



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

VLIV TURBULENCE V BEZOBLAČNÉM PROSTORU A
VULKANICKÉHO POPELA NA LETOVÝ PROVOZ
INFLUENCE OF CLEAR AIR TURBULENCE AND VOLCANIC ASH ON THE AIR TRAFFIC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VLADIMÍR PUCHAR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

RNDr. KAREL KRŠKA, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vladimír Puchar

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Profesionální pilot (3708R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv turbulence v bezoblačném prostoru a vulkanického popela na letový provoz

v anglickém jazyce:

Influence of clear air turbulence and volcanic ash on the air traffic

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popište turbulenci jako nebezpečný jev v letectví se zaměřením na horní troposféru a spodní stratosféru. Vztah mezi CAT a tryskovým prouděním. Vliv sopečné činnosti na letový provoz.

Cíle bakalářské práce:

Cílem je vyhodnotit osobní zkušenosti posádek letadel a letová omezení v důsledku CAT a sopečné činnosti, ekonomické ztráty společností provozujících leteckou dopravu. CAT a VA na mapách význačného počasí.

Seznam odborné literatury:

- [1] Dvořák,P.: Letecká meteorologie, Cheb. 2004.
- [2] Kráčmar,J.: a kol. Meteorologie (050). Učební texty, Brno. 2006.
- [3] Nedelka,M.: Prehľad leteckej meteorológie. Bratislava. 1984.
- [4] Soukup,Z.: Letecky významné jevy v horní troposféře a tropopauze. Práce a štúdie SHMÚ 17. Bratislava. 1977.

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Karel Krška, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 26.11.2010

L.S.

prof. Ing. Antonín Pištěk, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt

Bakalářská práce zpracovává problémy týkající se turbulence v bezoblačném prostoru a vliv vulkanického popela na letový provoz. Obsahuje základní informace a poznatky pro pilota dopravních letadel. Téma turbulence v bezoblačném prostoru CAT je více pojato z meteorologického hlediska, jsou zde zahrnuty obecné informace týkající se doprovodných jevů. Do kapitoly týkající se vulkanického popela jsou zařazeny i kapitoly pro pochopení dané problematiky, které se nevztahují přímo na ohrožení letového provozu.

Klíčová slova

Vulkanický popel, turbulence v bezoblačném prostředí, tryskové proudění, erupce

Abstract

Bachelor thesis handles issues related to turbulence in cloudless space and the influence of volcanic ash on air traffic. It contains basic information and knowledge to pilot airliners. Topic turbulence in cloudless space CAT is conceived more in terms of weather, they include general information about the accompanying phenomena. The chapter on volcanic ash are also included chapters on understanding the issues that are not directly related to the hazard to air traffic.

Keywords

Volcanic ash, clear air turbulence, jet streams, the eruption

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci zpracoval samostatně pod odborným vedením vedoucího mé bakalářské práce a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27.5. 2011

Poděkování

Především děkuji panu RNDr. Karlu Krškovi za odbornou pomoc a vedení při sestavování této bakalářské práce.

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Turbulence.....	9
2.1. Rozdělení atmosféry.....	9
2.2. Intenzita a účinky turbulence.....	10
2.3. Druhy turbulence.....	11
3. CAT – Clear Air Turbulence.....	13
3.1. Tryskové proudění a jeho význam.....	13
3.2. Turbulence velkých výšek.....	15
3.3. CAT.....	16
3.4. Předpověď CAT.....	18
3.5. Incidentsy spojené s CAT.....	19
4. Vulkanická činnost a její vliv na letový provoz.....	20
4.1. Ochrana před následky a druhy nebezpečí výbuchu sopky.....	20
4.2. Rozdělení sopek.....	21
4.3. Místa výskytu a vznik sopek.....	23
4.4. Výbuch sopky v roce 1883.....	24
4.5. Nebezpečí sopečného popela.....	26
4.6. Historie problémů se sopečným popelem v letovém provozu.....	28
4.7. Detekce sopečného popela palubními přístroji.....	29
4.8. Sopka Grimswötn.....	30
4.9. Sopka Eyjafjallajokull.....	32
4.10. Sopka Etna.....	36
5. Závěr.....	37
6. Seznam použité literatury.....	38
7. Seznam použitých obrázků.....	39
8. Přílohy.....	40

1. Úvod

V dnešní moderní době se setkáváme s věcmi, které nám ulehčují práci, a tím i život. Před sto lety si nikdo ještě nedokázal představit, že budeme létat přes oceány na jiné daleké kontinenty, na palubě budeme dostávat občerstvení a přitom se dívat na LCD obrazovky s filmem. Přitom nám do kabiny bude proudit čerstvý chladnější vzduch z klimatizace a my budeme sledovat, jak pod letadlem, v kterém sedíme na luxusním sedadlech, ubíhají stovky kilometrů země za hodinu. Avšak i nyní, kdy je letectví nejbezpečnějším druhem dopravy, jsme stále omezeni meteorologickými jevy. Stále žijeme na Zemi, kde fungují jisté zákonnitosti a přírodní síly, které znesnadňují činnost v letectví jak na zemi, tak i ve vzduchu.

V této bakalářské práci se zabývám dvěma meteorologickými jevy, které jsou velice obtížně předvídatelné a ztěžují práci pilotů a leteckých společností. Jsou to turbulence v bezoblačném prostoru (CAT) a sopečný popel.

Počasí lze s jistou spolehlivostí předpovídat a tedy se na něj připravit, v případě letadel vychýlit osy dráhy letu, či úplně zrušit let, pokud panuje velmi špatné počasí na místě vzletu nebo přiletu. Avšak nedokážeme ovlivnit vulkanickou činnost, která je do jisté míry předvídatelná, ale zatím nikdo nedokáže udělat tak přesné datum, nebo hodiny, výbuchu té dané sopky. Proto je tento jev tak nebezpečný, protože nevíme, kdy může nastat erupce sopky. Samozřejmě, existují jisté propočty a metody měření, které nám hlásí, že sopka začíná být aktivní, ale pořád jsou to jen informativní děje, které nám pouze říkají o jistých změnách pod zemským povrchem.

Obrázky, které doplňují následující text, jsem převzal z různých zdrojů, které uvádím ke konci práce v Seznamu použitých obrázků.

2. Turbulence

Piloti letounů se velmi často setkávají s meteorologickými jevy, které znesnadňují jejich práci. Takovými jevy například bývá nízká oblačnost spojená s mlhou, silné dešťové přeháňky často doprovázené bouřkovou činností a v neposlední řadě také turbulence, která obzvláště ve výškách pro běžnou dopravní činnost neumožní let touto oblastí. Takové turbulence se nazývají CAT (Clear Air Turbulence) do češtiny přeloženo jako turbulence v bezoblačném prostoru, nebo WST (Wind Shear Turbulence). Pro pilota dopravního letounu je nutno znát všechny druhy turbulencí nacházející se v celém výškovém rozsahu troposféry a dolní stratosféry.

Turbulence je proudění, v němž dochází k promíchávání proudnic vzduchu navzájem a nemají paralelní dráhy jako u laminárního proudění. Částice v proudnici vykonávají složitý nepravidelný pohyb, při kterém dochází k vytváření vírů. Vznikají při větších rychlostech proudění vzduchu přes překážku, například hory či kopce, nebo v důsledku nestejnomyerného zahřívání zemského povrchu, kde vznikají vzestupné proudy či jsou turbulence vázány na výšková proudění. V každém případě vznikají na letounu prolétávajícím takovým jevem dodatková zrychlení, která mohou způsobit i narušení konstrukcí letadel.

Základním měřicím přístojem pro zjištění intenzity turbulence je akcelerometr. Jedná se o zařízení, které obsahuje závaží umístěné na pružině, zrychlení se zobrazuje na kruhovém indikátoru. Následná hodnota zrychlení se udává v násobcích gravitačního zrychlení g , a proto se používá pro toto zařízení název g – meter.

2.1. Rozdělení atmosféry

Atmosféra je plynný obal Země, který podle změny rozdělení teplot s výškou členíme do základních vrstev. Mezi těmito vrstvami jsou přechodné oblasti nazývané hranicemi - paузami. Základní rozdělení atmosféry je následující:

1. troposféra – nejspodější základní vrstva charakteristická poklesem teploty s výškou
 - Výška nad zemí: nad póly 7 – 9 km při $t = -50\text{ °C}$
v mírných pásmech 10 – 12 km při $t = -50\text{ °C}$ až -60 °C
nad rovníkem 16 – 18 km při $t = -80\text{ °C}$ a nižší
2. stratosféra – nachází se zhruba do výšky 50 km, teplota roste s výškou
3. mezosféra – výška 80 – 85 kilometrů, teplota klesá s výškou
4. termosféra – hranice termosféry sahá až do výšek kolem 800 kilometrů, teplota roste s výškou
5. exosféra – je vrstva atmosféry rozprostírající se do výšek až 70 000 kilometrů od povrchu, teplota s výškou klesá

Mezi troposférou a stratosférou se nachází již zmiňovaná hranice nazývaná tropopauza. Pod ní se nachází oblast maximálního výškového proudění. Na obr. 22 viz příloha, vidíme jednotlivé vrstvy atmosféry s červeně vyznačeným chodem teploty.

V troposféře klesá teplota s výškou o hodnotu $0,65\text{ °C}$ na 100 metrů, nebo-li 2 °C na 1 000ft.

2.2. Intenzita a účinky turbulence

Intenzita turbulence je v celém letovém prostoru velmi různorodá a závisí na mnoha faktorech, které budou zohledněny níže. Podle ICAO rozeznáváme základní tři druhy intenzity turbulence:

1. Slabá – přírůstek přetížení 0,2 – 0,5 g a poryvy větru 5,1 – 10 m.s⁻¹
2. Mírná – přírůstek přetížení 0,51 – 1,0 g a poryvy větru 10,1 – 15 m.s⁻¹
3. Silná – přírůstek přetížení více než 1,0 g a poryvy větru více než 15 m.s⁻¹

Existuje také podobné označení intenzity, které má však přísnější kritéria, posouvají se měřítko posuzování intenzity:

Tab. 1: Stupně intenzity turbulence podle ICAO a M. Nedelky [9]

ICAO označení			Přísnější označení podle [9]		
Intenzita	Přírůstek přetížení [g]	Poryvy [m.s ⁻¹]	Intenzita	Přírůstek přetížení [g]	Poryvy [m.s ⁻¹]
-----	-----	-----	Slabá	< 0,2	1 - 5
Slabá	0,2 – 0,5	5,1 - 10	Mírná	0,2 – 0,5	5,1 - 10
Mírná	0,51 – 1,0	10,1 - 15	Silná	0,51 – 1,0	10,1 - 15
Silná	1,0 <	15 <	Extrémní	1,0 <	15 <

Účinky těchto intenzit turbulence jsou následující:

- Slabá turbulence vyvolává jednotlivé lehké záchvěvy letadla. U citlivých osob se stává let nepříjemným
- Mírná turbulence vyvolává častější záchvěvy letadla a nepatrné změny polohy letadla. Chvějí se ručičky indikátorů, avšak stanovený režim letu není narušen. Cestující s větší náchylností ke kinetóze pociťují nevolnost
- Silná turbulence - prudké záchvěvy letadla mají za následek výraznější změny výšky (propadání) letadla. Variometr a rychloměr indikují chybné údaje. Režim letu je tedy narušen, nastává problém udržet letovou hladinu. Autopilot se automaticky vypíná v důsledku velkých přetížení. Chůze po palubě je nemožná a je nutno se připoutat
- Při extrémní turbulenci dochází k význačným změnám polohy a výšky letu. Při nesprávné činnosti posádky může dojít k ohrožení letadla a cestujících

2.3. Druhy turbulence

Turbulenci dělíme podle jejího vzniku. Způsobují ji nestejněměrné zahřívání zemského povrchu (termická turbulence) nebo působení různých překážek, o něž se proudění deformuje (mechanická turbulence) anebo turbulence může vzniknout na základě výraznějších stříhů větru (dynamická turbulence).

V určitých výškách nad zemí je však nějaká z těchto turbulencí dominantní, a proto rozdělujeme turbulenci na termickou, mechanickou a dynamickou.

1. Termická turbulence

- Vyskytuje se ve výškách, do kterých sahají nejvyšší hřebeny kopců nebo hor a v konvektivních oblacích druhu Cu nebo Cb. Turbulence má denní chod, aktivní je více v dopoledních hodinách, kdy dochází k většímu prohřívání zemského povrchu. Lépe se zahřívají zoraná pole, městská zástavba, hornatý terén anebo větší asfaltové, případně betonové plochy. Nad těmito druhy povrchů se nachází vzestupné proudy teplejšího vzduchu. Sestupné proudy zaznamenáme nad lesy a jezery.

2. Mechanická turbulence

- Nachází se za význačnější vyšší překážkou, nebo vzniká v důsledku tření o zemský povrch. Avšak do této kategorie patří i turbulence v úplavu. Točivé víry, které vznikají za překážkami jsou přímo úměrné rychlosti proudění přes překážku.
- Pokud se vyskytuje proudění přes horskou překážkou, může za ní vznikat buď vírové, rotorové nebo proudění ve tvaru vln. Velmi často je to velmi nebezpečný jev.
- Dalším druhem mechanické turbulence je turbulence v úplavu, která je přímo spojená s pohybem letadla v ovzduší, kde dochází ke vzniku vírů na koncích křídel. Platí pravidlo, že čím má letadlo větší hmotnost, tím vyvolává i větší vztlakovou sílu, a tím je i turbulence v úplavu větší. ICAO stanovilo rozstupy mezi jednotlivými typy letadel, které jsou charakterizovány svými vzletovými hmotnostmi. Rychlosti ve vírech mohou dosahovat až $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

NASA provedla testování turbulence v úplavu, na obr.1 vidíme, jak tento vír vypadá. Víř se vytvořil za letounem velikosti našeho L-37, povětšinou známého pod označením Čmelák. Jaky víř vzniká například za nejnovějším dopravním letadlem Airbus A380 a jaké rozstupy musí být za takovým letadlem, si můžeme odvodit z obrázku.



Obr.1: Turbulence v úplavu za letounem. Experiment provedla NASA

3. Dynamická turbulence

- Vzniká v důsledku stříhu větru, který dodává letadlu zrychlení, a to buď ve vertikální nebo horizontální ose. Horizontální stříh větru má podstatně větší velikost než vertikální stříh větru, a proto nás bude více zajímat.
- Dynamická turbulence se vyskytuje do výšky 4 kilometrů od povrchu země anebo pod hranicí tropopauzy, tedy oblasti cestovních hladin dopravního letectví.
- S touto turbulencí se však setkáváme i v nebezpečných oblastech letu, tedy při vzletu a přistání, kde se často váže na mechanickou turbulenci. Proto byla vybudována zařízení snímající stříhy větru, obsahující pět periferních snímačů větru a opatřené barografem pro odhalení změny tlaku okolního vzduchu. Můžeme naměřit i stříhy větru, kde rychlost dosahuje až 7,5 m.s, což pro každé letadlo na přistání je velmi nebezpečné, u proudových letadel musíme zvážit fakt, že ke zvýšení výkonu, tedy zvýšení tahu motoru, potřebují delší čas než letadla pístová, což vyplývá z konstrukce motorů.
- V této bakalářské práci se již dále budu zabývat turbulencí v bezoblačném prostoru, tedy CAT.

3. CAT – Clear Air Turbulence

Tato turbulence komplikuje let především v oblastech pod dolní hranicí tropopauzy. Nová letecká technika si přímo žádá lety v těchto výškách z důvodu vyšší výkonnosti a letu tzv. nad počasím, tedy mimo dosah nežádoucích meteorologických vlivů.

Do těchto vrstev atmosféry pronikají bouřkové oblaky Cb (Cumulonimbus) vertikálně prorůstající až do výšek 15 000 metrů. Jsou charakteristické především svým tvarem, kde jejich horní části mají tvar kovádky. Tento druh oblačnosti obléváme z důvodu silných vertikálních proudů vzduchu uvnitř oblaku (až několik desítek metrů za sekundu). Tato turbulence se často váže na tryskové proudění, tedy jet stream dále jen JTST.

Tryskové proudění je silné proudění vzduchu ve tvaru zploštělé trubice s kvazistacionární osou maximální rychlosti proudění vzduchu, zpravidla 1 – 2 km pod tropopauzou. Je charakteristické nejen velkými rychlostmi proudění, nýbrž i výraznými horizontálními a vertikálními stříhy větru. Horizontální rozměry podél osy JTST jsou tisíce kilometrů a vertikální rozměry jsou jednotky kilometrů [13].

3.1. Tryskové proudění a jeho význam

JTST je proudění větru, kde horizontální složka větru dosahuje až stovek kilometrů za hodinu. V některých případech můžeme i toto proudění využít ve svůj prospěch, může dojít i k význačnému snížení doby letu. Maximální rychlost proudu je v ose JTST.

JTST je charakteristický stříhy větru, a to jak ve vertikální tak horizontální. Existence JTST je přímo vázána na oblasti velkých horizontálních teplotních gradientů, a tím i tlakových gradientů. Příkladem může být zblížení studené výškové cyklony a teplé výškové anticyklony (obr. 2).



Obr. 2: Zobrazení průběhu tryskového proudění mezi cyklonou a anticyklonou

JTST může být vysoký až několik kilometrů, má šířku až několik stovek kilometrů a délku až tisíce kilometrů. Jedná se o mezikontinentální proudění. Průměrná rychlost JTST je 150 – 300 km/h, ale maximální rychlost může dosáhnout až 600 km/h, kterou často naměříme nad východní částí pobřeží Ásie a přilehlou částí Tichého oceánu.

Takovéto proudění se vyskytuje na bezoblačné obloze nebo při velmi malé oblačnosti viz obr. 3. Pokud oblačnost pokrývá oblohu, jedná se pouze o oblačnost druhu Cirrus, tedy o oblačnost vyskytující se v horních částech troposféry a nacházející se podél směru proudění s žebrováním napříč proudem.

Oblak druhu Cirrus (obr. 4) je typický představitel oblačnosti nacházející se ve výšce 7 – 14 kilometrů. Je složen z ledových krystalků. Má bílou jemnou vláknitou strukturu a nevrhá svůj vlastní stín, Slunce jimi snadno prosvítá.



Obr. 4: Oblačnost druhu Cirrus

Při předletové přípravě musíme být dostatečně seznámeni s polohou JTST, protože na JTST je zpravidla vázána turbulence v bezoblačném prostředí. Nedoporučuje se vletávání přímo do osy tryskového proudění pro let proti směru proudění, jelikož tato oblast se vyznačuje výraznými změnami úhlu snosu letadla. Ovšem tohoto proudění využíváme pro zkrácení doby letu nebo prodloužení doletu, kdy zvýšení traťové rychlosti může činit až 200 km/h. Jako příklad může sloužit non-stop přelet letounu DC 8 společnosti SwissAir s 27 cestujícími na palubě z Los Angeles do Bejrutu dne 30. října 1963, kdy bylo využito výrazného JTST a trať byla, v úzké spolupráci s meteorology, volena tak, aby bylo této výhody maximálně využito. Zvýšení traťové rychlosti činilo místy až 190 km/h (rychlost až 1023 km/h) a celý let trval 13 hodin 38 minut na vzdálenost 12 724 km, tedy s průměrnou rychlostí 922 km/h [14].



Obr. 3: Tryskové proudění zachyceno z raketoplánu na oběžné dráze Země. Zřetelné je ohraničení oblaky druhu Cirrus

Tropopauza

Tropopauza je přechodná vrstva mezi troposférou a stratosférou. Její tloušťka je různá, od několika kilometrů anebo naopak může být natolik slabá, že si žádného přechodu vůbec nevšimneme. Na průlet tropopauzou je totiž vázána turbulentní činnost, která může být slabá až mírná. Turbulenci slabou pozorujeme, pokud má tropopauza značnou tloušťku, s turbulentí mírnou, případně velmi ojediněle s turbulentí silnou, se setkáváme v případě tenké tropopauzy, tedy s výraznou inverzí teploty, přičemž nejsilnější turbulence je v ose JTST, a to 1 – 2 km pod tropopauzou.

Výška tropopauzy se může i značně měnit v krátkých časových intervalech. Příkladem je přechod aktivní studené fronty, která způsobí pokles výšky tropopauzy až o 5 kilometrů.

3.2. Turbulence velkých výšek

Letadla s tryskovými motory se ve výškách 9 - 12 kilometrů často setkávají s turbulentí někdy až silné intenzity. Tato turbulence může být způsobena dynamickou turbulentí, a to v oblasti tryskového proudění, nebo i termickou turbulentí spojenou s pronikáním bouřkových Cb do horní troposféry, případně do spodní stratosféry.

Dynamická turbulence bývá zdrojem nebezpečných poryvů a vyskytuje se v bezoblačném prostoru, odtud jí nazýváme CAT, Clear air turbulence. Vzniká při velkých gradientech rychlostí a směru větru, při velkém stříhu větru. Stříh větru je způsoben vnitřním třením mezi vrstvami vzduchu s odlišným směrem a rychlostí proudění.

3.3. CAT

CAT je označení pro dynamickou turbulenci v blízkosti tryskového proudění a tropopauzy, buď v bezoblačném prostoru a nebo oblačností málo pokrytým prostorem, v tomto případě se jedná o oblačnost Ci (Cirrus), Cc (Cirrocumulus) a Cs (Cirrostratus). CAT je každá turbulence nad výškou 5 500 metrů, a to pouze tehdy, pokud není vázána na oblačnost s vertikálním vývojem.

Turbulence se však vyskytuje dosti často ve vysoké oblačnosti a podle definice ji také zahrnujeme do pojmů CAT.

CAT je pozorována v tenkých pásmech o výšce 400 - 600 metrů, velice zřídka i 1 kilometr, v tomto případě je turbulence slabá. Tato pásma jsou rozložena nad sebou a mezi nimi jsou oblasti, které jsou relativně klidné. Oblasti CAT jsou dlouhé desítky kilometrů, někdy až stovky kilometrů, a široké desítky kilometrů. Čím je toto pásmo užší, tím je CAT silnější a naopak. Pásma jsou nehomogenní, jsou rozdělena na jednotlivé pásy, v nichž můžeme očekávat silnější či slabší turbulenci. Vlivem nehomogenity pásem je délka trvání a čas turbulence měřitelná v minutách.

Pokud let probíhá pásmem s vírovým prouděním, jehož vlny jsou přibližně stejně velké jako letadlo, dochází k chvění a kymácení letadla, při letu ve zvlněné vrstvě nastává především chvění letadla, tzv. jízda po kočičkách hlavách nebo rozkmitání letadla podle délky a amplitudy vln a rychlosti letadla. Častější je však výskyt vírového proudění.

Pásmo turbulence je ze všech stran poměrně ostře ohraničené, takže letadlo se dostane do oblasti s turbulencí náhle, přímo z klidného prostoru, a zase náhle bez postupného přechodu z této oblasti vylétne. Mnohdy k tomu dochází v bezoblačném prostoru, bez viditelného upozornění na možnost výskytu CAT, což samo o sobě stupňuje nebezpečnost existence CAT na letecký provoz [14].

Při pronikání mohutných Cb do vysokých vrstev troposféry nebo i do stratosféry nad tropopauzu vzniká kolem horní hranice Cb turbulence, kterou sice nezahrnujeme do pojmu CAT, ale pokládáme ji za turbulenci spojenou s turbulencí termickou (s konvekcí), zahrnujeme ji však do pojmu turbulence velkých výšek [14].

Horní hranice Cb s přilehlou vrstvou (asi 300 metrů nad vrcholem) je turbulentní. Turbulenci lze očekávat dále nad Cb calvus obr. 5, nad výdutěmi Cb, nad rovnou hladinou Cs tvořícího kovadlinu, značná turbulence je na okrajích kovadliny tvořené Cs a také na okrajích pásů Ac, kterými bývá Cb obklopen. Rychle rostoucí Cb může být sám o sobě impulzem pro rozvlnění stabilní vrstvy, kterou proráží. Vlnění pak postupuje dále s prouděním a může se projevit turbulencí i dosti daleko od původního Cb. Obvykle jsou takto vzniklá pásma turbulence velmi úzká (cca 1 km) [14].



Obr. 5: *Cumulonimbus calvus*

Analýzou aerologicko-synoptických podmínek, při kterých se vyskytuje CAT, se zjistilo, že v 70% případů je CAT spojena s oblastmi JTST, i když její intenzita je velmi proměnlivá – od slabé až po silnou. V tomto případě existují všechny základní podmínky, které jsou příhodné pro vznik CAT – jde především o nehomogenitu v poli větru, výskyt velkých horizontálních gradientů teploty vzduchu, souvislost mezi výskytem turbulentních oblastí s oblastmi konvergence (sbližování) a zvláště divergence (oddalování) proudění provázané anticyklonálním zakřivením proudnic.

Při výskytu stříhu větru napříč proudění leží oblast CAT vždy bezprostředně v samotném JTST, vlevo od osy zhruba na vzdálenost 100 - 200 km s délkou 300 - 500 km. Na výskyt CAT při stříhu větru podél proudění připadá největší množství případů jejího výskytu. CAT při výrazném stříhu podél proudění (cca 50 km/h) má charakter kymáčení letadla nebo jeho výrazného poklesu nebo vzestupu. Ze zkušenosti letců vyplývá dále, že při rychlostech proudění v ose JTST (180 - 220 km/h a více) je CAT na jeho cyklonální straně místy až silná, chaotická a na velkém prostoru. Lze říci, že silná CAT je nejpravděpodobnější na cyklonální straně JTST ve výšce osy nebo něco málo pod osou a v jeho deltě. CAT se častěji vyskytuje nad oceány než nad pevninou [14].

Přibližně v 75% případů se CAT vyskytuje v oblasti JTST s maximem na cyklonální straně, přičemž 2/3 případů připadá na slabou turbulenci a 1/3 na mírnou až silnou turbulenci. Největší pravděpodobnost výskytu CAT připadá na vrstvu 500 - 1000 metrů pod skloněnou tropopauzou na straně nízkého tlaku. Se vzdálením od této vrstvy směrem dolů i nahoru dochází k rychlému poklesu četnosti výskytu CAT, přičemž k rychlejšímu poklesu četnosti výskytu dochází při výstupu na tropopauzu. Z toho vyplývá, že ve spodní stratosféře se pravděpodobnost výskytu CAT rychle zmenšuje s výškou, takže ve výškách řádově nad 15 kilometrů je CAT v mírných šířkách jevem poměrně řídkým [14].



3.4. Předpověď CAT

V předletové přípravě je záhodné získat informace o podmínkách, které mohou způsobit vznik CAT. Podle [13] takovými informacemi mohou být:

- mapa maximálního větru a mapa tropopauzy
- výškové mapy horní troposféry a spodní stratosféry, na nichž je vidět průběh JTST, zakřivení izobar, větvení JTST, spojování a větvení JTST apod.
- vertikální řezy atmosférou, znázorňující polohu JTST, hlavně z hlediska vertikálního rozdělení rychlostí proudění a ukazující průběh tropopauzy v prostoru JTST
- mapa vertikálních stříhů větru
- přízemní synoptická mapa s polohou frontálních rozhraní

Mapa význačného počasí SW vydaná 4. ledna 2008 (obr. 5 viz příloha) zobrazuje Evropu a předpověď trajektorie tryskového proudění a s ním spojenou CAT. Jedná se o mapu SWM, vyznačující předpovídané počasí mezi hladinami FL 100 – 450.

Tab. 2: Vyznačení turbulence a její intenzity na mapách význačného počasí

Intenzita turbulence	Označení turbulence na SW-mapách
Mírná	
Silná	

Tryskové proudění je vyznačeno tlustou černou čarou, přičemž na této čáře je vyznačena letová hladina výskytu i rychlost proudění a to vyplněnými trojúhelníčky - praporečky a čárkami - opeřením. Praporek má hodnotu rychlosti 50 kt a pířko 10 kt.

Oblast CAT (označeno číslem s červeným orámováním) ohraničená přerušovanou čarou se nachází především na cyklonální straně. Každé číslo zobrazuje oblast CAT pro které si můžeme v tabulce dohledat hladinu výskytu turbulence a podle tabulky výše i intenzitu turbulence.

Všimněme si, že oblast číslo 5 pokrývá letové hladiny v rozmezí FL180 – 410 (5,6 km – 12,8 km), a v případě průletu touto oblastí se tu setkáme se silnou turbulencí a s mírnou turbulencí nad vrcholy Cb (OCNL – dobře separované Cb, jednotlivé).

3.5. Incidentsy spojené s CAT

Dne 30. prosince 1997 letadlo 747 společnosti United Airlines číslo letu 826 letělo z Japonska na Hawajské ostrovy. Po dvou hodinách letu ve výšce 9 400 metrů piloti dostali od dispečerů zprávu, že v oblasti, kterou prolétají, mohou očekávat až silné turbulence. Po obdržení této zprávy vletli do oblasti extrémní turbulence a letadlo se propadalo až o 30 metrů. Posádka i cestující byli zraněni, jeden cestující byl mrtev, letadlo však nebylo významně poškozeno [16].

Dalším případem střetu s CAT je let AK5100 společnosti AirAsia, který letěl z Kuala Lumpur do Kota Kinabalu (Malajsie). Letadlo se s turbulencí střetlo po jedné hodině letu, část posádky utrpěla pohmožděniny.

4. Vulkanická činnost a její vliv na letový provoz

Na celé planetě se každým rokem přihlásí o slovo několik desítek sopek, přesto pouze menší část z nich představuje akutní ohrožení lidských životů. Zemětřesením je ohrožena asi 1/10 obyvatelstva Země, ale doprovodnými ději může být ohrožena i větší část populace. Nebylo by ovšem moudré toto riziko podceňovat, neboť mnoho vulkánů se probudí náhle a právě díky nepřipravenosti a podcenění často umírá množství nevinných obětí. Na druhou stranu mohou být doprovodné projevy vulkanismu, spojené se zvýšeným tokem geotermální energie, velmi pozitivně společností využity. Vulkanického ohrožení je v rámci celé zeměkoule ušetřen pouze jediný kontinent - Austrálie. [20]

4.1. Ochrana před následky a druhy nebezpečí výbuchu sopky

Ochrana před možnými následky je dvojího charakteru, aktivní a pasivní.

Pasivní ochrana - jedná se o evakuaci obyvatelstva z okolí, není dostatečně účinná u sopek, u kterých se nedá jednoznačně určit, kdy může dojít k erupci.

Aktivní ochrana - stavění různých zábran či výkopů, které odvedou lávu pryč do bezpečných zón, případně se odvádí i zátopová blátivá vlna.

Důležitou složkou ochrany je monitorování a zónování oblastí pod sopkami.

U aktivní sopky se shledáme se dvěma druhy nebezpečí:

- Primární nebezpečí je spojené přímo s aktivitou, tedy vyvrhováním hornin do okolí, vytékáním lávy, vznikem zemětřesení a také zvedáním obrovských mračen jemného prachu do ovzduší a jeho roznášením do obrovských dálek.
- Sekundární problém je deformace povrchu v okolí sopky, ukládání sopečného prachu v okolí, a tím vznikající nestabilita svahů, v případě výbuchu sopky pod hladinou moře vznikají tsunami, vytvářejí se kyselé deště z důvodu obsahu síry a dalších chemických látek v plynu sopky. Po erupci sopky na Islandu dochází k povodním v důsledku tání ledovců.

4.2. Rozdělení sopek

Sopky můžeme v zásadě velice hrubě rozdělit na tři základní druhy.

1. Sopky vyhaslé, tedy u kterých nebyla zaznamenána za dobu lidské existence žádná činnost.
2. Sopky dřímající, které sice nevykázaly žádnou činnost, ale z jejich doprovodných dějů je patrná jistá možnost aktivace.
3. Sopky aktivní, činné, u kterých probíhají erupce nebo další děje spojené se sopečnou činností.

Toto rozdělení je vytvořeno z historických záznamů erupcí sopek. Porovnáním těchto záznamů a stáří Země je to ovšem velice krátkou chvílí, a proto je toto rozdělení hrubé.

Z. Kukul [6] podle charakteru erupcí rozlišuje 5 typů sopek:

1. Havaj – tekutá láva se vylévá klidně puklinami, vznikají velké pokryvy láv
2. Stromboli - stratovulkány, vzniklé postupným vrstvením vyvrženého materiálu, láva je vyvrhována plynnými explozemi jako struska, krátkodobé lávové výlevy; střídá se období silnější a slabší činnosti
3. Vulcan - stratovulkán s centrálním kráterem, viskózní láva ucpává přívody, tlak plynů po čase proráží jícnem, nastává výbuch a vývrh usazeného materiálu, po explozi klidně vytéká láva
4. Vesuv - z hluboko uloženého magmatického krbu se na povrch dostává láva bohatá na plyny, silnými explozemi je vyvrhována do atmosféry (několik km) a dopadá zpět jako popel, aktivita je epizodická, dlouhá období klidu
5. Mt. Peleé - velmi viskózní láva ucpává přívod a vytváří vulkanický dóm, tvoří se žhavá mračna

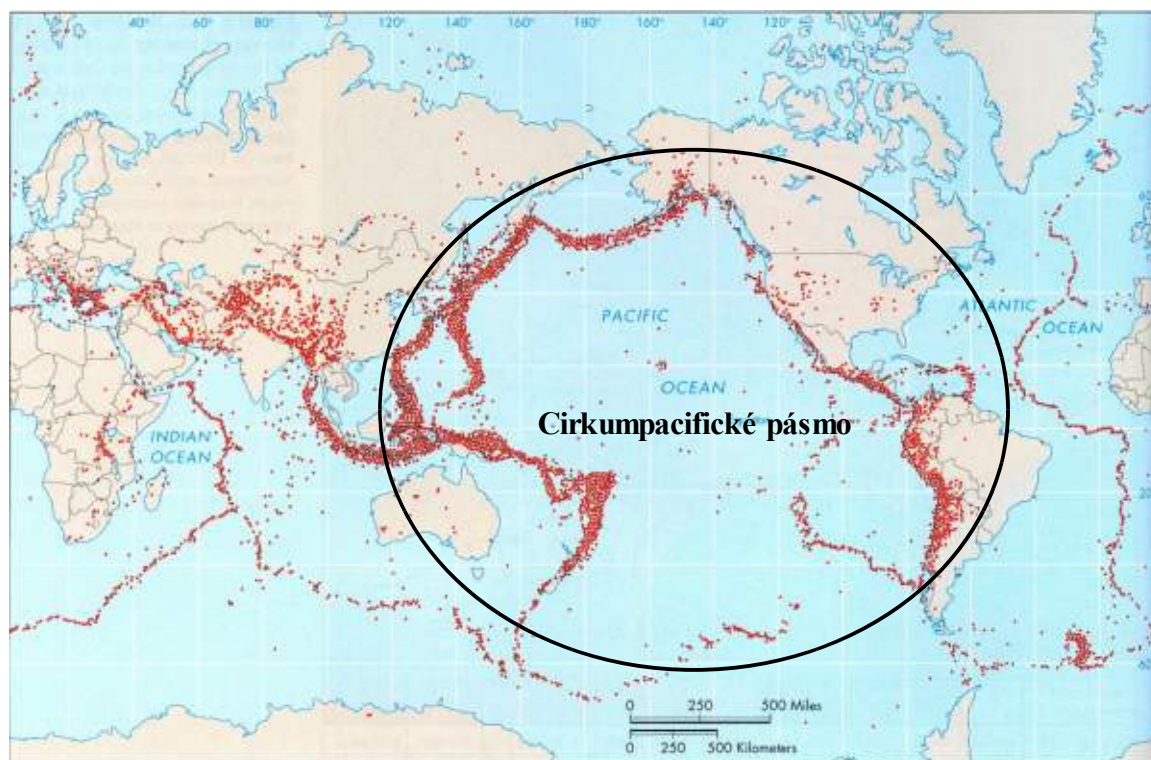
Pro letový provoz jsou nejnebezpečnějšími typy sopek Vulcan, Vesuv a Mt. Peleé z důvodu značného vyvrhování vyvěřelin a sedimentů, a tím tvořením vulkanického popela, který je unášen mnohdy až tisíce kilometrů daleko.

Typickým představitelem sopky typu Mt. Peleé je sopka Pinatubo, na obrázku zachycena erupce z roku 1991 (obr. 6).



Obr. 6: Erupce sopky Pinatubo v roce 1991

4.3. Místa výskytu sopek a vznik



Obr. 7: "Kruh ohně". Rozložení činných sopek na Zemi

Sopečná činnost jako endogenní geologický jev je úzce vázána na seismickou činnost. Tzv. Kruh ohně je v seismologii nazýván cirkumpacifické pásmo.

Hlavním místem výskytu sopek je cirkumpacifické pásmo, označované také jako „Kruh ohně“, který zahrnuje zhruba 2/3 všech sopek nacházejících se na Zemi a váže se na okraje tichomořské desky a desky Nasca. Rozložení činných sopek můžeme vidět na obr. 7. Celkem na Zemi existuje 540 činných sopek.

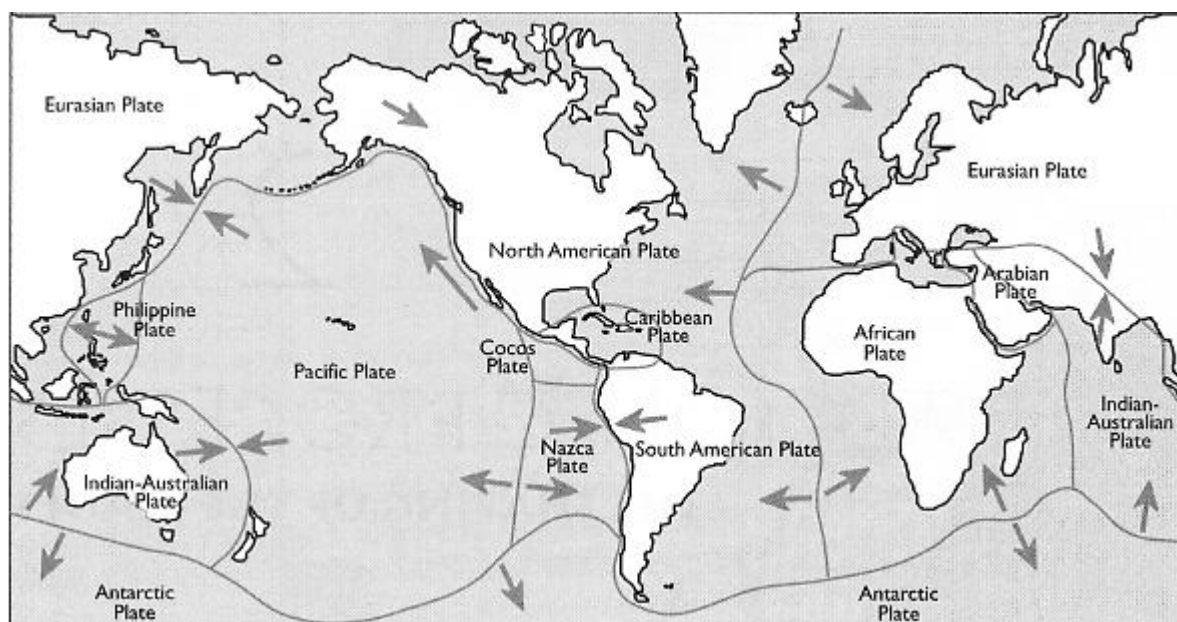
Pro vznik sopečné činnosti jsou příznivá čtyři geologická prostředí [6] :

Tab. 3: Rozdělení geologických prostředí podle výskytu sopečných činností

Geologické prostředí	Charakter magmatu	Hlavní oblasti
subdukční zóny	felsické	Kurily, Kamčatka, Japonsko, Indonésie, střední Amerika, Středozeří
riftové zóny	bazické	Východoafrický rift, Island, Azory
významné zlomy	oba typy	Karibská oblast, Kanárské a Kapverdské ostrovy
horké skvrny	bazické	Havajské ostrovy, Galapágy

Tato prostředí mají za následek i jiné složení magmatu a dokonce i povahu erupcí. Z obrázku a z tabulky si můžeme povšimnout, že právě místo střetu tektonických desek má za následek vytvoření sopek a následné jejich činnosti. Na Zemi je 7 hlavních tektonických desek, které jsou znázorněny na obr. 8. Na obrázku jsou znázorněny i směry pohybu desek.

Před 180 milióny let neexistoval Atlantický oceán a Severní Amerika s Evropou byly spojeny. Respektive existoval jeden velký světadíl, který se jmenoval Pangea. Z obrázku je také vidět, jak do sebe jednotlivé dnešní kontinenty v minulosti zapadaly.



Obr. 8: Znárodnění tektonických desek na Zemi

4.4. Výbuch sopky v roce 1883

Zřejmě největší výbuch v historii, který byl detailněji zaznamenán, byl výbuch sopky Krakatoa ležící mezi ostrovy Jáva a Sumatra. Sopka se nachází nad subdukční zónou, kde s podsouvá indicko-australská deska pod sundskou. Je záhodno dodat, že právě tato oblast obsahuje více než 130 aktivních vulkánů. Před erupcí obsahoval ostrov tři vulkanická centra viz (obr. 9).



Obr. 9: Mapka znázorňující ostrov před výbuchem

Hlavní výbuch sopky byl pozvolný, předcházelo mu několik menších erupcí. První nastala 20. května 1883, kdy začal severní kráter Perboewatan chrlit 6 kilometrů vysoký mrak popela a par viditelný do vzdálenosti 160 kilometrů. Koncem května aktivita postupně ustala.

Následný výbuch byl 19. června 1883, kde došlo k výbuchu mezi krátery Perboewatan a Danan v místě dnešního Anak Kratau (obr.10).



Obr. 10: Mapka znázorňující ostrov po výbuchu

Další erupce byla zaznamenána 24. srpna 1883, byla to mohutná erupce, při které mrak popela vystoupal až do výšky 27 kilometrů. Poslední a finální fáze dne 27. srpna měla katastrofální následky. Čtyři erupce, po sobě následující po hodině, vyvolaly čtyři vlny tsunami vysoké až 30 metrů, jejichž sekundární vlnění bylo zaznamenáno až v Lamančském průlivu. Zvuky explozí byly slyšitelné na vzdálenost několika tisíc kilometrů.

Sopečný popel zahalil oblast o poloměru 60 kilometrů. Během bouřlivého chrlení došlo k vyprázdnění magmatického krbu, tedy místa shromáždění magmatu pod povrchem, a k jeho zborcení. Tím se do uvolněných prostor dostala mořská voda a její náhlá přeměna na páru vyvolala poslední a nejničivější explozi. Příštího dne sopka utichla a z ostrova zůstalo pouze torzo a 250 metrová kaldera, tedy kulovitá prohlubeň. Celé těleso sopky bylo naprosto zničeno. Avšak za několik desetiletí později se začal formovat nový kráter, který dnes dosahuje téměř původní výšky vulkánu a jmenuje se Anak Krakatau – Syn Krakatoa (obr.11) [3].



Obr. 11: Nově se vytvářející vulkán

Následky výbuchu byly katastrofální. O život přišlo bezmála 36 000 lidí, se zemí bylo srovnáno 165 měst a vesnic a dalších 132 bylo poškozeno. Do ovzduší bylo vyvrženo 20 kilometrů krychlových popela, které se následně rozptýlilo ve stratosféře a způsobovalo rudě zbarvené západy Slunce. Průměrná roční teplota na Zemi byla snížena o 1 °C, návrat k původním hodnotám se předpokládal v roce 1888.

Dalším velkým výbuchem byl výbuch sopky tehdy se nacházející na dnešním ostrově Santorini, který leží na jižním okraji souostroví Kyklády mezi Řeckem, Krétou a Tureckem.

Na obr.12 vidíme ostrov Santorini nyní se skládající ze tří ostrůvků, přičemž uprostřed dvou největších se nachází zbytek vulkánu. Uvádí se, že výbuch, který se datuje do dob 17. století př. n. l., byl asi 100 x silnější než výbuch sopky Krakatoa v roce 1883. Dokonce i dějepisci se domnívají, že tento výbuch měl za následek pád minojské civilizace.

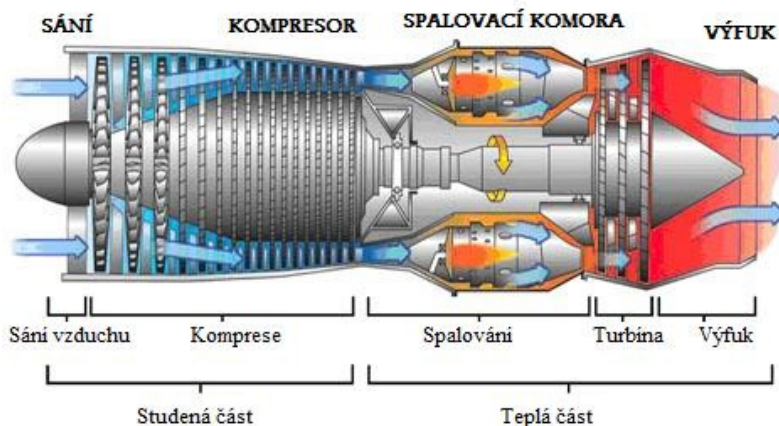


Obr. 12: Ostrov Santorini na družicovém snímku

Pro srovnání : výbuch vulkánu na ostrově Santorini měl sílu 2 400 megatun, bomba svržená na Hirošimu explodovala silou 15 kilotun, největší výbuch lidstvem vytvořené bomby měl sílu 50 megatun.

4.5. Nebezpečí sopečného popela

Do dnešní doby nepředstavoval sopečný prach větší problémy, protože tehdejší proudové motory měly menší provozní a pracovní teploty proudového motoru a nebyly příliš náchylné k zhasnutí motoru. Sopečný popel se totiž začíná tavit již při 1000 °C a moderní proudové motory běžně pracují s teplotou 1400 °C. Popel se při těchto teplotách nataví, vytvoří hmotu připomínající bláto a napeče se na lopatky a na obvod spalovací komory a dojde k zhasnutí plamene ve spalovací komoře, případně k pumpáži [12].



Obr. 13: Znárodnění základních částí proudového motoru

Vulkanický popel obsahuje i nejmenší části velmi tvrdých minerálů, které slouží jako abrasivum při vyšších rychlostech. Třením o povrch letadla vznikají elektrické výboje, které mohou způsobit „zmatení“ palubních přístrojů a vedou k jejich nesprávné indikaci.

Popel, který se již do proudového motoru dostane a způsobí zhasnutí motorů, nelze aktivně odstranit. Odstraní se pouze rychlým sklesáním, kdy se popel ochladí a následně se rozláme a odlétává z motoru ven. Až poté je možné motory znovu nastartovat a nouzově přistát. Pokud jsou motory poškozeny, dochází i k významnému rozvážení lopatek, což vede k vibracím a motor se může doslova rozletět. V lepším případě může po nasátí popela dojít k pumpáži, což je děj při kterém se odtrhává proudění od oběžných nebo statorových lopatek, a tím dochází k ztrátě stability průtoku v kompresorové části proudového motoru. Charakteristický je doprovodný zvuk a šlehání plamene z výfuku motoru. Jev je to velmi nebezpečný, jelikož ve spalovací komoře může zhasnut plamen [1]. Na obr. 14 vidíme lopatky postižené erozí a připečením sopečného popela.



Obr. 14: Statorové lopatky proudového motoru po průletu sopečným mrakem

Vulkanický popel je natolik jemný, že ho nedokáží zachytit ani běžné filtry pístových motorů. Částice tohoto popelu mají velikost od 1 do 15 μm . Běžné vzduchové filtry pístových leteckých motorů odfiltrují částice větší než je velikost částice popelu. Částečnou ochranou je použití tzv. HEPA filtrů, které odstraňují částice velikosti až 300 nm. Pokud tedy dochází k nasávání popelu i přes filtr, postupně se zanáší důležité orgány motoru, kterými mohou být škrtkové klapky, váha vzduchu a jiné. Pokud je motor vybaven novými systémy vstřikování paliva, dochází k ucpaní vstřikovacích špiček a tzv. vynechávání motoru, motor nemusí pracovat správně, a tím se rapidně sníží jeho výkon.

V případě průletu sopečným popelem by se měl vyměnit motorový olej i s olejovým filtrem a důkladně propláchnout motor speciálními proplachovými oleji. Částečky popela se dostávají i do spalovacích prostor válce, kde ulpí na stěně tohoto válce, a stírací kroužky, určené pro setření nečistot v podobě sazí a olejového filmu, odstraní i tento jemný popel. Následně se dostává do motorového oleje a olejové čerpadlo tyto částečky roznese po celém motoru, kde dochází ke zvyšování tření v ozubených částech motoru. Olej spojený s popelem výborně slouží jako abrasivum vně motoru.

Sopečný popel obsahuje i velice korozivní chemické látky, například H_2SO_4 nebo oxid siřičitý SO_2 . Celé letadlo po průletu sopečným mrakem musí být důkladně zkontrolováno a omyto.

4.6. Historie výskytu problémů se sopečným popelem v letovém provozu

Od roku 1982 jsou piloti školeni na rozpoznání vlivů sopečného popela. Při průletu sopečným popelem se vždy musí stáhnout otáčky na minimum, aby se snížila pracovní teplota motoru, a začít co nejdříve klesat.

Také od této doby jsou vydávány zprávy SIGMET na výskyt sopečného popela a vyznačením na mapách význačného počasí. Tuto speciální zprávu SIGMET zpracovává centrum v Toulouse, jehož označení je Volcanic Ash Advisory Centrum. Zabývá se předpověďmi trajektorií pohybu mraku sopečného popela.

V roce 1982 Boeing společnosti British Airways převážel 240 pasažérů a do sopečného mraku vletl ve výšce 11 000 metrů, 180 km jiho-východně od Jakarty v Indonésii (obr. 15). Cestující sedící u okýnek si všimli Eliášových ohňů (elektrometeor projevující se jako akustický a optický jev vyvolaný vybitím statické elektřiny) kolem motorů a náběžných hran křídel. Eliášovy ohně spatřili i piloti v kabině, avšak na čelním skle. Meteorologický radar však neindikoval žádné meteorologické problémy.

U jednoho z motorů došlo k pumpáži a motor se zastavil. Po minutě postupně zhasínaly ostatní motory. Bylo zahájeno klesání, a to v klesavém poměru 1:15, tedy na 1 kilometr délky 15 kilometrů výšky, pro porovnání L-23 Superblaník má tuto hodnotu 1:28. Posádka rychle propočítala, že sestup z výšky letu bude trvat 23 minut a uletí tak vzdálenost 169 kilometrů. Avšak v zápětí na to nastal pokles tlaku v kabině a kapitán Boeingu musel klesat rychlostí 1 800 metrů za minutu do výšky, kde je pravděpodobné, že většina pasažérů nebude mít dýchací potíže. Za tuto výšku se považuje výška kolem 4 kilometrů. V této výšce se pilotům podařilo nastartovat postupně tři ze čtyř motorů a poté za využití přistávacích systémů letiště v Jakartě úspěšně přistáli. Vulkanický popel poškrábal natolik čelní skla letadla, že piloti museli provést přístrojové přiblížení až do dosednutí [1].

O měsíc později Boeing společnosti Singapore Airlines s 230 pasažéry na palubě vzlétl do mraku téže sopky v noci, tři motory ze čtyř se zastavily, a po prokletání 2 500 metrů se pilotům podařilo znovu nastartovat zbylé motory.



Obr. 15: Výbuch sopky Galunggung dne 16. srpna 1982

4.7. Detekce vulkanického popela palubními přístroji

Palubní povětrnostní radar (AWR) je nepoužitelný pro detekci sopečných mraků, jelikož pracuje na zcela jiném principu rozpoznávání a detekci jevů před letadlem.

Radar AWR pracuje s délkou vysílané elektromagnetické vlny 3,2 cm na kmitočtu 9375 MHz a rozlišuje velké kapky a mokré kroupy, které mají právě velikost okolo 3 cm. Vlna se od předmětů stejných délek dobře odráží, takový předmět slouží jako anténa. Od předmětů menších délek se vlna neodráží. Obr. 16 zobrazuje barvami prostor srážek, zelená - slabé odrazy, žlutá - středně silné odrazy, červená - silné odrazy.

Piloti se tedy musí spoléhat pouze na předpovědi sopečných erupcí, které jsou zakresleny v mapách význačného počasí.

Na obr. 5 v příloze v levém dolním rohu je v obdelníku vyznačena sopka Etna se souřadnicemi. Sopka Etna nacházející se na Sicílii je označena stejným symbolem jako v obdelníku, avšak nejsou zde dodatkové informace z důvodu nedostatku místa. Tento symbol platí pro erupci sopky. V tomto případě musíme kontrolovat zprávu ASHTAM a NOTAM pro zjištění šíření vulkanického popela.



Obr. 16: Ukázka displaye z palubního meteorologického radaru

4.8. Sopka Grimsvötn

Když v roce 2004 vybuchla sopka Grimsvötn na Islandu, nebyl nikdo zraněn a předešlo se následné katastrofě tím, že v dostatečné době předtím byli včas lidé uvědoměni. Avšak i přesto měla erupce sopky následky. Farmáři byli nuceni zahánět stáda ovcí z luk protože louky, kde se ovce pasou, pokryl popel a spad hornin ze sopky, které byly ostré jako rozbité sklo. Horniny vylétávaly ze sopky až do výšek 12 kilometrů. Jelikož i v tu dobu převládaly západní větry, popel dopadl i na území Švédska, Finska a Norska.

Byly zakázány vyhlídkové lety nad Islandem, nizozemská dopravní společnost KLM odvolala téměř 60 letů a piloti letadel prolétající kolem odkláněli letadla jižněji od ostrova. Grimsvötn patří mezi tři největší sopky Islandu, dalšími dvěma jsou Hekla a Katla. Největší škody napáchal v roce 1993 a 1995, kdy způsobil masivní záplavy z důvodu vylití jezera, které se nachází na jeho vrcholu. A právě toto jezero má na svědomí aktivitu sopky Grimsvötn. Jezero udržuje sopku za normálních okolností v klidu díky tlaku, jenž na něj vyvíjí. Avšak jezero se pozvolna vypařuje, a to se podílí na vyhřeznutí magmatu na povrch. Odborníci proces přirovnali k ději, který nastane, když se z Papinova hrnce zvedne poklička [11].



Obr. 17: Erupce sopky Grimsvötn roku 1998. První den erupce

Sopka Grimsvötn leží pod největším ledovcem Evropy - Vatnajokull. Jeho rozloha je téměř 8 300 km² a celková výměra činí 4000km³.

Islandský vulkanolog Páll Einarsson dne 1. listopadu 2010 pronesl, že je velká pravděpodobnost další erupce sopky Grimsvötn na základě pozorování otřesů země a tání vody, které se silně podobají podobným událostem, jako tomu bylo v roce 2004, tedy poslední erupce Grimsvötnu. Tato sopka není nikterak nebezpečná a to z důvodu její velmi častých erupcí, které nastaly v letech 1993,1995,1998,2004.

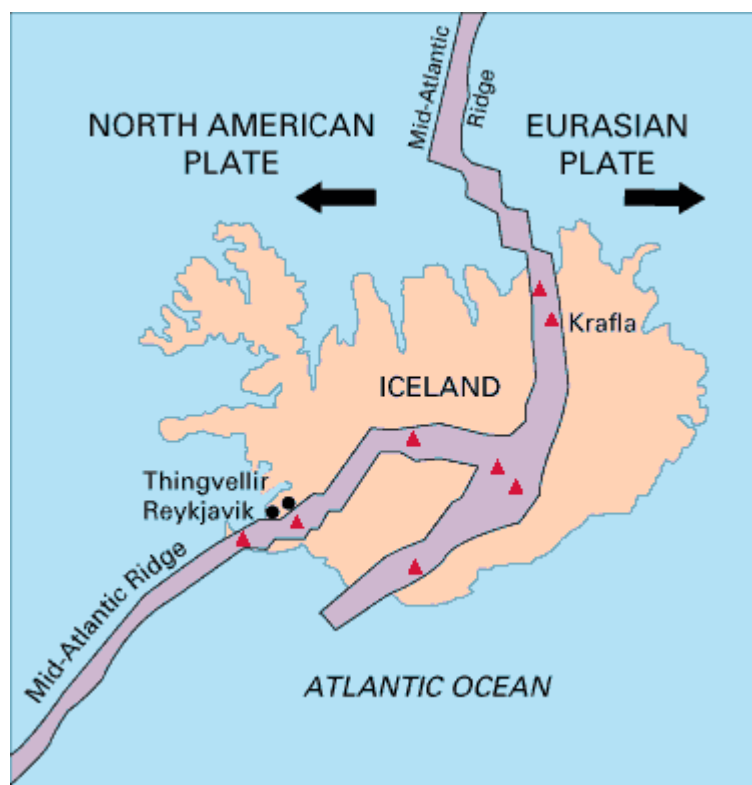


Obr. 18: Sopečný mrak sopky Grimsvötn ze dne 4.listopadu 2004

Sopka Katla se nachází pod ledovcem, který je až 700 metrů mocný. Sopečný kráter má průměr 10 kilometrů a k erupcím dochází přibližně dvakrát za století. V historii byla erupce Katly vždy vázána na erupci sopky Eyjafjallajokull, která dřímá pod stejnojmenným ledovcem. Sopka Eyjafjallajokull, jejíž poslední erupce byla v dubnu 2010, vyvolává mezi odborníky spekulace, zda-li a případně kdy dojde k erupci sopky Katla. Při výbuchu dochází ke střetu magmatu s vodou a touto kombinací dochází k dalším explozivním erupcím, které mají za následek vyvržení sopečného materiálu, a tím vytvoření vulkanického mraku.

Proč je právě Island natolik vulkanicky aktivní?

Ostrov Island se nachází na přelomu dvou tektonických desek, Severoamerické a Euroasijské desky. Tyto desky se od sebe vzdalují, a tím dávají možnost prostupu magmatu z hloubek na povrch.



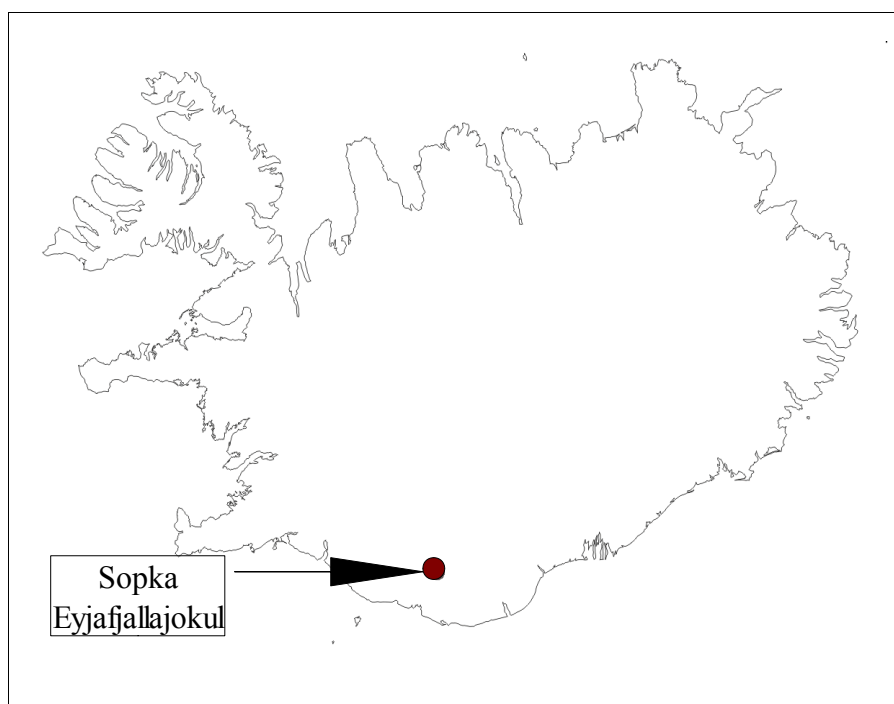
Obr. 19: Mapa ukazující středooceánský hřbet a jeho průběh Islandem

4.9. Sopka Eyjafjallajokull

V dubnu 2010 vybuchla islandská sopka Eyjafjallajokull a na celý měsíc zastavila leteckou dopravu nad celou Evropu a dokonce i nad částí východní Ásie. Erupce však nebyla náhlá, v průběhu svátků vánočních roku 2009 byla zaznamenána seizmická aktivita, doprovázena tisíci menšími zemětřeseními z hloubek až 10 kilometrů. Na konci února 2010 seizmologové naměřili posuvy zemské kůry a usoudili, že magma se shromažďuje v magmatickém krbu sopky. V březnu 2010 dala sopka o sobě vědět vyvržením magmatu na povrch z praskliny utvořené 8 kilometrů od vrcholu sopky.

Dne 14.dubna 2010 sopka vybuchla. Lidé z blízkosti byli včas varováni a evakuováni, a to

nejen z ohrožení vlivem erupce, ale i z obrovské masy vody, která pocházela z tajícího ledovce, napájející turisticky nejzajímavější vodopád na Islandu Skogafoss (obr.20)



Obr. 20: Mapa Islandu a poloha sopky Eyjafjallajökul

Sopka Eyjafjallajökul (Eyja = ostrov, fjalla = hora, jökul = ledovec) se nachází na jižním okraji Islandu pod až kilometr tlustým ledovcem, jehož povrch zaujímá plochu až 77 km². V důsledku globálního oteplování dochází k postupnému odtávání tohoto ledovce, jeho hmotnost se tím snižuje. Hmotnost ledovce tu hraje roli závaží, snížil se tlak ledovce na kráter sopky a následně došlo k erupci.

Při této erupci chrlila sopka popel do výšky několika kilometrů. Druhý den ráno byla jím zasažena, v důsledku převládajícího proudění, Velká Británie a část Skandinávie (obr. 21 a 23, příloha). Do atmosféry bylo vyvrženo až 5 milionů krychlových metrů horniny, prachu a popelu a dostal se až do horních hranic troposféry.

Jako první zasažené větší letiště bylo londýnské Heathrow, které ihned zastavilo více než polovinu letů. Anglická aerolinka British Airways každým dnem utrpěla ztrátu přes 10 milionů liber denně.

Zastavení celé vzdušné dopravy v Evropě na sebe nenechalo dlouho čekat, již 16. a 17. dubna, byla zastavena letecká doprava v Nizozemí, v Německu, v Polsku a také v České republice. Mezinárodní sdružení pro leteckou dopravu – IATA uvádělo, že celková ztráta aerolinek byla až 200 milionů dolarů denně.

Běžný počet přeletů nad Evropou je 28 tisíc letů denně, přičemž 15. dubna 2010 jich bylo pouze 10 tisíc. Po uzavření vzdušných prostorů nad Polskem, Německem a Českou republikou se tento počet přeletů dál snižoval.

Celkem bylo zrušeno přes 100 000 letů a erupce způsobila leteckým společnostem ztrátu až 3 miliardy eur. O zrušení letů a uzavření vzdušných prostorů rozhodoval Eurocontrol. Prostor nad Velkou Británií byl zastaven na 6 dní. I přes všechna rizika spojená průlety sopečných mraků se ozývali lidé, a to právě z řad britských leteckých společností, že zastavení letů bylo zbytečné a sopečný popel nebyl nijak zvláště nebezpečný.

Následující měsíc byl velmi deštivý, což meteorologové odůvodňují tím, že jednotlivá zrnka popelu posloužila jako kondenzační jádra pro vodní kapky.

Tab. 4: Omezení letového provozu v Evropě – platné k pátku 16. 4. 2010 18.00h
(zdroj: Lidové noviny, 17.dubna 2010, s. 2-3)

Stát	Počet zrušených letů	Doba uzavření letiště
V. Británie	Uzavřený vzdušný prostor	Do soboty 8.00
Nizozemsko	Uzavřený vzdušný prostor	Do soboty 6.00
Belgie	Uzavřený vzdušný prostor	Do soboty 10.00
Dánsko	Uzavřený vzdušný protor	Do soboty 6.00
Norsko	Uzavřený vzdušný protor	Pátek
Švédsko	Uzavřený vzdušný protor	Pátek
Finsko	Uzavřený vzdušný protor	Do neděle 14.00
Estonsko	Uzavřený vzdušný protor	Do neděle 2.00
Lotyšsko	Uzavřený vzdušný protor	Do soboty 8.00
Německo	Uzavřeno 13 mezinárodních letišť	
Česká republika	Uzavřený vzdušný protor	Nejméně do soboty 8.00
Slovenská republika	Uzavřený vzdušný protor a zrušené lety	Do odvolání, nejméně do nedělní noci
Francie	Uzavřeno 23 severních letišť	Do soboty 12.00
Švýcarsko	Uzavřený vzdušný protor	Do soboty 9.00
Rakousko	Postupné uzavírání letišť	
Maďarsko	Uzavřený vzdušný protor	Od pátku 19.00
Rumunsko	Uzavřený vzdušný protor a zrušené lety	
Itálie	Zrušeno 34 letů do Evropy	
Řecko	Zrušeno 85 letů do Evropy	

Itálie a Řecko nezaznamenaly nad svým územím výskyt sopečného popelu a letiště neuzavřely. Avšak i přesto museli zrušit lety do Evropy. K pátku 16. 4. 2010 bylo zrušeno více než 100 letů do Evropy jen z těchto dvou zemí. Dalšími zeměmi, které neprováděly lety do Evropy, byly Rusko, Španělsko, Bulharsko a Egypt.

Největší mezinárodní letiště České republiky Praha - Ruzyně zrušilo k 15. 4. 2010 12.00 hod 10 letů a ČSA celkem 5 letů, z Manchesteru do Prahy a z Prahy do Osla. Odpoledne pak byly odstaveny linky z Prahy do Londýna.

Erupce postupně utichla, chrlení hornin a vulkanického popelu postupně sláblo, což

bylo zaznamenáno kolem 1. 5. 2010. Ovšem 7. 5. 2010 se objevila další erupce, která znovu způsobila zastavení letového provozu nad Velkou Británií a západní Evropou. Tentokrát sopečný mrak o šířce 2000 kilometrů zasáhl i Španělsko, kde bylo uzavřeno na 15 letišť. Při této aktivitě vyvrhovala sopka popel až do výšky 9 000 metrů. Celkem byly znovu zrušeny stovky letů mezi Evropou a Amerikou. V Rakousku byla uzavřena letiště Innsbruck, Salzburg a Linz, od půlnoci i Vídeň.

Tento sopečný mrak dorazil i nad území České republiky, a to 9. května 2010, který se kolem půlnoci rozšířil nad území celé republiky. Pohyboval se ve výškách do 6 kilometrů.

K dalšímu uzavření letišť ve Velké Británii došlo 17. května 2010, kdy území Anglie zasáhl další sopečný mrak sopky Eyjafjallajökull. Provoz byl zastaven na letištích ve městech Manchester, Liverpool, Dublin, Doncaster, Carlisle a také na ve městech v Severním Irsku. Sopečný mrak se postupně přesouval na jih a zasahoval Nizozemí, Německo a i Českou republiku. Společnost Lufthansa v těchto dnech vyslala na testovací let speciálně vybavený Airbus A340, který měl zjistit intenzitu výskytu sopečného popelu v troposféře. Erupce trvaly od 13. dubna do 23. května.



Obr. 24: Snímek zachycující první den erupce

4.10. Sopka Etna

Nejvyšší činnou sopkou je evropská Etna, jejíž výška k roku 2009 činí 3 329 metrů. Nachází se na východním pobřeží ostrova Sicílie.

Etna je jedna z nejaktivnějších sopek na světě, nejstarší záznamy o erupci jsou datovány k roku 135 n. l. Od roku 1971 je sopka činná takřka nepřetržitě. Jedná se o stratovulkán, který se projevuje celou škálou sopečných erupcí od strombolského až po typ Mt. Peleé. Na obr. 25 je zachycen vulkanický mrak z erupce sopky v roce 2003 [4].



Obr. 25: Vulkanický mrak při erupci Etny v roce 2003

Popel z této erupce se usadil až v daleké Libyi. Letecký provoz byl odkláněn západně od Sicílie a Itálie.

5. Závěr

Piloti dopravních letadel se s turbulencí ve vyšších výškách setkávají vždy při přechodu přes hranici tropopauzy, vlivem prorůstání bouřkových oblaků a z důvodu tryskového proudění.

V případě výskytu tryskového proudění v předpokládaném směru letu dopravního letadla můžeme s pravděpodobností 70% očekávat turbulenci v bezoblačném prostoru (CAT), která je často vázána na toto proudění. V 2/3 případů se jedná o slabou turbulenci, zbylá 1/3 náleží mírné až silné turbulenci. Silné turbulence zaznamenáme při přiblížení k ose tryskového proudění, a to na straně konvexní - cyklonální, dále od osy intenzita CAT slábne. Z těchto důvodů vyplývá, že pokud se tryskové proudění objeví napříč nebo podélně letovým trasám využívaných leteckými společnostmi, snažíme se již s předstihem takovouto trasu upravit nebo zvolit jinou, abychom předešli možným zraněním posádky, nebo destrukce letadla, které mohou průletem oblastí CAT vzniknout.

Leteckou dopravu však ohrožuje mimo jiné i sopečná činnost, spojená s vyvrhováním sopečného popela mnohdy i do výšek několika kilometrů. Při erupci vznikající vulkanická mračna, která se mohou táhnout až tisíce kilometrů daleko, zastavují leteckou dopravu nad územím státu výskytu mračna. V dubnu 2010 jsme byli přímo svědky, jak se na jeden měsíc zastavila letecká doprava nad takřka celou Evropou, a to právě z důvodu erupce islandské sopky, která svou výškou v porovnání s 540 činnými sopkami na světě nepatří ani zdaleka k nejvyšším. Na základě minulých událostí spojené s průletem vulkanického popela se naplánované tratě letadel odklání od těchto oblastí, v případě celistvého sopečného mraku, z důvodu nasávání popela do motorů, obrušování povrchu letadla a dalších mnoha jevů spojených s takovým průletem. V případě rozptýlení vulkanického mračna po obloze se může stát, že dojde k uzavření vzdušného provozu. Dalším nebezpečím popela je jeho velice špatná detekce palubními meteorologickými radary.

Z mého pohledu byly oba dva tyto jevy do doby, než se stal vážný incident, zanedbávány a nebrány na zřetel v předletové přípravě. Nynější studie a katastrofy v minulosti však poukazují na důležitost pozorování těchto jevů a nutnost s nimi počítat jako s vlivy, které mohou být v krajních situacích velice nebezpečné.

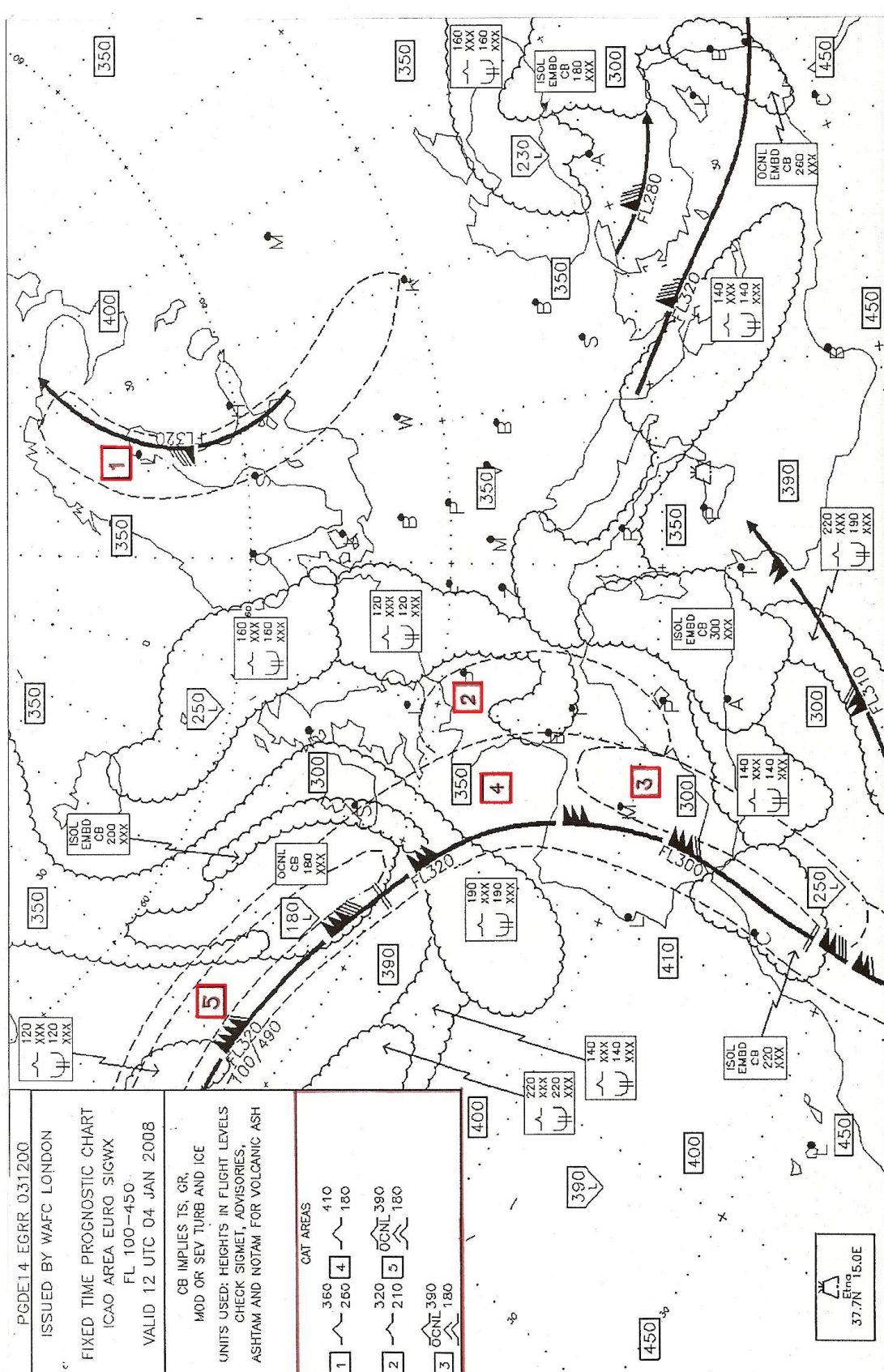
6. Seznam použité literatury

- [1] British Airways Flight 9. In Wikipedia: the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida). Wikipedia Foundation, last modified on 18. 4. 2011. Dostupné z www: <http://en.wikipedia.org/wiki/British_Airways_Flight_9>
- [2] Dvořák, P., 2004. Letecká meteorologie. 2.vydání. Cheb: Svět křídel. 221 s.
- [3] <http://vulcan.wr.usgs.gov/home.html> [online]. 16. 12. 2004. Description: 1883 Eruption of Krakatau. Dostupné z www: <http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Indonesia/description_krakatau_1883_eruption.html>
- [4] Etna. In Wikipedia: Encyklopedie zdarma [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, poslední modifikace 5. 5. 2011. Dostupné z www: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/etna>>.
- [5] Krakatoa. In Wikipedia: Encyklopedie zdarma [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, poslední modifikace 6. 4. 2011. Dostupné z www: <www.cs.wikipedia.org/wiki/krakatoa>.
- [6] KUKAL, Zdeněk. 1983. Přírodní katastrofy. 2. vyd. Praha: Horizont, 1983. 264 s.
- [7] Kulčák, L. a kol., 2006. Meteorologie. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o.: 293 s.
- [8] Lexmann, E., 1986. Meteorológia pre športového pilota. Bratislava: Alfa. 216 s.
- [9] Nedelka, M., 1984. Prehľad leteckej meteorológie. Bratislava: Alfa. 219 s.
- [10] Nedelka, M. a kol., 1998. Slovenský letecký slovník. Bratislava: Magnet-press Slovakia. 494 s.
- [11] Palečková, T., 2004. Islandský vulkán zastavil letadla. Lidové noviny, 2004, 6. listopad, s. 12
- [12] Severské listy [online]. 17. 4. 2010. Nebezpečí sopečného prachu pro letecké motory. Dostupné z WWW: <<http://www.severskelisty.cz/kaleido/kale0350.htm>>
- [13] Sobíšek, B. a kol. Meteorologický slovník výkladový a terminologický. Praha: Academia + Ministerstvo životního prostředí ČR, 1993. 594 s.
- [14] Soukup, L., 1977. Letecky významné jevy v horní troposféře a tropopauze. In: Práce a studie 17., Súčasnú otázky československej leteckej meteorológie. Bratislava: HMÚ, s. 232 - 244
- [15] Škoda, M., 1996. Vývoj spolupráce mezi Světovou meteorologickou organizací (SMO) a mezinárodní organizací pro civilní letectví (ICAO). Meteorologické zprávy, 1996, 3, s. 91 - 92
- [16] United Airlines Flight 826 (1997). In Wikipedia: Encyklopedie zdarma [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, poslední modifikace 7. 8. 2010. Dostupné z www: <[http://en.wikipedia.org/wiki/United_Airlines_Flight_826_\(1997\)](http://en.wikipedia.org/wiki/United_Airlines_Flight_826_(1997))>.
- [17] www.idnes.cz [online]. 19. 4. 2010. Je vulkanický prach karcinogenní?. Dostupné z www: <<http://nesvara.blog.idnes.cz/c/134007/Je-vulkanicky-popel-Islandskych-sopek-karcinogenni.html>>.
- [18] www.novinky.cz [online] 8. 5. 2010. Mohutný mrak popela z islandské sopky opět komplikuje leteckou dopravu. Dostupné z <<http://www.novinky.cz/zahranicni/evropa/199687-mohutny-mrak-popela-z-islandske-sopky-opet-komplikuje-leteckou-dopravu.html>>
- [19] www.popocatepetl.cz [online]. 2008. Popocatepetl. Dostupné z www: <<http://http://www.popocatepetl.cz/>>.
- [20] www.sci.muni.cz [online]. Neuvedeno. Sopečná činnost. Dostupné z www: <<http://http://www.sci.muni.cz/~herber/volcano.htm#begin>>.

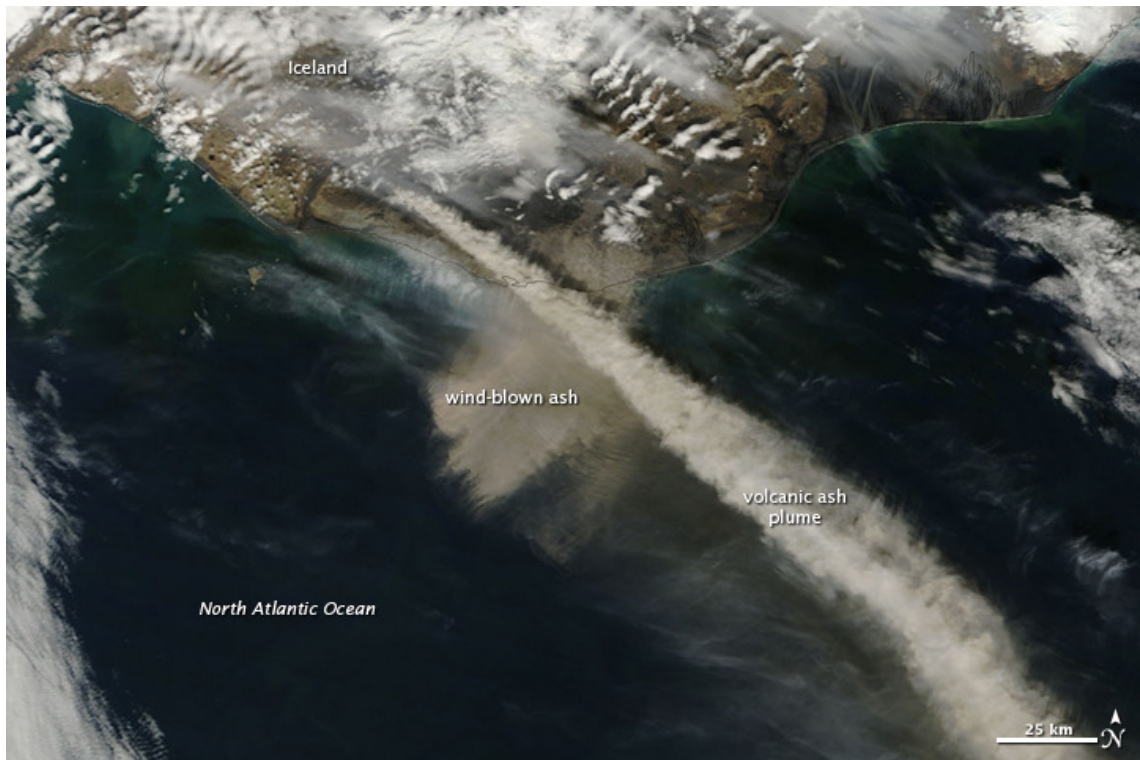
7. Seznam použitých obrázků

1. www.aopa.org/asf/safety_alerts/waketurbulence.html
2. [ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/cyc/upa/jet.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/cyc/upa/jet.rxml)
3. <http://passingparade-2009.blogspot.com/2010/04/jet-streams-and-tropical-cloudbands.html>
4. <http://weblogged.com/wikipediafeaturedpictures/cirrus-clouds/>
5. <http://meteoijsselmuiden.nl/cumulonimbus>
6. http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2006/volcano_nile.html
7. <http://kurz.geologie.sci.muni.cz/kapitola4.htm#4.1.2>
8. <http://www.greenibis.com/edu/geo/frames/background.html>
9. http://www.geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/Krakatau.html
10. http://www.geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/Krakatau.html
11. http://www.geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/Krakatau.html
12. <http://cs.wikipedia.org/wiki/Santorini>
13. http://www.bloodhoundssc.com/car/jet_propulsion.cfm
14. <http://www.popsci.com/science/article/2010-04/why-cant-planes-fly-through-volcanic-ash-because-nasa-tried-once>
15. <http://en.wikipedia.org/wiki/Galunggung>
16. www.eu-flysafe.org/Project/Aviation-Hazards/Weather/current-systems.html
17. <http://seismo.berkeley.edu/~rallen/research/iceland/eruption98/photos98.html>
18. <http://www.vulkaner.no/v/volcan/grimsvot-e.html>
19. <http://feww.wordpress.com/2010/04/20/icelands-bardarbunga-may-be-erupting>
20. <http://islande2010.mbnet.fr/2010/04/skogafoss-avant-et-apres-skogafoss-before-and-after>
21. <http://spacegizmo.livingdazed.com/tag/terra-satellite/page/2/>
22. http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/layers_activity_print.html
23. <http://raroworld.blogspot.com/2010/04/disruptive-volcano-of-iceland.html>
24. www.photoradar.com/photos/130099/ingi25/farm-house-and-the-epic-eyjafjallaj%C3%B6kull
25. http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Etna_smoke_seen_from_space.jpg

8. Přílohy



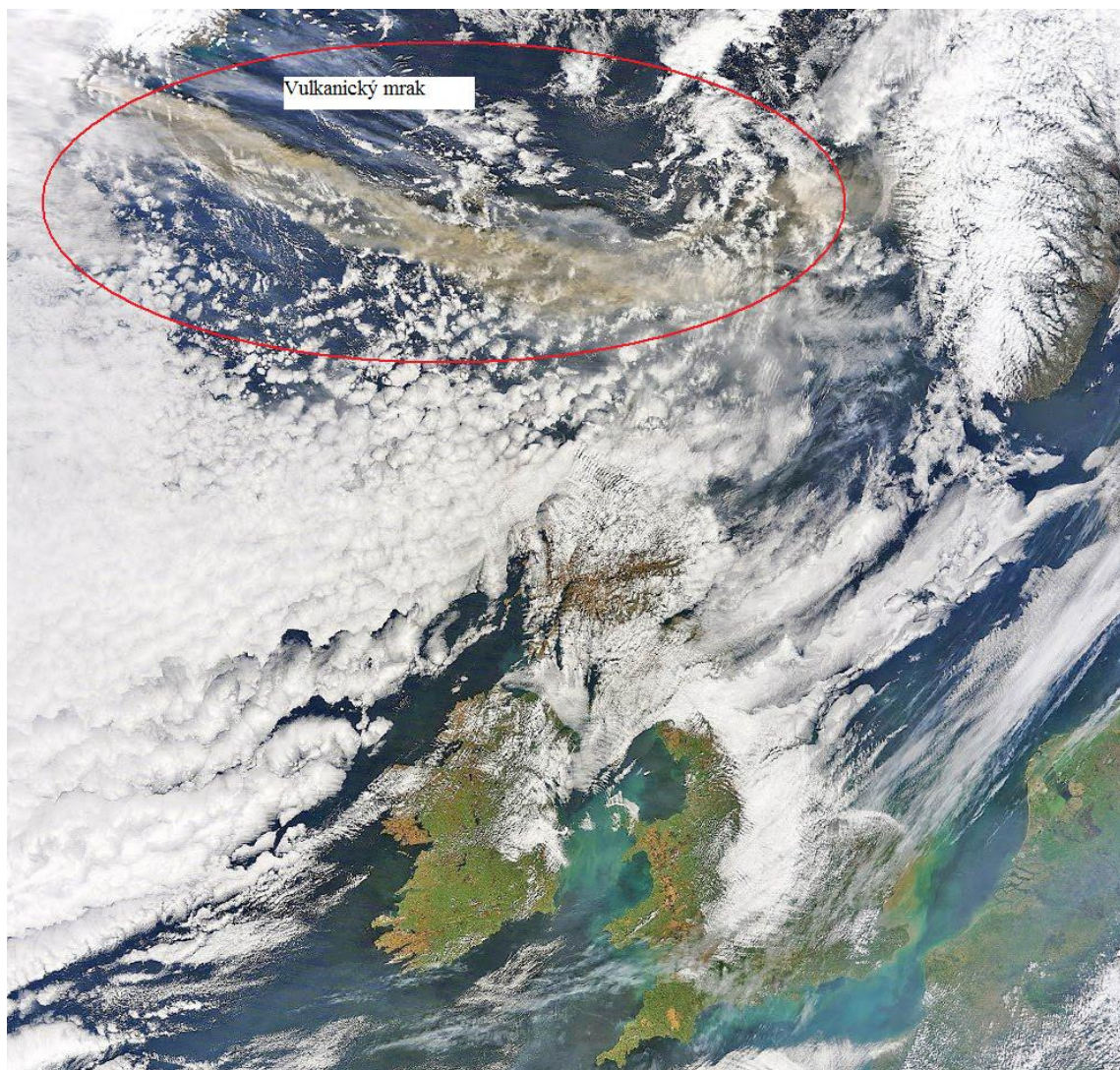
Obr. 5: Mapa význačného počasi



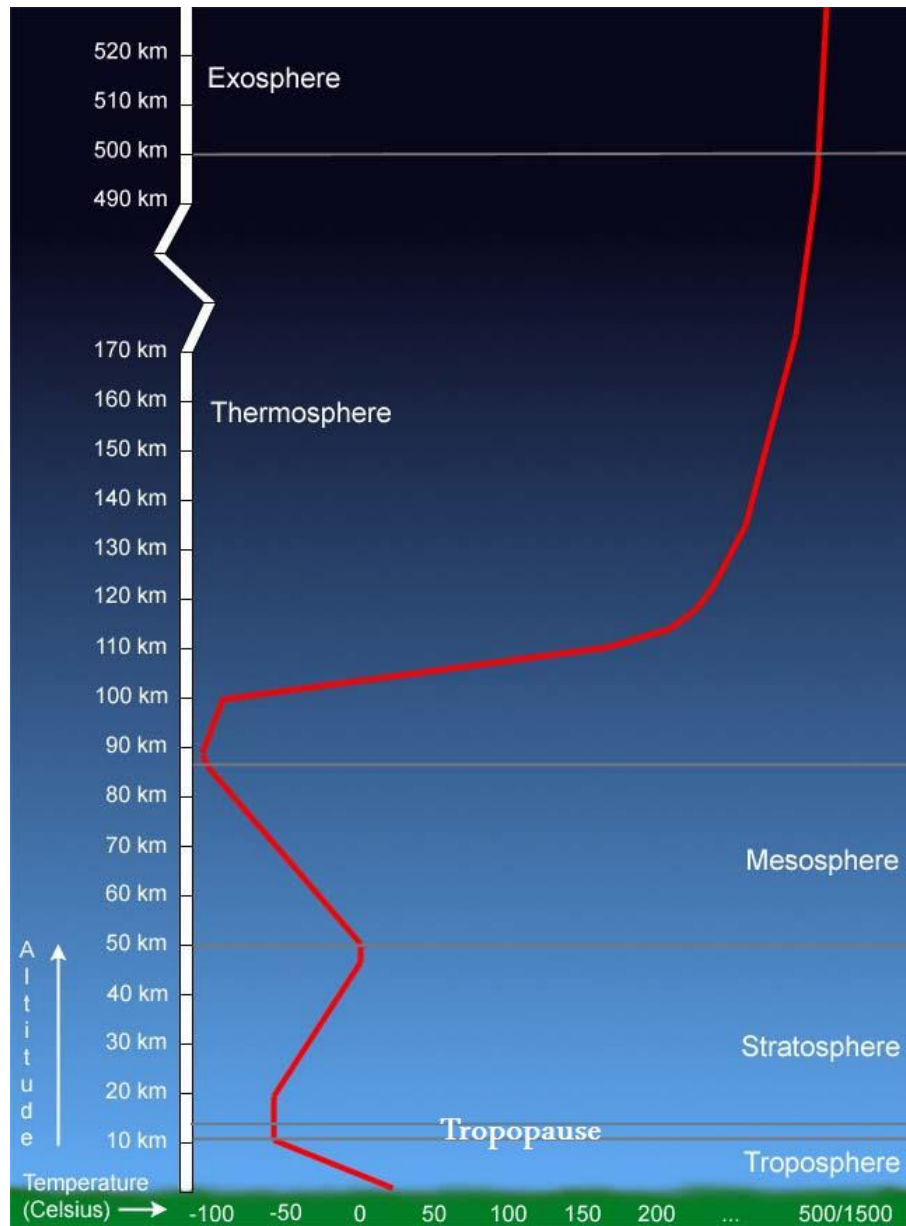
Obr. 21: Vulkanický mrak směřující ke Skandinávii



Obr. 20: Vodopád Skogafoss (Island)



Obr. 23: Směr postupu vulkanického mraku



Obr.22: Jednotlivé vrstvy atmosféry a vyznačení teploty