнего слоя атмосферы, которая определяется неоднородностью подстилающей поверхности Земли, а также горизонтальным и вертикальным обменами воздуха.

Как известно [13], тепловой баланс состоит из радиационного баланса; теплообмена в почве; теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой; тепла, затрачиваемого на испарение влаги с подстилающей поверхности.

Действие каждой составной части теплового баланса служит причиной уменьшения дальности видимости колебания, или преломления световых лучей в атмосфере. Так, изменение радиационного баланса вызывает ветер, турбулентные движения; следствием теплообмена между почвой и атмосферой являются испарения, образование тумана и дымки; испарения влаги усиливают колебания изображений.

Радиационный баланс, состоящий из коротковолновой солнечной радиации и длинноволнового излучения подстилающей поверхности, в дневное время ведущий и наибольший по напряжению. Он может быть как положительным, если приход тепла превышает

расход, так и отрицательным в обратном случае. Переход от отрицательного баланса в ночные часы к положительному в дневное время происходит при высотах Солнца около $10...15^\circ$, а при облачности — несколько меньших.

В непосредственной зависимости от изменения радиационного баланса находится суточный ход температуры и изменение вертикального градиента температуры.

Используя известное уравнение теплопроводности атмосферы [13], выразим изменение температуры от времени суток и высоты над Землей формулой

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial H} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial H} \right), \quad (1)$$

где K_z — коэффициент турбулентности.

Решая это уравнение, получаем

$$\Delta T(H, t) = A e^{-aH} \cos \left(\frac{2\pi}{24} t - aH \right), \quad (2)$$

где $a = \left(\frac{\pi}{24 K_z} \right)^{1/2}$, A — амплитуда изменения температуры у земной поверхности.

Решающее значение на дальность видимости и преломление лучей имеет стратификация приземных слоев, определяемая изменениями вертикального температурного градиента γ . Для анализа суточного хода вертикального градиента в различных условиях мы провели специальные экспериментальные исследования в горных и предгорных условиях [3, 4], в степной и таежной местности [6, 10], в полярных районах [7], в холмистой местности, над обширными водными поверхностями [3, 5, 11]. Анализ этих исследований позволил выявить существенные изменения значения и дневного хода вертикального градиента температуры в зависимости от условий местности, широты места, периода года. Эти отличия выражаются как в размахе амплитуды, так и во времени перехода через нулевые значения (наступление периода изотермии), а также в установлении максимальных и минимальных значений. Особенно резко эти отличия проявляются в полярных районах и в зимний период. Амплитуда дневного (суточного) хода γ увеличивается при перемещении к югу. Переход γ через нулевые значения в обычных условиях зависит от продолжительности дневного периода. Сравнение разных районов показывает, что чем ниже воздушный слой, тем больше амплитуда дневного хода γ . Усиление ветра и облачности вызывает значительное уменьшение амплитуды γ . В приводном слое суточные кривые γ сильно сглажены и во много раз меньше, чем над сушей.

При разного рода геодезических измерениях, в том числе при измерениях зенитных расстояний, наивыгоднейшим промежутком времени являются периоды спокойных изображений. Моменты установления и продолжительность периодов спокойных изобра-

жений зависят от облачности, периода года, широты, климатических особенностей и особенно от ветра. Весной и осенью середина этих периодов заметно отодвигается к близполуденному времени. В зимний период при существовании затяжных инверсий эти периоды отсутствуют. В полярных районах, в моменты круглосуточного солнцестояния она наступает на 3...4 ч раньше, чем в средних широтах. В приводном слое продолжительность этих периодов в два раза больше, чем над сушей.

Интенсивность турбулентного обмена в течение суток также определяется изменением температурного поля.

В связи с суточным ходом нагрева земной поверхности Солнцем в приземном слое ночью наблюдаются инверсии, а днем сверхадиабатические градиенты. Днем увеличивается турбулентный обмен, т. е. взаимодействие между верхними и нижними слоями воздуха. При усилении турбулентности возрастает приток в нижние слои частичек воздуха из верхних слоев и также приток с нижних слоев в верхние. При сильно развитом турбулентном обмене скорость ветра понижается в верхних слоях и усиливается в нижних. В случае затухания турбулентного обмена к вечеру скорость ветра в нижнем слое ослабевает.

С теоретической стороны это сводится к анализу системы уравнений, в которых коэффициенты турбулентности — функция высоты и времени. Такой анализ мы выполнили совместно с другими авторами [8, 9, 12, 14] для выяснения зависимости коэффициента турбулентности и уравнения световой кривой.

Рассмотрим суточный ход скорости ветра. Основной причиной изменения скорости ветра в пограничном слое является изменение турбулентного обмена, что в основном вызвано колебаниями температуры земной поверхности [13].

Исходные уравнения движения атмосферы записываем в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\omega_z v + \frac{\partial}{\partial z} K(z, t) \frac{\partial u}{\partial z}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\omega_z u + \frac{\partial}{\partial z} K(z, t) \frac{\partial v}{\partial z}, \end{aligned} \quad (3)$$

где коэффициент турбулентности

$$K(z, t) = \bar{k}(z) [1 + \varepsilon b(t)] \quad (4)$$

функция высоты и времени; u , v и w — проекции средней скорости движения изучаемого объема воздуха по осям x , y , z ; ω_z — составляющая угловой скорости вращения Земли; ρ — плотность воздуха. Коэффициент турбулентности — функция периодическая, где

$$b(t) = \cos(t - t_m); \quad (5)$$

ω — угловая скорость суточного вращения Земли; t_m — время наступления максимума K . Изменение K с высотой описывается моделью с изломом, выражающейся формулой

$$K = K_0 + k_1 z. \quad (6)$$

Днем ветер в приземном слое возрастает до высоты слоя обращения (где его направление меняется на обратное). Ночью он утихает — это общая закономерность для однородной поверхности. Но вблизи раздела таких поверхностей, как суша и вода, долина и склоны горы, имеют место свои закономерности: бризы, горно-долинные ветры и др.

После высоты слоя обращения, который доходит до 300 м и снижается до 20 м при наличии зимних инверсий, происходит обратная картина, т. е. днем ветер утихает, а ночью наблюдаются максимальные значения. Такая изменчивость объясняется турбулентными обменов. Резкая смена воздушных масс, прохождение фронтов могут нарушить нормальный ход и привести к значительным изменениям в отдельные дни.

Зависимость между профилями температуры и скоростью ветра на разных высотах z_1 и z_2 выражается формулой

$$T_2 - T_1 = \kappa T_* (u_2 - u_1) v_*^{-1}, \quad (7)$$

где u_1 и u_2 — скорость ветра и температуры T_1 и T_2 на разных высотах; z_1 и z_2 — постоянная Кармана, равная для воздуха 0,43; $v_* = (\tau/\rho)^{1/2}$ — скорость трения или динамическая скорость.

Зависимость между T_* и v_* запишем в виде

$$T_* = -Q(\kappa C_p \rho v_*)^{-1}; \quad (8)$$

$$L = -C_p v_* \rho (\kappa Q \eta)^{-1}, \quad (9)$$

где ρ — плотность воздуха; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении $\eta = gT^{-1}$; Q — вертикальный поток тепла; τ — турбулентный поток тепла; L — масштаб длины.

В связи с тем что в оптическом диапазоне влажность можно не учитывать, флуктуации коэффициента преломления можно связать с флуктуациями температуры:

$$C_n^2 = (80 \cdot 10^{-6} \rho T^{-2})^2 C_T^2. \quad (10)$$

Наряду с постоянно существующими турбулентными неоднородностями коэффициента преломления в атмосфере имеются крупномасштабные неоднородности, вызванные динамическими процессами. Причинами могут быть слоистый характер атмосферы, неоднородный термический режим при частичной облачности, градиенты метеоэлементов на границе разных по характеру подстилающих поверхностей.

Используя рассмотренные зависимости, выраженные формулами (7)—(10), а также другие закономерности, вытекающие из изменения температуры, ветрового режима и турбулентности приземного слоя, некоторые авторы (например, Джуман [2], Виноградов [1]) предприняли попытку найти аналитическую зависимость между турбулентными колебаниями изображений визирной цели и преломлением визирного луча. Это подтверждает наши предположения о комплексном подходе к определению наивыгоднейших условий прохождения визирных лучей и свидетельствует о

возможности уточнения формул, предложенных в работах [1, 2], с привлечением других факторов.

Дальность видимости визирных целей определяется:

- а) оптическими свойствами атмосферы (наличием дымки);
- б) свойствами визирной цели и ее отражательной способностью;
- в) условиями фона, на который проектируется визирная цель;
- г) свойствами оптического прибора.

Яркость воздушной дымки описываем уравнением [13]

$$\bar{\beta} = \frac{cE}{\alpha} (1 - p_1^l) = \frac{cE}{p_1} (1 - e^{-\alpha l}), \quad (11)$$

где α — показатель ослабления света; p_1 — коэффициент прозрачности, отнесенный к единице расстояния; c — коэффициент рассеяния; E — освещенность единицы объема; l — расстояние до визирной цели; β — яркость воздушной дымки.

Дальность видимости рассчитываем по уравнению

$$L = \frac{\ln K_1 - \ln \varepsilon}{\alpha}, \quad (12)$$

где ε — порог контрастной чувствительности глаза; K_1 — яркостный контраст, найденный из выражений

$$K_1 = \frac{B_0 - B_{\text{ср}}}{B_0}, \quad K_0 = \frac{B_{\text{ср}} - B_0}{B_{\text{ср}}}. \quad (12')$$

Здесь B_0 — видимая яркость объекта; $B_{\text{ср}}$ — яркость фона.

Наличие дождя и тумана приводит к сильному ухудшению видимости.

Дальность видимости можно в этом случае рассчитать из формулы

$$S_{\text{м}} = 2,61 \frac{r}{W_1} \rho_{\text{к}}, \quad (13)$$

где r — радиус капель; $\rho_{\text{к}}$ — плотность капли (воды), равная 1;

$W_1 = N \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{к}}$ — водность тумана.

Коэффициент рассеивания ослабления a определяется выражением

$$a = NK_0 \pi r^2, \quad (14)$$

Наиболее сильно ухудшают видимость туманы и дымка. Они представляют собой результат конденсации водяного пара в приземном слое воздуха.

Так как основной причиной туманов служит охлаждение воздуха, то наблюдается суточный ход туманов с максимумом в ранние утренние часы и минимумом после полудня. Наиболее отчетливый ход имеют радиационные туманы. Суточный ход тем отчетливее, чем выше температура.

Летом туманы быстро рассеиваются после восхода Солнца, а зимой значительно медленнее. В годовом ходе максимум повторяемости туманов в осенне-зимний период и минимум — летом.

Подводя итоги анализа изменения всех факторов, определяющих наивыгоднейшее время для проведения угловых измерений, в том числе зенитных расстояний, следует отметить, что для средних широт таким временем является вторая половина дня. В первую половину дня очень часто видимость ограничивают туманы и дымки, хотя влияние рефракции, турбулентности в периоды утренних спокойных изображений минимальны.

1. *Виноградов В. В., Медовиков А. С., Никольский Е. К.* Определение рефракции по размытию изображения параллельной миры // *Геодезия и картография*. 1986. № 10. С. 11—14.
2. *Джуман Б. М., Матяцук И. С., Островский А. Л.* Новый метод учета атмосферных влияний при светодальномерных измерениях // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*. 1979. Вып. 30. С. 61—65.
3. *Маслич Д. И.* Суточный ход вертикальной рефракции и периоды спокойных изображений // *Рефракция оптических волн в атмосфере*. Томск, 1982. С. 44—62.
4. *Маслич Д. И.* О точности геодезического нивелирования в горных условиях. Львов, 1957.
5. *Маслич Д. И.* О применении одновременного геодезического нивелирования для определения высот пунктов триангуляции в холмистой местности // *Тр. Ворошиловгр. горно-металлург. ин-та*. 1960. Т. 1. С. 89—98.
6. *Маслич Д. И., Кулиш Л. А.* Особенности рефракционного поля таежных районов и способы его учета при измерении зенитных расстояний // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*. 1975. Вып. 22. С. 22—28.
7. *Маслич Д. И., Петрашевич Г. Г.* Суточные изменения рефракции в Заполярье // *Геодезия и картография*. 1969. Вып. 9. С. 23—28.
8. *Маслич Д. И., Хижак Л. С., Дидух И. И.* и др. Определение уравнений световой кривой и углов рефракции в атмосфере // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*. 1980. Вып. 32. С. 90—96.
9. *Маслич Д. И., Хижак Л. С., Дидух И. И., Иосипчук Н. Д.* Исследование некоторых характеристик турбулентного потока на пути визирного луча // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*. 1982. Вып. 36. С. 74—78.
10. *Маслич Д. И., Хижак Л. С., Кравцов Н. И.* К вопросу об отрицательных значениях коэффициентов рефракции // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*. 1969. Вып. 10. С. 35—40.
11. *Маслич Д. И., Хижак Л. С., Глустьяк Б. Т., Власенко С. Г.* Исследование закономерностей изменения коэффициента рефракции в зимний период // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*. 1968. Вып. 7. С. 15—24.
12. *Маслич Д. И., Хижак Л. С., Яскилка Н. Б.* Определение коэффициента турбулентности в точках световой кривой по геодезическим и метеорологическим измерениям // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*. 1982. Вып. 36. С. 78—84.
13. *Матвеев Л. Т.* Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., 1976.
14. *Хижак Л. С., Маслич Д. И., Яскилка Н. Б., Иосипчук Н. Д.* Определение уравнения световой кривой, углов рефракции с учетом характеристик турбулентной атмосферы // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*. 1983. Вып. 38. С. 127—131.