

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra experimentální fyziky

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

## **Fyzikální děje v atmosféře**



|                         |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| Autor:                  | Šárka Bártová               |
| Studijní program:       | B1701 Fyzika                |
| Studijní obor:          | Fyzika - Matematika         |
| Forma studia:           | Prezenční                   |
| Vedoucí práce:          | RNDr. Renata Holubová, CSc. |
| Termín odevzdání práce: | duben 2014                  |

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Renaty Holubové, CSc., a že jsem použila zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci .....

.....

## **Poděkování**

Děkuji paní RNDr. Renatě Holubové, CSc., vedoucí mé práce, za cenné rady a připomínky, které mi v průběhu psaní této bakalářské práce poskytla.

## Bibliografická identifikace:

|                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jméno a příjmení autora | Šárka Bártová                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Název práce             | Fyzikální jevy v atmosféře                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Typ práce               | Bakalářská                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Pracoviště              | Katedra experimentální fyziky                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Vedoucí práce           | RNDr. Renata Holubová, CSc.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Rok obhajoby práce      | 2014                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Abstrakt                | <p>Práce popisuje nejvýznamnější fyzikální děje probíhající v atmosféře. Součástí práce je i informativní dotazníkové šetření mapující stav vědomostí středoškolských žáků o dané problematice s vyhodnocením.</p> <p>V textu jsou uvedeny základní vlastnosti zemské atmosféry, její složení, členění, atmosférický tlak. Dále jsou popsány a zdůrazněny fyzikální podstaty konkrétních jevů v ní probíhajících – proudění vzduchu, jet streamu, tropických cyklon a tornád.</p> |
| Klíčová slova           | Atmosféra Země, atmosférický tlak, proudění vzduchu, vítr, jet stream, tropická cyklona, tornádo, dotazníkové šetření                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Počet stran             | 71                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Počet příloh            | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Jazyk                   | Český                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

## **Bibliographical identification:**

|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Autor's first name and surname | Šárka Bártová                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Title                          | Physical processes in the atmosphere                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Type of thesis                 | Bachelor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Department                     | Department of Experimental Physics                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Supervisor                     | RNDr. Renata Holubová, CSc.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| The year of presentation       | 2014                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Abstract                       | <p>This work describes the most important physical processes in the atmosphere. The work also includes an informative survey mapping the state of knowledge of secondary school pupils about the issue and the evaluation. The text describes the basic features of the earth's atmosphere, composition, classification, atmospheric pressure. There is also described and emphasized the physical nature of specific phenomena, which proceed there - the flow, jet streams, tropical cyclones and tornadoes.</p> |
| Keywords                       | <p>The earth's atmosphere, atmospheric pressure, air flow, wind, jet stream, tropical cyclones, tornadoes, survey</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Number of pages                | 71                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Number of appendices           | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Language                       | Czech                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

# OBSAH

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ÚVOD .....                                                                                      | 7  |
| 1. PRŮZKUM ZNALOSTÍ ŽÁKŮ STŘEDNÍCH ŠKOL O ZEMSKÉ<br>ATMOSFÉŘE A DĚJÍCH V NÍ PROBÍHAJÍCÍCH ..... | 8  |
| 1.1 Vyhodnocení jednotlivých otázek dotazníkového šetření .....                                 | 8  |
| 1.2 Celkové vyhodnocení dotazníkového šetření .....                                             | 19 |
| 2. ATMOSFÉRA ZEMĚ .....                                                                         | 21 |
| 2.1 Složení zemské atmosféry .....                                                              | 21 |
| 2.2 Vertikální členění atmosféry .....                                                          | 23 |
| 2.2.1 Členění podle průběhu teploty vzduchu s nadmořskou výškou .....                           | 23 |
| 2.2.2 Členění podle chemického složení vzduchu .....                                            | 25 |
| 2.2.3 Členění podle koncentrace atmosférických iontů a volných elektronů .....                  | 26 |
| 2.2.4 Členění podle ovlivnění spodních vrstev atmosféry zemským povrchem .....                  | 27 |
| 3. ATMOSFÉRICKÝ TLAK .....                                                                      | 29 |
| 4. PROUDĚNÍ VZDUCHU JAKO FYZIKÁLNÍ JEV .....                                                    | 33 |
| 4.1 Základní typy proudění .....                                                                | 33 |
| 4.2 Vítr .....                                                                                  | 38 |
| 4.2.1 Příčiny pohybu vzduchu .....                                                              | 38 |
| 4.2.2 Beaufortova stupnice .....                                                                | 40 |
| 5. TRYSKOVÉ PROUDĚNÍ - JET STREAM .....                                                         | 42 |
| 5.1 Vznik jet streamu .....                                                                     | 42 |
| 5.2 Druhy jet streamu .....                                                                     | 42 |
| 5.3 Důsledky a využití jet streamu .....                                                        | 44 |
| 6. TROPICKÉ CYKLONY .....                                                                       | 47 |
| 6.1 Podmínky pro vznik .....                                                                    | 47 |
| 6.2 Vznik tropického cyklonu .....                                                              | 48 |
| 6.3 Stavba tropické cyklony .....                                                               | 50 |
| 6.4 Výskyt tropických cyklón .....                                                              | 51 |
| 6.5 Saffir-Simpsonova stupnice .....                                                            | 54 |
| 7. TORNÁDA .....                                                                                | 56 |
| 7.1 Podmínky vzniku .....                                                                       | 56 |
| 7.2 Vznik tornáda .....                                                                         | 57 |
| 7.3 Vzhled tornáda .....                                                                        | 58 |
| 7.4 Výskyt tornád .....                                                                         | 59 |
| 7.5 Fujitova stupnice .....                                                                     | 62 |
| ZÁVĚR .....                                                                                     | 64 |
| SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ .....                                                                  | 65 |
| PŘÍLOHA 1 .....                                                                                 | 70 |

# ÚVOD

Děje v zemské atmosféře se více či méně dotýkají každého člověka, neboť v ní prožije celý život. Učivo popisující plynný obal Země a rozebírající děje v něm, je na středních školách po částech rozmístěno především do fyziky, zeměpisu a chemie. Cílem této práce je základní vlastnosti a jevy v atmosféře sjednotit a zdůraznit fyzikální podstatu uvedených poznatků.

V rámci bakalářské práce bylo provedeno dotazníkové šetření, jehož cílem bylo zjistit stav informovanosti žáků středních škol o základních pojmech týkajících se zemské atmosféry, jejích vlastnostech a dějích, které v ní probíhají. V návaznosti na dotazníkové šetření je formulován hlavní cíl bakalářské práce, a to sestavit přehledný studijní text, použitelný například ve fyzikálním semináři, či pro jakékoliv jiné zájemce jako doplněk středoškolského učiva. Tento text se proto bude zabývat uplatněním fyziky v atmosférických jevech, bude popisovat jejich vznik, zdůrazní a vysvětlí podstatu fyzikálních jevů, které se v nich uplatňují.

# **1. PRŮZKUM ZNALOSTÍ ŽÁKŮ STŘEDNÍCH ŠKOL O ZEMSKÉ ATMOSFÉŘE A DĚJÍCH V NÍ PROBÍHAJÍCÍCH**

Cílem tohoto průzkumu je zjistit, jaké znalosti mají žáci středních škol o vlastnostech zemské atmosféry a dějích v ní probíhajících, o kterých bude tato bakalářská práce pojednávat.

Toto šetření bylo provedeno formou dotazníku. Při sestavování dotazníku jsem vycházela z pravidel a požadavků na konstrukci dotazníku, kterou uvádí M. Chráska ([8] s. 169-170) a zdroj [22]. Cílem bylo tedy sestavit dotazník tak, aby jednotlivé položky v dotazníku byly všem respondentům jasné a srozumitelné, aby byly formulovány jednoznačně a co možná nejstručněji. Dále jsem se snažila dodržet uváděná pravidla, aby dotazník nebyl příliš obsáhlý, byl přehledný a aby obsahoval jasné pokyny k vyplňování. Sestavila jsem tak dotazník s deseti uzavřenými otázkami, zjišťujícími znalosti a vědomosti, s výběrem právě jedné správné odpovědi ze čtyř uvedených možností (viz. Příloha 1). Středoškoláci vyplňující dotazník byli také seznámeni s možností neodpovídat na otázky, se kterými se nikdy nesetkali – ve škole ani mimo ni, a odpovědi tak netipovat.

Dotazník byl rozdán v papírové podobě k samostatnému vypracování v hodinách fyziky. Dotazník byl pro všechny respondenty anonymní (z osobních údajů bylo třeba vyplnit pouze typ školy a navštěvovaný ročník). Dotazník byl zadán do devíti tříd celkem 186 žákům z Gymnázia Šumperk, Gymnázia Hejčín v Olomouci, Slovanského gymnázia v Olomouci a Gymnázia Jana Pivečky ve Slavičíně. Konkrétně se jednalo o 62 žáků 2. ročníku, 89 žáků 3. ročníku a 35 žáků 4. ročníku.

## **1.1 Vyhodnocení jednotlivých otázek dotazníkového šetření**

Při analýze dat získaných dotazníkovým šetřením jsem postupovala podle interpretace výsledků třídění 1. stupně, kterou uvádí M. Chráska ([8] str. 178-179). Sestavila jsem dvě tabulky četností a získaná data prezentovala také graficky.



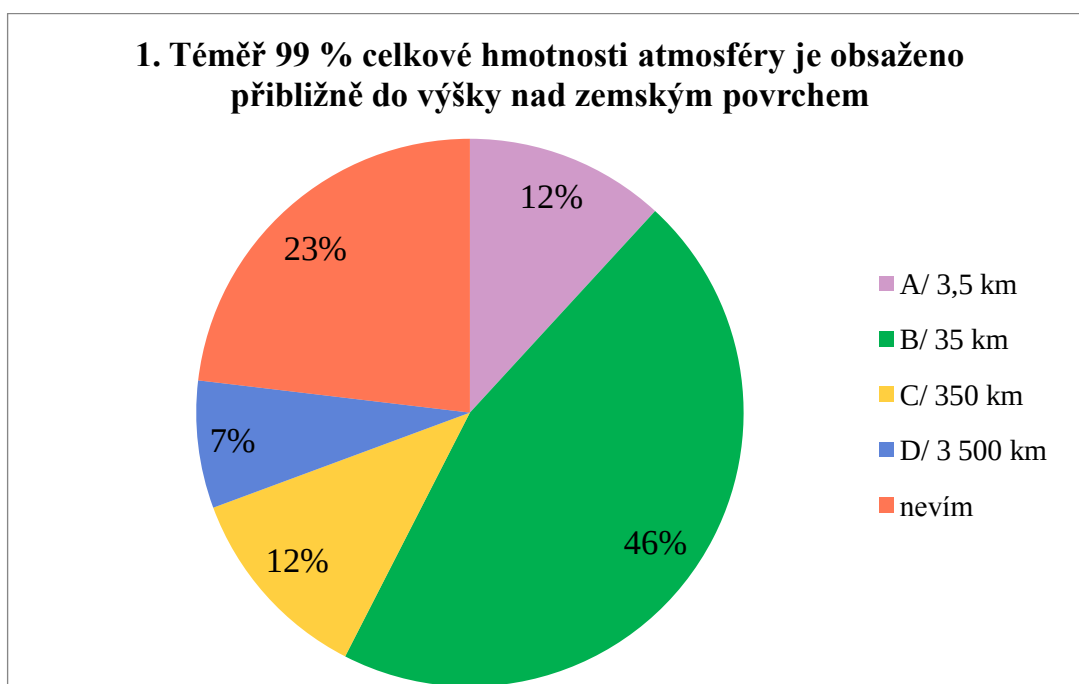
## 1. OTÁZKA

**Téměř 99 % celkové hmotnosti atmosféry je obsaženo přibližně do výšky nad zemským povrchem**

- A/ 3,5 km
- B/ 35 km**
- C/ 350 km
- D/ 3 500 km

**Tab. č. 1:** Četnost odpovědí na otázku č. 1.

| odpověď               | A    | B    | C    | D   | nevím |
|-----------------------|------|------|------|-----|-------|
| absolutní četnost     | 22   | 85   | 22   | 14  | 43    |
| relativní četnost [%] | 11,8 | 45,7 | 11,8 | 7,4 | 23,1  |



**Graf. č. 1:** Relativní četnost odpovědí na otázku č. 1.

Správnou odpovědí je varianta B/, tu zvolilo 46 % žáků. Možnost A/, stejně jako možnost C/, zvolilo 12 % dotázaných, odpověď D/ uvedlo 7 % všech žáků. 23 % žáků na otázku nedokázalo odpovědět.

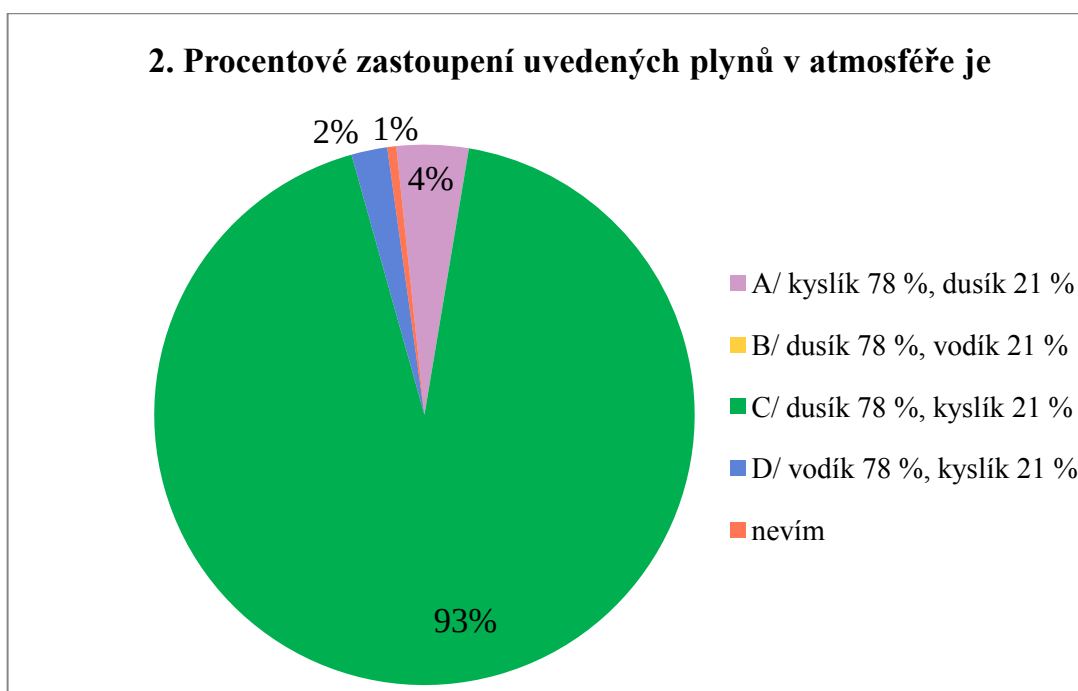
## 2. OTÁZKA

### Procentové zastoupení uvedených plynů v atmosféře je

- A/ kyslík 78 %, dusík 21 %
- B/ dusík 78 %, vodík 21 %
- C/ dusík 78 %, kyslík 21 %**
- D/ vodík 78 %, kyslík 21 %

**Tab. č. 2:** Četnost odpovědí na otázku č. 2.

| odpověď               | A   | B   | C           | D   | nevím |
|-----------------------|-----|-----|-------------|-----|-------|
| absolutní četnost     | 8   | 0   | <b>173</b>  | 4   | 1     |
| relativní četnost [%] | 4,2 | 0,0 | <b>93,0</b> | 2,2 | 0,5   |



**Graf. č. 2:** Relativní četnost odpovědí na otázku č. 2.

93 % žáků zvolilo správnou odpověď C/. 4 % dotázaných označila možnost A/, odpověď B/ nezvolil nikdo. 2 % respondentů uvedlo odpověď D/. Pouze jeden žák odpověď neuvedl.

### 3. OTÁZKA

**Objem vodní páry v atmosféře je přibližně**

A/ 20 % – 30 %

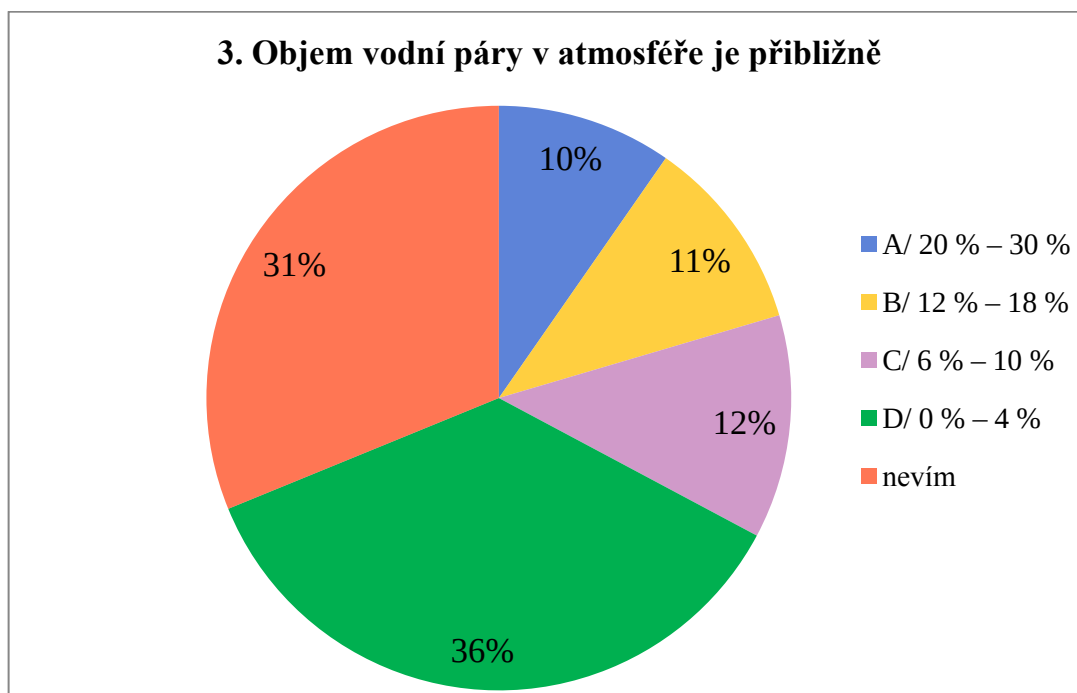
B/ 12 % – 18 %

C/ 6 % – 10 %

**D/ 0 % – 4 %**

**Tab. č. 3:** Četnost odpovědí na otázku č. 3

| odpověď               | A   | B    | C    | D           | nevím |
|-----------------------|-----|------|------|-------------|-------|
| absolutní četnost     | 18  | 20   | 23   | <b>67</b>   | 58    |
| relativní četnost [%] | 9,6 | 10,8 | 12,4 | <b>36,0</b> | 31,2  |



**Graf. č. 3:** Relativní četnost odpovědí na otázku č. 3.

Správnou odpověď D/ označilo 36 % žáků. Odpověď A/ vybralo 10 % dotázaných, odpověď B/ 11% dotázaných, odpověď C/ 12 % žáků. 31% žáků odpověď nevědělo.

#### 4. OTÁZKA

**Pořadí vrstev atmosféry podle průběhu teploty s rostoucí vzdáleností od povrchu Země je**

A/ troposféra, stratosféra, mezosféra, termosféra

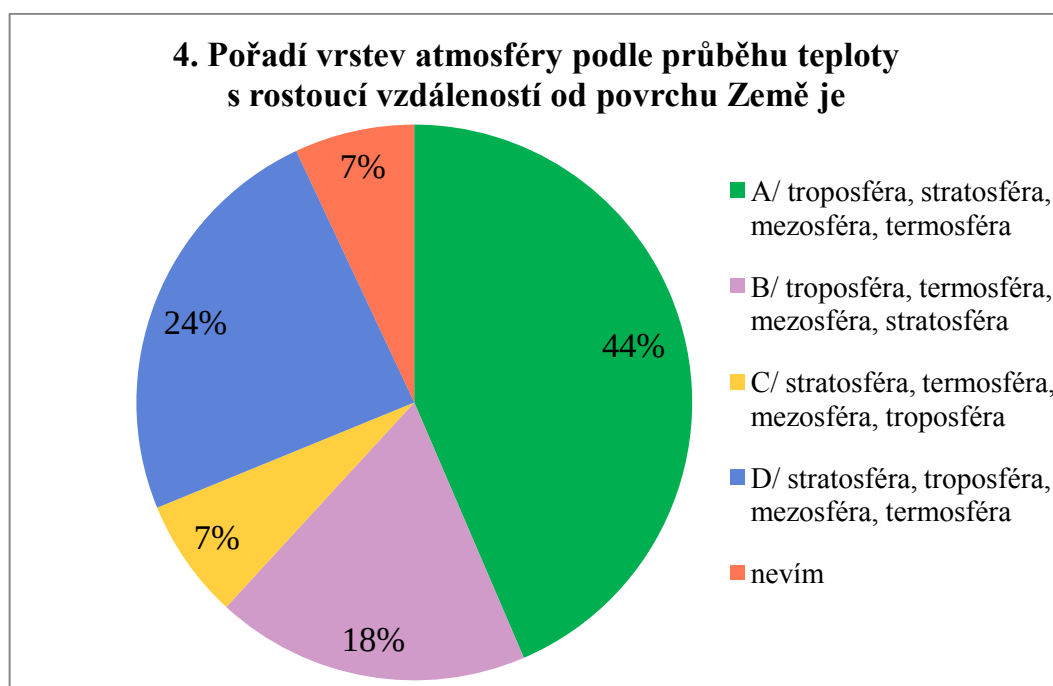
B/ troposféra, termosféra, mezosféra, stratosféra

C/ stratosféra, termosféra, mezosféra, troposféra

D/ stratosféra, troposféra, mezosféra, termosféra

**Tab. č. 4:** Četnost odpovědí na otázku č. 4

| odpověď               | A           | B    | C   | D    | nevím |
|-----------------------|-------------|------|-----|------|-------|
| absolutní četnost     | <b>81</b>   | 34   | 13  | 45   | 13    |
| relativní četnost [%] | <b>43,5</b> | 18,3 | 7,0 | 24,2 | 7,0   |



**Graf. č. 4:** Relativní četnost odpovědí na otázku č. 4.

44 % žáků vybralo správnou odpověď A/, 18% uvedlo odpověď B/, 7 % odpověď C, 24 % odpověď D/. 7% žáků odpověď neuvedlo.

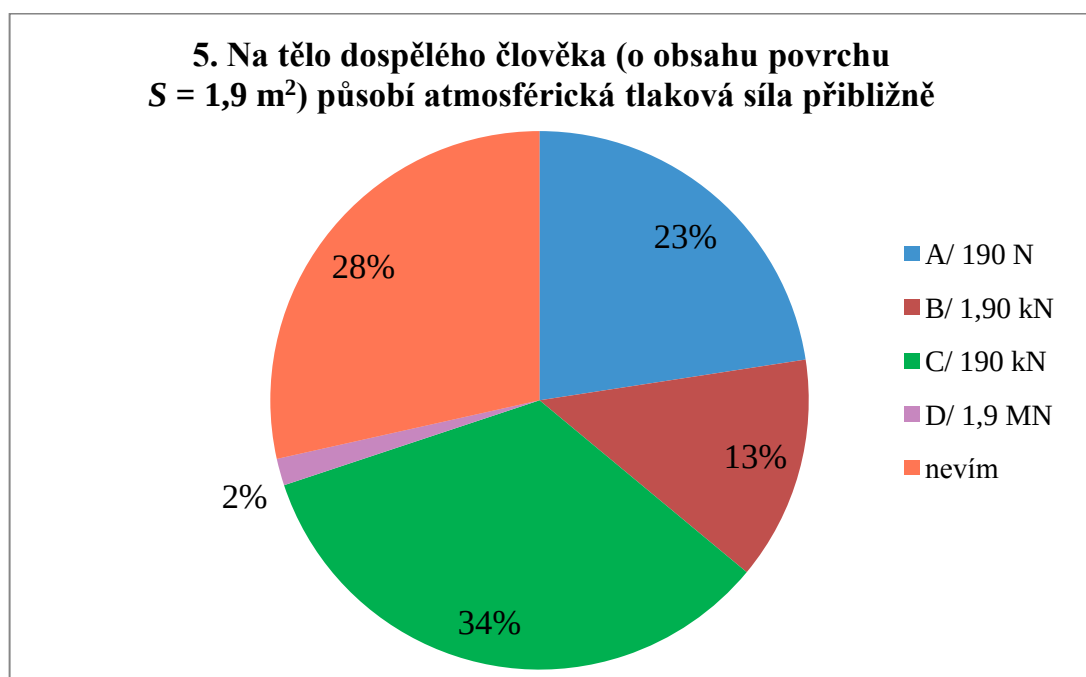
## 5. OTÁZKA

Na tělo dospělého člověka (o obsahu povrchu  $S = 1,9 \text{ m}^2$ ) působí atmosférická tlaková síla přibližně

- A/ 190 N
- B/ 1,90 kN
- C/ 190 kN
- D/ 1,9 MN

Tab. č. 5: Četnost odpovědí na otázku č. 5.

| odpověď               | A    | B    | C           | D   | nevím |
|-----------------------|------|------|-------------|-----|-------|
| absolutní četnost     | 42   | 25   | <b>63</b>   | 3   | 53    |
| relativní četnost [%] | 22,6 | 13,4 | <b>33,9</b> | 1,6 | 28,4  |



Graf. č. 5: Relativní četnost odpovědí na otázku č. 5.

Na tuto otázku odpovědělo 34 % dotázaných správně, tedy vybráním možnosti C/. 23 % uvedlo možnost A/, 13 % možnost B/, 2 % uvedly možnost D/. 28 % odpověď nevědělo.

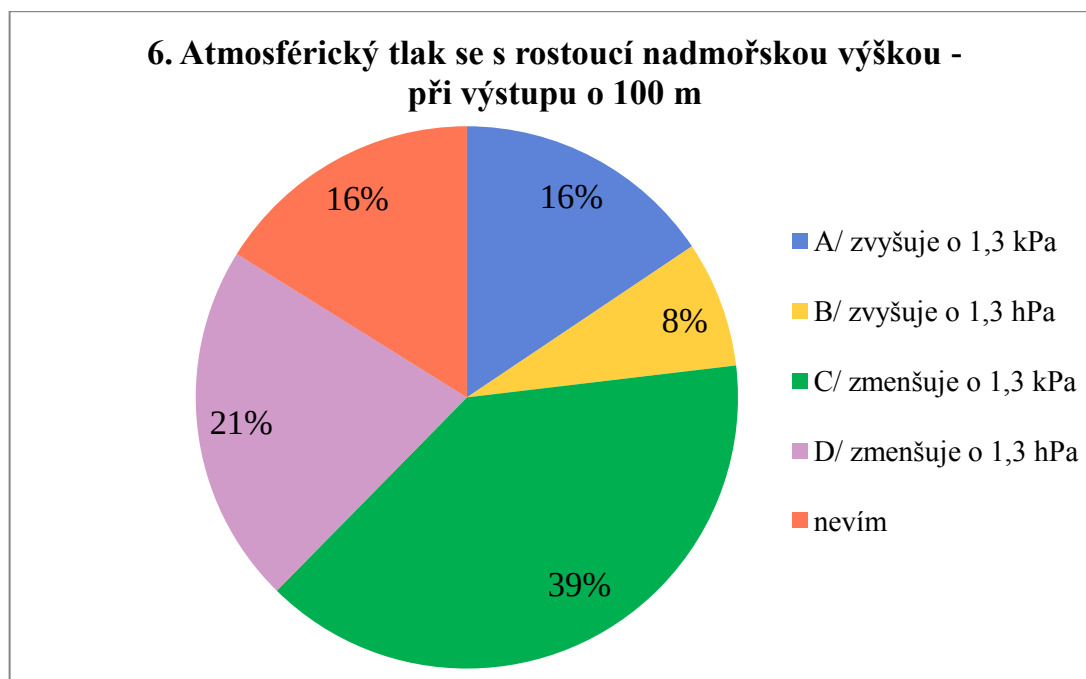
## 6. OTÁZKA

**Atmosférický tlak se s rostoucí nadmořskou výškou - při výstupu o 100 m**

- A/ zvyšuje o 1,3 kPa
- B/ zvyšuje o 1,3 hPa
- C/ zmenšuje o 1,3 kPa**
- D/ zmenšuje o 1,3 hPa

**Tab. č. 6:** Četnost odpovědí na otázku č. 6.

| odpověď               | A    | B   | C           | D    | nevím |
|-----------------------|------|-----|-------------|------|-------|
| absolutní četnost     | 29   | 14  | <b>73</b>   | 40   | 30    |
| relativní četnost [%] | 15,6 | 7,5 | <b>39,2</b> | 21,4 | 16,1  |



**Graf. č. 6:** Relativní četnost odpovědí na otázku č. 6.

39 % žáků správně odpovědělo za C/, 16 % zvolilo možnost A/, 8 % možnost B/, 21 % označilo odpověď D/. 16 % odpověď neuvedlo, tedy naznačilo, že se s informací nesetkalo.

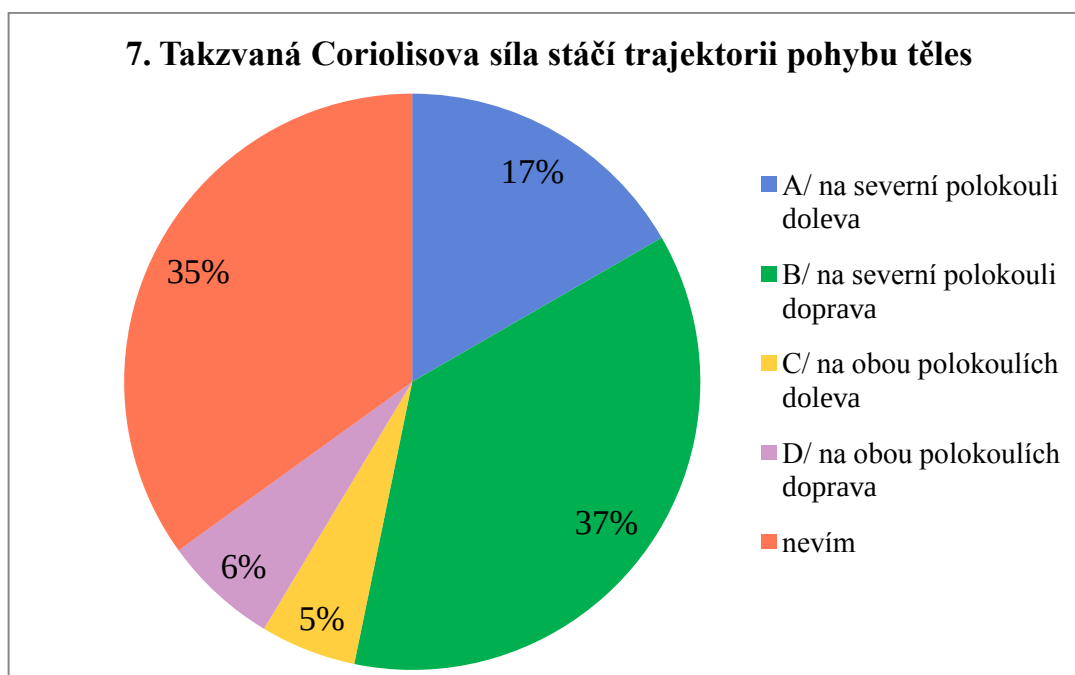
## 7. OTÁZKA

### Takzvaná Coriolisova síla stáčí trajektorii pohybu těles

- A/ na severní polokouli doleva  
B/ na severní polokouli doprava  
C/ na obou polokoulích doleva  
D/ na obou polokoulích doprava

Tab. č. 7: Četnost odpovědí na otázku č. 7.

| odpověď               | A    | B    | C   | D   | nevím |
|-----------------------|------|------|-----|-----|-------|
| absolutní četnost     | 31   | 68   | 10  | 12  | 65    |
| relativní četnost [%] | 16,7 | 36,6 | 5,4 | 6,4 | 34,9  |



Graf. č. 7: Relativní četnost odpovědí na otázku č. 7.

Správnou možnost B/ vybralo 37 % dotázaných, Odpověď A/ označilo 17 % žáků, odpověď C/ 5 % žáků, odpověď D/ vybralo 6 % respondentů. 35 % žáků odpověď neuvedlo.

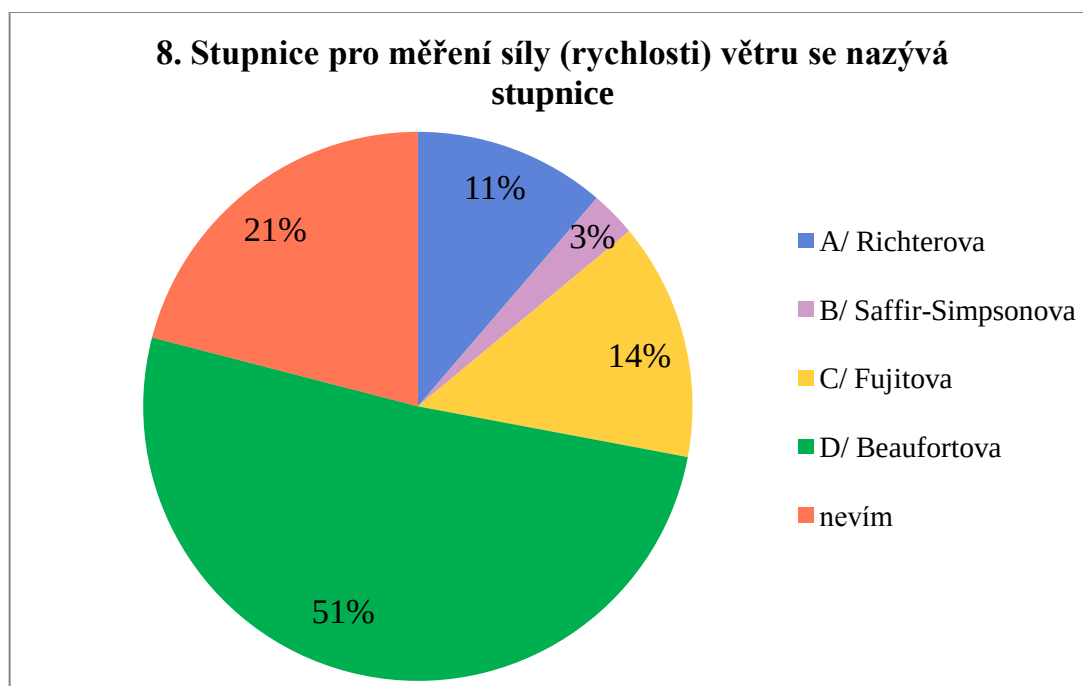
## 8. OTÁZKA

**Stupnice pro měření síly (rychlosti) větru se nazývá stupnice**

- A/ Richteroва
- B/ Saffir-Simpsonova
- C/ Fujitova
- D/ **Beaufortova**

**Tab. č. 8:** Četnost odpovědí na otázku č. 8.

| odpověď               | A    | B   | C    | D           | nevím |
|-----------------------|------|-----|------|-------------|-------|
| absolutní četnost     | 21   | 5   | 26   | <b>95</b>   | 39    |
| relativní četnost [%] | 11,3 | 2,7 | 14,0 | <b>51,0</b> | 21,0  |



**Graf. č. 8:** Relativní četnost odpovědí na otázku č. 8.

Správnou možnost D/ uvedlo 51 % respondentů. Odpověď A/ označilo 11 %, odpověď B/ pouze 3 % dotázaných. odpověď C/ zvolilo 14 % žáků. 21 % odpověď na otázku nevědělo.



## 9. OTÁZKA

Vzhledem k převažujícímu směru tryskových proudů (jet streamů) je doba letu letadel po většinu roku kratší (často i o několik hodin) při letu

A/ z USA do Evropy než z Evropy do USA

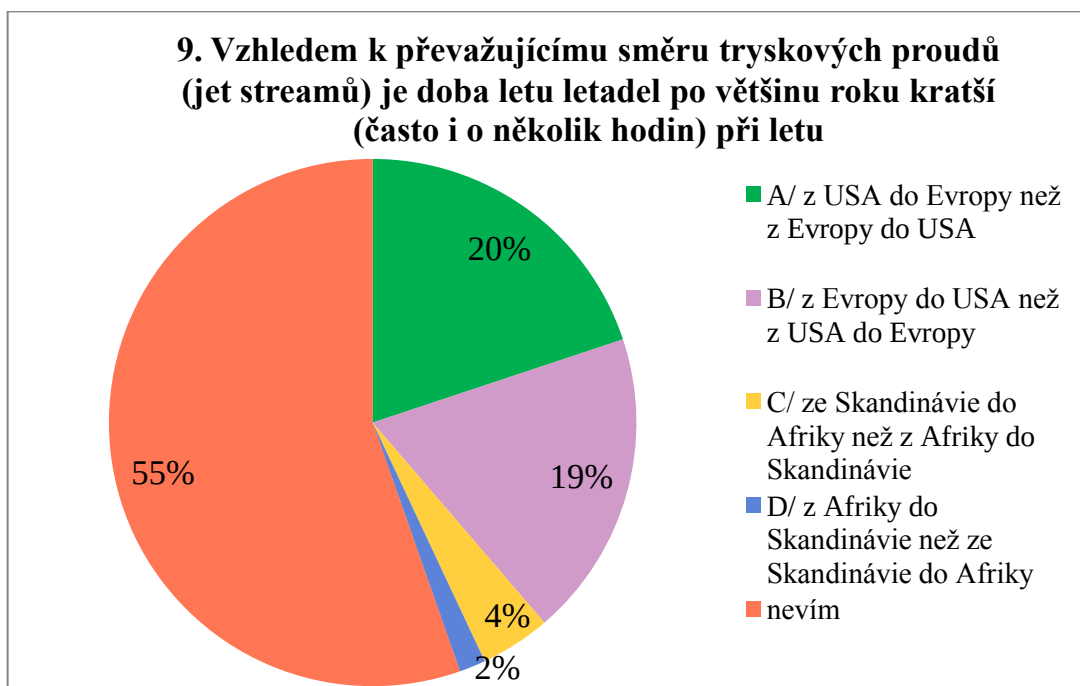
B/ z Evropy do USA než z USA do Evropy

C/ ze Skandinávie do Afriky než z Afriky do Skandinávie

D/ z Afriky do Skandinávie než ze Skandinávie do Afriky

Tab. č. 9: Četnost odpovědí na otázku č. 9.

| odpověď               | A    | B    | C   | D   | nevím |
|-----------------------|------|------|-----|-----|-------|
| absolutní četnost     | 37   | 35   | 8   | 3   | 103   |
| relativní četnost [%] | 19,9 | 18,8 | 4,3 | 1,6 | 55,4  |



Graf. č. 9: Relativní četnost odpovědí na otázku č. 9.

20 % dotázaných správně označilo odpověď A/, 19 % uvedlo odpověď B/, odpověď C/ zvolily 4 % žáků, 2 % uvedla odpověď D/. Nejvíce žáků – 55 % odpověď neoznačilo, tedy o jet streamech nikdy neslyšeli.

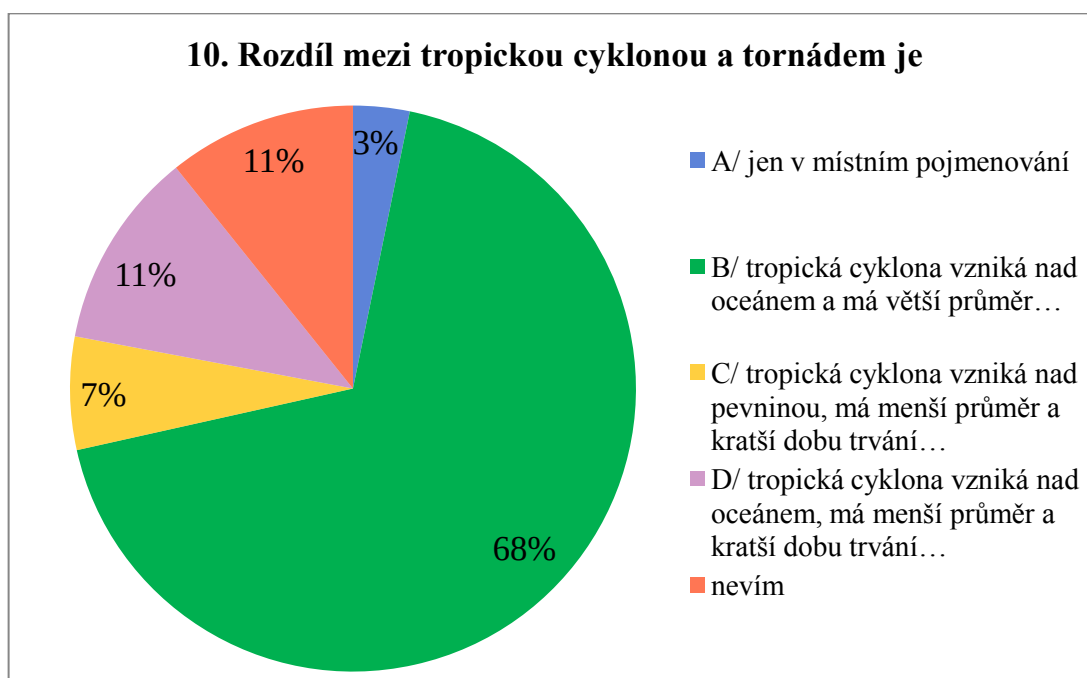
## 10. OTÁZKA

### Rozdíl mezi tropickou cyklonou a tornádem je

- A/ jen v místním pojmenování - oba názvy označují stejný jev
- B/ tropická cyklona vzniká nad oceánem a má větší průměr, zatímco tornáda mohou vznikat i nad pevninou a mají menší průměr a kratší dobu trvání**
- C/ tropická cyklona vzniká nad pevninou, má menší průměr a kratší dobu trvání, zatímco tornádo vzniká nad oceánem, má větší průměr a delší dobu trvání
- D/ tropická cyklona vzniká nad oceánem a má menší průměr, zatímco tornáda mohou vznikat i nad pevninou a mají větší průměr a delší dobu trvání

Tab. č. 10: Četnost odpovědí na otázku č. 10.

| odpověď               | A   | B    | C   | D    | nevím |
|-----------------------|-----|------|-----|------|-------|
| absolutní četnost     | 6   | 127  | 12  | 21   | 20    |
| relativní četnost [%] | 3,2 | 68,3 | 6,5 | 11,3 | 10,8  |

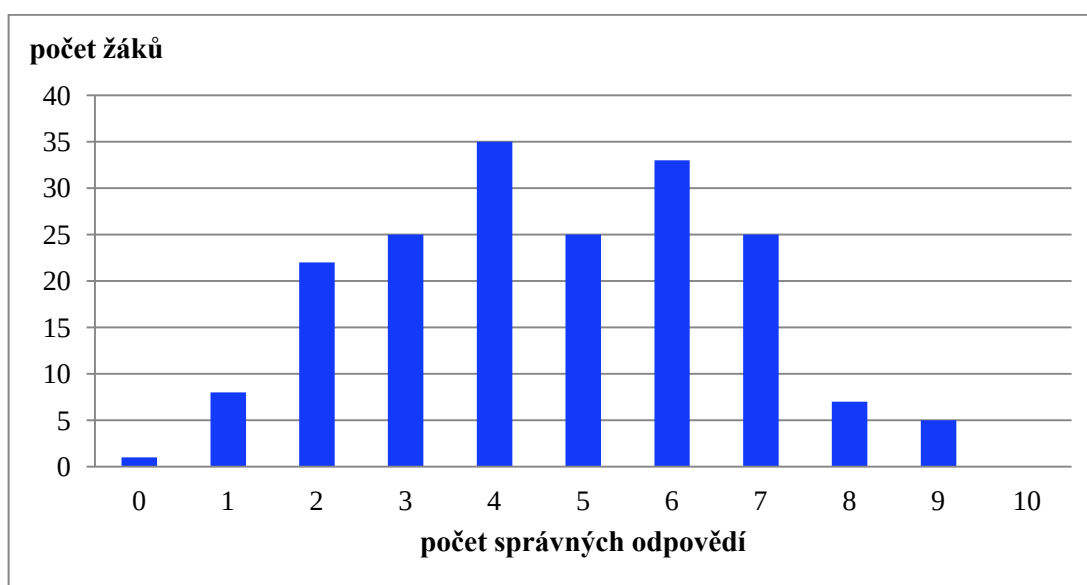


Graf. č. 10: Relativní četnost odpovědí na otázku č. 10.

68 % žáků vědělo správnou odpověď B/. Odpověď A/ uvedly 3% dotázaných, odpověď C/ označilo 7 %, odpověď D/ zvolilo 11 % respondentů. 11 % odpověď nevědělo.

## 1.2 Celkové vyhodnocení dotazníkového šetření

Naprosto bez chyby, tedy správně všech deset otázek, nevyplnil dotazník žádný z respondentů. 5 žáků odpovědělo správně na devět otázek. 7 žáků správně označilo osm otázek. 25 dotázaných mělo sedm z deseti otázek správně. 33 žáků vědělo správně 6 otázek. Poloviční úspěšnost mělo 25 dotázaných. 35 žáků vědělo správně čtyři odpovědi, tři správné odpovědi mělo 25 žáků, 22 žáků mělo pouze dvě správné odpovědi a 8 žáků odpovědělo správně pouze na jednu otázku. Jeden žák neměl žádnou správnou odpověď.



**Graf. č. 11:** Absolutní četnost žáků podle počtu správných odpovědí.

Nejsnadnější otázkou – podle úspěšnosti – byla 2. otázka týkající se procentového zastoupení plynů v atmosféře. Správnou odpověď uvedlo 93 % dotázaných. Druhou největší úspěšnost měla otázka č. 10, kdy měli žáci označit, jaký je rozdíl mezi tropickou cyklonou a tornádem. Správnou možnost zvolilo 68 % žáků. Naopak nejméně znalostí měli respondenti o tryskovém proudění jet streamu. Více jak polovina dotázaných (55 %) se s tímto pojmem nikdy nesetkala. Otázka č. 5, ve které měli žáci určit velikost atmosférické síly, která působí na člověka, způsobila některým žákům také problémy. Pravděpodobně z důvodu neuvědomění si, že odpověď lze jednoduše získat z definičního vztahu pro tlak. Menší úspěšnosti dosáhla také otázka č. 7, ve které 35 % dotazovaných uvedlo, že se s pojmem Coriolisova síla nesetkalo. Na druhou

stranu, i když v základním středoškolském kurzu fyziky není Coriolisova síla detailně probírána, téměř stejný počet respondentů (37 %) správnou odpověď vědělo. Pořadí otázek podle úspěšnosti přehledně udává tabulka č. 11.

**Tab. č. 11:** Pořadí otázek podle úspěšnosti.

| Číslo otázky | absolutní četnost<br>správných<br>odpovědí | relativní četnost<br>správných<br>odpovědí |
|--------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 2            | 173                                        | 93 %                                       |
| 10           | 127                                        | 68 %                                       |
| 8            | 95                                         | 51 %                                       |
| 1            | 85                                         | 46 %                                       |
| 4            | 81                                         | 44 %                                       |
| 6            | 73                                         | 39 %                                       |
| 7            | 68                                         | 37 %                                       |
| 3            | 67                                         | 36 %                                       |
| 5            | 63                                         | 34 %                                       |
| 9            | 37                                         | 20 %                                       |

Na závěr k vyhodnocení dotazníkového šetření bych ráda uvedla, že zpracované výsledky šetření neměly a ani neslouží ke srovnávání škol, ročníků ani vyučujících. Jsou jen ilustrací současného stavu znalostí na menším vzorku respondentů. Přesto z nich alespoň určitou představu získat lze.

Nedílnou vlastností dotazníku je i nenápadná motivace testovaných k samostatnému doplňování znalostí o jim méně známých pojmech a jevech, ať už jde o jevy meteorologické, dopravní nebo ryze fyzikální. Výchozí možnost k samostudiu jim poskytne právě následný sestavený text práce, ve kterém naleznou odpovědi na všechny položky v dotazníku a jejímž studiem mohou uceleně a přehledně své znalosti doplnit či prohlubovat.

## 2. ATMOSFÉRA ZEMĚ

Atmosféra Země je vzdušný neboli plynný obal Země, který obklopuje naši planetu a sahá od zemského povrchu přibližně do výšky 30 až 40 tisíc kilometrů, kde bez výrazné hranice přechází do meziplanetárního prostoru. Název atmosféra je složen z řeckých slov „atmos“ – pára a „sphaira“ – obal. Atmosféra chrání povrch Země před škodlivými složkami slunečního záření, před kosmickým zářením i před dopadem pevných částic z kosmu. Atmosféra také mírní teplotní extrémy na zemském povrchu. Pro život na Zemi je tedy nezbytná. Zemská atmosféra je k Zemi poutána gravitační silou a účastní se zemské rotace. [11, 39]

### 2.1 Složení zemské atmosféry

Zemská atmosféra je složena ze směsi plynů, vodní páry, pevných a kapalných částic. Největší zastoupení má v atmosféře dusík a kyslík, ostatní složky jsou vzhledem k nim zastoupeny v nepatrných množstvích. V blízkosti zemského povrchu má atmosféra toto složení:

**Tab. 12:** Složení atmosféry v blízkosti zemského povrchu (podle C. D. Ahrens, 1998). (převzato z [15], str. 58)

| Stálé plyny |                |                       |  |
|-------------|----------------|-----------------------|--|
| Plyn        | Značka         | Objemové množství (%) |  |
| Dusík       | N <sub>2</sub> | 78,08                 |  |
| Kyslík      | O <sub>2</sub> | 20,95                 |  |
| Argon       | Ar             | 0,93                  |  |
| Neon        | Ne             | 0,0018                |  |
| Helium      | He             | 0,0005                |  |
| Vodík       | H <sub>2</sub> | 0,00006               |  |
| Xenon       | Xe             | 0,000009              |  |

| Proměnlivé plyny                                           |                  |                       |                               |
|------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Plyn (a částice)                                           | Značka           | Objemové množství (%) | Počet částic na milion (ppmv) |
| Vodní páry                                                 | H <sub>2</sub> O | 0-4                   | -                             |
| Oxid uhličitý                                              | CO <sub>2</sub>  | 0,036                 | 360*                          |
| Metan                                                      | CH <sub>4</sub>  | 0,00017               | 1,7                           |
| Oxid dusný                                                 | N <sub>2</sub> O | 0,00003               | 0,3                           |
| Ozon                                                       | O <sub>3</sub>   | 0,000004              | 0,04**                        |
| Částice (prach, saze, aj.)                                 | -                | 0,000001              | 0,01-0,15                     |
| Freony (CFCs)                                              | -                | 0,00000002            | 0,0002                        |
| * V milionu molekul vzduchu je 360 molekul CO <sub>2</sub> |                  |                       |                               |
| ** Hodnoty ve stratosféře jsou 5 – 12 ppmv                 |                  |                       |                               |

ppmv – udává jeden díl v milionu objemově.

Kromě plynů uvedených v tabulce jsou v zemské atmosféře plyny, jejichž zastoupení je stopové, např. oxid uhelnatý (CO), čpavek (NH<sub>3</sub>), páry jódu, aj. [15]

„V důsledku promíchávání vzduchu se jeho složení do výšky 90 až 95 km nemění. Výjimku tvoří CO<sub>2</sub> a O<sub>3</sub>. Množství oxidu uhličitého se mění v závislosti na čase a místě, množství ozónu se mění především v závislosti na výšce. U zemského povrchu je koncentrace ozónu nepatrná, větší je ve výškách 10 až 50 km, v tzv. ozonoféře.“ [11, str. 18]

Aby molekuly plynu ze zemské atmosféry neunikly, tzn. nepřestaly být přitahovány gravitační silou Země, musí být jejich střední kvadratická rychlost menší, než je parabolická neboli úniková rychlost. Musí tedy platit

$$v_k < v_p$$

$$\sqrt{\frac{3kT}{m_0}} < \sqrt{\frac{2\kappa M_Z}{R_Z + h}}, \quad (1)$$

kde  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$  je Boltzmannova konstanta,  $T$  termodynamická teplota,  $m_0$  je hmotnost molekuly,  $\kappa = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$  gravitační konstanta,  $R_Z = 6\,378 \text{ km}$  poloměr Země,  $h$  výška tělesa nad povrchem Země. [1] Uvažujeme-li výšku atmosféry 30 000 km, úniková rychlost má hodnotu  $11,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Tato hodnota je v porovnání s velikostí střední kvadratické rychlosti těžších molekul obsažených ve vzduchu (např. dusíku, kyslíku, atd.) mnohokrát větší, proto tyto molekuly ze zemské atmosféry neunikají. Lehčí molekuly (např. vodíku) mají střední kvadratickou rychlost větší, proto při vzájemných srážkách mohou dosáhnout i rychlosti dostatečné k opuštění atmosféry a postupem času tedy z atmosféry všechny tyto molekuly uniknou. [1]

„Celková hmotnost atmosféry je podle K. E. Trenbertha (1981)  $5,137 \cdot 10^{18} \text{ kg}$ , tedy přibližně jedna milióntina hmotnosti Země“. [11, str. 18] „Vzhledem k tomu, že tlak a hustota s výškou rychle klesají, je celých 50 % hmotnosti atmosféry soustředěno do výšky 5,5 km, 75 % do 11 km a 90 % do 20 km od povrchu Země. Ve vrstvě od 0 do 36 km je soustředěno 99 % hmotnosti atmosféry“. [15, str. 57]

Nejjednodušší výpočet hmotnosti zemské atmosféry lze provést, pokud celou atmosféru nahradíme vhodným modelem, pro který budeme uvažovat jeho tloušťku malou

vzhledem k poloměru Země  $R_z$  (tento předpoklad je poměrně dobře splněn, pokud uvažujeme výšku atmosféry do 36 km, ve které se nachází většina hmoty), a tedy gravitační zrychlení konstantní. Zemi nahradíme koulí a nebudeme uvažovat, že se otáčí, tedy zanedbáme odstředivou sílu. Porovnáme velikosti tlakové  $F_{tl}$  a tíhové síly  $F_G$  působící na zemský povrch o ploše  $S$

$$F_{tl} = pS = F_G = M_a \cdot g, \quad (2)$$

kde  $p$  je velikost atmosférického tlaku u povrchu Země,  $S$  je velikost povrchu Země

$$S = 4\pi R_z^2. \quad (3)$$

Z rovnice (2) vyjádříme velikost hmotnosti atmosféry

$$M_a = \frac{pS}{g} = \frac{p4\pi R_z^2}{g}. \quad (4)$$

Po dosazení hodnot  $p = 101\,325\text{ Pa}$ ,  $R_z = 6378\,000\text{ m}$ ,  $g = 9,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , dostaneme hmotnost zemské atmosféry  $M_a \doteq 5,28 \cdot 10^{18}\text{ kg}$ . [19]

## 2.2 Vertikální členění atmosféry

Dělení atmosféry na vertikální vrstvy se provádí podle vlastností a hledisek, které jsou specifické pro každou vrstvu. „Nejčastější dělení atmosféry jsou podle průběhu teploty vzduchu s nadmořskou výškou, podle chemického složení vzduchu, podle koncentrace atmosférických iontů a volných elektronů a podle ovlivnění spodních vrstev atmosféry zemským povrchem“. [29]

### 2.2.1 Členění podle průběhu teploty vzduchu s nadmořskou výškou

- **Troposféra:** Přestavuje nejnižší část zemské atmosféry, která sahá v oblastech rovníku do výšky 16-18 km, v našich zeměpisných šířkách do výšky 11 km a v polárních oblastech do výšky 7-9 km. Průměrná výška troposféry se mění např. v závislosti na roční době, v zimě dosahuje níže než v létě. [15] V troposféře je obsažena většina vzduchu, asi 90 % jeho celkové hmotnosti. Teplota vzduchu v této vrstvě klesá s rostoucí výškou. Tento pokles teploty je způsoben konvekcí vzduchu, která představuje pohyby vzduchu vyvolanými

jejich teplotními rozdíly (viz. 4. kapitola). Vzduch, který se ohřeje o zemský povrch, má menší hustotu (a tedy menší hmotnost), začíná proudit – podle Archimedova zákona stoupá vzhůru. Na jeho místo proudí chladnější vzduch z vyšších vrstev troposféry. Bublina teplejšího vzduchu se při výstupu zvětšuje, zmenšuje se v ní tlak. Protože je vzduch špatným vodičem tepla, můžeme tento děj považovat za adiabatický, nedochází tedy k tepelné výměně plynu s okolím. Při adiabatickém rozpínání se teplota plynu snižuje, a tedy bublina vzduchu se při výstupu vzhůru ochlazuje. [9] „Teplota vzduchu v troposféře s výškou klesá v průměru o 0,65 °C na 100 m výšky. V závislosti na zeměpisné šířce nabývá horní část troposféry různých teplot. V oblasti pólů je průměrná teplota troposféry kolem –50 °C, v mírných zeměpisných šířkách –56 °C až –60 °C a nad rovníkem –80 °C. Troposféra je oblastí intenzivního proudění vzduchu, odtud vznikl její název (řecké slovo *tropos* znamená mísit). Troposféra obsahuje téměř veškerou vodu v atmosféře, a proto je oblastí vzniku oblaků, bouřkové činnosti, vzniku a vypadávání srážek a mlh“. [15, str. 60]

- **Stratosféra:** Vrstva atmosféry, která se nachází nad troposférou a zasahuje do výšky 50 km nad zemským povrchem. Od troposféry je stratosféra oddělena tropopauzou. Ve stratosféře se vlivem pohlcování ultrafialového záření ozonem zastavuje pokles teploty s rostoucí výškou a v její horní části přechází v růst. V důsledku tohoto pohlcování se tato část zemské atmosféry ohřívá shora, je tedy teplejší více nahoře než dole a nevzniká zde konvekce. Ve spodní části stratosféry do výšky asi 25 km je průměrná teplota –55 °C, v horní části, kolem 50 km nad zemským povrchem, dosahuje teplot až +10 °C. Na rozdíl od troposféry se v této vrstvě netvoří oblačnost, neboť je zde minimální množství vodních par. Výjimkou mohou být pouze tzv. perleťová oblaka, která se zde mohou dostat z troposféry. [9, 11]
- **Mezosféra:** Mezosféra je od stratosféry oddělena vrstvou stratopauzou. Nachází se ve výšce 50-85 km od zemského povrchu. Tato vrstva se vyznačuje silným poklesem teploty s rostoucí výškou. Na její spodní hranici je průměrná teplota kolem 0 °C, v její horní části dosahuje teplota až –90 °C. [15]



- **Termosféra:** Od nižší vrstvy mezoféry je termosféra oddělena mezopauzou. Termosféra sahá od výšky 85 km do výšky 500 km nad zemským povrchem. Charakteristické pro tuto vrstvu je rychlý vzestup teploty s rostoucí výškou. Ve výšce 200 km dosahuje teploty 500 °C a na její horní hranici až 1 000 °C. [13]

## 2.2.2 Členění podle chemického složení vzduchu

- **Homosféra:** Sahá do výšky kolem 90 km od zemského povrchu. Objemové zastoupení plynů se zde v důsledku intenzivního promíchávání vzduchu nemění. Homosféra je tvořena ze 78 % dusíku, 21 % kyslíku. Mezi látky, jejichž objemové zastoupení se i v homosféře mění, patří oxid uhličitý, vodní pára, ozon a částice prachu. [15, 25]
- **Heterosféra:** Vrstva nad homosférou, která se nachází ve výšce od 90 km nad zemským povrchem. Složení vzduchu se zde mění s výškou. Kromě kyslíku a dusíku má v heterosféře své zastoupení například také helium a vodík. Molekuly plynů jsou v této vrstvě rozkládány působením ultrafialového slunečního záření na atomy a jejich příslušné ionty. S rostoucí výškou tedy převládá zastoupení atomů a lehkých prvků. „Od úrovně asi 200 km výše převládá kyslík nad dusíkem.“ [39] V důsledku pohlcování sluneční energie je v heterosféře teplota několik set °C. [15, 25]
- **Exosféra:** Část atmosféry, která leží ve výšce nad 800 km od zemského povrchu. Přibližně do výšky 1 000 km se vyskytují ještě částice kyslíku. Výše převládají částice vodíku a její nejvyšší část tvoří volné elektrony. Plyny jsou v této vrstvě velmi zředěné, rychlosti molekul dosahují velikostí únikové rychlosti, takže molekuly přestávají být přitahovány gravitační silou Země a unikají do meziplanetárního prostoru. Přejít mezi exosférou a meziplanetárním prostorem se považuje za plynulý, neurčuje se tedy vrchní hranice atmosféry. [29, 13]

### 2.2.3 Členění podle koncentrace atmosférických iontů a volných elektronů

- **Neutrosféra:** Část atmosféry zasahující do výšky 60-70 km. Zahrnuje tedy troposféru, stratosféru a část mezoféry. Koncentrace iontů je v ní tak malá, že v ní nedochází k odrazu radiových vln. [15]
- **Ionosféra:** Část atmosféry ve výšce od 60 km do 500 km, tedy v oblasti mezoféry a termosféry. Vlivem ultrafialového záření zde dochází k ionizaci atomů a molekul vzduchu. To znamená, že dochází k rozštěpení elektricky neutrálního atomu nebo molekuly na elektron a kladný iont. K odtržení elektronu je potřeba určitá práce, kterou nazýváme ionizační (výstupní) a značíme ji  $W_i$ . Tato práce je pro každý plyn v atmosféře jiná. Hodnoty ionizační práce pro jednotlivé atomy lze nalézt např. v matematicko-fyzikálních tabulkách. Podle Einsteinovy rovnice pro fotoelektrický jev můžeme tuto výstupní práci zapsat vztahem

$$W_i = hf - E_k, \quad (5)$$

kde  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s je Planckova konstanta,  $f$  frekvence dopadajícího záření,  $E_k$  kinetická energie vystupujícího elektronu.

Z této rovnice je zřejmé, že k ionizaci dojde jen v případě, kdy ionizační energie  $W_i$  je nižší než energie  $hf$  dodaná dopadajícím zářením.

Protože je v nižších vrstvách atmosféry hustota vzduchu vysoká, kladný iont vzniklý ionizací se rychle srazí s některým elektronem, rekombinuje s ním a vzniká tak opět neutrální atom nebo molekula. „Ve výškách nad 60 km je ale hustota vzduchu malá, doba života iontu je proto tak dlouhá, že v kterýkoliv okamžik je přibližně jeden atom z milionu ionizován. Tato vrstva slabě ionizovaného plynu (plazmy) se nazývá ionosféra“. [9, str. 34] Podle intenzity ionizace se v ionosféře rozlišují čtyři vrstvy. Spodní vrstva ionosféry označovaná jako vrstva D je slaběji ionizována a po západu Slunce kvůli rekombinaci rychle zaniká. Nad vrstvou D leží vrstva E, která se nachází přibližně 100 km od zemského povrchu. Horní část ionosféry tvoří vrstva F, která se dělí na vrstvy F1 a F2. Nejsilněji ionizovaná vrstva je nejvyšší vrstva F2, která leží ve výšce nad 350 km. [39] Tato vrstva bývá zachována i v nočních hodinách a vyskytuje se po celý rok. V důsledku ionizace neutrálního plynu je

prostředí ionosféry elektricky vodivé. [42] „Vysoká koncentrace iontů a volných elektronů způsobuje odraz některých frekvencí elektromagnetických vln zpět k zemskému povrchu a ovlivňuje tak radiové spojení.“ [15, str. 62] „Podmínkou pro odraz však je, že frekvence radiových vln musí být nižší než určitá kritická frekvence. Frekvence vyšší než je kritická frekvence by ionosférou prošly bez odrazu. Tato kritická frekvence závisí na koncentraci iontů: čím více je vzduch ionizován, tím vyšší je kritická frekvence (a tím více radiových vln ionosféra odráží).“ [9, str. 34] Protože vzduch v ionosféře ionizuje sluneční záření, závisí kritická frekvence také na denní a roční době. Kritická frekvence tedy odpovídá maximální koncentraci elektronů v dané vrstvě a v našich zeměpisných šířkách se pohybuje kolem 3,5 MHz pro vrstvu E a 4 až 12 MHz pro vrstvu F2. [42] Odrazu vln se využívá pro šíření krátkých radiových vln (vlnových délek řádu desítek metrů) a tedy k rádiovému spojení na těchto vlnách. Po několikanásobném odrazu se mohou tyto vlny šířit i na velké vzdálenosti.

#### 2.2.4 Členění podle ovlivnění spodních vrstev atmosféry zemským povrchem

- **Mezní vrstva atmosféry:** Jako mezní vrstva se označuje nejspodnější část atmosféry, sahající do výšky 2 km. „Charakteristickou vlastností mezní vrstvy atmosféry je to, že pole jednotlivých meteorologických prvků se zde formují v těsné vzájemné souvislosti a ve stavu rovnováhy jsou jednoznačně určena vnějšími a vnitřními parametry, mezi něž patří zejména: pole atmosférického tlaku, příkon slunečního záření, tvar reliéfu, drsnost a tepelné vlastnosti zemského povrchu.“ [3, str. 10]
- **Volná atmosféra:** Sahá od výšky přibližně 2 km nad zemským povrchem. Zde se už neprojevují interakce zemského povrchu a atmosféry. [29]

### Kontrolní otázky:

1. Proč se v zemské atmosféře nevyskytuje vodík, ačkoliv je ve vesmíru nejrozšířenějším prvkem? [12]

Molekuly vodíku jsou velmi lehké - jejich relativní molekulová hmotnost je pouze  $M_r = 2,016m_u$ . Proto je pro tyto molekuly již při teplotě  $0\text{ }^\circ\text{C}$  jejich střední kvadratická rychlost poměrně vysoká (po dosazení do vztahu (1))  $v_k = 1,85\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tyto lehké molekuly mohou tak nahodilými srážkami dosáhnout únikové rychlosti. Postupem doby tak všechny molekuly vodíku z atmosféry unikly. [1, 12]

2. Proč se nerozplyne zemská atmosféra?

Zemská atmosféra se skládá převážně z molekul o vyšší relativní atomové hmotnosti, např. dusíku ( $M_r = 28,014m_u$ ) a kyslíku ( $M_r = 31,998m_u$ ). Těžší molekuly dosahují při teplotě  $0\text{ }^\circ\text{C}$  menší střední kvadratické rychlosti přibližně  $v_k = 0,49\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Počet těchto těžších molekul, které by mohly dosáhnout hodnot únikové rychlosti je ve srovnání s celkovým počtem molekul v atmosféře zanedbatelně malý. Země tak prakticky atmosféru neztrácí.[1,10,12]

3. Proč teplý vzduch stoupá vzhůru?

Teplý vzduch – např. ohřátý od zemského povrchu, má podle stavové rovnice (např. [1]) pro plyn menší hustotu (a tedy menší hmotnost). Působením aerostatické vztlakové síly teplý vzduch začíná proudit – podle Archimedova zákona stoupá vzhůru.

4. Proč v troposféře s rostoucí výškou teplota klesá?

Tento pokles teploty v troposféře je způsoben výstupným a sestupným prouděním vzduchu podmíněným teplotními rozdíly (tzv. konvekcí vzduchu). Bublina teplejšího vzduchu, která v důsledku archimedovské vztlakové síly stoupá vzhůru, se při výstupu do výšky s nižším atmosférickým tlakem zvětšuje, zmenšuje se v ní tlak, nastává tak adiabatické rozpínání. Při adiabatickém rozpínání se teplota plynu snižuje, a tedy bublina vzduchu se při výstupu vzhůru ochlazuje.

### 3. ATMOSFÉRICKÝ TLAK

Atmosférický tlak je tlak vyvolán tíhou vzduchového sloupce sahajícího od místa, kde tlak zjišťujeme, až po horní hranici zemské atmosféry. [11] Pokud ze vztahu pro výpočet velikosti tlaku

$$p_a = \frac{F}{S}, \quad (6)$$

vyjádříme sílu

$$F = p_a \cdot S \quad (7)$$

a za  $p_a$  dosadíme hodnotu normálního atmosférického tlaku  $p_a = 101\,325\text{ Pa}$  [1], zjistíme, že na  $1\text{ m}^2$  na hladině moře, působí atmosféra silou  $101\,325\text{ N}$ , neboli tíha vzduchového sloupce se základnou  $1\text{ m}^2$ , který sahá od hladiny moře po horní hranici atmosféry je  $101\,325\text{ N}$ . Vzduch tedy také na naše tělo působí obrovským tlakem. Velikost tohoto tlakového působení lze zjistit tak, že do vzorce (7) dosadíme obsah povrchu našeho těla a velikost atmosférického tlaku v daném místě. Obsah povrchu lidského těla spočítáme podle vzorce

$$S = (m^{0,425} \cdot h^{0,725}) \cdot 0,007184, \quad (8)$$

kde  $m$  je hmotnost v kg,  $h$  výška v cm [27].

Dospělý člověk má přibližně obsah povrchu těla  $1,9\text{ m}^2$ , působí na něho tedy atmosférická tlaková síla o velikosti přibližně  $192\text{ kN}$ , tedy tíhou  $19\,200\text{ kg}$ . Proti této síle však působí naše kostra a vzduch v tkáních a krvi, který vyvíjí stejný tlak, jako na nás působí atmosféra. (upraveno podle [15])

Pro celou atmosféru je charakteristický stálý exponenciální pokles tlaku s rostoucí nadmořskou výškou. Tento pokles je důsledkem zmenšování sloupce vzduchu, který způsobuje tlak na danou úroveň. Vzorec, pro výpočet velikosti atmosférického tlaku v závislosti na výšce udává tzv. barometrická rovnice, kterou lze odvodit, uvažujeme-li stálou teplotu plynu a malou vrstvu vzduchu o hustotě  $\rho$  a tloušťce  $\Delta h$  ve výšce  $h$ . Tlakový rozdíl  $\Delta p$  ve vrstvě vyjádříme ze vztahu pro hydrostatický tlak

$$\Delta p = -\rho g \Delta h. \quad (9)$$

Při stálé teplotě dostaneme z Boylova-Mariottova zákona vztah

$$pV = p \frac{m}{\rho} = p_0 \frac{m}{\rho_0} \Rightarrow \rho = \frac{\rho_0}{p_0} p, \quad (10)$$

kde  $p_0, \rho_0$  jsou hodnoty pro nulovou nadmořskou výšku. Po dosazení za  $\rho$  do rovnice pro  $\Delta p$  dostaneme

$$\Delta p = - \frac{\rho_0}{p_0} \cdot p \cdot g \cdot \Delta h. \quad (11)$$

Budeme-li vrstvu vzduchu neustále ztenčovat, a tedy výpočet zpřesňovat, můžeme přejít od  $\Delta h \rightarrow dh$  a rovnici (11) přepíšeme na tvar

$$\frac{dp}{p} = - \frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot dh. \quad (12)$$

Integrací této rovnice dostaneme barometrickou rovnici pro tlak ve tvaru

$$p = p_0 e^{-\frac{\rho_0 \cdot g}{p_0} \cdot h}. \quad (13)$$

Po dosazení  $p_0 = 101\,325 \text{ Pa}$ ,  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $\rho_0 = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  zjistíme, že atmosférický tlak s rostoucí nadmořskou výškou klesá přibližně o 13 hPa na 100 m. [43] Tento poznatek se dá využít pro měření nadmořské výšky. Tlak vzduchu však nezávisí pouze na nadmořské výšce, ale v určitém místě se v souvislosti s denním chodem teploty vzduchu a s cirkulací atmosféry neustále mění. Ze stavové rovnice ideálního plynu

$$pV = nRT, \quad (14)$$

po dosazení

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad (15)$$

plyne

$$p = \frac{n\rho RT}{m}, \quad (16)$$

tedy tlak vzduchu závisí přímo úměrně na jeho teplotě a hustotě. [1] V důsledku poklesu tlaku vzduchu klesá také jeho hustota a současně klesá i jeho teplota.

V atmosféře se vyskytují plochy, v jejichž každém bodě je stejný tlak vzduchu, nazýváme je izobarické plochy. Na synoptických mapách se tyto plochy znázorňují

izobarami, tedy čarami spojujícími místa se stejnou hodnotou tlaku vzduchu. Horizontální rozložení atmosférického tlaku není však přirozeně homogenní, ale v zemském ovzduší se vyskytují tlakové útvary, mezi které patří například tlakové níže (cyklony), tlakové výše (anticyklony), hřebeny vysokého tlaku a brázdy nízkého tlaku. Tlaková níže je oblast, ve které je atmosférický tlak v dané ploše nižší než v okolí. V tlakové výši je vzhledem k okolí atmosférický tlak vyšší. Oba tyto útvary však mají kolem svého centra v uvažované ploše uzavřené izobary. Hřebeny vysokého tlaku a brázdy nízkého tlaku tyto uzavřené izobary neobsahují. [2]

## **Kontrolní otázky:**

1. Proč člověk necítí působení atmosférického tlaku přes jeho značnou hodnotu?

Lidské tělo je přizpůsobeno tomuto tlakovému působení – naše kostra a vzduch v tkáních a krvi, vyvíjí tlak o stejné velikosti, jakým na nás působí atmosféra.

2. Kdy si uvědomujeme působení atmosférického tlaku kolem sebe?

Působení atmosférického tlaku si uvědomujeme např. při výstupu letadel do letové výšky a jejich opětovném sestupu. Při jízdě v automobilu do kopce, z kopce. Citliví lidé mohou pociťovat pokles atmosférického tlaku před bouřkou doprovázený zvýšením krevního tlaku a migrénou.

3. Na čem závisí velikost atmosférického tlaku?

Podle barometrické rovnice závisí velikost atmosférického tlaku na nadmořské výšce. Atmosférický tlak však není na daném místě konstantní, ale mění se také v souvislosti s meteorologickou situací – závisí tedy také na teplotě a hustotě vzduchu. [1]

4. Proč s rostoucí nadmořskou výškou atmosférický tlak klesá?

Ve větší nadmořské výšce je menší atmosférický tlak, protože se zmenšuje sloupec vzduchu sahající od hladiny, od které tlak měříme, po horní hranici atmosféry a tedy na dané místo působí menší tlaková síla. Hustota vzduchu také není konstantní, ale s rostoucí výškou se snižuje, proto se podle stavové rovnice snižuje i tlak vzduchu. [1, 11]



## 4. PROUDĚNÍ VZDUCHU JAKO FYZIKÁLNÍ JEV

Neustálý pohyb a přemísťování různě velkých objemů vzduchu je jedním ze základních rysů zemské atmosféry. Proudění vzduchu je nejčastěji způsobeno rozdílnými hodnotami atmosférického tlaku, které má atmosféra tendenci vyrovnávat. Při proudění dochází k přenosu hmotných částic a také k transportu tepla. [15]

### 4.1 Základní typy proudění

Mezi základní typy proudění můžeme zařadit proudění laminární, turbulentní a konvekci. Proudění vzduchu v reálné atmosféře je zpravidla turbulentní. V nejnižších částech mezní vrstvy atmosféry se ale uplatňuje také laminární proudění a termická konvekce.

- **Laminární** proudění je forma proudění, při kterém se vzduchové částice pohybují ve vrstvách rovnoběžných se směrem proudění. Tento typ proudění se může vyskytovat pouze v tenké vrstvě nad tzv. aerodynamicky hladkým povrchem, např. nad klidnou vodní hladinou nebo hladkým povrchem ledu. Mezi jednotlivými vrstvami dochází při laminárním proudění pouze k výměně jednotlivých molekul, a to v důsledku jejich neuspořádaného termického pohybu. V úrovni aerodynamicky hladkého povrchu klesá rychlost proudění k nule. S rostoucí výškou nad tímto povrchem vzrůstá i velikost proudění. Molekuly, které směřují z nižších, tedy pomaleji pohybujících, vrstev vzhůru, mají menší hybnost, než molekuly přecházející z horních, tedy rychleji se pohybujících vrstev. [2,15] Při proudění vzduchu tak dochází k přenosu hybnosti směrem z horních vrstev do dolních. Velikost hybnosti při jejím přenosu můžeme vyjádřit vztahem [6]

$$dp = -\eta \frac{dv}{dy} dS dt, \quad (17)$$

kde  $\eta$  je koeficient vnitřního tření,  $\frac{dv}{dy}$  je gradient rychlosti způsobený rozdílem tlaků,  $dS$  element plochy,  $dt$  změna času.

Záporné znaménko vyjadřuje, že přenos hybnosti probíhá v opačném směru než vzrůst rychlosti. Při přenosu hybnosti mezi jednotlivými vrstvami se tedy mění hybnost jednotlivých vrstev. Podle druhého Newtonova pohybového zákona tak

musí na každou vrstvu působit síla, která je rovna změně její hybnosti za jednotku času. Této síle, působící mezi sousedními vrstvami vzduchu, říkáme síla vnitřního tření a je rovna veličině určující tok hybnosti

$$\phi_p = \frac{dp}{dt} = -\eta \frac{dv}{dy} dS = dF_t. \quad (18)$$

Pokud zavedeme hustotu toku hybnosti vztahem

$$\frac{\phi_p}{dS} = -\eta \frac{dv}{dy} = \frac{dF_t}{dS} = \sigma_t, \quad (19)$$

dostaneme veličinu tečné napětí  $\sigma_t$ , které je rovno tečné síle působící mezi vrstvami vztažené na jednotku plochy. Existence tečného napětí  $\sigma_t$  je příčinou vnitřního tření vzduchu a dalších tekutin. [6]

Velikost vnitřního tření můžeme měřit silou  $F$ , které je zapotřebí, aby se plocha  $S$  obklopená vzduchem, ležící ve vzdálenosti  $z$  od klidné plochy (např. vodní hladiny), pohybovala vzhledem k ní rychlostí  $v$ . Pro velikost této síly platí vztah

$$F = \eta S \frac{v}{z}, \quad (20)$$

který představuje Newtonův zákon viskozity. Tekutiny, které se řídí tímto zákonem, se nazývají newtonovské. Mezi ně patří všechny plyny, páry, voda a další běžné kapaliny. Konstanta úměrnosti  $\eta$  je dynamický součinitel vnitřního tření (dynamická viskozita), jeho jednotkou je Pa·s (pascal sekunda). Dynamická viskozita závisí na druhu tekutiny a na teplotě, u plynů s rostoucí teplotou roste, u kapalin klesá. [6]

- **Turbulence** je nejčastějším typem proudění, které vzniká při proudění o vyšších rychlostech nebo nad aerodynamicky drsným prostředím (členitý georeliéf, zastavěné plochy, apod.). Turbulentní proudění je charakterizováno víry, které mohou vzniknout tedy v důsledku mechanické příčiny – drsnosti povrchu, ale také v důsledku nestability teplotního zvrstvení atmosféry. [15] „Tzv. mechanická turbulence je v mezní vrstvě atmosféry způsobena třením proudícího vzduchu o zemský povrch, které vytváří vertikální gradient velikosti rychlosti proudění.“ [3, str. 73] Tento gradient se projevuje turbulentním přenosem hybnosti od výše ležících, a tedy rychleji pohybujících se vrstev vzduchu směrem dolů. Termická

turbulence je důsledkem nestálého teplotního zvrstvení. Její vlastní příčinou jsou archimedovské síly, které se uplatňují v poli turbulentních fluktuací teploty vzduchu. Termickou turbulenci lze v tomto smyslu považovat za příklad termické konvekce (viz. konvekce), ale je třeba odlišovat ji od tzv. uspořádané termické konvekce. Turbulentní proudění je charakterizované tzv. turbulentními víry různých velikostí, které se pohybují chaoticky uvnitř proudícího vzduchu. Velikost a směr rychlosti vzduchu v určitém bodě se nepravidelně mění. Proudnice mají v případě turbulentního proudění zcela nepravidelný tvar a mění se rychle s časem. V případě turbulentního proudění, jsou síly tření působící v proudícím vzduchu o několik řádů větší, než vazké třecí síly působící při laminárním proudění. [2,3]

O druhu proudění rozhoduje hodnota bezrozměrné veličiny Reynoldsova čísla  $R$  dané vztahem

$$R = \frac{d\rho v}{\eta} = \frac{dv}{\nu}, \quad (21)$$

kde  $d$  je charakteristický lineární rozměr (orientační odhad tloušťky mezní vrstvy atmosféry),  $v$  střední rychlost proudění,  $\rho$  hustota vzduchu,  $\eta$  dynamická viskozita,  $\nu$  kinematická viskozita (podíl dynamické viskozity a hustoty vzduchu).

Pokud je Reynoldsovo číslo menší než jeho kritická hodnota ( $R < R_k$ ), jde o proudění laminární. Pokud dosáhne, či překročí kritickou hodnotu ( $R \geq R_k$ ), nastává proudění turbulentní.

„Pro reálnou mezní vrstvu atmosféry Reynoldsovo číslo přesahuje řádově kritickou hodnotu pro přechod od laminárního proudění k proudění turbulentnímu.“ [3, str. 71] V mezní vrstvě atmosféry se tedy prakticky vždy budeme setkávat s turbulentním prouděním. Výjimku tvoří jen tzv. laminární podvrstva (nejčastěji tloušťky řádově  $10^{-3}$  m a méně), která se vytváří nad již zmíněným aerodynamicky hladkým povrchem (např. klidnou vodní hladinou, uhlazenou sněhovou pokrývkou). [3,6]

- **Konvekce** představuje výstupné a kompenzační sestupné proudění vzduchu podmíněné teplotními rozdíly. Dochází k ní během letních slunečních dnů, kdy dochází k nerovnoměrnému zahřátí nestejnorožného zemského povrchu. Vzduch nad teplejšími místy se ohřívá a rozpíná, klesá jeho hustota a vlivem působení vzniklé

archimedovské aerostatické vztlakové síly začíná stoupat směrem vzhůru. Velikost této síly odvodíme pomocí Archimedova zákona, který říká, že těleso ponořené do tekutiny (zde uvažujeme vzduch) je nadlehčováno vztlakovou silou, jejíž velikost se rovná tíze tekutiny stejného objemu, jako je objem ponořeného tělesa.

Na molekuly ve vzduchu působí Země tíhovou silou [4]

$$F_G = m_m g = \rho_m V g, \quad (22)$$

kde  $\rho_m$  je hustota vystupujících ohřátých molekul,  $V$  jejich objem a  $g$  tíhové zrychlení.

Na tyto molekuly působí okolní vzduch vztlakovou silou

$$F_{Vz} = m_{Vz} g = \rho_{Vz} V g, \quad (23)$$

kde  $\rho_{Vz}$  je hustota okolního studeného vzduchu. [4]

Protože ohřáté molekuly mají menší hustotu a tedy i menší hmotnost, je tíhová síla, která na ně působí menší než vztlaková. Rozdíl těchto sil je

$$F_{Vz} - F_G = \rho_{Vz} V g - \rho_m V g = V g (\rho_{Vz} - \rho_m). \quad (24)$$

Můžeme také vypočítat vertikální zrychlení vystupujících molekul. Uvažujeme-li jednotkový objem  $V = 1 \text{ m}^3$  a vyjádříme-li velikost síly jako součin hmotnosti vystupujících ohřátých molekul a zrychlení, dostaneme vztah

$$m_m a = V g (\rho_{Vz} - \rho_m) \quad (25)$$

a po dosazení za  $m_m$  dostaneme

$$\rho_m V a = V g (\rho_{Vz} - \rho_m), \quad (26)$$

tedy pro velikost zrychlení dostaneme

$$a = \frac{g(\rho_{Vz} - \rho_m)}{\rho_m}. \quad (27)$$

Budeme-li chtít vypočítat zrychlení podle některé měřitelné veličiny (např. teploty), budeme uvažovat vzduch jako ideální plyn, tedy můžeme použít stavovou rovnici

$$pV = nRT \quad (28)$$

a z ní vyjádřit hustotu pro molární hmotnost  $1 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (29)$$

kde  $p$  je tlak,  $R$  je molární plynová konstanta,  $T$  termodynamická teplota. [4]

Po dosazení do vztahu (27) s příslušnými indexy dostaneme pro zrychlení

$$a = \frac{g\left(\frac{p}{RT_{vz}} - \frac{p}{RT_m}\right)}{\frac{p}{RT_m}}. \quad (30)$$

Protože je tlak stejný uvnitř částice i v jejím okolí, můžeme  $p$  i  $R$  zkrátit a po úpravě dostaneme rovnici pro zrychlení vystupujících molekul vzduchu ve tvaru

$$a = g \frac{T_m - T_{vz}}{T_m}. \quad (31)$$

$T_m$  je teplota vystupujících molekul vzduchu v termickém proudu,  $T_{vz}$  je teplota okolního vzduchu.

Z tohoto vztahu vidíme, že vertikální zrychlení vystupujících molekul závisí na teplotním rozdílu mezi vystupujícími molekulami a okolním vzduchem. Platí tedy, že čím vyšší teplotu budou molekuly vůči okolí mít, tím větší zrychlení je bude nutit k výstupu do výšky. [5]

V důsledku překonávání odporu prostředí, tíhového zrychlení a rozpínání se, spotřebovávají stoupající částice vzduchu svoje teplo. Archimedovská vztlaková síla působí do doby, kdy se teplota vystupující vzduchové částice a teplota jejího atmosférického okolí vyrovnají. Výšce, v níž je teplota vystupující částice stejná, jako teplota okolního vzduchu, se říká hladina nulového vztlaku. Zde se vlivem ztráty energie během ochlazování začíná výstupný pohyb zastavovat. Chladnoucí vzduch se na vrcholu výstupného pohybu rozteče do stran a zahájí klesavý pohyb.“ [5, str. 314] „Podle zákona zachování hmoty je množství vzduchu ve stoupavých proudech rovno množství vzduchu v klesavých proudech.“ [5, str. 316]. Některé klesavé proudy proniknou až k zemskému povrchu a nahradí tak vzduch v místě vzniku a odtrhnutí stoupavého proudu. Ten zde opět začne přijímat teplo od podkladu a proces konvekce se opakuje do doby, dokud je nerovnoměrně

prohříváný zemský povrch schopen dodávat dostatek tepla do přízemní vrstvy. [5, 11]

Održený stoupající vzduch má zpravidla tvar komínu a ve výškách kolem 50 až 300 m nad povrchem dochází k jejich spojování do mohutnějších celků. Rychlost výstupných proudů u termické konvekce bývá nejčastěji  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jejich průměr bývá okolo 100 m. Projevy konvekce se často omezují na výšku 1 km-2 km od zemského povrchu, ve výjimečných případech mohou zasáhnout až do tropopauzy. [5, 15]

Termické stoupavé proudy mají většinou dostatek energie k tomu, aby vynesly lehká letadla, větroně či padákové kluzáky do výšky. Proto je konvekce využívána piloty bezmotorových letadel.

## 4.2 Vítr

Vítr patří mezi významné meteorologické prvky. Větrem rozumíme přemísťování vzduchu vzhledem k zemskému povrchu, vznikající v důsledku existence tlakového gradientu. Tlakový gradient je vektor, jehož vertikální složku považujeme za rovnovážnou s tíhovým zrychlením a horizontální složku měříme ve směru od vyššího k nižšímu tlaku. Proudění vzduchu neboli vítr, tedy vzniká v důsledku působení síly horizontálního tlakového gradientu. [5]

### 4.2.1 Příčiny pohybu vzduchu

Protože na různých místech zemského povrchu existují různé hodnoty atmosférického tlaku redukovaného na hladinu moře a hladiny s konstantním tlakem v atmosféře zpravidla neleží v konstantní nadmořské výšce, vznikají v ovzduší horizontální složky **síly tlakového gradientu**. Tyto síly mají tendenci vyrovnávat rozdíly atmosférického tlaku a vytvářet tak horizontálně homogenní tlakové pole. Kdyby v horizontální rovině na vzduchové částice nepůsobila žádná další síla, částice by se pohybovaly kolmo na izobary do oblasti s nižším atmosférickým tlakem. Docházelo by tedy k vyrovnávání horizontálních tlakových rozdílů a nedocházelo by k dlouhodobějšímu trvání tlakových útvarů. Příčinou vyvolávající pohyb vzduchu není ale pouze síla horizontálního tlakového gradientu, která uděluje objemu vzduchu zrychlení, ale na pohybující částice vzduchu působí i další faktory. [3]

Jedním z nich je **Coriolisova síla** (uchylující síla zemské rotace). Tato síla je přímo úměrná rychlosti pohybu vzduchu a závisí na zeměpisné šířce daného místa. Na pólech je její hodnota největší, na rovníku, kde je zeměpisná šířka nulová, je rovna nule. Její velikost vyjadřuje vzorec

$$F_c = 2\omega \times v \times \sin\varphi, \quad (32)$$

kde  $\omega$  je úhlová frekvence,  $v$  rychlost pohybu,  $\varphi$  zeměpisná šířka. [15]

Coriolisova síla působí vždy kolmo na směr pohybu částice. Na severní polokouli tato síla stáčí trajektorii pohybu částic doprava, na jižní polokouli doleva. [11]

Coriolisova síla působí, dokud se neustanoví rovnováha, při které jsou horizontální složky síly tlakového gradientu a Coriolisovy síly stejně velké, ale opačného směru. Poté se částice vzduchu pohybuje podél přímkových izobar. Takový pohyb vzduchu nazýváme geostrofický vítr. Rychlost tohoto větru je přímo úměrná horizontálnímu gradientu tlaku. Takové proudění nastává ve vysokých výškách v tzv. volné atmosféře. [5]

Skutečný vítr se však od geostrofického liší, protože pohybující částice vzduchu podléhají působení dalších dvou sil - síly odstředivé a třecí. **Odstředivá síla** působí na vzduchové částice, které se pohybují po zakřivených drahách. Tato síla působí na pohybující se částice směrem kolmo od osy otáčení a snaží se vyrovnávat jejich dráhu. Velikost této síly lze, pokud uvažujeme kruhovou dráhu, vyjádřit vztahem

$$F_{od} = m\omega^2 r = m \frac{v^2}{r}, \quad (33)$$

kde  $m$  je hmotnost pohybující částice,  $r$  poloměr kružnice,  $v$  velikost rychlosti částice,  $\omega$  její úhlová rychlost. [4]

Tedy čím větší bude mít částice rychlost, tím větší odstředivá síla na ni bude působit.

V mezní vrstvě atmosféry se mimo horizontálních složek síly tlakového gradientu, Coriolisovy a odstředivé síly uplatňuje významně také **třecí síla**, která působí proti směru pohybu částic a mění tak směr a rychlost proudění vzduchu. Vítr potom vane tak, aby byla přibližně zachována rovnováha mezi horizontálními složkami síly tlakového gradientu, Coriolisovy síly a silou tření. V mezní vrstvě atmosféry bývá proto rychlost větru nižší než ve volné atmosféře. [3]

#### 4.2.2 Beaufortova stupnice

Beaufortova stupnice je stupnice pro odhad rychlosti větru bez užití přístrojů tj. podle účinků větru na různé předměty nebo objekty v krajině. Původní stupnice z let 1805 až 1808 sestavená F. Beaufortem se týkala pouze odhadu síly větru na moři. Sloužila tak k určení vhodnosti plavby při určitém počtu a druhu plachet tehdejších válečných lodí. V roce 1923 byla standardizována a používá se k odhadu rychlosti větru podle pozorovatelných jevů i na souši. Beaufortova stupnice je rozdělena do 13 stupňů. Jednotlivé stupně jsou definované rozsahem rychlostí větru měřených ve výšce 10 m nad zemským povrchem. [11, 16]

**Tab. 13:** Beaufortova stupnice rychlosti větru. (převzato z [11], str. 37-38).

| Stupeň | Vítr               | Rychlost<br>[m·s <sup>-1</sup> ] | Rychlost<br>[km·h <sup>-1</sup> ] | Projevy na souši                                                        |
|--------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 0      | Bezvětrí           | 0,0 až 0,2                       | < 1                               | kouř stoupá kolmo vzhůru                                                |
| 1      | Vánek              | 0,3 až 1,5                       | 1 až 5                            | směr větru je poznatelný podle pohybu kouře                             |
| 2      | Slabý vítr         | 1,6 až 3,3                       | 6 až 11                           | listí stromů šelestí, vítr je cítit ve tváři                            |
| 3      | Mírný vítr         | 3,4 až 5,4                       | 12 až 19                          | listy stromů a větvičky jsou v trvalém pohybu, slabě čeří vodní hladinu |
| 4      | Dostí čerstvý vítr | 5,5 až 7,9                       | 20 až 28                          | zdvihá prach a útržky papíru                                            |
| 5      | Čerstvý vítr       | 8,0 až 10,7                      | 29 až 38                          | listnaté keře se začínají hýbat                                         |
| 6      | Silný vítr         | 10,8 až 13,8                     | 39 až 49                          | telegrafní dráty sviští, používání deštníků je nesnadné                 |
| 7      | Prudký vítr        | 13,9 až 17,1                     | 50 až 61                          | chůze proti větru je nesnadná, vítr pohybuje celými stromy              |
| 8      | Bouřlivý vítr      | 17,2 až 20,7                     | 62 až 74                          | ulamují se větve, chůze proti větru je téměř nemožná                    |
| 9      | Vichřice           | 20,8 až 24,4                     | 75 až 88                          | vítr strhává komíny, tašky ze střech                                    |
| 10     | Silná vichřice     | 24,5 až 28,4                     | 89 až 102                         | vyvrací stromy, působí větší škody na obydlích                          |
| 11     | Mohutná vichřice   | 28,5 až 32,6                     | 103 až 117                        | způsobuje rozsáhlá pustošení, velké škody v lesích, na domech           |
| 12     | Orkán              | > 32,6                           | > 117                             | ničivé účinky                                                           |



## Kontrolní otázky

### 1. Jaký je rozdíl mezi laminárním a turbulentním prouděním?

Při laminárním proudění jsou vektory rychlostí proudící tekutiny v daném průřezu rovnoběžné. Rovněž jsou rovnoběžné proudnice zobrazující trajektorie jednotlivých částic tekutiny. Při turbulentním proudění se vytváří v tekutině víry. Proudnice mají v případě turbulentního proudění zcela nepravidelný tvar a mění se rychle s časem. Při turbulentním proudění působí proti směru pohybu větší odporová síla než při laminárním. [4]

### 2. Proč je u těles proudnicového (aerodynamického) tvaru malý odpor prostředí? [12]

Proudění kolem těchto těles je téměř laminární, nedochází k tvoření vírů a tedy turbulentního proudění za tělesem. Protože je odporová síla působící proti směru relativního pohybu tělesa v tekutině malá, konstruuji se v tomto tvaru trupy letadel, lodí, či karoserie automobilů.

### 3. Jak vzniká vítr?

Proudění vzduchu neboli vítr vzniká v důsledku působení síly horizontálního tlakového gradientu. Tato síla má tendenci vyrovnávat rozdíly atmosférického tlaku, které vznikají v důsledku nerovnoměrného zahřívání jednotlivých míst zemského povrchu a vzduchu nad ním. Větší teplotní rozdíly vedou k větším rozdílům v tlaku vzduchu a tím k větrnějšímu počasí. [3]

### 4. Proč silný vítr zvedá lehké předměty (papíry, listy, apod.) vysoko nad zem? [12]

Podle Bernoulliho rovnice (viz. [4]) působí vlivem velké rychlosti větru na povrch předmětů menší tlak vzduchu než je atmosférický tlak. Protože pod předmětem zůstává stejný atmosférický tlak, tlakový rozdíl vyvolá vztlak. Na spodní stranu tak působí aerodynamická vztlaková síla, která je větší než tíhová síla a působí opačným směrem.[12]

## 5. Tryskové proudění - JET STREAM

Tryskové proudění neboli jet stream jsou pásy rychle proudícího vzduchu dlouhé obvykle kolem 3 000 km, široké 370 km, hluboké 3,5 km. Nachází se v oblastech ve výškách 6-12 km od zemského povrchu, jsou tedy soustředěny podél téměř horizontální osy v horní troposféře a stratosféře. Proudící vzduch zde dosahuje rychlostí od  $110 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  do  $700 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Většina jet streamů směřuje směrem od západu, v rovníkové oblasti se vyskytuje ale také jet stream směřující od východu. [33]

### 5.1 Vznik jet streamu

Tryskové proudění je vyvoláno velkými teplotními rozdíly dvou vzduchových hmot. Pro oblast výskytu je tedy charakteristické sblížení teplých a studených vzduchových hmot – atmosférických front. V teplé vzduchové hmotě je velký gradient tlaku vzduchu, oproti malému gradientu tlaku ve studené frontě. Atmosféra se tak snaží rozdíly tlaku vyrovnávat. Čím je rozdíl tlaků větší, tím rychleji se vzduch přemísťuje a vzniká tak silné proudění o vysokých rychlostech. Na severní polokouli se následkem působení Coriolisovy síly odchyluje doprava, proto tento jet stream směřuje nejčastěji od západu na východ. [13]

### 5.2 Druhy jet streamu

Podle oblasti výskytu se rozlišují čtyři základní tryskové proudy. [33, 35]

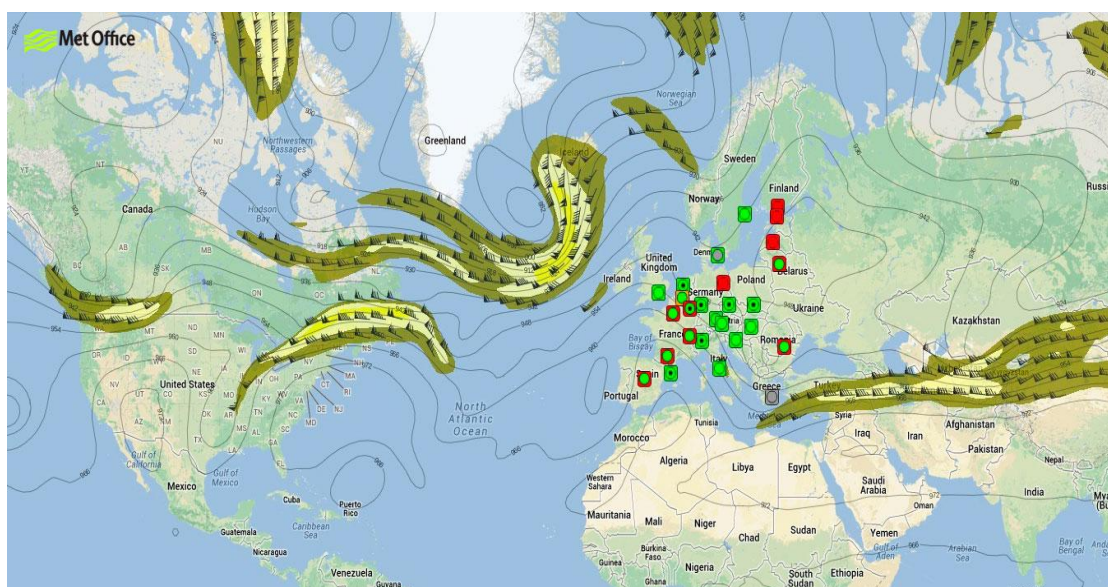
**Subtropický** jet stream se tvoří v oblastech subtropických anticyklon. Jejich místa výskytu nejsou trvalá – během roku zeměpisná šířka jejich výskytu kolísá. Vyskytuje se na obou polokoulích. V zimě v zeměpisných šířkách  $25^\circ$  až  $40^\circ$ , v létě v oblastech  $40^\circ$  až  $45^\circ$ . Proudí směrem ze západu.

**Polární** jet stream se vyskytuje na obou polokoulích v oblasti  $40^\circ$  až  $65^\circ$  s. š., a v oblasti  $50^\circ$  j. š. Jsou obklopeny teplým vzduchem. Proudění má směr ze západu na východ, dosahuje průměrných rychlostí  $280 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , byly však zaznamenány i velikosti rychlostí  $650 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Vyskytuje se během celého roku.

**Tropický východní (rovníkový) jet stream**, představující silné východní proudění ve výšce 13-14 km, které se vyskytuje na severní polokouli mezi 10° až 20° s. š., kde je velký teplotní rozdíl mezi intenzivně zahřívanou pevninou a okolním vzduchem. Nachází se nad Jihočínským mořem a směřuje na západ přes jižní Indii, Etiopii a tropickou Afriku. Vyskytuje se pouze v letním období.

**Arktický jet stream** se nachází nad pevninou Kanady a USA v oblastech 45° až 50° s. š., a dále na severu v oblastech 60° s. š. Vyskytuje se pouze v zimním období a jeho směr proudění je od západu.

Jiné lokální tryskové proudy, vyskytující se např. nad východní Afrikou, mohou vzniknout v důsledku místních teplotních nebo dynamických okolností. Nad východem Asie a přilehlým Tichým oceánem byly zaznamenány hodnoty rychlostí tryskového proudění kolem  $550 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , v této oblasti je tedy tryskové proudění silnější než nad Atlantským oceánem, kde bývá jeho rychlost kolem  $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . [5, 33, 35]



**Obr. 1:** Výskyt jet streamu 6. července 2013. (převzato z [24])

V zimě (na severní polokouli) se poloha všech jet streamů posouvá více na sever, v létě (na severní polokouli) se posouvají více k jihu. Tyto změny polohy jejich výskytu jsou výraznější nad kontinenty než nad oceány. [5]

Oblast výskytu jet streamu můžeme rozpoznat podle rozfoukaných obláčků typu cirrus, které jsou protažené ve směru proudění a zahnuté přibližně v pravém úhlu k mrakům na nižších úrovních. (obr. 2)



**Obr. 2:** Pohled na jet stream z kosmického prostoru. (převzato z [17])

### 5.3 Důsledky a využití jet streamu

Jet stream výrazně ovlivňuje doby letů. Je známo, že např. při transatlantických letech z Ameriky do Evropy, kdy letadlo letí ve směru proudění jet streamu, je doba letu kratší než opačným směrem. Nejen pro časové úspory, ale také pro snížení letových nákladů se piloti snaží tryskové proudění využívat.

V oblastech, kde se vyskytují jet streamy, tj. v oblastech silných výškových větrů, vzniká však důsledkem tření jednotlivých vzduchových vrstev s různou rychlostí, teplotou a směrem proudění silná dynamická turbulence čistého ovzduší (turbulence bezoblačného prostředí). V těchto oblastech dochází vlivem zmíněného tření vzduchových vrstev ke vzniku vírů, které dynamickou turbulenci způsobují. „Například při letech z Evropy do USA, je známo, že při přiletu k severoamerickému pobřeží přes Atlantský oceán se zde v zimě velmi často vyskytuje silná turbulence, spojená právě s existencí jet streamu na rozhraní arktického kontinentálního vzduchu nad Kanadou

a severem USA, a teplého oceánského vzduchu nad teplým Golfským proudem v Atlantiku.“ [5, str.160] Pro leteckou dopravu mohou být tyto turbulence nebezpečné, proto nebývá využívána nejsilnější oblast proudění jet streamu, ale pouze jeho okrajů. Předpověď a analýza tryskového proudění je tedy kvůli ekonomickým a časovým úsporám, ale také právě kvůli výskytu nebezpečných turbulencí důležitým oborem letecké meteorologie. [5, 35]

Tryskové proudění neovlivňuje pouze leteckou dopravu, ale má také vliv na počasí v Evropě a Asii, neboť “popohání“ tlakové útvary, které se tak nemohou udržet na jednom místě a způsobit dlouhodobé extrémy počasí. Na rozhraní polárního a tropického vzduchu se však mohou vytvořit tzv. Rossbyho vlny (vznikající působením Coriolisovy síly) opačného směru než směřuje tryskové proudění, mohou ho tedy zastavit. Tlakové útvary v tomto případě zůstanou nad určitým místem a v důsledku dlouhodobě stejného rozložení atmosférického tlaku způsobí extrémní počasí. [21]

Také neobvyklé počasí panující během letošní zimy na obou stranách Atlantského oceánu je dáváno do souvislosti se změnami tryskového proudění na severní polokouli. Podle výzkumů vědců z Rutgers University v New Jersey změnil jet stream svou trasu, která je nyní delší a meandruje. „Nad Severní Amerikou se přitom proudění stáčí od severu na jih, kam vhání chladné počasí, zatímco nad Atlantikem vybírá zatáčku a vrací se od jihu k severu, takže do Evropy posílá teplý vzduch.“ [44] Je tedy možné, že tryskové proudění může mít vliv na neobvyklé počasí letošní zimy – za dlouhotrvající mrazivé počasí s množstvím sněhových bouří v USA, bouře a záplavy ve Velké Británii a nezvykle mírné až jarní počasí ve středu Evropy.

## Kontrolní otázky

### 1. Jaké jsou hlavní důsledky tryskového proudění-jet streamu?

V oblastech výskytu jet streamu vzniká silná turbulence, která je pro letadla nebezpečná. Jet stream ovlivňuje doby letů. Má také vliv na počasí (nejen) v Evropě.

### 2. Jak jet stream ovlivňuje dobu letu z Evropy do Severní Ameriky a zpět?

Při letech z Evropy do Severní Ameriky letí letadlo proti směru proudění jet streamu. Přestože se plánují trasy, na kterých se piloti snaží maximálnímu působení jet streamu vyhnout, jet stream výrazně prodlužuje dobu letu. Pokud letí letadlo opačným směrem, tedy ze západu na východ, letí ve směru působení jet streamu, kterého s výhodou využívá. Doba letu je tedy kratší.

V tabulce č. 14 jsou pro názornost náhodně vybrány přesné doby odletů a příletů z letového řádu společnosti Air France [18] ve směrech Paříž (letišť Charles de Gaulle) – New York (letišť John F. Kennedy) a zpět.

**Tab. č. 14:** Doby odletů, příletů a průměrné doby letů.

| Z Paříže do New Yorku |                       |                                      | Z New Yorku do Paříže |                      |                                      |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|
| odlet                 | přílet                | doba letu                            | odlet                 | přílet               | doba letu                            |
| 22. 10. 2013<br>14:10 | 22. 10. 2013<br>16:16 | 8 h 6 min                            | 27. 11. 2013<br>16:21 | 28. 11. 2013<br>5:14 | 6 h 53 min                           |
| 27. 11. 2013<br>14:28 | 27. 11. 2013<br>16:59 | 8 h 31 min                           | 5. 2. 2014<br>16:27   | 6. 2. 2014<br>4:58   | 6 h 31 min                           |
| 5. 2. 2014<br>14:35   | 5. 2. 2014<br>17:26   | 8 h 51 min                           | 7. 2. 2014<br>16:26   | 8. 2. 2014<br>4:52   | 6 h 26 min                           |
| 6. 2. 2014<br>14:11   | 6. 2. 2014<br>16:50   | 8 h 39 min                           | 10. 2. 2014<br>16:25  | 11. 2. 2014<br>4:59  | 6 h 34 min                           |
| 11. 2. 2014<br>14:16  | 11. 2. 2014<br>16:41  | 8 h 25 min                           | 22. 2. 2014<br>16:36  | 23. 2. 2014<br>5:02  | 6 h 26 min                           |
| 12. 2. 2014<br>14:21  | 12. 2. 2014<br>16:47  | 8 h 26 min                           | 23. 2. 2014<br>16:30  | 24. 2. 2014<br>5:06  | 6 h 36 min                           |
| 22. 2. 2014<br>14:44  | 22. 2. 2014<br>17:17  | 8 h 33 min                           | 28. 2. 2014<br>16:23  | 1. 3. 2014<br>4:58   | 6 h 35 min                           |
|                       |                       | průměrná<br>doba letu:<br>8 h 30 min |                       |                      | průměrná<br>doba letu:<br>6 h 34 min |

Uvedené doby byly vyhledány pro stejné číslo letu a stejný typ letadla v různých dnech, a to z Paříže do New Yorku let číslo AF 006 typ letadla Boeing 777-300ER. Z New Yorku do Paříže let číslo AF 023 typ letadla Boeing 777-200ER.

## 6. TROPICKÉ CYKLONY

Tropické cyklony patří na naší planetě mezi nejnebezpečnější přírodní živly. Každý rok jich nad oceány vzniká kolem osmdesáti. Dostanou-li se nad pevninu, mají ničivé účinky. „Tropickými cyklony nazývají meteorologové atmosférické poruchy (víry) vyznačující se extrémně nízkým tlakem, orkánovými větry a lijáky.“ [7, str. 44] Tropické cyklony se od cyklon vyskytujících v mírných zeměpisných šířkách liší mnohem větší silou, způsobenou velkými horizontálními gradienty tlaku vzduchu, a také mnohem většími horizontálními rozměry. Průměr tropické cyklony je řádově v desítkách až stovkách kilometrů. Podle intenzity tropické cyklony a rychlosti větru, který je doprovází, se stádia tropické cyklony rozdělují na tropickou poruchu (slabá cyklonální cirkulace), tropickou níži (rychlost větru do  $12,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), tropickou bouři (rychlost větru do  $33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a na tropickou cyklonu s největší intenzitou (centrum s velmi nízkým tlakem vzduchu a silnými větry přesahující rychlost  $33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). V tropických cyklonách dosahují rychlosti větru často hodnot  $180\text{--}290 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a jsou doprovázeny extrémními přívalovými srážkami. [7, 11]

V různých oblastech Země se tropické cyklony označují různými místními názvy. V severní části Atlantského oceánu, v USA a na Karibských ostrovech se tropická cyklona nazývá **hurikán**, v oblastech Tichého oceánu, Jihočínského moře **tajfun**, v severní oblasti Indického oceánu **cyklón**, v oblasti Austrálie **willy-willy**, v oblasti Filipín **baguio**. [7]

### 6.1 Podmínky pro vznik

Tropické cyklony vznikají v oblastech převážně mezi  $5^\circ$  a  $20^\circ$  severní a jižní zeměpisné šířky. Důvodem je podmínka dostatečné velikosti Coriolisovy síly, která způsobuje vznik spirálového pohybu teplé vodní páry a vzduchu u vodní hladiny. [7, 28]

Tropické cyklóny vznikají nad hladinou oceánu, když teplota na hladině oceánu dosahuje alespoň hodnot  $26,5^\circ\text{C}$ . Tato podmínka je nutná proto, aby množství páry ve vzduchu bylo dostatečně vysoké, a tedy entalpie (tepelný obsah) vzduchu byla dostatečná pro vytvoření spirálového proudění. [28]

V nižších vrstvách atmosféry musí být tečná (cyklonová) rychlost alespoň  $2\text{--}3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , aby nastala změna původního směru proudění. [28]

Ve středních vrstvách troposféry (2-8 km) musí být vyšší vlhkost vzduchu, aby nevyschl mrak stoupajícího vlhkého vzduchu. [28]

Původní proudění v jádře směrem vzhůru, se musí změnit tak, aby středem jádra klesal chladný vzduch bez vodní páry. Pokud jsou všechny tyto podmínky současně splněny, může tropická cyklona vzniknout a dále se rozvíjet. [28]

## 6.2 Vznik tropického cyklonu

Na povrchu vod oceánů dochází za každé teploty, při které existuje kapalné skupenství k **vypařování** - přeměně kapaliny v páru. Tento proces lze vysvětlit takto: molekuly kapaliny jsou v neustálém neuspořádaném pohybu. Pokud mají některé molekuly blízko jejího povrchu takovou kinetickou energii, že jsou schopny překonat kohezní síly, které je poutají k ostatním molekulám, pak tyto molekuly unikají do prostoru nad kapalinou a vytváří plynné skupenství zvané pára. Tato vzniklá pára difunduje se vzduchem nad oceánem. V důsledku tepelného pohybu se některé molekuly, které kapalinu opustily, opět do ní vrací. Počet těchto molekul je při procesu vypařování však menší, než těch, které za stejnou dobu kapalinu opustily. Kapaliny tedy ubývá a zvětšuje se hmotnost páry. Protože při vypařování kapalinu opouštějí molekuly s největší rychlostí, zmenšuje se střední kinetická energie zbylých molekul v kapalině. Toto se projevuje poklesem teploty kapaliny. Vypařující se kapalina má tedy vždy poněkud nižší teplotu, než je teplota okolí. Vzniklá pára má však teplotu rovnou teplotě kapaliny protože molekuly, které ji tvoří, svou přebytkovou kinetickou energii spotřebovaly na překonání přitažlivých sil při opouštění kapaliny. Tyto molekuly mají ale vyšší potenciální energii. Vnitřní energie páry dané hmotnosti je tedy větší než vnitřní energie kapaliny téže hmotnosti a teploty. Teplo, které musíme kapalině dodat, aby se přeměnila na páru téže teploty, se nazývá skupenské teplo vypařování a značí se  $L_v$ . Jeho jednotkou je joule. Pro různé kapaliny o stejné hmotnosti je hodnota skupenského tepla vypařování různá, proto se zavádí veličina měrné skupenské teplo vypařování  $l_v$ , kterou definujeme vztahem

$$l_v = \frac{L_v}{m}, \quad (33)$$

kde  $m$  je hmotnost kapaliny. Měrné skupenské teplo vypařování je tedy číselně rovno množství skupenského tepla vypařování, které musíme dodat 1 kg kapaliny, aby se



přeměnila v 1 kg plynu o téže teplotě. Jednotkou měrného skupenského tepla vypařování je joule na kilogram. S rostoucí teplotou kapaliny klesá měrné skupenské teplo vypařování. Pro vodu o tlaku  $10^5$  Pa a teplotě  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  je  $l_v = 2,51\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , pro teplotu  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  je  $l_v = 2,26\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Platí, že rychlost vypařování kapaliny se zvýší, zvýší-li se teplota kapaliny a zvětší-li se obsah jejího povrchu. Rychlost vypařování závisí také na druhu kapaliny, na tlaku par nad kapalinou a na pohybu plynu nad kapalinou. [1]

Při výstupných proudech teplého a vlhkého vzduchu nad hladinou oceánu dochází ve výškách o nižší teplotě vzduchu ke **kondenzaci** vodní páry obsažené ve vlhkém vzduchu. Kondenzace (kapalnění) je opačný děj k vypařování. Při tomto ději se pára v důsledku zmenšování svého objemu nebo snižováním své teploty mění v kapalinu. Při tom se do okolí uvolňuje skupenské teplo kondenzační. Pro stejnou látku za dané teploty a tlaku má měrné skupenské teplo kondenzační stejnou velikost jako měrné skupenské teplo vypařování. Částice, na kterých začíná kondenzace, se nazývají kondenzační jádra, nejčastěji jsou to částice prachu, pylová zrnka, ionty atd. Ke kondenzaci dochází při nasycení vzduchu vodní párou, tedy když relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %, nebo při jeho ochlazení na teplotu rosného bodu. Teplota rosného bodu je teplota, na kterou bychom museli izobaricky ochladit vzduch, při nezměněné absolutní vlhkosti vzduchu, aby se vodní pára v něm obsažená stala sytou vodní párou. Vzduch za určité teploty však může pojmout jen určité množství vodní páry, při ochlazení pod teplotu rosného bodu tedy začíná přebytečná vodní pára kondenzovat. Při tomto ději dochází ke spojování molekul páry v mikroskopické kapky, které mají tendenci shlukovat se do větších oblačných kapek nebo ledových krystalků, které postupně rostou. Na chladných předmětech se vytváří rosa, nad povrchem země mlha a ve větších výškách mraky. [1, 11, 15]

Vznik cyklony můžeme popsat tedy takto:

Na povrchu vod oceánů dochází k vypařování. Při rozpínání vystupujících vzduchových hmot dochází k poklesu teploty. Nastává výše popsaná kondenzace, při které se uvolňuje značné množství skupenského tepla kondenzačního. To způsobuje, že se chladný vzduch ve výšce ohřívá, což vede k jeho rychlejšímu výstupu. Chybějící vzduch v této výšce je nahrazován vlhkým vzduchem z prostoru nad hladinou oceánu. Ten je zase kompenzován proudícím vzduchem přízemní vrstvy atmosféry ze širšího

okolí. U vodní hladiny vzniká spirálový pohyb působením Coriolisovy síly. Tak vzniká uzavřená cirkulace vzduchu, jejíž intenzita závisí na množství dostupné vlhkosti a tepla od hladiny oceánu. [34]

### 6.3 Stavba tropické cyklony

Charakteristické pro tropické cyklony je jejich symetrická stavba. Na synoptických mapách jsou zaznamenány v podobě téměř soustředných kružnic – izobar. Vzdálenost od středu cyklony po poslední uzavřenou izobaru se definuje jako poloměr cyklony. „Poloměry atlantských hurikánů se pohybují v rozmezí 100 km až 140 km, poloměry tajfunů jsou o něco větší, pohybují se od 200 km do 900 km.“ [7, str. 47].

V tropické cykloně se rozlišují čtyři zóny [7].

- 1. Zóna ticha** – tzv. oko cyklóny, nachází se ve středu víru. Její průměr je 18 km až 55 km v závislosti od stádia vývoje. Přítomnost oka udává, že cyklóna dosáhla orkánové rychlosti. Pokud je vertikální osa kolmá na povrch oceánu, má oko cyklóny v horizontálním průřezu kruhový tvar, pokud je vertikální osa nakloněná, oko má tvar oválný. Pro tuto oblast je typický slabý vítr a téměř bezoblačná obloha. Teplota vzduchu v oku cyklónu je v porovnání s okolím vyšší o 6 °C až 15 °C. S rostoucí výškou se rozdíly mezi teplotou oka cyklóny a jeho okolí zvětšují. Bylo zjištěno, že čím je v centru nižší tlak vzduchu, tím je zde jeho teplota vyšší. Tropická cyklóna je tedy tím intenzivnější, čím vyšší je teplota v jejím oku a čím méně je zde oblačnosti.
- 2. Zóna maximálních větrů a prudkých srážek** – bezprostředně přiléhá k oku cyklóny. V této oblasti dosahuje rychlost větru běžně  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  až  $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Oblast široká 30-40 km přiléhající k oku hurikánu, pro niž jsou typické velmi silné srážky, se nazývá vnitřní sféra. Zde dochází k intenzivnímu konvekčnímu proudění teplého vlhkého vzduchu, které je doprovázeno tvorbou oblačnosti, prudkými srážkami a vysokými rychlostmi větrů. K ní přiléhá vnější sféra šířky 100 km, se slabšími srážkami. Tlak vzduchu zde klesá na hodnotu kolem 950 hPa, v extrémních případech i na hodnotu 870 hPa. Pokles tlaku je vysvětlován působením odstředivé síly, která vymršťuje z centra cyklony vzduch při současném malém přílivu vzduchu ze spodních vrstev.

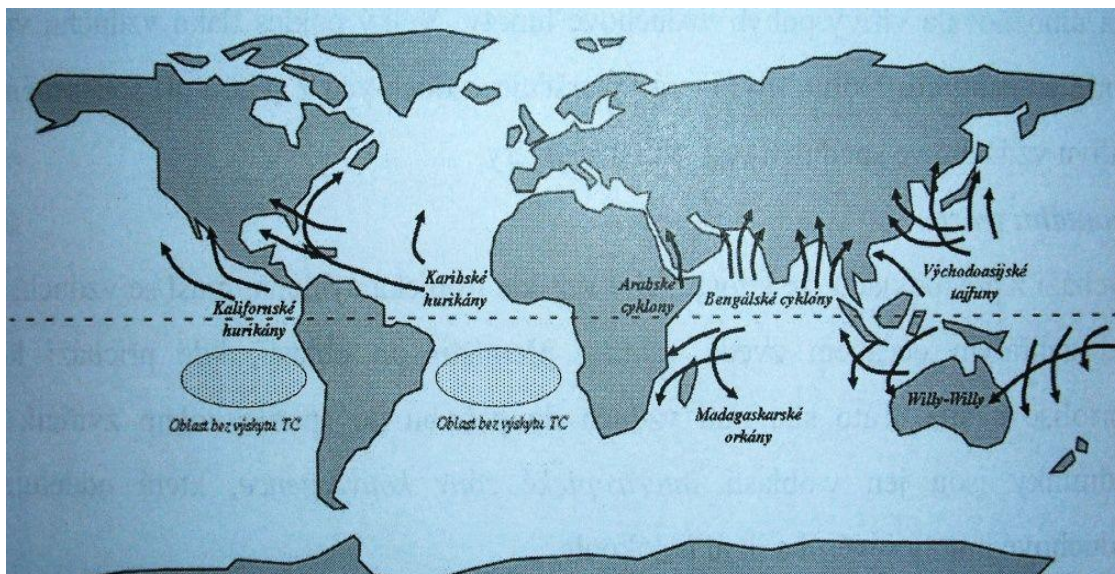
**3. Přechodná zóna** – její šířka je proměnlivá, převládá zde menší pokles tlaku vzduchu, ale intenzita srážek a rychlost větru je stále poměrně vysoká. Vítr dosahuje síly vichřice, v nárazech i orkánové rychlosti.

**4. Vnější zóna** – je charakteristická slabou cyklonální cirkulací. Srážky zde ustávají, rychlost větru slábne.

Ve vertikálním směru sahají tropické cyklóny do výšek 15 km až 18 km. Cyklonální cirkulace slábne s rostoucí výškou. Vzduch přichází do cyklóny ve spodní 3 kilometrové vrstvě atmosféry a ve výškách nad 11 km odtéká z tropické cyklóny ven. Příliv vzduchu do cyklóny je podmíněný rozdílnou hodnotou tlaku ve středu cyklóny a tlaku mimo něj. [7].

## 6.4 Výskyt tropických cyklon

Tropické cyklóny vznikají, jak již bylo řečeno, vždy nad tropickými vodami oceánů, převážně mezi 5° a 20° severní a jižní zeměpisné šířky. Maximum výskytu tropických cyklon je na severní polokouli v červenci až září, na jižní v lednu až únoru. [7] Dráha cyklon závisí na větrném pásu, ve kterém se nachází. Cyklóny vznikající v Atlantském oceánu bývají unášeny východními pasátovými větry v tropech směrem na západ, postupně se stáčí na severozápad do vyšších zeměpisných šířek. V mírných zeměpisných šířkách se stáčí k severovýchodu až východu. Cyklony vznikající v Atlantském oceánu tedy obvykle směřují do USA a Karibské oblasti. Na jižní polokouli se tropické cyklóny stáčí nejdříve jihozápadním směrem, poté na jih až jihovýchod. Cyklony vznikající v oblastech Jihočínského a Východočínského moře zpravidla směřují na Filipíny a do Číny. Cyklóny vznikající v Bengálském zálivu putují směrem do Bangladéše. Dráhy většiny cyklón mají tvar paraboly. Na jižní polokouli existují dvě subtropické oblasti, ve kterých se tropické cyklóny nevyskytují. V jižní části Atlantského oceánu, západně od Afrického kontinentu a ve východní části Tichého oceánu západně od pobřeží jižní Ameriky. V obou případech je příčinou studený oceánský proud, proudící zde z oblastí Antarktidy. Teplota vody zde proto nedosahuje potřebné teploty 26,5 °C. [7]



**Obr. 3:** Dráhy tropických cyklón. (převzato z [7] str. 45)

Tropická cyklona nemusí putovat osamoceně, ale mohou současně existovat dvě nebo i více cyklon. Nad tropickým oceánem se při příznivých podmínkách mohou cyklony udržet až tři týdny, po tuto dobu překonávají obrovské vzdálenosti (až 11 000 km). Pohybují se nejčastěji rychlostmi  $26\text{--}37\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Pokud se však dostanou nad pevninu, dochází rychle vlivem zastavení přísunu energie z teplého oceánu k jejímu zániku. Ten však bývá často spojován s katastrofálním deštěm způsobujícím značné škody. [7, 11]

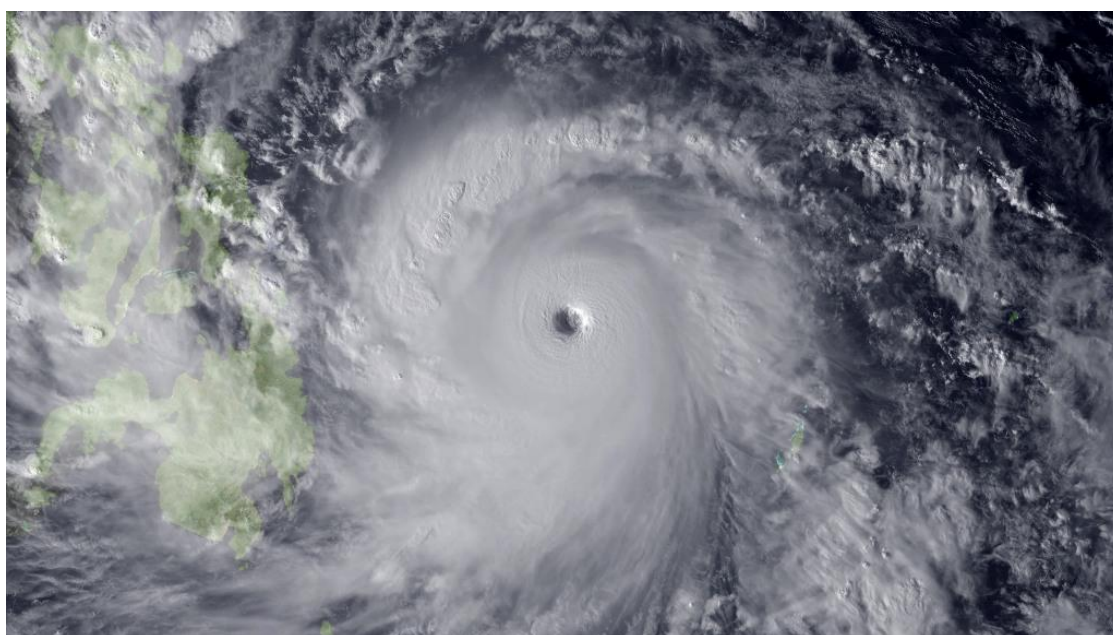
Více než 90 % všech úmrtí, které má tropická cyklona na svědomí není však způsobeno prudkým větrem o rychlostech často i  $200\text{--}300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , ani mohutnými dešti, ale přívalovou vlnou. Vlivem silného větru a velmi nízkého atmosférického tlaku je způsobeno na moři obrovské vzedmutí vody do výšky několika metrů, která po nárazu na pobřeží zaplaví vše, co jí stojí v cestě. [14]

Nejhorší katastrofa zaznamenaná v dějinách způsobená cyklonem nastala dne 12. 11. 1970, kdy se přes Bengálský záliv přehnal cyklon o rychlosti větru  $250\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , přičemž se zvedla 12 m vysoká přívalová vlna, která zasáhla Bangladéš a zabila až půl milionu lidí. Rozsah tohoto cyklonu byl několik stovek metrů a dosahoval 3. stupně Saffir-Simpsonovy stupnice. [14]

K nejničivějším hurikánům v USA patří hurikán 5. stupně Katrina, který na konci srpna roku 2005 způsobil obrovské škody na jihu USA, zničil město New Orleans a vyžádal si přes 1 800 obětí. Severovýchod USA zasáhl v říjnu 2012 hurikán nazvaný Sandy.

Pozoruhodný byl její obrovský plošný rozsah. „Sandy byla tak rozsáhlá, že těsně před svým příchodem nad pobřeží New Jersey dokázala zvednout mořskou hladinu o více než 3,5 metru ještě ve vzdálenosti 800 km od svého centra a vítr o rychlosti kolem  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  bylo možné zaznamenat na území o průměru téměř 1700 km.“ [45]

Jeden z nejsilnějších tropických cyklonů v historii byl tajfun Haiyan (obr. 4), který si vyžádal více než 10 000 obětí. Haiyan zasáhl v listopadu roku 2013 jihovýchodní Asii především Filipíny. „Vítr o rychlosti větru až  $315 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , v nárazech až  $378 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  (podle odhadu amerického námořnictva) doprovázel intenzivní déšť a až 14 metrů vysoké vlny, které pronikaly jeden kilometr hluboko do vnitrozemí.“ [23]



**Obr. 4:** Satelitní snímek tajfunu Haiyan ze dne 7. 11. 2013 (převzato z [23])

Tropická cyklona může výjimečně proniknout až do oblasti mírných zeměpisných šířek, kde její intenzita postupně slábne a může buď zaniknout, nebo se může přeměnit v mimotropickou tlakovou níži. Takové tlakové níže čerpají energii převážně z výrazných teplotních gradientů v atmosféře a jsou příčinou vzniku velmi intenzivních dešťů, zvýšení hladin moří a větrů dosahujících síly hurikánů. Tyto tlakové níže ovlivňují pak cirkulaci nad západní částí evropského kontinentu, ve vzácných případech i ve střední Evropě. [7]

## 6.5 Saffir-Simpsonova stupnice

Síla tropických cyklon se udává pomocí Saffir-Simpsonovy stupnice, kterou vytvořil roku 1969 Herbert Saffir a později dopracoval Robert Simpson. Tato stupnice je rozdělena do pěti kategorií popisujících intenzitu hurikánů a slouží tak k odhadu možných způsobených škod. Určujícím faktorem pro rozdělení do jednotlivých kategorií je rychlost větru při zemském povrchu. [38]

Nejnižší první stupeň označuje slabé hurikány s rychlostí větru od  $119 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  do  $152 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , nejvyšší pátý stupeň odpovídá hurikánům s rychlostmi větru od  $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

**Tab. 15:** Saffir-Simpsonova stupnice. (upraveno podle [20])

| Kategorie | Rychlost větru<br>[km.h <sup>-1</sup> ] | Účinky                                                                                                                                                  |
|-----------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1         | 119-153                                 | nezpůsobují zásadní poškození budov, mohou poškodit střechy, převrhnout neukotvené mobilní domy, mohou vyvolat záplavy na pobřeží, poškodit mola, hráze |
| 2         | 154-177                                 | mohou poškodit dveře, okna, vegetaci, způsobit sesuvy půdy, těžce poškodit mobilní domy                                                                 |
| 3         | 178-209                                 | značná ničivá síla, silné záplavy, narušení staveb s dřevěnými konstrukcemi, zničení budov bez pevných základů                                          |
| 4         | 210-249                                 | extrémní ničivá síla, eroze pobřežních oblastí, záplavy ve vnitrozemí, hroucení střech, úplné zničení mobilních domů                                    |
| 5         | nad 250                                 | katastrofická ničivá síla, zničení střech, průmyslových budov, zhroucení zdí, záplavy i daleko ve vnitrozemí, odplavení pobřežních staveb               |

## Kontrolní otázky

### 1. Jaký je rozdíl mezi hurikánem a tajfunem?

Oba názvy označují stejný jev - tropickou cyklonu. Hurikán je místní označení pro tropickou cyklonu vznikající v Atlantském oceánu. Tajfunem nazýváme tropickou cyklonu, která vznikla v Tichém oceánu, případně v Jihočínském moři.

### 2. Jak vzniká tropická cyklona?

Na povrchu vod oceánů dochází k vypařování. Chladnější a vlhký vzduch stoupá vzhůru. Nastává výše popsaná kondenzace vodní páry obsažené ve vzduchu, při které se uvolňuje značné množství skupenského tepla kondenzačního. To způsobuje, že se chladný vzduch ve výšce ohřívá, což vede k jeho rychlejšímu výstupu. Chybějící vzduch v této výšce je nahrazován vlhkým vzduchem z prostoru nad hladinou oceánu. Vzniká uzavřená cirkulace vzduchu, jejíž intenzita závisí na množství dostupné vlhkosti a tepla od hladiny oceánu. [34]

### 3. Jaké fyzikální děje se uplatňují v tropických cyklonách?

Vypařování, kondenzace, působení Coriolisovy síly.

### 4. Hrozí výskyt tropických cyklon v Evropě?

Tropická cyklona může výjimečně proniknout až do oblasti mírných zeměpisných šířek. Zde ale její intenzita postupně slábne. Může se však přeměnit v mimotropickou tlakovou níž, která má menší energii, ale i tak může být příčinou vzniku velmi intenzivních dešťů, zvýšení hladin moří a větrů dosahujících síly hurikánů. Tyto tlakové níže ovlivňují cirkulaci nejčastěji nad západní částí evropského kontinentu, ve vzácných případech i ve střední Evropě.

## 7. TORNÁDA

Tornáda jsou mohutné rotující větrné víry s přibližně vertikální osou otáčení, které jsou spjaty s bouřkovým oblakem ze kterého se spouští dolů v podobě nálevky (komínu). Během své existence se nejméně jednou dotknou zemského povrchu a jsou natolik silná, aby na něm mohla způsobit značné škody. Na rozdíl od tropických cyklon, které mohou být široké i stovky kilometrů a mohou existovat i několik dní, tornádo se soustřeďuje přibližně do nálevkovitého tvaru šířky do 2 km a trvá jen několik desítek minut. Tornádo je sice menší ale má mnohem koncentrovanější energii – přibližně šestkrát větší než tropická cyklóna. Tornáda mohou vzniknout nad pevninou i nad mořem a mohou se vyskytnout na všech světadílech kromě Antarktidy.[ 14, 32, 40]

### 7.1 Podmínky vzniku

Tornáda jsou vázána na spodní základny konvektivních bouří. Konvektivní bouře obvykle vznikají v oblastech, kde se mísí suchý studený vzduch s teplým, vlhkým vzduchem. Vznik konvektivní bouře je tedy podmíněn nestabilitou vzduchových hmot. [ 40]

Konvektivní bouře je tvořena jednou či více bouřkovými buňkami, ve kterých se objevují vzestupné a sestupné vertikální proudy (viz. konvekce). Od jisté hladiny začne stoupající vlhký vzduch ve vzestupném proudu kondenzovat do drobných kapiček, začíná tak vznikat oblak typu cumulus. Pokud má stoupající proud dostatek energie, může se vyvinout podstatně mohutnější oblak - cumulonimbus (bouřkový mrak). Vystupující vodní oblačné kapičky rostou do doby, kdy je už výstupný proud neunes. Poté se vytvoří sestupný proud studeného vzduchu, ve kterém oblačné kapičky začnou propadat dolů v podobě srážek. Přitom dolů strhávají s sebou studený vzduch z výšky. Studený vzduch přiváděný sestupným proudem se u země roztéká do stran. Přitom vytlačuje další teplejší vzduch do výšky. Může ale nastat i opačná situace, kdy roztékající studený vzduch může zamezit dalšímu vytváření teplých výstupných proudů. Vzestupný proud teplého vzduchu pak slábne a postupně zanikne. Studené sestupné proudy postupně způsobí rozpad bouřkové buňky. [5, 32, 40,]

Bouřka je tedy vždy spojena s oblakem cumulonimbus, ale neplatí, že z každého takového oblaku vzniká bouřka. Pro vznik oblaku typu cumulonimbus je nutný vysoký obsah vzdušné vlhkosti a silný pokles teploty vzduchu podél vertikály v celé troposféře.



Další podmínkou je relativně nízká hodnota hladiny, ve které nastává intenzivní kondenzace vlhkého vzduchu a vhodné tlakové pole podporující výstupné pohyby vzduchu. U bouřkových oblaků cumulonimbus dosahují výstupné konvekční proudy rychlostí běžně  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , v extrémních případech i rychlostí  $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Důsledkem těchto vysokých rychlostí je výskyt silné turbulence v určitých částech oblaku. [5, 32, 40]

Konvektivní bouře se dělí podle vnitřní struktury na supercely a multicely.

**Supercely** jsou jednobuněčné bouře s dlouhou životností (i několik hodin), ve kterých jejich konvekční výstupný proud rotuje kolem vertikální osy. Na počátku vývoje supercely probíhá běžná konvekce, při které výstupný proud nerotuje. Pokud se ale při výstupném pohybu mění s rostoucí výškou směr nebo rychlost větru, vzniká jeho rotace. V supercelách se vyskytuje pouze jeden výstupný a jeden sestupný proud. Jejich vertikální rozsah je velký, často zasahují i do tropopauzy. Supercely vznikají během horkých letních dnů před příchodem studené fronty, za kterou postupuje chladný a vlhký oceánský vzduch. Bývají doprovázeny nejprudším počasím – tornády, obrovskými, kroupami, přivalovými srážkami, extrémní elektrickou aktivitou. [5, 32]

**Multicely** mají podobné rozměry jako supercely, jsou však složeny z více konvekčních buněk, které se nachází v různém stádiu vývoje a vzájemně se ovlivňují. V důsledku tohoto ovlivňování je výsledná bouře silnější, než kdyby jednotlivé buňky existovaly zvlášť.

Supercelární tornáda jsou vázána na výskyt supercelární konvektivní bouře. Nesupercelární tornádo je vázáno na bouři tvořenou více bouřkovými buňkami. Nesupercelární bouřková buňka má životnost kolem 30 minut. Konvekční bouře je ale komplexem několika takových buněk v různém stádiu vývoje, takže může existovat po dobu mnohem delší. Tornáda vázaná na multicely bývají slabší, než supercelární. [36, 40]

## 7.2 Vznik tornáda

Pro vznik tornáda musí být splněny výše uvedené podmínky. Vznikají tedy v místech, kde se prudký studený suchý vzduch překříží s teplým vlhkým vzduchem, tedy v místech kde je atmosféra nestabilní. Toto překřížení vyvolá pod spodní základnou oblaků konvekčních bouří horizontální rotaci stoupajícího teplého vzduchu. Po stranách

tornáda stoupá vzduch, zatímco uprostřed klesá. Kolem středu rotuje vzduchová hmota, široká obvykle do dvou kilometrů, která nasává další vzduch při zemi a vše co jí stojí v cestě. Protože průměr víru není ve všech místech stejný, mění se také úhlová rychlost  $\omega$  otáčivého pohybu. Pokud budeme uvažovat kruhový pohyb tornádového víru, je podle vztahu

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (34)$$

úhlová rychlost otáčení při kruhovém pohybu nepřímo úměrná velikosti poloměru kružnice. [4] Tedy u povrchu Země, kde je vír užší, má větší úhlovou rychlost, než ve výšce. V důsledku velké úhlové rychlosti se uvnitř tornáda projevuje odstředivá síla. Pro ni platí vztah

$$F_{od} = m\omega^2 r. \quad (35)$$

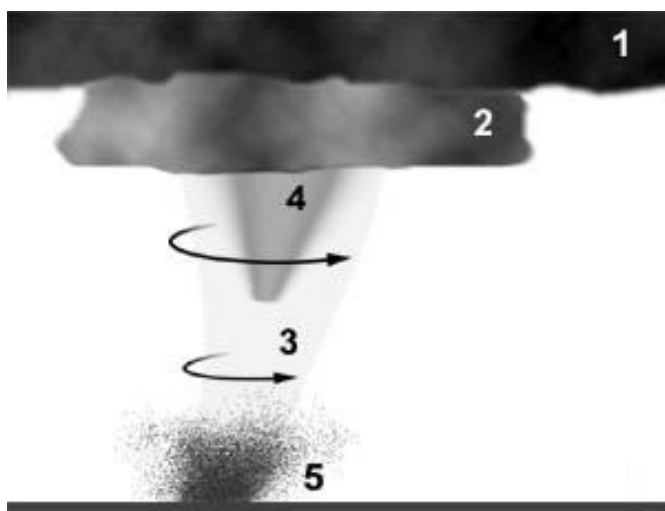
[4] Tato síla má vliv na prudký pokles tlaku ve středu tornáda. Udává se, že minimální tlak v tornádu může být jen 600 hPa.[11, 13]

Vlivem velkého tlakového gradientu u svého středu a tedy obrovské rychlosti větru, ale také vlivem silného vztlaku (savých vírů) působí tornádo na zemském povrchu obrovské škody, vyvrací stromy, bortí domy a je obrovským zdrojem nebezpečí pro obyvatelstvo. Směr otáčení tornáda odpovídá cyklonálnímu otáčení vzduchu v tlakové níži. Na severní polokouli se tedy tornáda otáčí proti směru pohybu hodinových ručiček. Směr pohybu tornáda závisí na směru pohybu mateřského bouřkového oblaku, nejčastěji směřují od jihozápadu na severovýchod. Tornádo průměrně urazí dráhu kolem 10 km a to průměrnou rychlostí  $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Známý jsou ale také případy, kdy tornáda urazila vzdálenosti až několik set kilometrů a postupovala rychlostí až  $225 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . [11, 40]

### 7.3 Vzhled tornáda

Tornádo se nejčastěji jeví jako vír se svislou osou, který visí ze spodní základny bouřkové oblaku. Má tvar nálevky, širší konec je spojený s oblakem, jeho užší spodní část sahá až k zemskému povrchu. Průměrná šířka dráhy (stopy) tornáda bývá nejčastěji 200 m až 250 m, mohou se ale také vyskytnout tornáda s průměrem až 3 km. [11, 40]

„Nejčastěji je tornádo "zviditelněné" díky kondenzaci vodní páry, ke které dochází v důsledku velmi silné rotace vzduchu a následnému poklesu atmosférického tlaku uvnitř tornáda. Zeslabení cirkulace nebo nasátí suššího vzduchu má za následek "zvednutí se" tornáda ze zemského povrchu či jeho úplného vymizení. Kolísání intenzity rotace se projevuje jako "skákání" tornáda.“ [40]



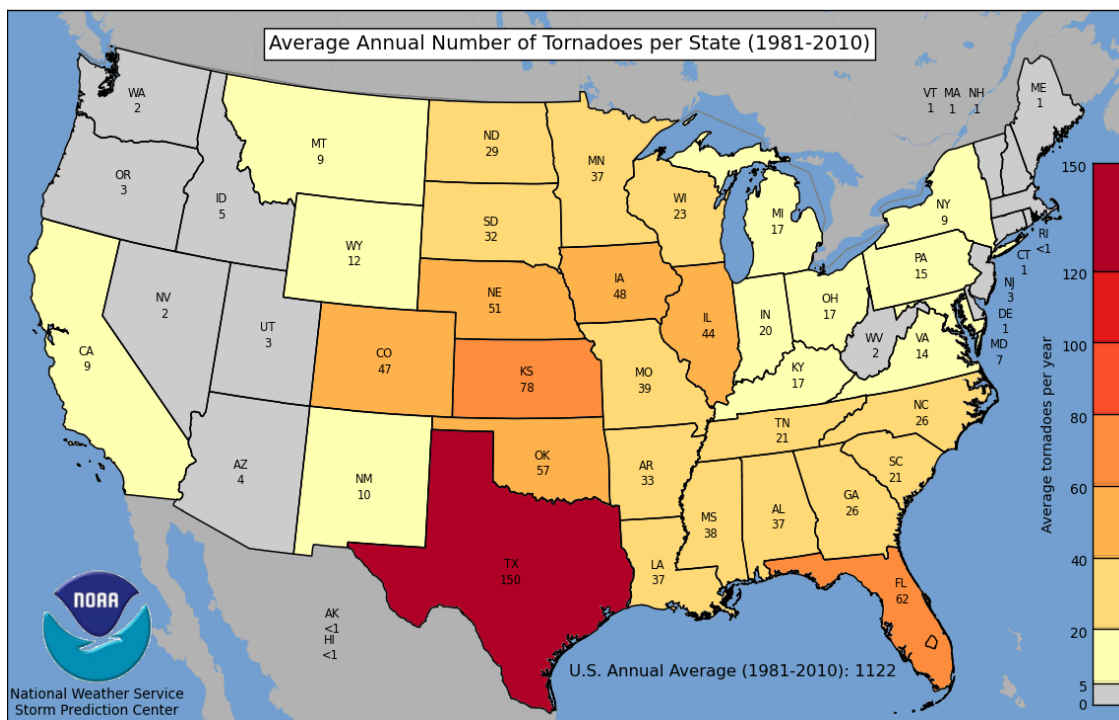
**Schéma tornáda**

1. spodní základna oblačnosti bouře
2. pomalu rotující stěnový oblak
3. rychle rotující vlastní tornádo
4. kondenzační nálevka (chobot)
5. zvržený prach a trosky

**Obr. 5:** Schéma tornáda (převzato a upraveno z [40])

## 7.4 Výskyt tornád

Nejčastěji se tornáda vyskytují na území středu USA, kde se chladný, suchý vzduch ze Skalnatých hor střetává s vlhkým a velmi teplým vzduchem proudícím z oblasti Mexického zálivu a horkým vzduchem z pouští Arizony a Nového Mexika. Této oblasti, do které zasahují státy Texas, Oklahoma, Kansas, Nebraska a Jižní Dakota se říká tornádový pás, a vyskytují se zde stovky tornád ročně. „Vůbec nejhorší tornádo zaznamenané v USA udeřilo v tornádovém pásu 18. března 1925, kdy vytvořilo třiapadesátikilometrovou cestu zkázy ve státech Missouri, Illinois, a Indiana. Takzvané „Tornádo tří států“ zpustošilo devět měst, zabilo 695 lidí a zranilo jich 2027. Největší výskyt tornád v dějinách během krátkého období nastal 26.–27. dubna 2011. Za tyto dva dny zaznamenali meteorologové ve státech na jihu USA (Alabama, Mississippi, Tennessee, Arkansas, Georgie, Virginie, Louisiana) 312 tornád, která si vyžádala 321 lidských životů. Byl tak překonán rekordní počet výskytu tornád ve dnech 3.-4. dubna 1974, kdy jich bylo za 16 hodin zaznamenáno v tornádovém pásu 148 ve 13 státech. Tato tornáda v dubnu 1974 zavinila smrt 330 lidí a skoro 5 500 zranění.“ [14, 26].



**Obr. 6:** Průměrný roční výskyt tornád ve státech USA v letech 1981-2010. (převzato z [37])

V Oklahomě City, která leží téměř v epicentru tornádového pásu udeřilo tornádo od roku 1893 již stodvanáctkrát. V roce 1999 zde byla naměřena rychlost tornáda  $512 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . [14]



**Obr. 7:** Jedno z tornád ve státě Oklahoma v roce 1999. (převzato z [30])

Kromě USA ohrožují tornáda často také Bangladéš. Právě zde udeřilo v dubnu roku 1989 nejsmrtečnější tornádo v historii, které zabilo 1 300 lidí a více než 12 000 jich zranilo. [31]

V České republice se vyskytují tornáda výjimečně. 9. června 2004 bylo však v Litovli zaznamenáno tornádo o síle F3 (viz. Fujitova stupnice), které doprovázelo konvektivní bouři nad Olomouckým okresem. V šířce své stopy 100 m-200 m poškodilo domy, odneslo střechy, vyvrátilo stromy (obr. 8).



**Obr. 8:** Škody po tornádu v Litovli. (převzato z [40])

K dalšímu výskytu tornáda v České republice došlo 18. června 2013 v Krnově (okres Bruntál). Toho dne nad územím České republiky proudil velmi teplý a vlhký vzduch. Tornádo se v Krnově vyskytlo během silné bouřky v odpoledních hodinách, trvalo cca. 10 min. Délka prokázaného dotyku se zemí byla 3 km. Poškodilo 40 domů a více než 30 ha lesních polomů. V České republice byly zaznamenány i další případy slabších tornád a především silných tromb, tedy vírů v atmosféře, které však nesplňují některou z podmínek definice tornáda, např. nedotknou se zemského povrchu. [40] Aktuální informace o výskytu tornád a tromb na území České republiky, ale také informace a rady jak se v případě, pokud se člověk setká s tornádem, má zachovat, lze nalézt na webových stránkách Českého hydrometeorologického ústavu, viz. [41]

## 7.5 Fujitova stupnice

Fujitova stupnice (F-Scale) dělí tornáda do šesti stupňů podle účinků a způsobených škod. Udávaná rychlost větru je pouze orientační. Tato stupnice byla odvozena meteorologem T. Theodore Fujitou v roce 1971.

V roce 2007 byla Fujitova stupnice aktualizována na tzv. rozšířenou Fujitovu stupnici EF-Scale (Enhanced Fujita Scale), tak aby přesněji odpovídala rychlosti větru a způsobeným škodám. Tato stupnice je založena na 28 identifikátorech poškození (např. různých druhů vegetace, typů budov atd.). Rozšířená Fujitova stupnice se nyní používá v USA a Kanadě. [38]

**Tab. 16:** Fujitova stupnice. (převzato z [38])

| STUPEŇ<br>x | odhad<br>rychlosti<br>FUJITOVA<br>STUPNICE<br>F <sub>x</sub> | odhad<br>rychlosti<br>ROZŠÍŘENÁ<br>FUJITOVA<br>STUPNICE<br>EF <sub>x</sub> | POPIS ŠKOD                                                                                                                                                                             |
|-------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0           | 17-32 m.s <sup>-1</sup>                                      | 29-37 m.s <sup>-1</sup>                                                    | slabé škody - škody na komínech, zlámané větve, vyrvané mělce kořenicí stromy                                                                                                          |
| 1           | 33-49 m.s <sup>-1</sup>                                      | 38-49 m.s <sup>-1</sup>                                                    | mírné škody - poškozené krytiny střech, posunuje nebo otáčí prefabrikované domy a vytlačuje auta ze silnic                                                                             |
| 2           | 50-69 m.s <sup>-1</sup>                                      | 50-60 m.s <sup>-1</sup>                                                    | značné škody - strhává střechy, ničí prefabrikované domy, převrací vagóny, vyvrací a láme vzrostlé stromy, z lehkých předmětů vytváří nebezpečné projektily, zdvihá automobily ze země |
| 3           | 70-92 m.s <sup>-1</sup>                                      | 61-73 m.s <sup>-1</sup>                                                    | vážné škody - ničí střechy i zdi dobře postavených domů, převrací vlaky, většina stromů v lesích je vyvrácena, těžká auta jsou zdvihána ze země a odvrhávána                           |
| 4           | 93-116 m.s <sup>-1</sup>                                     | 74-90 m.s <sup>-1</sup>                                                    | zničující škody - srovnává se zemí dobře postavené domy, stavby se slabými základy odnáší, auta jsou odmršťována, i těžké předměty poletují                                            |
| 5           | 117-142 m.s <sup>-1</sup>                                    | > 91 m.s <sup>-1</sup>                                                     | neuvěřitelné škody - silné konstrukce domů jsou srovnávány se zemí a odnášeny, předměty velikosti automobilu poletují vzduchem a jsou odmršťovány do vzdálenosti přesahující 100 m     |

## Kontrolní otázky

### 1. Jaký je rozdíl mezi tropickou cyklonou a tornádem?

Zásadní rozdíl mezi tornádem a tropickou cyklonou je v jejich velikosti. Zatímco tornádo má nejčastěji průměr desítky metrů, tropická cyklona dosahuje v průměru i stovek kilometrů. Hnací silou tropické cyklony je kondenzace vodní páry obsažené ve vlhkém vzduchu nad hladinou oceánů, tornádo svoji energii čerpá převážně z výrazných teplotních gradientů v atmosféře. Rozdíl je také v době jejich trvání – tropická cyklona může trvat jeden až dva týdny, zatímco doba existence tornáda bývá v desítkách sekund až několika minut. [7, 11, 40]

### 2. Jak vzniká tornádo?

Tornádo vzniká v místech, kde se suchý studený vzduch mísí s teplým vlhkým vzduchem. Toto překřížení vyvolá pod spodní základnou oblaků konvekčních bouří, na která jsou tornáda vázána, horizontální rotaci stoupajícího teplého vzduchu. „Proudění vystupující z teplého bouřkového mraku zdvihne rotující vzduchový válec a vztyčí ho do vertikální polohy. Spojení vertikálního a otáčivého pohybu vytváří velmi široký sloup zvráceného vzduchu.“ [29]

## Závěr

Problematika fyzikálních dějů v atmosféře, kterou se práce zabývá, není ve středoškolských učebnicích probírána systematicky, ale jen útržkovitě. To může být jedním z důvodů, proč mají středoškoláci o zemské atmosféře, ačkoliv je pro náš život nezbytná, neúplné informace nebo představy. Tato skutečnost byla mojí motivací k sepsání uceleného textu, který by mohl nedostatky ve znalostech doplnit.

V práci jsem nejprve uvedla základní vlastnosti atmosféry, její chemické složení a členění atmosféry dle různých hledisek. Samostatná kapitola se věnuje atmosférickému tlaku. Dále jsem se zaměřila na důležitý fyzikální atmosférický jev – proudění vzduchu. Popsala jsem základní typy proudění – laminární, turbulenci a konvekci, které se v atmosféře vyskytují. Další kapitola se zabývá popisem, vysvětlením vzniku, důsledků a způsobu využití tryskového proudění – jet streamu. Jet stream má významné důsledky i pro člověka, avšak ne mnoho, nejen středoškoláků, o něm ví. Dále jsem se zaměřila na popis přírodních jevů – tropické cyklony a tornáda. Snažila jsem se vysvětlit fyzikální podstatu jejich vzniku. Ačkoliv do našich životů výrazně zasahují, znalosti o tom, proč a jak přesně vznikají, mají žáci (i veřejnost) jen omezené. Za každou kapitolou jsem uvedla několik kontrolních otázek, na kterých si čtenář může ověřit pozornost při čtení a porozumění předchozího textu.

Tímto textem chci ukázat, že fyziku lze použít jako nástroj k vysvětlení pozorovatelných jevů běžného života. Potěšilo mě, že při dotazníkovém šetření někteří středoškoláci projevíli zájem o zkoumané jevy, trvali na společné kontrole výsledků a alespoň stručném popisu jim méně známých pojmů. I proto si myslím, že některé z nich, a nejen jen, by obsah práce jistě zaujal, bavil a obohatil. Věřím, že tato práce by mohla být přínosem k motivaci žáků pro studium fyziky.



## Seznam použitých pramenů

### Knižní zdroje

- [1] BARTUŠKA, Karel; SVOBODA, Emanuel. *Fyzika pro gymnázia: Molekulová fyzika a termika*. Dotisk 4. vydání. Praha: Prometheus, spol. s. r. o., 2003. 244 s. ISBN 80-7196-200-7.
- [2] BEDNÁŘ, Jan. *Meteorologie: úvod do studia dějů v zemské atmosféře*. 1. vydání. Praha: Portál, s.r.o., 2003. 224 s. ISBN 80-7178-653-5.
- [3] BEDNÁŘ, JAN; ZIKMUNDA, OTAKAR. *Fyzika mezní vrstvy atmosféry*. 1. vydání, Praha: Academia, 1985. 248 s.
- [4] BEDNÁŘÍK, Milan; ŠIROKÁ, Miroslava. *Fyzika pro gymnázia: Mechanika*. Dotisk 3. vydání. Praha: Prometheus, spol. s. r. o., 2005. 288 s. ISBN 80-7196-176-0.
- [5] DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie*. Cheb: Svět křídel, 2010. 481 s. ISBN 978-80-86808-85-7.
- [6] HOLUBOVÁ, Renata. *Molekulová fyzika a termodynamika*. 1. vydání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. 145 s. ISBN 978-80-244-3299-1.
- [7] HUDEC, František. *Synoptická meteorologie V*. 1. vydání. Brno: Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, 2012. 99s. ISBN 978-80-7231-879-7.
- [8] CHRÁSKA, Miroslav. *Metody pedagogického výzkumu. Základy kvantitativního výzkumu*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, a.s., 2007. 272s. ISBN 978-80-247-1369-4.
- [9] MACHÁČEK, Martin. *Fyzika pro gymnázia: Astrofyzika*. 2., upravené vydání. Praha: Prometheus, spol. s. r. o., 2004. 143 s. ISBN 80-7196-277-5.
- [10] MIKULČÁK, Jiří; KLIMEŠ, Bohdan; ŠIROKÝ, Jaromír; ŠŮLA Václav; ZEMÁNEK, František. *Matematické fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Dotisk 3. vydání. Praha: Prometheus, spol. s. r. o., 2002. 206 s. ISBN 80-85849-84-4.

[11] MUNZAR, Jan, a kolektiv. *Malý průvodce meteorologií*. 1. vydání. Praha: Mladá fronta, 1989. 248 s.

[12] NAHODIL, Josef. *Fyzika v běžném životě*. 2., rozšířené vydání. Praha: Prometheus, spol. s r. o., 2004. 206 s. ISBN 80-7196-278-3.

[13] SCHMIDT, M. *Meteorológia pre každého*. 1. vydanie, Bratislava: Alfa, 1980. 256 s.

[14] SIMONS, Paul. *Extrémní počasí*. Přel. P. Vereš. 1. vydání. Praha: Reader's Digest Výběr, s.r.o., 2010. 160s. ISBN 978-80-7406-110-3.

[15] VYSOUDIL, Miroslav. *Meteorologie a klimatologie*. 2. vydání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2006. 281 s. ISBN 80-244-1455-4.

### Internetové zdroje

[16] Beaufortovy stupnice síly větru. *Amatérská meteorologická stanice* [online].

© 2014 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z <<http://pocasi.ok5aw.cz/teorie.php?doc=page11>>

[17] Clouds from space: Jet Stream Cirrus. *Lunar and Planetary Intitute* [online].

© 2013 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z

<[http://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/clouds/slide\\_2.html](http://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/clouds/slide_2.html)>

[18] Flight status. Search for a flight. *Airfrance.com* [online]. [cit. 2014-02-28].

Dostupné z <[http://www.airfrance.com/cgi-](http://www.airfrance.com/cgi-bin/AF/CZ/cs/local/resainfovol/infovols/detailsVol.do#anchor_errors)

[bin/AF/CZ/cs/local/resainfovol/infovols/detailsVol.do#anchor\\_errors](http://www.airfrance.com/cgi-bin/AF/CZ/cs/local/resainfovol/infovols/detailsVol.do#anchor_errors)>

[19] Fyzikální korespondenční seminář. *MFF UK Praha* [online]. XII. ročník 1998.

Řešení III. série, [cit. 2014-04-04]. Dostupné z <<http://fykos.cz/rocnik12/reseni/reseni3-3.pdf>>

[20] Herbert Saffir: Vědec, který dokázal změřit ničivou sílu hurikánů. *National Geographic Česko* [online]. © 2009-2013 [cit 2014-04-04]. Dostupné z

<<http://www.national-geographic.cz/detail/herbert-saffir-vedec-ktery-dokazal-zmerit-nicivou-silu-hurikanu-33701/>>

- [21] HONSOVÁ, Dagmar. *Může za to jet stream?* Blog.aktulne.cz [online]. 2007 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z <<http://blog.aktualne.centrum.cz/blogy/dagmar-honsova.php?itemid=10711>>
- [22] Jak správně vytvořit dotazník. *Vyplň to.cz* [online]. © 2008-2014 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z <<http://www.vyplnto.cz/tipy/jak-spravne-sestavit-dotaznik/>>
- [23] Jeden z nejsilnějších tajfunů v historii pustošil Filipíny, počet obětí přesáhl 10 tisíc. *Gnosis* [online]. © 2004-2014 [cit 2013-04-04]. Dostupné z <<http://gnosis9.net/view.php?cisloclanku=2013110002>>
- [24] Jet stream shift to bring summer weather. *Met Office News Blog* [online]. 2013 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z <<http://metofficenews.wordpress.com/?s=jet+stream>>
- [25] *Katedra fyziky Přf OU* [online], Ostravská univerzita 2005. Atmosféra [cit. 2014-04-05]. Dostupné z <[http://artemis.osu.cz/MMi/meteo1/diplomka/Ramec2\\_soubory/homosfera.html](http://artemis.osu.cz/MMi/meteo1/diplomka/Ramec2_soubory/homosfera.html)>
- [26] KUKLIŠ, Libor. Rekordní sezóna tornád v USA - v dubnu 875 tornád a 361 obětí. *Gnosis9.net - Internetový magazín pro ty, kdo hledají poznání* [online]. 2011 [cit 2014-04-05]. Dostupné z <<http://gnosis9.net/view.php?cisloclanku=2011040003>>
- [27] Lékařské kalkulačky. *MUDr.org* [online]. © 2011 [cit. 2014-04-01]. Dostupné z <<http://www.mudr.org/web/bsa-povrch-tela>>
- [28] MARŠÍK, František. Termodynamika a vznik tropických cyklonů. *Přírodovědecký časopis Vesmír*, © *Vesmír, spol. s r. o.* [online]. Praha 2001. ISSN 1214-4029 [cit 2014-04-05]. Dostupné z <<http://www.vesmir.cz/clanek/termodynamika-a-vznik-tropickych-cyklonu>>
- [29] *Meteocentrum* [online], © 2007-2013. Encyklopedie meteorologie [cit. 2014-04-01]. Dostupné z <<http://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/vertikalni-cleneni-atmosfery.php>>

[30] Na tornáda bohatý rok 2008 si v USA vyžádal už stovku mrtvých. *Gnosis* [online]. © 2004-2014 [cit 2014-04-05]. Dostupné z  
<<http://gnosis9.net/view.php?cisloclanku=2008050009>>

[31] Nejděsivější tornáda v historii: Tisíce mrtvých lidí a města srovnaná se zemí! *tn.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z  
<<http://tn.nova.cz/zpravy/doprava/nejdesivejsi-tornada-v-historii-tisice-mrtvych-lidi-a-mesta-srovnana-se-zemi.html>>

[32] O tornádech. *Tornáda.cz* [online]. © 2011 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z  
<<http://www.tornada.cz/o-tornadech>>

[33] Oxford Aviation Training, Joint Aviation Authorities (Europe), Great Britain. Civil Aviation Authority. *050 Meteorology. Joint Aviation Authorities airline transport pilot's licence: theoretical knowledge manual* [online]. Frankfurt: Jeppesen, 2001 [cit. 2014-03-30 ]. ISBN 0-88487-286-6. Dostupné z  
<<http://lewczuk.com.pl/materialy/testy/050%20Meteorology%20Jeppesen.pdf>>

[34] PECHO, Jozef. *Tropické cyklóny v meniacom sa svete*. [online]. Akademický repozitár, 2011. 11s. [cit 2014-04-04]. Dostupné z  
<<http://www.akademickyrepozitar.sk/sk/repozitar/tropicke-cyklony-v-meniacom-sa-svete.pdf>>

[35] SEKAL, Ondřej. *Škola pilotů. Základy letecké meteorologie* [online]. Czech Airlines Virtual 2013-11-01. 19 s. [cit. 2014-03-30 ]. Dostupné z  
<<http://www.csavirtual.cz/cs/vyukove-centrum/skola-pilotu/134-planovani-letu-poasi?catid=44%3Astudium>>

[36] SETVÁK, Martin. Konvektivní bouře – pohled z vesmíru na jeden z nejkrásnějších živelních projevů. [online]. *Přírodovědecký časopis Vesmír*, © Vesmír, spol. s r. o. Praha 1999. ISSN 1214-4029 [cit 2014-04-06]. Dostupné z  
<<http://www.vesmir.cz/clanky/clanek/id/868>>

- [37] Severe Weather Awareness. *National Weather Service Weather Forecast Office*[online]. © 2014 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z <[http://www.srh.noaa.gov/sjt/?n=svrwx\\_awareness](http://www.srh.noaa.gov/sjt/?n=svrwx_awareness)>
- [38] Slovník. *Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i.* [online]. © 2011 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z <[http://www.ufa.cas.cz/html/meteo/slovník\\_13/VYKLAD/S\\_vyklad.htm](http://www.ufa.cas.cz/html/meteo/slovník_13/VYKLAD/S_vyklad.htm)>
- [39] ŠOLTÉSOVÁ, Jana. Atmosféra Země a její struktura. *Příroda.cz* [online]. 2007 [cit. 2014-04-05]. ISSN 1801-2787. Dostupné z <http://www.priroda.cz/clanky.php?detail=1016>
- [40] Tornáda. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. © 1996-2010 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z <<http://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/tornada/tor2.html>>
- [41] Tornáda a jevy příbuzné na území České republiky. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. © 1996-2014 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z <<http://www.tornada-cz.cz/pripady/>>
- [42] *Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i.* [online] © 2011. Oddělení aeronomie. Fyzika ionosféry 2012. [cit. 2014-04-06]. Dostupné z <<http://www.ufa.cas.cz/html/climaero/topics/ionosphere.html>>
- [43] VOLF, Ivo; JAREŠOVÁ, Miroslava. Fyzika je kolem nás (Hydrostatika a aerostatika). *Fyzikální olympiáda* [online]. © 2002–2013 [cit. 2014-04-01]. Dostupné z <<http://fyzikalniolympiada.cz/texty/fyzika4.pdf>>
- [44] Za současný chaos v počasí ve světě může Santova pomsta. *Novinky. cz* [online]. © 2003-2014 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z <<http://www.novinky.cz/domaci/327907-za-soucasny-chaos-v-pocasi-ve-svete-muze-santova-pomsta.html>>
- [45] Změna klimatu a Sandy. *Přírodovědecký časopis Vesmír* [online], © Vesmír, spol. s r. o. Praha 1999. ISSN 1214-4029 [cit 2014-04-04]. Dostupné z <<http://www.vesmir.cz/clanek/sandy-a-zmena-klimatu>>

# PŘÍLOHA 1

## Dotazníkové šetření

Průzkum znalostí středoškolských žáků o zemské atmosféře a dějích  
v ní probíhajících.

Škola: .....

Ročník: .....

Pozn.: U každé otázky je právě jedna odpověď správná.

U otázek, se kterými jste se **nikdy** nesetkali -ve škole ani mimo ni- odpověď  
NEVYPLŇUJTE = „nehádejte“ !

1. Téměř 99 % celkové hmotnosti atmosféry je obsaženo přibližně do výšky nad  
zemským povrchem

A/ 3,5 km                      B/ 35 km                      C/ 350 km                      D/ 3 500 km

2. Procentové zastoupení uvedených plynů v atmosféře je

A/ kyslík 78 %, dusík 21 %  
B/ dusík 78 %, vodík 21 %  
C/ dusík 78 %, kyslík 21 %  
D/ vodík 78 %, kyslík 21 %

3. Objem vodní páry v atmosféře je přibližně

A/ 20 % – 30 %              B/ 12 % – 18 %      C/ 6 % – 10 %      D/ 0 % – 4 %

4. Pořadí vrstev atmosféry podle průběhu teploty s rostoucí vzdáleností od povrchu  
Země je

A/ troposféra, stratosféra, mezosféra, termosféra  
B/ troposféra, termosféra, mezosféra, stratosféra  
C/ stratosféra, termosféra, mezosféra, troposféra  
D/ stratosféra, troposféra, mezosféra, termosféra

5. Na tělo dospělého člověka (o obsahu povrchu  $S = 1,9 \text{ m}^2$ ) působí atmosférická  
tlaková síla přibližně

A/ 190 N                      B/ 1,90 kN                      C/ 190 kN                      D/ 1,9 MN

6. Atmosférický tlak se s rostoucí nadmořskou výškou - při výstupu o 100 m
- A/ zvyšuje o 1,3 kPa                      B/ zvyšuje o 1,3 hPa  
C/ zmenšuje o 1,3 kPa                      D/ zmenšuje o 1,3 hPa
7. Takzvaná Coriolisova síla stáčí trajektorii pohybu těles
- A/ na severní polokouli doleva  
B/ na severní polokouli doprava  
C/ na obou polokoulích doleva  
D/ na obou polokoulích doprava
8. Stupnice pro měření síly (rychlosti) větru se nazývá stupnice
- A/ Richteroва                      B/ Saffir-Simpsonova  
C/ Fujitova                      D/ Beaufortova
9. Vzhledem k převažujícímu směru tryskových proudů (jet streamů) je doba letu letadel po většinu roku kratší (často i o několik hodin) při letu
- A/ z USA do Evropy než z Evropy do USA  
B/ z Evropy do USA než z USA do Evropy  
C/ ze Skandinávie do Afriky než z Afriky do Skandinávie  
D/ z Afriky do Skandinávie než ze Skandinávie do Afriky
10. Rozdíl mezi tropickou cyklonou a tornádem je
- A/ jen v místním pojmenování - oba názvy označují stejný jev  
B/ tropická cyklona vzniká nad oceánem a má větší průměr, zatímco tornáda mohou vznikat i nad pevninou a mají menší průměr a kratší dobu trvání  
C/ tropická cyklona vzniká nad pevninou, má menší průměr a kratší dobu trvání, zatímco tornádo vzniká nad oceánem, má větší průměr a delší dobu trvání  
D/ tropická cyklona vzniká nad oceánem a má menší průměr, zatímco tornáda mohou vznikat i nad pevninou a mají větší průměr a delší dobu trvání