

**Přírodovědecká fakulta Univerzita Palackého  
v Olomouci**

**katedra optiky**



Přírodovědecká  
fakulta

Univerzita Palackého  
v Olomouci

**Srovnání modelů turbulence atmosféry a  
jejich vliv na šíření světla v atmosféře**

**Bakalářská práce**

Vypracoval: Jakub Hegedús

Studijní obor: Digitální a přístrojová optika

Datum odevzdání: 12. 5. 2016

Olomouc 2016

## Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Jakub Hegedůs
Instituce:	Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta 17. listopadu 1192/12 771 46 Olomouc
Pracoviště:	Katedra optiky
Studijní obor:	Digitální a přístrojová optika
Název práce:	Srovnání modelů turbulence atmosféry a jejich vliv na šíření světla v atmosféře
Vedoucí práce:	Řehoř Zdeněk, Ing. Ph.D.
Počet stran:	51
Klíčová slova:	Atmosféra, turbulence, matematický model, strukturní parametr

## Abstrakt:

Cílem této práce je vymezení platnosti stávajících modelů turbulence. Práce rovněž pojednává o stanovení parametrů vybraných modelů turbulence pro ekvivalentní vliv turbulence na šíření světla v atmosféře.

## Bibliographical identification

Autor's first name and surname:	Jakub Hegedús
School:	University of Palacky in Olomouc Faculty of Science 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc
Department:	Department of optics
Program:	Digital and instrumental optics
Title of thesis	Comparison of atmosphere models and their influence on light propagation in atmosphere
Thesis consultant:	Řehoř Zdeněk, Ing. Ph.D.
Number of pages:	51
Keywords:	atmosphere, turbulence, mathematic model, structural parameter

## Abstract:

The goal of this thesis is to define validity of existing models of turbulence. Thesis also interprets the determination of selected models of turbulence for the equivalent effect of turbulence on the propagation of light in the atmosphere.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci napsal samostatně s použitím uvedené literatury a za pomoci vedoucího této práce Ing. Zdeňka Řehoře, Ph.D.

V Olomouci dne 12. 5. 2016

.....

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Řehořovi, PhD. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

# Obsah

1. Atmosféra Země.....	9
1.1. Složení zemské atmosféry .....	9
1.1.1. Suchý vzduch.....	9
1.1.2. Vodní pára .....	10
1.1.3. Aerosoly.....	10
1.2. Vliv atmosféry na šíření světla .....	11
1.2.1. Absorpce .....	12
1.2.2. Rozptyl.....	13
2. Turbulentní proudění.....	14
2.1. Vznik turbulence.....	16
2.1.1. Mechanická turbulence .....	16
2.1.2. Termická turbulence .....	16
2.2. Definice turbulence.....	17
2.2.1. Náhodnost.....	17
2.2.2. Difuzivita .....	17
2.2.3. Vířivost.....	17
2.2.4. Spektrum měřítek .....	18
2.2.5. Prostorovost.....	18
2.2.6. Disipativnost.....	18
2.2.7. Nelinearita .....	19
2.3. Kolmogorova teorie turbulence .....	20
3. Veličiny používané k popisu turbulence .....	21
3.1. Strukturní parametr indexu lomu.....	21
3.2. MTF.....	22
3.3. MCFA.....	23
4. Modely atmosférické turbulence.....	24
4.1. Empirický model .....	24
4.2. Referenční model turbulence (Tatarského) .....	27
5. Analýza modelů turbulence.....	29
5.1. Empirický model .....	29
5.1.1. Závislost na teplotě T .....	30

5.1.2.	Závislost na váhové funkci $W$ .....	31
5.1.3.	Závislost na rychlosti větru $WS$ .....	32
5.1.4.	Závislost na relativní vlhkosti $RH$ .....	33
5.1.5.	Dílčí závěr.....	34
5.2.	Analýza vlivu turbulence na kvalitu obrazu .....	34
5.2.1.	Závislost koeficientu $MCFA$ na teplotě $T$ .....	35
5.2.2.	Závislost koeficientu $MCFA$ na relativní vlhkosti $RH$ .....	36
5.2.3.	Závislost koeficientu $MCFA$ na rychlosti větru $WS$ .....	37
5.2.4.	Dílčí závěr.....	37
5.3.	Referenční model turbulence (Tatarského) .....	38
5.3.1.	Lidské oko .....	38
5.3.2.	Binokulár .....	39
5.3.3.	Astronomický dalekohled.....	40
5.3.4.	Dílčí závěr.....	41
6.	Porovnání .....	43
	Závěr .....	47
	Citovaná literatura .....	48
	Seznam obrázků.....	50
	Seznam tabulek.....	51

# Úvod

V dnešní době, kdy je důležité předávat velké množství dat a informace na velké vzdálenosti za co nejmenší čas, je prioritou všech zlepšovat komunikační kanály, které tento způsob spojení umožňují. Jednou z významných technologií v tomto odvětví je optická bezdrátová komunikace.

V oblasti atmosféry ovšem dochází k degradaci signálu ovlivňující kvalitu přijímaných dat. To je důsledkem fyzikálních jevů jako absorpce, rozptyl a turbulence.

Tato práce si dává za cíl porovnat vybrané modely turbulence atmosféry popisující míru ovlivnění optického svazku turbulencí na základě srovnání výsledků strukturního parametru  $C_n^2$ . V její první části je představena atmosféra z obecného pohledu. Dále je podrobně rozebrán vliv atmosféry na šíření optického svazku a především tedy turbulence.

Na základě poznatků o turbulenci jsou v práci dále popsány vybrané modely, umožňující simulovat její vliv v atmosféře. Tyto modely jsou dále zpracovány a vzájemně srovnány za účelem vymezení jejich platnosti pro středoevropský region.



# 1. Atmosféra Země

Termín atmosféra vznikl složením řeckých slov „*atmos*“ (pára) a „*sphaira*“ (obal). Její hmotnost ( $5,157 \cdot 10^{18}$  kg) se může zdát velká, přesto se nevyrovná ani jedné miliontině hmotnosti planety Země.

Atmosféra samotná je plynný obal tvořený směsicí plynů, které mezi sebou chemicky nereagují. Při hmotnostním rozdělení atmosféry, s ohledem na pokles hustoty a tlaku vzduchu, je až 50 % atmosféry soustředěno do výšky 6 km, 75 % do 11 km a 90 % do 20 km. Ve vyšších částech atmosféry (50 – 80 km) se chemické složení už výrazně nemění a to díky turbulentním pohybům.

Nad touto hranicí dochází působením krátkovlnného slunečního záření disociací a ionizací molekul a atomů k rozkladu kyslíku a dusíku. V horních vrstvách atmosféry pak převažují jen lehké plyny (helium, vodík), které mají tendenci neustále disipovat do meziplanetárního prostoru. [1]

## 1.1. Složení zemské atmosféry

Vzdušný obal Země je rozdělen na tři složky:

- Suchý vzduch bez znečišťujících příměsí
- Vodní pára, popř. kondenzační produkty (tj. vodní kapky nebo ledové krystalky)
- Různé znečišťující příměsi [2]

### 1.1.1. Suchý vzduch

Suchý vzduch se skládá ze dvou složek – stálé a proměnné. Stálými složkami jsou označovány plyny, které se v atmosféře vyskytují v přibližně stejném množství. Proměnné složky jsou pak ty, jejichž množství se mění.

Mezi základní stálé složky je řazen dusík (78,09%) a kyslík (20,95%), které představují 99% skladby celé atmosféry. Mezi stálé složky dále patří argon, neon, helium, krypton, xenon, pyrogen a oxid dusitý a stopové množství dalších.

Proměnlivým množstvím se vyznačuje ozon, vodní pára, oxid uhličitý a oxid uhelnatý. Jejich kvantita je závislá na meteorologických a geografických podmínkách.

Kupříkladu četnost oxidů uhličitých a uhelnatých je silně závislá na ročním období, popř. je zvýšená v průmyslových oblastech. [3]

### **1.1.2. Vodní pára**

Nejvýznamnějším proměnným prvkem v atmosféře je vodní pára. Její obsah v atmosféře je velmi proměnlivý v čase i prostoru. Ve středoevropském regionu se její koncentrace, vyjádřená relativní vlhkostí vzduchu, pohybuje zpravidla v intervalu 60 – 80 % [3], přičemž množství vodních par obsažených ve vzduchu velmi rychle klesá s rostoucí výškou nad zemským povrchem.

Vodní páru lze v atmosféře považovat za reálný plyn, který se přibližně řídí zákony dokonalého plynu. To platí za podmínky, dokud nedochází ke změnám fáze.

V atmosférických podmínkách může vodní pára měnit skupenství a přecházet ve vodu (kondenzace) nebo přímo v led (sublimace). V atmosféře ovšem probíhají i ostatní fázové přechody: led ve vodu (tání), voda v páru (vypařování) a voda v led (mrznutí). V posledním případě (při přechodu z kapalného do pevného skupenství) se voda mění v krystalky ledu nebo vodní kapky, které jsou řazeny mezi aerosoly. [2]

### **1.1.3 Aerosoly**

Kromě výše zmíněných složek se v atmosféře vyskytují také různé typy velmi malých částic a kapek. Mezi aerosoly patří prach, nečistoty, mikroorganismy, mořská sůl, kapky vody (opar nebo mlha) a kouř.

Typická struktura kontinentálních aerosolů se skládá z 70% látek rozpustných ve vodě a z 30% látek podobných prachu. Většina takových aerosolů je ve formě kapiček vody, které tvoří opar, mlhu a mraky. Tyto kapičky se tvoří okolo malých

jader, jak absorbují vodu z obsahu páry v atmosféře. Kapičky, které formují opary, jsou ve velikosti menší než 1  $\mu\text{m}$ . Naproti tomu, kapičky utvářející mraky a mlhu mají tendenci být větší než 3  $\mu\text{m}$ . [3]

Jelikož se v atmosféře mění velké množství veličin na základě geografického umístění, byla přijata definice standardní atmosféry - ISA. Zkratkou ISA (International Standard Atmosphere) se rozumí mezinárodní standardní atmosféra, která udává závislost teploty, atmosférického tlaku a hustoty na vzdálenosti od Země. ISA má definované chemické složení s 21,9% kyslíku a tíhovým zrychlením  $9,80665 \text{ m/s}^2$ . Další veličiny jsou uvedeny v tabulce 1 níže, kde MSL (Mean Sea Level) označuje střední hladinu moře a hodnoty v závorkách výšku nad povrchem Země. [4]

**Tabulka 1. ISA [4]**

Tlak vzduchu (MSL)	1013,25 hPa
Teplota vzduchu (MSL)	288,15 K
Hustota vzduchu (MSL)	$1,225 \text{ kg/m}^3$
Vertikální teplotní gradient (0 - 11000 m)	$0,65 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$
Teplota vzduchu (11 000 m)	216,65 K (-56,5 $^\circ\text{C}$ )
Hustota vzduchu (11 000 m)	$0,36319 \text{ kg/m}^3$
Tíhové zrychlení (11 000 m)	$9,7727 \text{ m/s}^2$
Vertikální teplotní gradient (11 000 - 20 000)	$0 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$
Tlak vzduchu (20 000 m)	54,749 hPa

## 1.2. Vliv atmosféry na šíření světla

Projevy počasí, jako je (např.) déšť, sníh, mlha, znečištění a jiné stavy atmosféry mají velký vliv na šíření optického signálu skrz atmosféru. S narůstající délkou trasy roste také působení atmosféry.

Je-li zobrazován předmět optickou či optoelektronickou soustavou je nutno počítat s těmito projevy oproti stavu neovlivněného vlivem atmosféry[5]:

- Pokles intenzity optického záření
- Snížení kontrastu cíle k pozadí
- Fluktuace přijímané úrovně optického záření
- Deformace obrazů pozorovaných objektů
- Zkreslení barevných charakteristik objektů

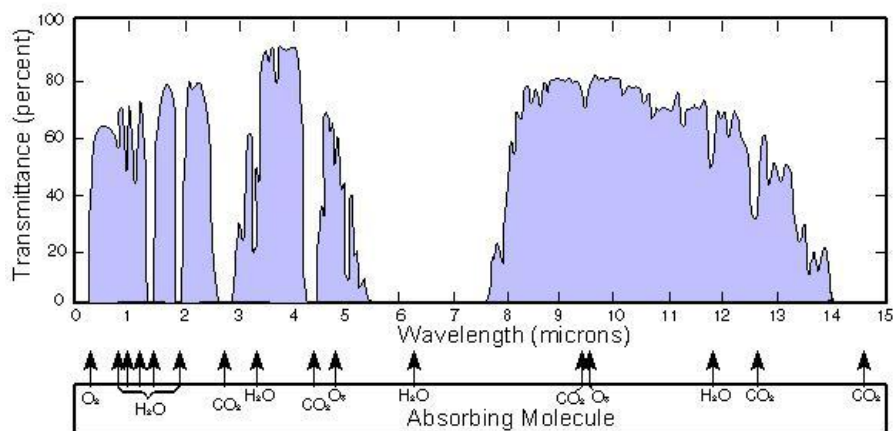
Tyto projevy jsou zapříčiněny výskytem 3 fyzikálních jevů v atmosféře:[5]

- Absorpce optického záření
- Rozptyl optického záření
- Turbulence atmosféry

Absorpce a rozptyl mají vliv na přenos viditelného a infračerveného záření a způsobují jeho útlum. Turbulence ovlivňuje kvalitu obrazu pozorovaného na velkou vzdálenost.

### 1.2.1. Absorpce

Hlavní složky, které silně absorbují záření, jsou oxid uhličitý, vodní páry, aerosolové částice a méně výrazně také ozón. Velikost absorpce se velmi mění v závislosti na vlnové délce, jak ukazuje obrázek 1 níže.[5]



Obrázek 1. Propustnost atmosféry[6]

### 1.2.2. Rozptyl

K rozptylu optického záření v atmosféře dochází na plynných molekulách a částicích aerosolu.

Míra rozptylu závisí především na poměru mezi vlnovými délkami procházejícího záření, velikosti částic, jejich koncentraci a také tvaru. Mezi další činitele ovlivňující míru rozptylu se řadí také index lomu částic a úhel mezi zářením a směrem pohledu.

Z pohledu vzájemného poměru vlnové délky procházejícího optického záření a rozměru interagující částice existují 3 druhy rozptylu: Rayleighův, Miův a neselektivní (někdy též označovaný jako geometrický) rozptyl. Rayleighův rozptyl probíhá na molekulách vzduchu, které jsou malé v porovnání s vlnovou délkou záření  $\lambda$ . Miův rozptyl je způsoben pevnými částčkami nebo kapkami obsažených v atmosféře. Neselektivní rozptyl se uskutečňuje v případě, kdy nižší atmosféra obsahuje dostatečné množství aerosolů s průměrem 10x větším než je určitá vlnová délka. Miův rozptyl se týká především částček, ze kterých jsou složeny mraky a mlha.[3]

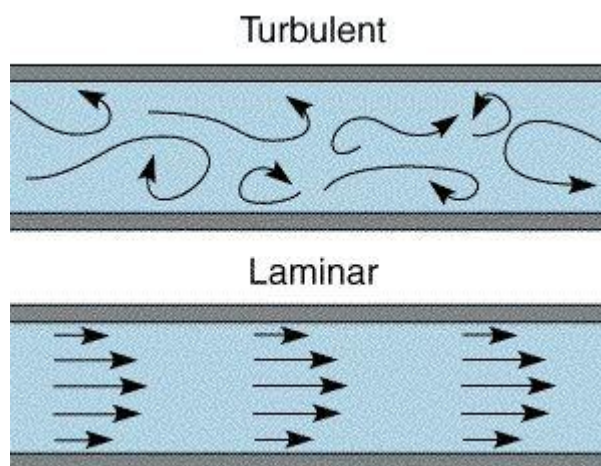
## 2. Turbulentní proudění

„Vnitřní tření tekutin (viskozita) se projevuje vazkými silami, které působí na předměty pohybující se v tekutinách. Z četných experimentů (např. Reynoldsovy pokusy se zabarvením proudových vláken) je známo, že původně hladké laminární proudění se při překročení kritické rychlosti naruší a přechází v proudění turbulentní charakterizované vznikem turbulentních vírů chaoticky se pohybujících uvnitř tekutiny.“[2]

Obecně se rozlišují 2 základní proudění: laminární a turbulentní.

Pro laminární proudění je typický velmi pomalý pohyb nebo vysoká hodnota viskozity. Částice tekutiny mají uspořádaný pohyb a pohybují se ve vrstvách. Latinsky nazýváme vrstvu (popř. plátek) slovem „lamina“, odtud laminární proudění. Vrstvy, šířící se ve směru proudu, po sobě hladce kloužou. Nedochozí tedy k promíchání proudnic.[7]

Naproti tomu proudění, které si lze zjednodušeně představit v podobě chaoticky se pohybujících se vírů různých velikostí, je nazýváno turbulentním. Při přimísení vhodného barviva lze rozlišit, že proudnice tohoto proudění mají náhodný tvar, jenž se rychle mění v závislosti na čase.[4]



Obrázek 2. Druhy proudění [8]

K vymezení typu proudění se používá Reynoldsovo číslo. Turbulentním se proudění stává zhruba okolo hodnoty 4000. Jelikož kritická hodnota je závislá na aktuálních podmínkách v atmosféře, nelze ji proto určit přesně.

Reynoldsovo číslo je definováno na základě rychlosti kapaliny, geometrických rozměrů a fyzikální vlastnosti tekutiny.

Reynoldsovo číslo (Re) je definováno vztahem [9]:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu_k} , \quad (1)$$

kde  $v$  je rychlost vzduchu [m/s],  $\nu_k$  je součinitel kinematické viskozity [m<sup>2</sup>/s] a  $l$  je rozměr [m].

Součinitel kinematické viskozity je určen vztahem:

$$\nu_k = \frac{\eta}{\rho} , \quad (2)$$

kde  $\eta$  je dynamická viskozita [N·s/m<sup>2</sup>] a  $\rho$  je hustota kapaliny [kg/m<sup>3</sup>]

Dynamická viskozita je pak určena vztahem [10]:

$$\eta = \eta_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} , \quad (3)$$

kde  $\eta_0$  je referenční viskozita [N·s/m<sup>2</sup>] při referenční teplotě  $T_0$  [K],  $T$  je teplota [K],  $C$  je Sutherlandova konstanta pro plynný materiál.

## **2.1. Vznik turbulence**

Příčiny vzniku turbulence v atmosféře jsou jak mechanické, tak i termické povahy.

### **2.1.1. Mechanická turbulence**

Tento druh turbulence vzniká v mezní vrstvě atmosféry třením proudícího vzduchu o zemský povrch. Přesněji dochází k tomu, že na závětrné straně překážky (např. hory) dochází ke zvyšování atmosférického tlaku, naproti tomu v závětrné straně tlak vzduchu klesá. Při šíření proudů vzduchu přes pohoří či jiné překážky dává tento rozdíl tlaků možnost vzniknout závětrnému víru s horizontální osou proudění. Deformace vzdušného proudu je natolik zásadní, že dochází ke vzniku tohoto druhu turbulence i při stabilním rozvrstvení vzduchu.[4]

### **2.1.2. Termická turbulence**

Termická turbulence vzniká za nestabilního teplotního rozvrstvení. Pravou příčinnou jsou vztahové a tlakové síly působící v poli turbulentních fluktuací teploty vzduchu. Za tohoto předpokladu lze termickou turbulenci považovat za příklad termické konvekce. Je však nutné ji nezaměňovat s tzv. uspořádanou termickou konvekcí. Dalším faktorem, který dopomáhá vzniku termické turbulence v nižších výškách, je členitost terénu. To znamená, že čím je terén členitější, tím je rozvrstvení teplot nad terénem různorodější.[2]

Nutno poznamenat, že stabilní rozložení teploty ve vzduchu tlumí rozvoj neuspořádaných pohybů a jedná se tedy o faktor snižující rozvoj turbulence.



## **2.2. Definice turbulence**

Výrok, že turbulentní proudění je neuspořádané v čase a prostoru, je pravdivý, ale nejedná se o přesnou matematickou definici. Je nutno vzít v úvahu, že turbulentní proudy, mohou mít odlišné vlastnosti, mohou být prostorové nebo rovinné, dokonce se v těchto proudech mohou vyskytovat organizované až skoro pravidelné struktury.

Společnou vlastností pro všechny tyto proudy je však schopnost míšení a přenos hmoty podstatně rychleji, než je tomu u molekulárních transportních mechanismů.

Turbulenci samotnou lze vyjádřit jako souhrn atributů, díky kterým ji můžeme lépe specifikovat:

### **2.2.1. Náhodnost**

Turbulentní režim proudění má náhodný charakter. To znamená, že malé náhodné poruchy v daném počátečním čase jsou stále zesilovány, až se po určité době stává deterministická předpověď dalšího vývoje neproveditelná. [7]

### **2.2.2. Difuzivita**

Difuzivitou je označována schopnost turbulence transportovat veličiny z objemu tekutiny do ostatních přilehlých objemů. Což má za následek zvýšení hodnot toku hmoty a energie v proudovém poli. Intenzita děje může být až o několik řádů vyšší než u molekulární difúze.[7],[11]

### **2.2.3. Vířivost**

Turbulentní proudy se vyznačují značným výskytem náhodně rotujících vírů. Vírové struktury (popř. náhodně rotující víry) specifikujeme jako koherentní víry nebo také koherentní struktury, jejichž rotace je úměrná jejich velikosti. Rychlost rotace má zvětšující se tendenci kvůli rozpadu vírů.[11]

#### **2.2.4. Spektrum měřítek**

Víry o různých rozměrech, vyskytující se v turbulentním proudovém poli, jsou charakterizovány širokou škálou délkových měřítek. Velikost struktur nepřesahuje rozměry smykových oblastí, které byly u jejich vzniku. Zdola jsou potom omezeny velikostí disipujících vírů. Spektrum měřítek je tedy spojitě a lze proto turbulentní proudové pole označit jako dynamický systém s velmi vysokým počtem stupňů volnosti.[7]

#### **2.2.5. Prostorovost**

Důsledkem toho, že vírové struktury se v proudovém poli vyskytují na náhodných místech s náhodnou orientací, je prostorovost vektorového pole fluktuací rychlosti. Nastává situace, kdy při definování určitých okrajových podmínek mohou vírové struktury dosahovat větších rozměrů než je jistá mezní velikost. K podobnému ději dochází i u proudění v tenkých vrstvách, kde rozměry oblasti umožňují vznik vírů, jež mohou být větší, než je tloušťka vrstvy, pouze s orientací vířivosti napříč vrstvou a nikoli podél ní.[7]

#### **2.2.6. Disipativnost**

Turbulence je disipativní proces. Disipace, jako proces, má za následek zvýšení přeměny kinetické energie vírových struktur v teplo. Ve své podstatě je to nevratný proces, který je součástí práce viskózních napětí. Aby došlo k trvalému zachování turbulentního proudění, je nutné dodávat energii. V praxi energii do systému odvádí hlavní proud v oblasti velkých měřítek. Dodaná energie je dále kaskádovitě předávána menším vírovým strukturám.[7]

### **2.2.7. Nelinearita**

Samotná podstata turbulentního proudění je nelineární. Nelinearit je nutné uplatnit i u vzniku turbulence, kde dochází k stálému zesilování malých odchylek vedoucích k chaosu.[11]

### 2.3. Kolmogorova teorie turbulence

V 1941 přišel sovětský matematik Kolmogorov s teorií, která se stala fundamentální pro popis principu turbulence v atmosféře. Teorie praví, že pokud rychlost vzduchu překročí kritickou hodnotu Reynoldsova čísla, dojde ke vzniku víru tak, že se větší vír rozpadne na menší části.

Vnější měřítko turbulence  $L_o$  udává tzv. velikost nezávislosti výchozího toku na turbulentních vlastnostech – přívod energie. Takto dojde ke vzniku homogenních a izotropních vírů, jejichž velikost je menší než  $L_o$  a nehomogenních a anizotropních vírů pro délky větší nebo rovna  $L_o$ . Vnější měřítko  $L_o$  se zvětšuje až do výšek 100 m nad zemský povrch.

Vnitřní měřítko turbulence  $l_o$  udává velikost vírové struktury těsně před tím, než dojde k rozptýlení energie. Hodnoty, kterých vnitřní měřítko turbulence dosahuje, se pohybují v intervalu 1 – 10 mm při zemském povrchu.[12]

### 3. Veličiny používané k popisu turbulence

K popisu míry turbulence a degradace signálu při průchodu atmosférou se využívá velké množství veličin. V této práci je brán největší zřetel na 3 veličiny uvedené níže.

#### 3.1. Strukturní parametr indexu lomu

Modely popisující atmosféru se často opírají o parametr  $C_n^2$ . Jeho hodnota přímo souvisí s teplotou a se změnou větru. Dá se konstatovat, že velikost  $C_n^2$  nám udává míru turbulence v atmosféře. Představu o hodnotách a řádech, ve kterých se tato veličina pohybuje, znázorňuje tabulka 2.

**Tabulka 2. Míra turbulence -  $C_n^2$  [14]**

$10^{-16}$	Slabá
$10^{-15}$	Střední
$10^{-14}$	Silná
$10^{-13}$	Velmi silná

Parametr je závislý na velkém množství vlivů např. denní doba, teplota, roční období a další. Proto je téměř nemožné vytvořit jeden referenční model popisující atmosféru. Na druhou stranu je však možné vytvořit model, jenž odpovídá daným geografickým podmínkám.

## 3.2. MTF

Modulační přenosovou funkcí (Modulation transfer function) je nazýván přenos poměru modulace objektu k modulaci pozadí. Pojmem modulace objektu je označováno prostorové rozložení intenzity optického záření v obraze.[13]

Z průběhu MTF lze získat množství informací o výsledné kvalitě zobrazení. Nízké prostorové frekvence v obraze udávají umístění a základní tvary velkých objektů. Informace o správném rozdělení stupnice záře tj. věrném barevném podání nese střední oblast prostorových frekvencí. Kromě toho obsahuje také data základních obrysů objektů. A poslední, tedy vysoké frekvence, mají významný podíl na správném zobrazení jemných struktur obrazu, drobných detailů a v neposlední řadě také ostrých přechodů mezi objekty a jejich pozadím.

MTF atmosféry vypočtená z meteorologických parametrů z daného regionu umožňuje:

- Předpovídat vývoj kvality zobrazení v závislosti na meteorologických podmínkách
- Předpokládat dosah a chyby měření optických a optoelektronických přístrojů
- Rekonstruovat zobrazení vzdálených cílů

Výsledný průběh MTF je výrazně ovlivněn turbulencí atmosféry a útlumem optického záření během šíření atmosférou, proto je vhodným druhým parametrem k porovnání modelů atmosféry.[5]

### 3.3. MCFA

Pro hodnocení kvality je dále využíván koeficient MCFA ( Modulation Contrast Function Area), který je popsán vztahem:

$$MCFA = \int_0^{\infty} \frac{MTF(f_r)}{f_r} df_r , \quad (4)$$

kde  $f_r$  je prostorová frekvence [čar/rad] a MTF je modulační přenosová funkce atmosféry [%].

Výsledná hodnota udává zjednodušeně míru kvality obrazu. Lze konstatovat, že při hodnotách nad 0,68, je obraz kvalitní. Se snižující se hodnotou koeficientu pak také klesá kvalita obrazu. Pro interval (0,5 – 0,68) je již znát zhoršení kvality zobrazení jemných struktur obrazu. Zobrazení s koeficientem v intervalu (0,33 – 0,5) je již více zatíženo vlivem atmosféry. Větší vliv atmosféry má pak za následek to, že v intervalu (0,1 - 0,33) už rozeznáváme pouze základní struktury a pro nižší hodnoty už je obraz zcela nerozpoznatelný.[5]

## 4. Modely atmosférické turbulence

### 4.1. Empirický model

Tento model je určen k výpočtu strukturálního parametru  $C_n^2$  na základě aktuálních meteorologických podmínek [5]:

$$C_n^2 = A_1W + B_1T + C_1RH + C_2RH^2 + C_3RH^3 + D_1WS + D_2WS^2 + D_3WS^3 + E_1SF + F_1TCSA + G, (5)$$

kde  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $E_1$ ,  $G$  představují regresní koeficienty,  $W$  je časová váhová funkce,  $T$  je teplota [K], písmena  $RH$  označují relativní vlhkost [%],  $WS$  označuje rychlost větru [m/s],  $SF$  je hustota slunečního záření dopadajícího na horizontální rovinu [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ] a  $TCSA$  je celková plocha příčného průřezu částic aerosolu na jednotku trasy [ $\text{m}^2$ ].

Je-li požadována vyšší rychlost výpočtu a postačuje-li nižší přesnost, zanedbávají se hodnoty  $SF$  a  $TCSA$ .

Časová váhová funkce  $W$  představuje zjednodušeně vliv turbulence v závislosti na denní době. Její velikost narůstá hodnot již 2 – 3 hodiny po východu Slunce. Naopak v průběhu noci a za nepříznivých meteorologických podmínek jsou hodnoty váhové funkce  $W$  zanedbatelné. Hodnoty váhové funkce obsahuje tabulka 3.[5]



**Tabulka 3. Váhová funkce W [5]**

<b>Relativní časový interval</b>	<b>Váhová funkce W</b>	<b>Poznámka</b>
do -3	0,11	
-3 ÷ -2	0,07	
-2 ÷ -1	0,08	
-1 ÷ 0	0,06	
0 ÷ 1	0,05	východ Slunce
1 ÷ 2	0,10	
2 ÷ 3	0,51	
3 ÷ 4	0,75	
4 ÷ 5	0,95	
5 ÷ 6	1,00	
6 ÷ 7	0,90	
7 ÷ 8	0,80	
8 ÷ 9	0,59	
9 ÷ 10	0,32	
10 ÷ 11	0,22	
11 ÷ 12	0,10	západ Slunce
12 ÷ 13	0,08	
nad 13	0,13	

**Tabulka 4. Regresní koeficienty [5]**

Koeficient	Přesný model	Model pro praktické výpočty
$A_1$	$5,9 \times 10^{-15}$	$0,8 \times 10^{-14}$
$B_1$	$1,6 \times 10^{-15}$	$2,0 \times 10^{-15}$
$C_1$	$-3,7 \times 10^{-15}$	$-2,8 \times 10^{-15}$
$C_2$	$6,7 \times 10^{-17}$	$2,9 \times 10^{-17}$
$C_3$	$-3,9 \times 10^{-19}$	$-1,1 \times 10^{-19}$
$D_1$	$-3,7 \times 10^{-15}$	$-2,5 \times 10^{-15}$
$D_2$	$1,3 \times 10^{-15}$	$1,2 \times 10^{-15}$
$D_3$	$-8,2 \times 10^{-17}$	$-8,5 \times 10^{-17}$
$E_1$	$2,8 \times 10^{-14}$	-
$F_1$	$-1,8 \times 10^{-14}$	-
$F_2$	$1,4 \times 10^{-14}$	-
$G$	$-3,9 \times 10^{-13}$	$-5,3 \times 10^{-13}$

## 4.2. Referenční model turbulence (Tatarského)

Model, který vytvořil V. I. Tatarski, přímo vychází z Kolmogorovy teorie. Tento model je hojně užíván a je ověřen četnými experimenty, proto ho pro účel této práce budeme brát jako referenční. Model předpokládá, že odchylky čela vlny jsou způsobeny změnami indexu lomu atmosféry, což přímo vede k fluktuaci fáze záření. Co se týče samotné fluktuace fáze, byla stanovena hypotéza, že má tzv. náhodnou Gaussovskou distribuci (příp. normální rozdělení).[15]

Tatarski předpokládá, že vlnové číslo  $K$  dosahuje mnohem vyšších hodnot než reciproká hodnota vnějšího rozměru turbulence  $L_0$ . Jelikož se v tomto bodě, neshodují s Kolmogorovou teorií, bylo třeba upravit vztah pro výpočet spektra indexu lomu  $\Phi_n$  do následující podoby:

$$\Phi_n(K) = 0,033 \cdot C_n^2 \cdot K^{\frac{-11}{3}} \cdot e^{-\frac{K^2 \cdot l_0}{592^2}}, \quad (6)$$

kde  $l_0$  je vnitřní rozměr turbulence [m],  $C_n^2$  je strukturní parametr indexu lomu [ $m^{-2/3}$ ].  $K$  je definováno jako:

$$K = \frac{2 \cdot \pi}{\text{velikost turbulence}} \quad . \quad (7)$$

Pro posouzení souvztažností mezi kvalitou optické trasy (míry vlivu turbulencí) a návaznosti na parametry optického systému lze s výhodou využít Friedův parametr (Fried parameter), který lze pro tento případ (je uvažována vodorovnou trasu délky  $s$  a rovnoměrné rozložení turbulence o velikosti  $C_n^2$  podél trasy) popsat vztahem [3]:

$$r_0 = 6,626 C_N^2 \lambda^{-2} s \quad (8)$$

V praxi je velmi často k stanovení míry turbulence na konkrétní optickou soustavu využíván rovněž parametr FWHM (Full Width at Half Maximum) vyjadřující velikost rozptylového bodu pro dostatečně dlouhou expozici. Jde tedy o jakousi obdobu Rayleighova difrakčního limitu ( $1,22\lambda/D$ ) v podmínkách turbulence.

Vlivem turbulentního prostředí se rozlišovací mez při pozorování konkrétní optickou soustavou snižuje právě na hodnotu FWHM. Mezi FWHM (FWHM v rad) a  $r_0$  platí [5]:

$$FWHM = 0,98 \lambda / r_0. \quad (9)$$

Pro nulovou až velmi slabou turbulenci tak můžeme pro dlouhé expozice psát [5]:

$$\left(1,22 \frac{\lambda}{D}\right) \sim \left(0,98 \frac{\lambda}{r_0}\right). \quad (10)$$

Obdobně lze pro krátké expozice (tj. expozice, u nichž není pozorovatelný „smaz“ obrazu vlivem jeho pohybu vyvolaného turbulencí) [5]:

$$\left(1,22 \frac{\lambda}{D}\right) \sim \left(0,35 \frac{\lambda}{r_0}\right). \quad (11)$$

V další práci je uvažován pouze případ dlouhých turbulencí. Předpokládá se přitom, že vnitřní měřítko turbulence  $l_0$  bylo velikostně srovnatelné s průměrem objektivu dalekohledu (nebylo výrazně větší) a aby míra turbulence byla výrazně menší než pozorovaná vzdálenost. Pro účel práce bude postačovat vztah, který je odvozen ze spektra indexu lomu  $\Phi_n$ , pro dosažení ekvivalentní míry turbulentního vlivu při pozorování optickou soustavou daných parametrů na vzdálenost  $s$  [5]:

$$C_N^2 = \frac{0.95 \left(\frac{FWHM}{f}\right)^{(5/3)}}{2.91 k^{(1/3)} s}, \quad (12)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost [mm],  $k$  je vlnové číslo [ $m^{-1}$ ] a  $s$  je vzdálenost [m].

Vztahy 7, 8, 9, 10, 11, 12 již přímo umožňují analyzovat zobrazení optickou soustavou v turbulentním prostředí.

## 5. Analýza modelů turbulence

Cílem této práce je analyzovat závislosti jednotlivých modelů na jejich veličinách, dále pak analýza získaných dat a srovnání těchto modelů. Na základě srovnání dojde ke stanovení hraničních podmínek a vymezení jejich platnosti.

Ke srovnání bude přistupováno na základě strukturního parametru indexu lomu a dále na MTF daných modelů.

### 5.1. Empirický model

Pro výpočet strukturního parametru indexu lomu empirického modelu je použit výše zmíněný vzorec 5.

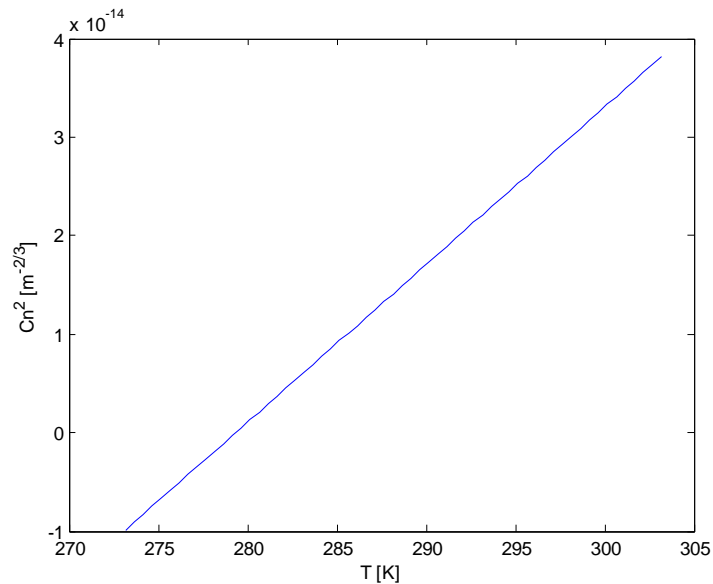
Jako normalizované hodnoty meteorologických podmínek je využíváno dat z tabulky 5 níže.

**Tabulka 5. Normalizované hodnoty**

$W = 1$	Předpokládaný čas měření tedy je 5 až 6 hodin po východu Slunce (poledne)
$T = 288,15 \text{ K}$	Standardní teplota podle ISA ( $15 \text{ }^\circ\text{C}$ )
$RH = 60 \%$	Relativní vlhkost vzduchu
$WS = 4,5 \text{ m/s}$	Rychlost větru

### 5.1.1. Závislost na teplotě T

Pro výpočet závislosti na teplotě byl použit interval hodnot teploty v rozmezí 0 °C až 30 °C.

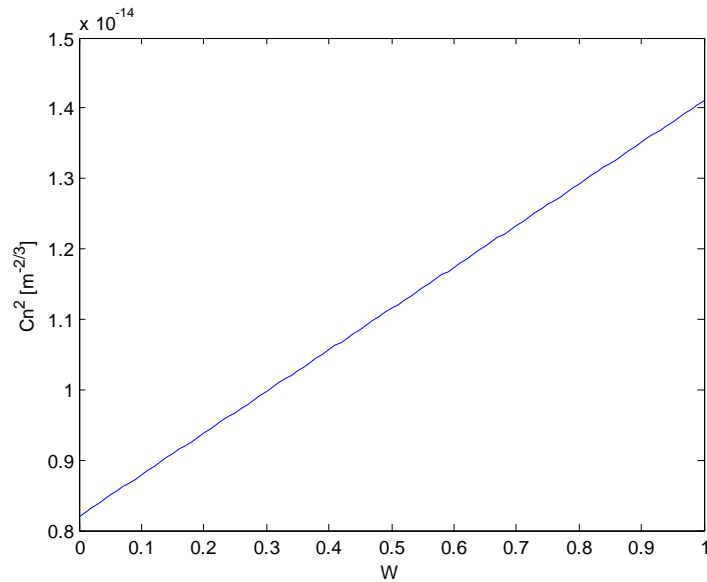


Obrázek 3. Průběh závislosti  $C_n^2 / T$

Z grafu je patrné, že závislost empirického modelu na teplotě je čistě lineární a s narůstající hodnotou se zvyšuje také strukturní parametr  $C_n^2$ . Hodnoty při teplotě pod 0 °C nejsou dostatečně průkazné kvůli provázanosti některých meteorologických parametrů (relativní vlhkost, teplota). V této práci je předpokládána omezená závislost jednotlivých veličin vůči sobě. To dostatečně přesně platí pro malý rozsah změn, popř. nedochází-li v prostředí k fázovým přechodům (např. pára -> voda popř. voda -> led).

### 5.1.2. Závislost na váhové funkci W

V dalším grafu je naznačen vývoj váhové funkce W v porovnání s mírou strukturního parametru  $C_n^2$ . Hodnoty W korespondují s tabulkou 3, proto se pohybuje v intervalu od 0,05 do 1.

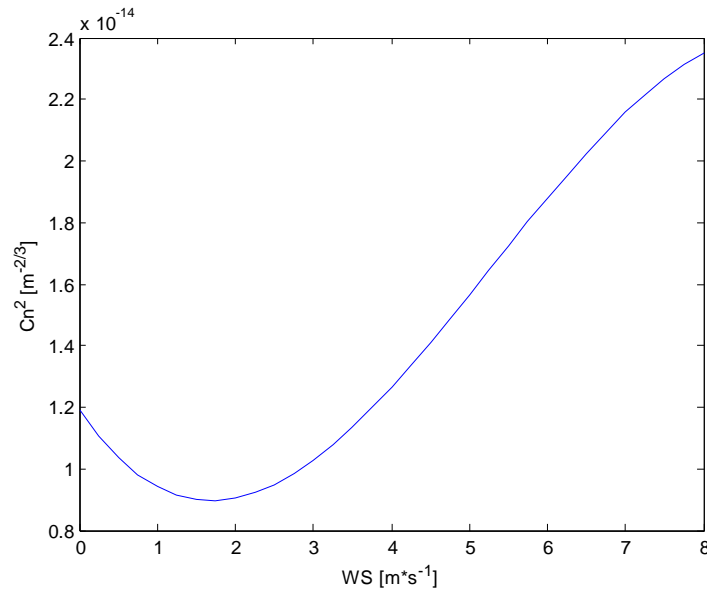


Obrázek 4. Průběh závislosti  $C_n^2 / W$

V tomto grafu je zřetelný strukturního parametru  $C_n^2$  v lineární závislosti na váhové funkci W. V tomto konkrétním případě se setkáváme s nepříliš významným ovlivněním výsledných hodnot  $C_n^2$ . Obecně to však neplatí.

### 5.1.3. Závislost na rychlosti větru WS

Model v kapitole 4.1 (vztah 5) byl dále podroben analýze vlivu rychlosti větru WS. Pro analýzu byly zvoleny hodnoty od 0 m/s do 8 m/s, aby více odpovídaly středoevropským podmínkám.



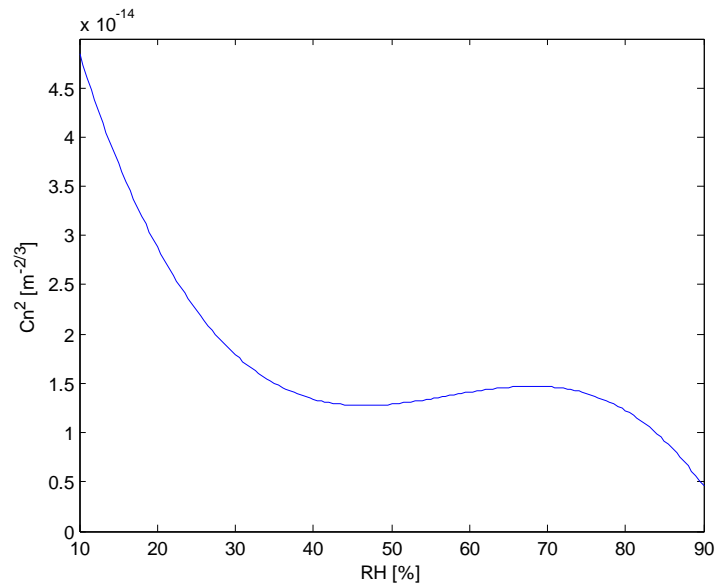
Obrázek 5. Průběh závislosti  $C_n^2$  / WS

Tento graf má pro změnu kvadratický průběh, který velmi dobře vystihuje různorodost atmosféry. Pro malou rychlost větru (cca do 1,8-2 m/s) vítr snižuje rozvoj turbulence (dochází k promíchávání nehomogenních vrstev vzduchu). V tomto případě se projevuje zejména termická turbulence. Pro vyšší rychlost větru začíná významnější roli hrát geografické uspořádání terénu (jeho reliéf, terénní překážky,...). Je patrné, že čím větší je rychlost větru, tím také narůstá velikost strukturního parametru  $C_n^2$ .



### 5.1.4. Závislost na relativní vlhkosti RH

Poslední analýzou průběhů empirického modelu je závislost na relativní vlhkosti. Pro účel této práce byl určen rozsah od 10 % do 90 %.



**Obrázek 6. Průběh závislosti  $C_n^2$  / RH**

Na grafu je výrazný průběh, který lze v oblasti od 35 % do 65 % považovat za poměrně stabilní. Ve středoevropském regionu (relativní vlhkost vzduchu je nejčastěji právě v tomto intervalu) lze tedy považovat s jistým omezením vliv RH za konstantní.

### 5.1.5. Dílčí závěr

Z výše zmíněných grafů lze konstatovat, že mezi hlavní činitele mající výrazný vliv na velikost strukturního parametru  $C_n^2$  patří relativní vlhkost RH a teplota T.

## 5.2. Analýza vlivu turbulence na kvalitu obrazu

Mezi další parametr, na jehož základě budou modely porovnány je koeficient MCFA popsáný výše. Jelikož je určení MTF poměrně závislé na přístrojovém vybavení, byl autorem empirického modelu vytvořen vztah počítající MCFA z dostupných meteorologických veličin [5]:

$$MCFA = A_1 \cdot T^3 + A_2 \cdot T + B_1 \cdot SF^3 + B_2 \cdot SF^2 + B_3 \cdot SF + C_1 \cdot RH^2 + C_2 \cdot RH + D \cdot WS + E \quad (13)$$

kde T je teplota [K], SF je hustota slunečního záření dopadající na horizontální rovinu [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ], RH relativní vlhkost vzduchu [%] a WS rychlost větru [m/s]. Dále pak vytvořeny regresní koeficienty odpovídající středoevropským podmínkám.[5]

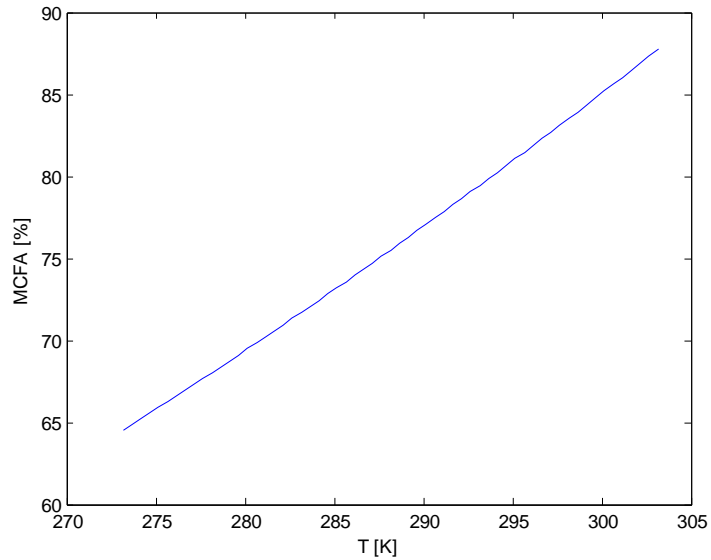
Tabulka 6. Regresní koeficienty MCFA [5]

Koeficient	Hodnota
A21	$3,15 \cdot 10^{-6}$
A22	$-1,02 \cdot 10^{-2}$
B21	$3,97 \cdot 10^{-1}$
B22	$-2,46 \cdot 10^{-1}$
B23	$2,05 \cdot 10^{-1}$
C12	$2,19 \cdot 10^{-5}$
C22	$-3,65 \cdot 10^{-3}$
D2	$2,51 \cdot 10^{-3}$
E2	3,09

Hodnotu SF považujeme pro tuto analýzu za konstantní na  $0,6 \text{ kW}/\text{m}^2$ .

### 5.2.1. Závislost koeficientu MCFA na teplotě T

Následující graf znázorňuje vývoj koeficientu MCFA vzhledem k teplotě.

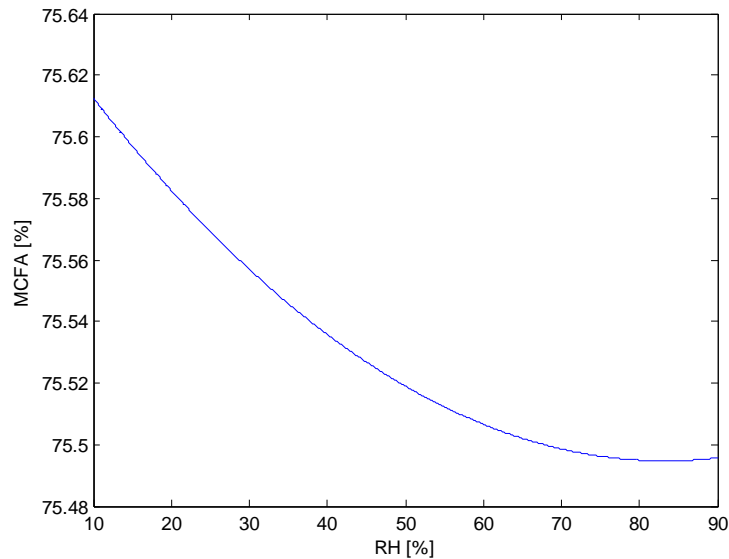


**Obrázek 7. Průběh závislosti MCFA / T**

Graf ukazuje, že vyšších hodnot MCFA (tj. i vyšší kvality obrazu) lze očekávat při vyšších teplotách. To potvrzují praktické zkušenosti z pozorování na velké vzdálenosti, kdy např. astronomové mohou během letních měsíců využít vyšší zvětšení mnohem častěji než v zimě, kdy jsou vrstvy teplého a studeného vzduchu značně labilní.

### 5.2.2. Závislost koeficientu MCFA na relativní vlhkosti RH

Následující graf vyjadřuje závislost mezi relativní vlhkostí a koeficientem MCFA.

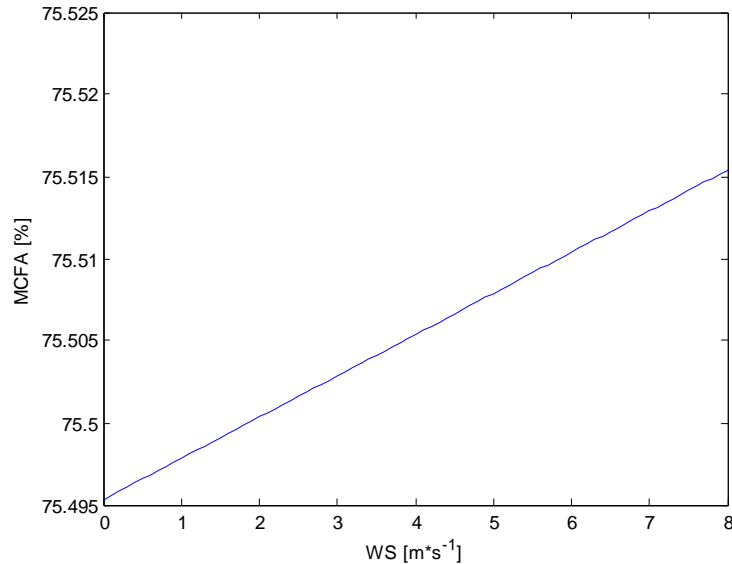


**Obrázek 8. Průběh závislosti MCFA / RH**

Z grafu je patrné, že koeficient má snižující se tendenci vzhledem k relativní vlhkosti. Jelikož se ale hodnota MCFA mění pouze v rámci 2 desetín, vliv relativní vlhkosti v poměru s koeficientem MCFA není tak významný. To odpovídá předpokladu z kapitoly 5.1.4.

### 5.2.3. Závislost koeficientu MCFA na rychlosti větru WS

Další graf je zaměřen na vazbu mezi rychlostí větru a kvalitou obrazu.



Obrázek 9. Průběh závislosti MCFA / WS

Z průběhu patrného na obrázku je zřejmý velmi malý vliv na koeficient MCFA na základě změny rychlosti větru WS. Křivka má stoupající tendenci.

### 5.2.4. Dílčí závěr

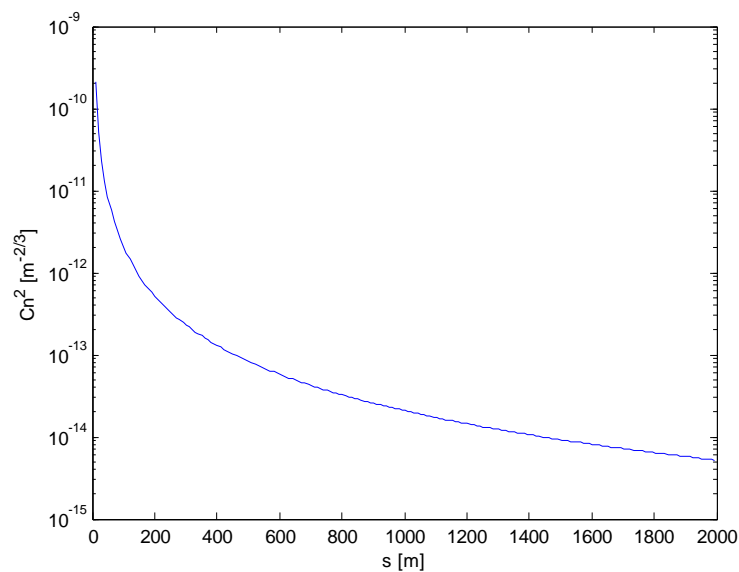
Po analýze předchozích tří grafů lze konstatovat, že největší váha na hodnotě MCFA je přisuzována teplotě. Teplotu vzduchu, resp. ohřívání a ochlazování vzduchu od okolního terénu a vzduchu spolu s promícháváním jednotlivých vrstev atmosféry, lze tak považovat za hlavní faktor ovlivňující kvalitu obrazu.

### 5.3. Referenční model turbulence (Tatarského)

Pro analýzu vlivu parametrů objektivu na velikost strukturního parametru, byly pro účel práce vybrány 3 vzorové případy optických soustav. Ke srovnání optických soustav je použit vztah 8, který umožňuje stanovit ekvivalentní míru turbulence a vzdálenosti s ohledem na parametry soustavy. Z následujících grafů je tak možné stanovit vzdálenosti, při kterých je obraz shodně degradován v různých podmínkách turbulence. V neturbulentním prostředí je předpokládána kvalita obrazu MCFA=1.

#### 5.3.1. Lidské oko

První reálnou soustavou je oko, pro které byla normovaná velikost ohniska 16 milimetrů a velikost apertury 8 milimetrů. Vývoj strukturního parametru se zvyšující se vzdáleností předmětu od obrazu je vyobrazen na následujícím grafu.

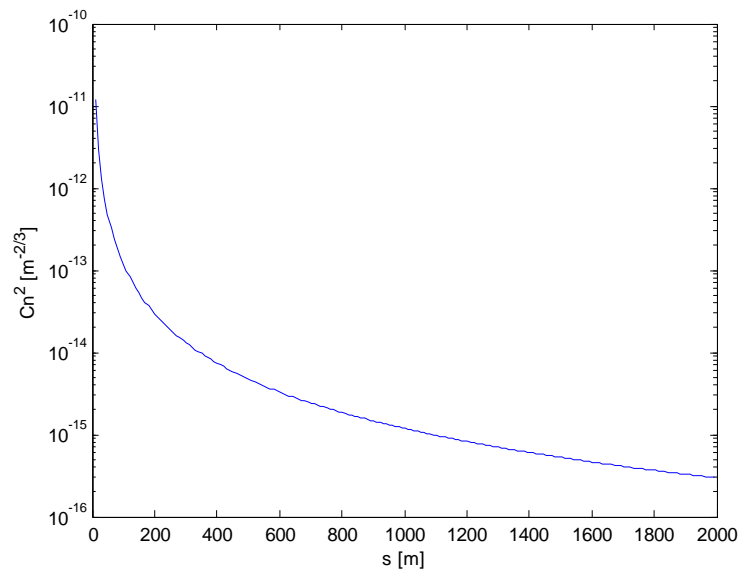


Obrázek 10. Průběh závislosti  $C_n^2 / s$

### 5.3.2. Binokulár

Další reálná soustava, vybraná k analýze vlivu parametrů objektivu na  $C_n^2$ , je binokulární dalekohled se střechovými hranoly v systému Schmidt-Pechan a zvětšením 8x.

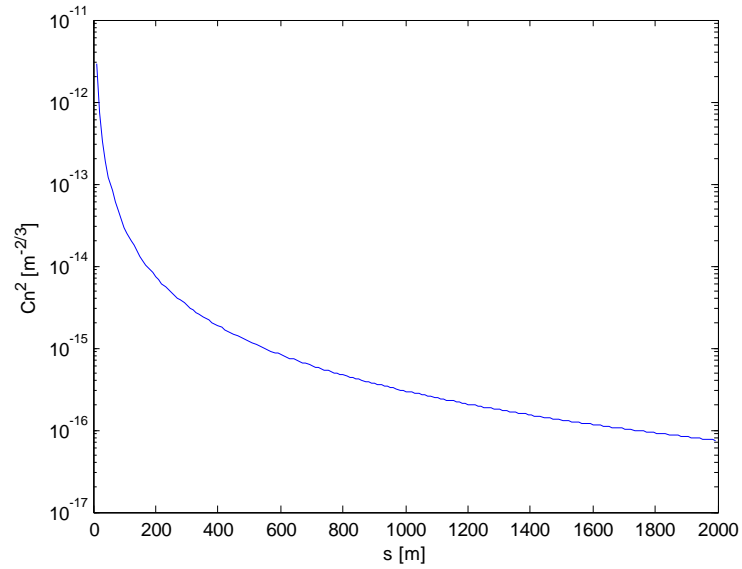
Objektiv má ohniskovou vzdálenost 400 milimetrů a průměr 56 milimetrů.



Obrázek 11. Průběh závislosti  $C_n^2 / s$

### 5.3.3. Astronomický dalekohled

Poslední reálnou soustavou je astronomický dalekohled. Je typu Newton (reflektor) s ohniskem objektivu 1200 milimetrů a aperturou 254 milimetrů. Zvětšení tohoto dalekohledu je 43x.

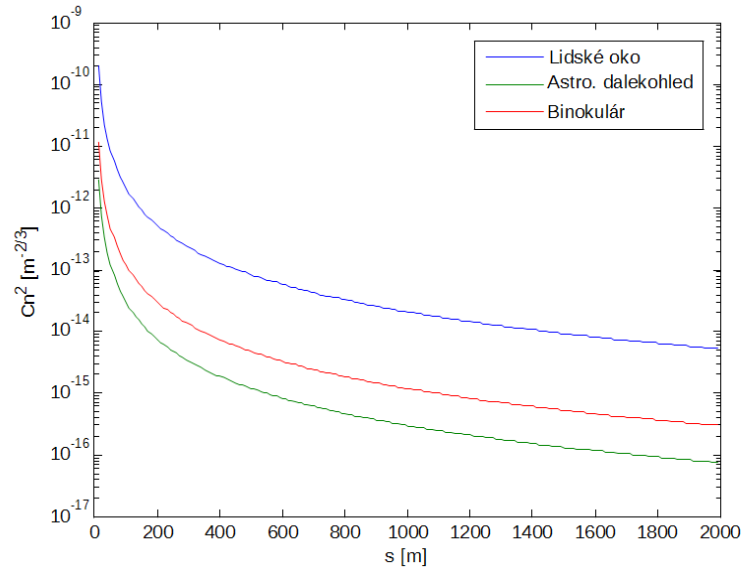


Obrázek 12. Průběh závislosti  $C_n^2 / s$



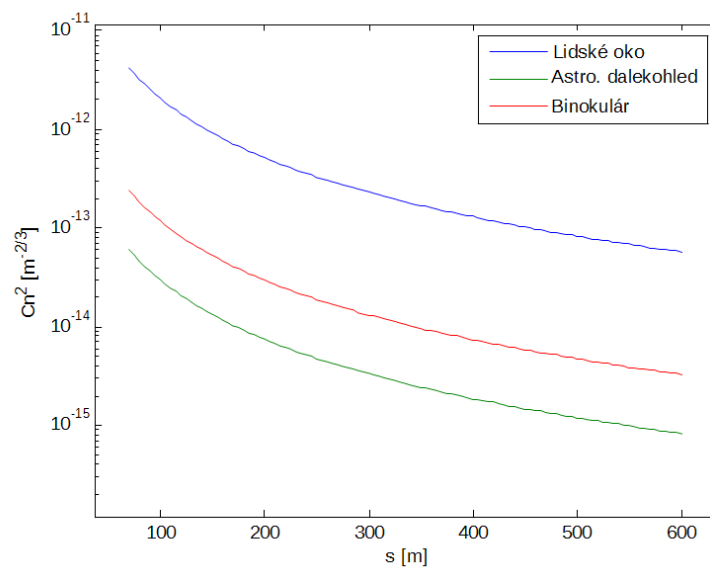
### 5.3.4. Dílčí závěr

Pro názornou ukázkou srovnání jednotlivých reálných soustav byl vypracován graf.



Obrázek 13. Průběh závislosti  $C_n^2 / s$

Na tomto grafu je patrné, že všechny analyzované soustavy prodělávají největší změny pro vzdálenosti 50 až 600 metrů. Omezení intervalu pouze na tento úsek vyobrazuje další graf.

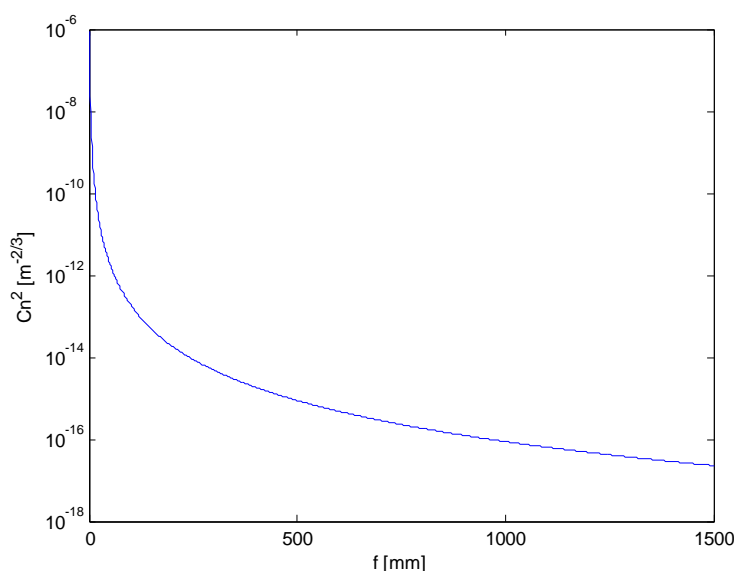


Obrázek 14. Průběh závislosti  $C_n^2 / s$

Srovnáním průběhů na obrázcích 14 a 15 je patrné, že optická soustava s větší vstupní aperturou je citlivější na hodnotu turbulence. Tzn., že pro dosažení stejně kvalitního obrazu (viz kapitola 3.3) vyžaduje nižší hodnotu  $C_n^2$ .

Mimo průměr vstupní apertury objektivu má vliv na kvalitu výsledného obrazu i jeho ohnisková vzdálenost (pro různé ohniskové vzdálenosti je různá velikost „smazu“ obrazu).

Na obrázku 16 níže je analyzována situace pro případ objektivu s konstantní aperturou 28 milimetrů a proměnnou ohniskovou vzdáleností. Jde o zobrazení změny  $C_n^2$  v závislosti na ohnisku objektivu pozorující předmět vzdálený 400 metrů.



**Obrázek 15. Průběh závislosti  $C_n^2 / f$**

Lze říci, že pro optické soustavy o menším průměru objektivu a nižší světelnosti je získáván obraz kontrastnější, kvalitnější (vyšší hodnota MCFA), oproti soustavě s větším průměrem objektivu. Případné fluktuace se u soustavy s menším průměrem objektivu projeví zřetelnější deformací pozorovaného obrazu (zvláště u krátkých expozic) oproti méně deformovanému, ale více neostrému obrazu u větších průměru objektivu.

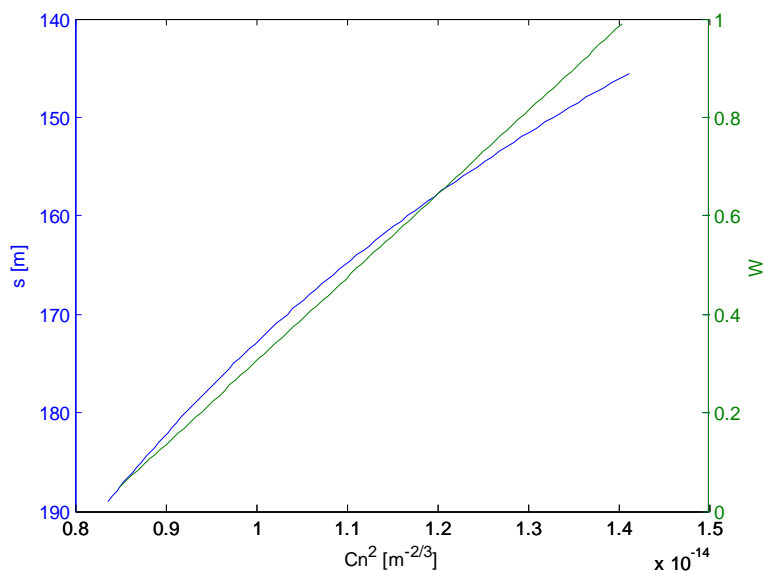
## 6. Porovnání

Dalším cílem této práce je srovnání výše zmíněných atmosférických modelů turbulence při středoevropských podmínkách. Jejich vzájemná komparace je založena na analýze spočtených dat a jejich grafického zpracování. V obou průbězích jsou na základě jejich rozboru (viz. kapitola 5) vybrány stěžejní parametry a provedeno jejich vzájemné srovnání. Určené nomogramy pak umožňují efektivní určení hodnot porovnávaných veličin tak, že jejich vliv je ekvivalentní (tj. způsobí stejnou míru degradace obrazu).

V prvním kroku srovnání jsou analyzovány podobnostní znaky v jednotlivých průbězích obou modelů. Za předpokladu shodné/podobné míry ovlivnění optického signálu turbulencí lze stanovit ekvivalentní rozsahy porovnávaných vstupních parametrů mezi srovnávanými modely turbulence.

Dle ovlivnění stejným či takřka totožným turbulentním vlivem lze určit podobnost mezi modely.

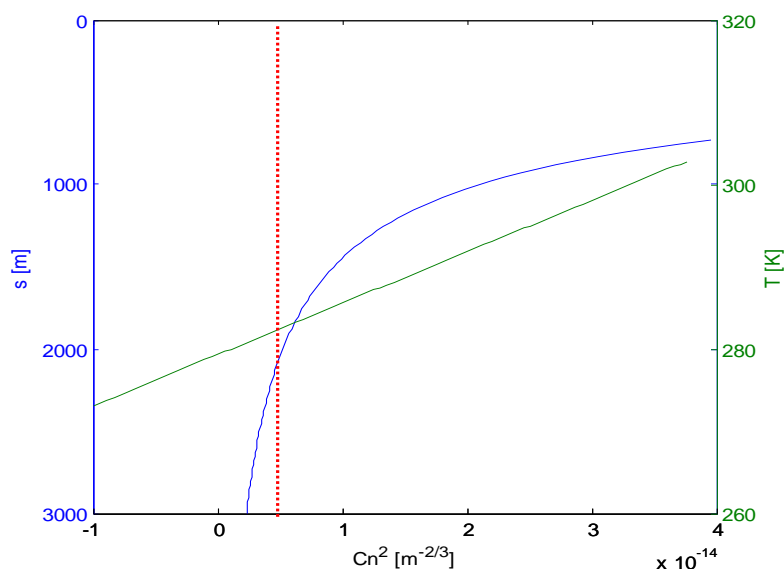
První případ na obrázku 17 popisuje vývoj strukturního parametru  $C_n^2$  empirického modelu v závislosti na váhové funkci  $W$  v porovnání s vymezeným úsekem průběhu křivky klasického binokuláru (kapitola 5.3.2.).



Obrázek 16. Nomogram závislosti  $C_n^2 / W + s$

Z obrázku je patrný shodný trend  $C_n^2$  obou modelů. Křivky jsou dobře sesouhlasené a lze tedy říct, že vliv váhové funkce empirického modelu je ekvivalentní změně vzdálenosti druhého modelu (vyšší hodnota váhové funkce má na výsledný obraz obdobný vliv jako vyšší vzdálenost). Např. za námi zvolených podmínek (při teplotě 15 °C, mírném větru o rychlosti 4,5 m/s a vlhkosti 60 %) má vliv denní doby na míru turbulence obdobný vliv jako pozorování obrazu vzdáleného 145 až 190 metrů.

Další porovnání na obrázku 18 je mezi křivkou závislosti teploty empirického modelu a křivkou druhého modelu při pozorování neozbrojeným okem.

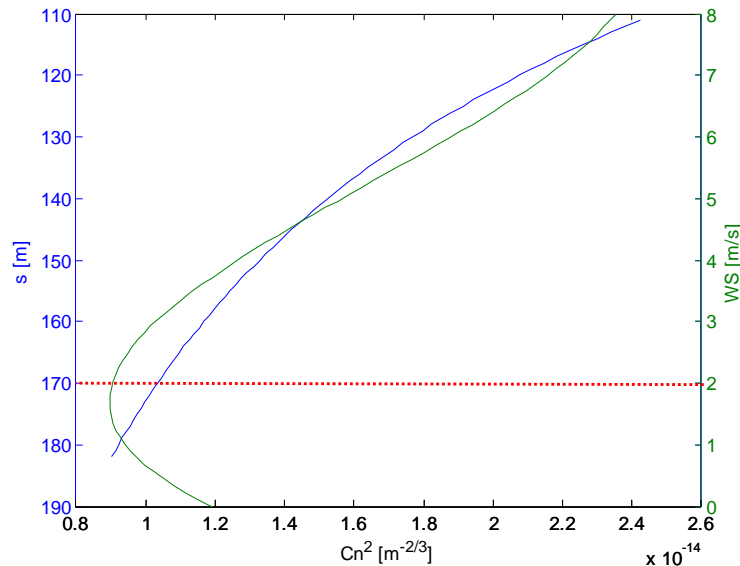


**Obrázek 17. Nomogram závislosti  $C_n^2 / T + s$**

Z nomogramu je patrný podobný vývoj hodnot  $C_n^2$  obou modelů. Protože při nízkých teplotách dochází k fázovým změnám vodních par (na obrázku 18 je červeně znázorněn rosný bod pro uvažované podmínky), nelze situace s nízkými teplotami  $T$  zahrnout do výpočtů.

Pro konkrétní případ, pro nějž byl výpočet proveden (pozorování v poledne při rychlosti větru 4,5 m/s a při vlhkosti 60%), lze říci, že výsledná degradace optického signálu vlivem teploty (a jí odpovídající  $C_n^2$ ) je v tomto případě srovnatelná s degradací obrazu při pozorování pouhým okem na vzdálenost 2250 metrů.

Následující nomogram na obrázku 19 představuje závislost rychlosti větru na  $C_n^2$ , načež druhá křivka vyobrazuje závislost mezi  $C_n^2$  a vzdáleností obrazu pozorovaného binokulárem.

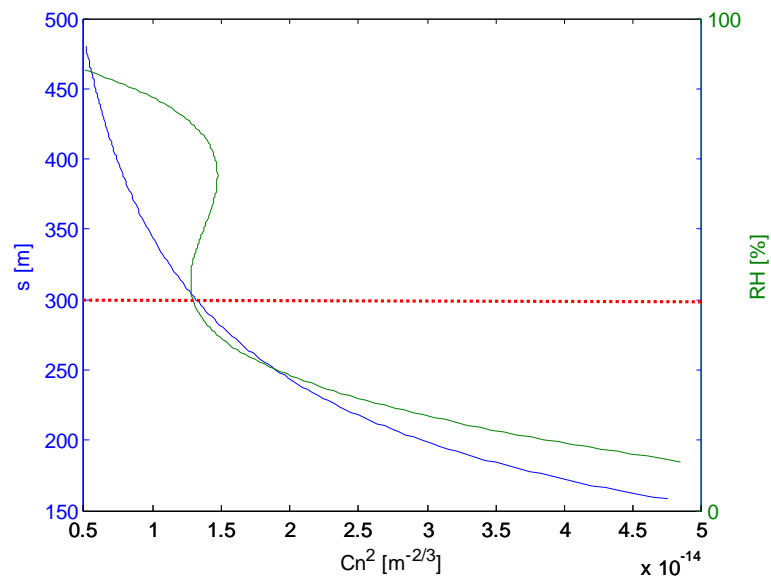


**Obrázek 18. Nomogram závislosti  $C_n^2 / WS + s$**

Pro horní část průběhu mají nomogramy obdobný průběh (odchylka je velmi malá). Zelený průběh (experimentální model) popisující rychlost větru více odpovídá skutečnosti oproti teoretickému modelu. V intervalu 0 až 2 m/s (bezvětří a velmi slabý vítr) je výrazný vliv termické turbulence a nerovnoměrného ohřívání/ochlazování jednotlivých vrstev vzduchu. Při zvyšování rychlosti větru dochází k postupnému promíchávání vzduchu a tím i snížení míry turbulence. Při dalším růstu jsou proudnice vzduchu více ovlivňovány terénními nerovnostmi a překážkami, které dopomáhají vzniku nehomogenit ve vzduchu a tím i k opětovnému stoupání míry turbulence.

Za podmínek uvedených v tabulce 4 lze odvodit pro uvažovanou modelovou situaci vzájemný vliv na posuzované veličiny. Interval rychlosti větru od 0 do 8 metrů za sekundu koresponduje se vzdáleností předmětu od pozorovatele od 111 do 182 metrů (je-li objekt pozorován binokulárem z podkapitoly 5.3.2.).

Případ na obrázku 20 poukazuje na diagramy závislosti relativní vlhkosti RH na  $C_n^2$  a vzdálenosti předmětu od pozorovatele při zobrazování astronomickým dalekohledem.



**Obrázek 19. Nomogram závislosti  $C_n^2$  / RH + s**

Nomogram na obrázku výše znázorňuje podobné vývoje hodnot strukturního parametru  $C_n^2$  do hodnoty RH cca 40 %. Pro hodnoty RH 40% až 60% je vliv změn relativní vlhkosti vzduchu minimální. To odpovídá zjištěním uvedeným v kapitole 5.2.2. Při vyšších hodnotách relativní vlhkosti dochází ve vzduchu k fázovým přechodům kapiček vody, které, společně s průměrováním jiných vlivů, opět přispívají k vychýlení křivky od teoretického modelu.

V konkrétním případě, tj. za podmínek v tabulce 4, má relativní vlhkost obdobný vliv na strukturní parametr  $C_n^2$  jako vzdálenost 330 metrů předmětu od obrazu. Pouze v případě je-li užíváno astronomického dalekohledu dle parametrů v podkapitole 5.3.3.

## Závěr

V práci byly analyzovány modely popisující vývoj turbulence v atmosféře. Určené modely byly posléze analyzovány na základě závislosti na meteorologických veličinách.

Bylo zjištěno, že empirický model, použitý v této práci, dobře postihuje vývoj strukturního parametru v závislosti na prostředí. A to především na teplotě, relativní vlhkosti a rychlosti větru.

Dalším určeným modelem k analýze byl Tatarského (Tatarski) model, jenž byl zvolen pro snadnou možnost simulovat v tomto modelu ekvivalentní vliv turbulence a vzdálenosti. K řešení byly vybrány 3 příklady reálných optických soustav o určitých parametrech. Ze zpracovaných grafů lze konstatovat, že tento model velmi dobře popisuje závislost mezi výší strukturního parametru, parametry objektivu a výsledné kvality obrazu. Mezi parametry objektivu, které jsou v této práci zahrnuty, patří: průměr objektivu, jeho ohnisková vzdálenost a vzdálenost předmětu od obrazu.

V poslední kapitole této práce byla zjišťována míra shody mezi oběma modely. Průběh strukturního parametru  $C_n^2$  stanovený empirickým modelem velmi dobře souhlasí s průběhem strukturního parametru  $C_n^2$  stanovený Tatarského modelem. Podobné průběhy umožnily srovnání v rámci vybraných parametrů obou modelů. Následně pak díky ekvivalenci stanovit míru jejich podobnosti. Jednotlivé výsledky jsou shrnuty v dílčích závěrech.

Pro ověření správnosti těchto tvrzení by bylo třeba podrobit výsledky experimentálnímu ověření. To už však není cílem této práce.

## Citovaná literatura

- [1] Atmosféra : is.muni.cz [online] [cit. 2016-02-20]. Dostupné z:  
[https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz\\_geogr/web/pages/02-atmosfera.html](https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/02-atmosfera.html)
- [2] BEDNÁŘ, Jan. *Fyzika mezní vrstvy atmosféry: Vysokoškol. příručka pro stud. matem.-fyz. a přírodověd. fak.* Vyd. 1. Praha, 1985.
- [3] FISCHER, Pavel et al. *Optical devices I.* Vyd. 1. Brno: Univerzita obrany, 2008. 80 s. ISBN 978-80-7231-539-0.
- [4] KELLER, Ladislav et al. *Učebnice pilota 2008: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost.* Vyd. 1. Cheb: Svět křídel, 2008. 708 s. ISBN 978-80-86808-46-8.
- [5] ŘEHOŘ, Zdeněk. *Vlivy atmosféry na měření pasivním optoelektronickým systémem,* výzkumná zpráva pro projekt MPO ČR FD-K3/099, 2004, Brno.
- [6] Atmospheric transmittance. [graf] [online] [cit. 2016-03-07]. Dostupné z:  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric.transmittance.IR.jpg>
- [7] URUBA, Václav. *Turbulence* ČVUT Praha, 2009 [online] [cit. 2016-02-26].  
Dostupné z: [http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/Aero/Turbulence\\_45.pdf](http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/Aero/Turbulence_45.pdf)
- [8] Types of flows [obrázek] [online] [cit. 2016-03-07]. Dostupné z:  
<https://esfsciencenew.wordpress.com/2012/10/26/turbulent-flow-and-viscosity/>
- [9] Reynoldsovo číslo: fyzika.jreichl.com [online][cit. 2016-03-08]. Dostupné z:  
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/555-reynoldsovo-cislo>
- [10] Viskozita : cs.wikipedia.org [online][cit. 2016-04-01]. Dostupné z:  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Viskozita>
- [11] BLEJCHAŘ, Tomáš. *Turbulence – modelování proudění – CFX* Vyd. 1. Ostrava: VŠB, 2010 [online][cit. 2016-03-08]. Dostupné z:  
[http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence\\_ESF\\_v4.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence_ESF_v4.pdf)
- [12] ANDREWS, Larry C.; PHILLIPS, Donald L. *Laser beam propagation through random media* Vyd. 1, SPIE 1998 808s. ISBN 9780819459480



- [13] Optical transfer function : cs.wikipedia.org [online][cit. 2016-03-05]. Dostupné z:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_transfer\\_function#Factors\\_affecting\\_MTF\\_in\\_t  
ypical\\_camera\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_transfer_function#Factors_affecting_MTF_in_typical_camera_systems)
- [14] Modelování turbulentní atmosféry a snižování fluktuací přijímaného signálu  
vícesvazkovým provozem: elektrorevue.cz [online][cit. 2016-04-01]. Dostupné z:  
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02067/index.html>
- [15] Astronomical seeing: cs.wikipedia.org [online][cit. 2016-03-01]. Dostupné z:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Astronomical\\_seeing](https://en.wikipedia.org/wiki/Astronomical_seeing)

## Seznam obrázků

Obrázek 1. Propustnost atmosféry [6]	12
Obrázek 2. Druhy proudění [8]	14
Obrázek 3. Průběh závislosti $Cn^2 / T$	30
Obrázek 4. Průběh závislosti $Cn^2 / W$	31
Obrázek 5. Průběh závislosti $Cn^2 / WS$	32
Obrázek 6. Průběh závislosti $Cn^2 / RH$	33
Obrázek 7. Průběh závislosti MCFA / T	35
Obrázek 8. Průběh závislosti MCFA / RH	36
Obrázek 9. Průběh závislosti MCFA / WS	37
Obrázek 10. Průběh závislosti $Cn^2 / s$	38
Obrázek 11. Průběh závislosti $Cn^2 / s$	39
Obrázek 12. Průběh závislosti $Cn^2 / s$	40
Obrázek 13. Průběh závislosti $Cn^2 / s$	41
Obrázek 14. Průběh závislosti $Cn^2 / s$	41
Obrázek 15. Průběh závislosti $Cn^2 / f$	42
Obrázek 16. Nomogram závislosti $Cn^2 / W + s$	43
Obrázek 17. Nomogram závislosti $Cn^2 / T + s$	44
Obrázek 18. Nomogram závislosti $Cn^2 / WS + s$	45
Obrázek 19. Nomogram závislosti $Cn^2 / RH + s$	46

## Seznam tabulek

Tabulka 1. ISA [4]	11
Tabulka 2. Míra turbulence - $C_n^2$ [14]	21
Tabulka 3. Váhová funkce W [5]	25
Tabulka 4. Regresní koeficienty [5]	26
Tabulka 5. Normalizované hodnoty	29
Tabulka 6. Regresní koeficienty MCFA [5]	34