



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Sébastien Lán

**VZNIK A ANALÝZA
KONDENZAČNÍCH STOP LETADEL**

Diplomová práce

2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta dopravní
d ě k a n**

Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K621..... Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Sébastien Lán

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Vznik a analýza kondenzačních stop letadel**

Název tématu (anglicky): Aircraft Contrails Formation and Analysis

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Kondenzační stopy a jejich vznik
- Popis měření a sběr dat
- Analýza naměřených záznamů
- Korelace mezi délkou kondenzační stopy a fuel flow
- Vyhodnocení výsledků

- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: HOSPODKA, Jakub a Stanislav PLENINGER. Vliv letecké dopravy na atmosféru: problematika začlenění leteckých společností do EU ETS.
IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Bc. Jakub Hospodka, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2016**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. května 2017**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD. MBA
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Sébastien Lán
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....30. června 2016

Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Bc. Jakubu Hospodkovi, Ph.D. Jsem mu vděčný za čas, který mi po celou dobu zpracování práce věnoval, za cenné rady a podněty, které mi udílel. Vždy, když jsem potřeboval, mi poradil a nasměroval správnou cestou. Cením si též jeho osobního přístupu a vstřícnosti. Za to vše mu patří velký dík.

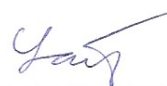
Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 30. května 2017



.....
podpis

Abstrakt

Předmětem diplomové práce „Vznik a analýza kondenzačních stop letadel“ je popis tvoření kondenzačních stop a jejich analýza založená na pozorování v okolí Děčína. Teoretická část je zaměřena na definování kondenzační stopy, proces a podmínky tvoření, Schmidt-Applemanovo kritérium, pokrytí kondenzačními stopami a indukovanou cirrovitou oblačností, dopad kondenzačních stop na životní prostředí, budoucí vývoj letecké dopravy, který koresponduje s radiačním působením kondenzačních stop a možnosti, jak se vyvarovat kondenzačním stopám. Praktická část této práce obsahuje rozbor kamerových záznamů a ADS-B zpráv. Naměřená data byla použita pro posouzení existence korelace mezi délkou kondenzačních stop a okamžitou spotřebou paliva.

Klíčová slova

kondenzační stopa, emise, cirrus, klima, vodní pára, radiační působení, aerosoly, skleníkový efekt, vlhkost vzduchu, okamžitá spotřeba paliva, kondenzace, Schmidt-Applemanovo kritérium

Abstract

The subject of the diploma thesis „Aircraft Contrails Formation and Analysis“ is description of contrail formation and contrail analysis based on observation around Děčín. The theoretical part is focused on contrail definition, process and conditions of contrail formation, Schmidt-Appleman criterion, contrail and contrail cirrus coverage, impact on the environment, prognosis of air transport which corresponds to contrail radiative forcing and options how to avoid contrails. The practical part of the thesis includes analysis of camera recordings and ADS-B messages. Measured data were used for assessment of existence of correlation between contrail lifetime and fuel flow.

Key words

contrail, emission, cirrus, climate, water vapour, radiative forcing, aerosols, greenhouse effect, air humidity, fuel flow, condensation, Schmidt-Appleman criterion

Obsah

Seznam použitých zkratek	6
1 Úvod	7
2 Kondenzační stopy a jejich vznik	10
2.1 Definice	10
2.2 Princip vzniku kondenzační stopy	11
2.2.1 Kondenzační stopa vznikající za motorem	11
2.2.2 Kondenzační stopa vznikající za křídlem	12
2.3 Mísení výfukových plynů se vzduchem	13
2.4 Prahová teplota	14
2.5 Vliv účinnosti na vytvoření kondenzační stopy	16
2.6 Schmidt-Applemanovo kritérium	17
2.7 Ledové částice tvořící kondenzační stopu	18
2.8 Vývoj kondenzační stopy	21
2.9 Rozpadový pruh	23
3 Výskyt kondenzačních stop a jejich vliv na klima	25
3.1 Působení letecké dopravy na podnebí	25
3.2 Skleníkový efekt atmosféry	25
3.3 Radiační bilance	26
3.4 Aerosoly	28
3.4.1 Přímý dopad aerosolů	29
3.4.2 Nepřímý dopad aerosolů	29
3.5 Vodní pára	31
3.6 Perzistentní kondenzační stopy	31
3.7 Pokrytí indukovanou cirrovitou oblačností	32
3.8 Vliv kondenzačních stop na klima	35
3.9 Shrnutí radiačního efektu kondenzačních stop	41
4 Budoucí vývoj	44
4.1 Letecká doprava	44

4.2	Pohonné hmoty a pokrytí kondenzačními stopami.....	44
4.3	Radiační působení kondenzačních stop.....	45
5	Omezení vzniku kondenzačních stop.....	47
5.1	Úprava pohonné jednotky.....	47
5.2	Palivová aditiva	49
5.3	Alternativní paliva	52
5.4	Operační změny.....	53
5.4.1	Doba během dne.....	53
5.4.2	Omezení výšky letu	53
5.4.3	4D trajektorie.....	54
6	Vlastní pozorování a analýza dat.....	56
6.1	Popis měření a sběr dat	56
6.2	Analýza naměřených záznamů.....	58
6.3	Korelace mezi délkou stopy a fuel flow.....	59
6.4	Vyhodnocení výsledků.....	65
7	Závěr.....	67
	Použité zdroje.....	70
	Seznam obrázků.....	78
	Seznam grafů	79
	Seznam tabulek.....	80
	Seznam příloh.....	81
	Přílohy	82

Seznam použitých zkratk

ADS-B	Automatic dependent surveillance – broadcast	
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	Německé středisko pro letectví a kosmonautiku
ERF	Effective radiative forcing	Efektivní radiační působení
ERFaci	Effective radiative forcing due to aerosol–cloud interactions	
ERFari	Effective radiative forcing due to aerosol-radiation interactions	
FL	Flight level	Letová hladina
IATA	International Air Transport Association	Mezinárodní asociace leteckých dopravců
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IFR	Instrument flight rules	Pravidla pro let podle přístrojů
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	Mezivládní panel pro změny klimatu
IWC	Ice water content	
LT	Local Time	Místní čas
ppm	Parts per million	Počet částic na milion
RF	Radiative forcing	Radiační působení
SFC	Specific fuel consumption	Variabilní vodící lopatky
TIT	Turbine inlet temperature	Teplota na vstupu do turbíny
UTC	Coordinated Universal Time	Světový koordinovaný čas
VGW	Variable guide vanes	Specifická spotřeba paliva

1 Úvod

Kondenzační stopa je jev, který lze v atmosféře pozorovat díky letectví. Do příchodu letecké dopravy tento úkaz neexistoval. Jedná se o jeden z nejvíce viditelných antropogenních jevů majících vliv na atmosféru. Kondenzační stopa nebo též kondenzační čára či pruh je umělý oblak mající podobu bílého pruhu, který se může objevit za určitých podmínek za letadlem pohybujícím se v atmosféře ve výškách kolem 8 až 12 km nad zemským povrchem.

Princip vzniku kondenzačních stop není příliš složitý. Dopravní letadla používají pro pohon motory, které spalují palivo označované jako kerosin. Kerosin je tvořen převážně směsí uhlovodíků. Při jeho reakci s kyslíkem, tj. při spalování, se tvoří oxid uhličitý a voda v podobě vodní páry. Tak by tomu bylo v ideálním případě. V palivu je však obsaženo i malé množství jiných látek a spalování není nikdy dokonalé. Proto výfukové plyny obsahují ještě další substance, mj. částičky sazí. Ty spolu s aerosoly nacházejícími se v okolním vzduchu slouží jako tzv. kondenzační jádra. Horké výfukové plyny vycházející z letadlových motorů se mísí s okolním studeným vzduchem a pokud při tomto procesu dojde k dosažení určité hranice týkající se množství vodní páry – meze nasycení, začne vodní pára kondenzovat na kondenzačních jádrech. Vzhledem k tomu, že se letadla pohybují ve vysokých výškách nad zemí, kde jsou velmi nízké teploty, zkondenzované kapky vody rychle zamrzají a tvoří ledové krystalky. Takto vzniklé krystaly tvoří kondenzační stopu.

Existuje ještě další typ kondenzační stopy, která vzniká na základě jiného principu. Stopa se může vytvořit za křídlem či vrtulí ve vlhkém prostředí. Je krátká a obsahuje pouze vodu nacházející se v okolním vzduchu. Voda kondenzuje díky lokálnímu poklesu tlaku, ke kterému dochází vlivem pohybujícího se křídla nebo vrtule. Tyto kondenzační stopy jsou však ojedinělé [1].

Poprvé byla kondenzační stopa pozorována již v roce 1915. Z anglického označení *condensation trail* vznikl obecně používaný zkrácený termín *contrail*, který zavedli britští piloti v roce 1942. Kondenzační stopy byly celkem často pozorovány právě za druhé světové války během náletů a leteckých soubojů. Existují i zprávy o výskytu kondenzačních stop, které se tvořily za letadly amerického letectva startujícího z Anglie a podnikajícího bombové nálety na Evropu. Kondenzační stopy byly částečně studovány v Německu. První vysvětlení termodynamického principu jejich vzniku podal Ernst Schmidt v roce 1941 v článku „Die Entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen von Flugmotoren“, jenž byl publikován ve *Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung*. Častější pozorování tohoto jevu je zaznamenáváno od padesátých let vlivem rostoucího objemu letecké dopravy a používání proudových motorů ve vojenské i civilní sféře. V roce 1953 Herbert Appleman v časopise

Bulletin of the American Meteorological Society publikoval článek nesoucí název „The Formation of Exhaust Condensation Trails by Jet Aircraft“, ve kterém navázal na E. Schmidta. Definoval podmínku pro vznik kondenzační stopy, kterou je dosažení nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě. Na základě těchto vědeckých prací vzniklo označení Schmidt-Applemanovo kritérium, jehož dosažení je nezbytné pro vznik kondenzační stopy [2, 3].

Doba životnosti kondenzačních stop je různá. Někdy se vytratí chvíli potom, co vznikly, jindy setrvávají v atmosféře i několik hodin. Dlouhodobé kondenzační stopy se označují jako perzistentní. Doba, po kterou kondenzační stopa v atmosféře setrvává, záleží na okolních podmínkách, tj. na teplotě a vlhkosti vzduchu. Pokud je atmosféra přesycená vodní párou, může být životnost kondenzačních stop velmi dlouhá, a navíc se mohou stopy dále rozšiřovat a přejít v indukovanou cirrovitou oblačnost vzhledově podobnou přírodní oblačnosti. Cirrus, někdy označovaný českým pojmem řasa, je oblak vysokého patra tvořený vzájemně oddělenými oblaky, které vypadají jako bílá vlákna, úzké pruhy nebo plošky. Stejně jako kondenzační stopa je tvořený ledovými krystalky. Má bílou barvu a skoro vždy je průsvitný [4, 5].

Ačkoli se na první pohled může zdát, že kondenzační stopy, jež jsou tvořeny ledovými krystalky, nepředstavují žádné riziko pro životní prostředí, opak je pravdou. Problémem jsou dlouhodobé kondenzační stopy, které zvyšují oblačnost. Větší oblačnost má negativní dopad na podnebí, neboť ovlivňuje radiační záření. Princip je obdobný jako u skleníkových plynů. Kondenzační stopy odrážejí část slunečního záření a pohlcují část odraženého záření od Země. V závislosti na mnoha parametrech může být výsledkem oteplování i ochlazování, v průměru ale vychází, že větší pokrytí kondenzačními stopami vede k oteplování atmosféry.

Existuje mnoho studií, které udávají odhad radiačního působení kondenzačních stop i indukované cirrovité oblačnosti, která se z nich vytvořila, avšak hodnoty se značně liší. Problémem je i samotné určení pokrytí touto oblačností, protože kondenzační stopy ztrácejí postupem času svůj tvar přímých čar a je obtížné je odlišit od přírodní oblačnosti. Výsledný efekt kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti je závislý na více okolnostech, mezi které patří doba životnosti a optická tloušťka, koncentrace a velikost ledových krystalků, doba během dne, roční období a další. Přestože existují odhady radiačního dopadu kondenzačních stop, nelze v současné době určit, jak velký efekt mají na globální oteplování, jinými slovy, jak velké oteplení zemského povrchu způsobují. Vše si žádá další vědecké zkoumání.

Pozorování ukazují malý nárůst v pokrytí cirrovitou oblačností v oblastech s velkým objemem letecké dopravy ve srovnání s přilehlými oblastmi. V současné době je největší hustota

leteckého provozu v Evropě a ve Spojených státech amerických. V těchto oblastech je tedy nejvíce kondenzačních stop, z čehož vyplývá i největší dopad na klima. Větší pokrytí cirrovitou oblačností však nemusí být způsobeno pouze kondenzačními stopami. Svůj podíl by na něm mohly mít také emitované aerosoly [1, 6].

Kondenzační stopy nebyly příliš v popředí zájmů a do devadesátých let o nich nebylo vydáno mnoho odborných prací. V poslední době je zájem o kondenzační stopy větší z důvodu jejich vlivu na životní prostředí spočívajícím ve zvyšování oblačnosti a následném efektu na teplotu atmosféry. V současné době legislativa neřeší tvoření a výskyt kondenzačních stop.

Cílem této práce je podat ucelený přehled o kondenzačních stopách. V úvodní části je popsán termodynamický princip vzniku kondenzačních stop a Schmidt-Applemanovo kritérium. Dále jsou zde vysvětleny podmínky, za jakých se stopy vytvářejí, vliv podmínek na strukturu a dobu životnosti kondenzačních stop, parametry letadla a paliva, které ovlivňují formování kondenzačních stop. V následující části je rozebrán negativní dopad kondenzačních stop a emitovaných aerosolů na podnebí. V této kapitole je též shrnutí dosavadních poznatků týkajících se pokrytí oblohy krátkodobými a dlouhodobými kondenzačními stopami, a přehled výsledků několika provedených studií na radiační dopad kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti. Také jsou vysvětleny parametry kondenzačních stop a prostředí mající vliv na výsledný efekt. V závěru kapitoly jsou naznačeny současné problémy týkající se nedostatečného vědeckého porozumění v oblasti kondenzačních stop a přibližný vývoj radiačního působení kondenzačních stop od počátku letectví do současnosti. Následuje část o budoucím vývoji kondenzačních stop a jejich dopadu, což úzce souvisí s prognózami poptávky po letecké dopravě v následujících letech. Přestože nyní neexistuje omezení týkající se kondenzačních stop, je v práci rozebráno několik řešení, která se nabízejí pro omezení vzniku kondenzačních stop. Mezi ně patří technické řešení v podobě úpravy pohonné jednotky, změna složení paliva a alternativní paliva, a operační řešení, kterými by se změnila doba letů či jejich trať. V závěru jsou výsledky vlastního pozorování kondenzačních stop v okolí Děčína a jejich vyhodnocení. Kamerové záznamy spolu se zprávami ADS-B posloužily jako podklad pro zkoumání, zda existuje závislost mezi délkou kondenzační stopy a fuel flow.

2 Kondenzační stopy a jejich vznik

2.1 Definice

V českém názvosloví se můžeme kromě pojmu kondenzační stopa setkat i s výrazem kondenzační pás nebo kondenzační pruh. Všechny tyto pojmy označují tentýž letadlem způsobený úkaz. Česká meteorologická společnost ho v Meteorologickém slovníku výkladovém a terminologickém definuje následovně: „*Pruh kondenzační – umělý oblak vzhledu cirru¹ až cirrocumulu², který vzniká za letadlem nebo raketou v horní troposféře³ a ve spodní stratosféře⁴. Kondenzační pruhy bývají zpočátku široké 5 až 10 m a vytvářejí se ve vzdálenosti 50 až 100 m za letadlem. Jejich trvání zpravidla nepřesahuje 40 minut. Nejčastěji se vyskytují při teplotě –40 až –50 °C ve výšce 7 až 12 km. Vertikální tloušťka vrstvy s vhodnými podmínkami pro vznik kondenzačních pruhů bývá asi 2 km. Kondenzační pruh vzniká kondenzací vodní páry na kondenzačních jádrech, která dodávají letadla a rakety do ovzduší, a následným mrznutím vzniklých přechlazených kapek. Jeho vznik je ovlivňován i poklesem tlaku vzduchu v oblasti adiabatického rozpínání vzduchu. Z angl. *condensation trail* vznikl mezinárodně často používaný termín (zkratka) *contrail*. Ve starší české literatuře se lze setkat s nevhodným označením „kondenzační sledy“, které vzniklo přímým převzetím ruského termínu“ [7].*

¹ Cirrus je druh oblaku vláknitého vzhledu a hedvábného lesku charakterizovaný jako vzájemně oddělené oblaky mající podobu bílých jemných vláken, plošek nebo úzkých pruhů. Jedná se o ledový oblak, z něhož nevypadávají srážky [7].

² Cirrocumulus je druh oblaku charakterizovaný jako tenké skupiny nebo vrstvy bílých oblaků složené z malých oblačných částí v podobě zrn nebo vlnek. Části oblaku mohou být oddělené nebo spojené. Jedná se zpravidla o ledový oblak, někdy může obsahovat přechlazené vodní kapky [7].

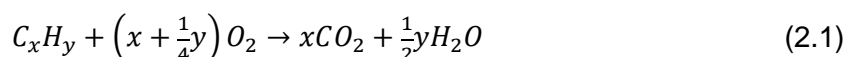
³ Troposféra je spodní část atmosféry Země, jejíž vlastností je klesání teploty vzduchu o 0,65 °C na každých 100 m výšky. V troposféře se nachází téměř všechna voda atmosféry, proto zde vznikají mlhy, bouřková činnost, atmosférické srážky a oblaky. Troposféra dosahuje nad rovníkem výšky 16 až 18 km, nad póly 7 až 9 km a ve středních zeměpisných šířkách průměrně 11 km. Lze ji dělit na spodní troposféru, která u nás sahá asi do 2 km, střední troposféru ležící mezi 2 až 7 km a horní troposféru, která je v oblasti od 7 km do spodní hranice tropopauzy [7].

⁴ Stratosféra je část atmosféry Země mezi tropopauzou a stratopauzou ve výšce asi 10 až 50 km. Ve spodní části, která sahá do výšky 20 až 25 km, se teplota s výškou nepatrně zvyšuje. Nad touto oblastí teplota roste. To je způsobeno přítomností ozonu pohlcujícího ultrafialové záření [7].

2.2 Princip vzniku kondenzační stopy

2.2.1 Kondenzační stopa vznikající za motorem

Vznik kondenzační stopy za letadlem je způsoben zvýšením relativní vlhkosti⁵ vzduchu v proudu za motorem. Nárůst vlhkosti je výsledkem mísení horkých a vlhkých výfukových plynů se studeným vzduchem v okolním prostředí. Palivo, které se používá v leteckých motorech, je tvořeno směsí uhlovodíků. Výsledkem dokonalého spalování uhlovodíků jsou dvě sloučeniny, což je vidět na obecné rovnici 2.1 reakce uhlovodíku s kyslíkem. Reakcí vznikají plyny oxid uhličitý a vodní pára, která má zásadní vliv na vytvoření kondenzační stopy [8].



Pokud je atmosféra v okolí letadla dostatečně chladná, tedy teplota vzduchu je pod prahovou teplotou, může vlhkost obsažená v proudu za motorem dosáhnout bodu nasycení, to znamená stavu, kdy vzduch již nemůže pojmout větší množství vodní páry. Existuje však i stav přesycení, kdy je ve vzduchu vyšší počet molekul vody, než odpovídá dané teplotě, resp. než odpovídá stavu nasycení. Tyto molekuly, z důvodu jejich většího množství, vyvíjejí vyšší parciální tlak⁶. Jelikož se jedná o energeticky nevyvážené prostředí, snaží se molekuly vody o dosažení rovnovážného stavu. Ve stavu přesycení mají molekuly vody tendenci přecházet ze skupenství plynného do skupenství kapalného, resp. pevného. Pokud je tedy vzduch přesycený vodní párou, dochází ke kondenzaci, případně depozici⁷. Aby bylo dosaženo rovnovážného stavu, musí dojít ke vzniku kapek vody a ledových krystalů. Vzduch se tak stává opět pouze nasyceným [8, 9].

V případě kondenzace vodní páry se začnou tvořit kapky vody. Voda kondenzuje převážně na sazích a prachových částicích ve výfukových plynech. Tyto malé částice jsou označovány jako tzv. kondenzační jádra. Jelikož je okolní teplota velmi nízká (kolem $-40\text{ }^\circ\text{C}$ až $-60\text{ }^\circ\text{C}$), kapky vody rychle zamrzají a tvoří ledové krystaly. Ty pak dále rostou depozicí do té doby, dokud je relativní vlhkost vzduchu vzhledem k ledu nad bodem nasycení. Vzhled a doba trvání kondenzační stopy závisí na více meteorologických faktorech. Mezi ně patří relativní vlhkost vzduchu, turbulence, vertikální pohyby okolní atmosféry. Vytvořené kondenzační stopy se

⁵ Relativní (poměrná) vlhkost vzduchu udává stupeň nasycení vzduchu vodní párou. Vyjadřuje se jako poměr skutečné hustoty vodní páry a hustoty vodní páry v nasyceném vzduchu při dané teplotě. Místo hustoty vodní páry lze v poměru použít tlak vodní páry [7].

⁶ Parciální tlak je tlak vyvolaný jednou ze složek plynů. Daltonův zákon říká, že se plyny ve směsi chovají tak, jako kdyby existoval každý plyn samostatně. Celkový tlak směsi plynů je součtem parciálních tlaků jednotlivých plynů [7].

⁷ Depozice je fázový přechod vody, při kterém led roste přímo z vodní páry [7].

vytrácejí v podobě srážek do nižších hladin nebo sublimací, pokud relativní vlhkost vzduchu vzhledem k ledu klesne pod bod nasycení [9, 10, 11].

Pro představu dosažení stavu nasycení vzduchu vodní párou slouží následující příklad. Letadlo letí v letové hladině 350 rychlostí 850 kmh^{-1} . Meteorologické podmínky v této hladině jsou uvažovány: teplota vzduchu $-54,5 \text{ }^\circ\text{C}$, tlak vzduchu $23\,820 \text{ Pa}$, relativní vlhkost vzduchu 5% . Obvyklá spotřeba paliva u letadla typu B737 či A320 se pohybuje okolo 2500 kgh^{-1} , z čehož vyplývá spotřeba jednoho motoru $0,35 \text{ kgs}^{-1}$. Index emise vodní páry je pro běžně používané palivo asi $1,237$ (tzn. spálením 1 kg paliva se uvolní $1,237 \text{ kg}$ vodní páry). Za 1 s se z jednoho motoru uvolní $0,443 \text{ kg}$ vodní páry. Za tuto dobu uletí letadlo vzdálenost 236 m . Proud vycházející z motoru se kuželovitě rozšiřuje. Pro jednoduchost je uvažován tvar válce s průměrem 5 m . Objem tohoto válce (odpovídající sekundě letu) je $4\,634 \text{ m}^3$. V něm se nachází $0,443 \text{ kg}$ vyprodukované páry. Její hustota v uvažovaném válci je $0,096 \text{ gm}^{-3}$. K této hodnotě hustoty je třeba připočítat vlhkost, která se vyskytuje ve vzduchu. Relativní vlhkost 5% odpovídá při daných podmínkách hustotě $0,002 \text{ gm}^{-3}$. Výsledná hustota vodní páry je $0,098 \text{ gm}^{-3}$. Aby bylo dosaženo stavu nasycení, musí vzduch obsahovat $0,038 \text{ gm}^{-3}$ vodní páry. V tomto případě by došlo k přesycení téměř 260% . Vznik kondenzační stopy je závislý na celém průběhu mísení vyprodukované vodní páry s okolním vzduchem. Za daných podmínek by bylo dosaženo prahové teploty a kondenzační stopa by se mohla vytvořit [8, 12, 13].

2.2.2 Kondenzační stopa vznikající za křídlem

Další možností vzniku kondenzační stopy je vytvoření stopy, která je tvořená kapkami vody, a která se vyskytuje při vyšších teplotách. Tato stopa vzniká na koncích křídel letadla pohybujícího se ve velmi vlhkém vzduchu. Okolní vzduch, který je stlačován, rychle expanduje do prostoru s nízkým tlakem během adiabatické expanze. To dočasně způsobí dostatečné ochlazení vzduchu pod teplotu rosného bodu⁸, což vyústí v kondenzaci vody a tvoření kapek vody. Takto vznikající stopy jsou ovšem ojedinělé a není třeba jim věnovat velkou pozornost, proto nejsou dále v práci popisovány. Nejčastěji mohou být spatřeny za bojovými letouny při letech za vysokých rychlostí. Jsou pozorovatelné také u vrtulových letadel, u kterých se tvoří na koncích listů vrtule [9, 10].

⁸ Rosný bod je teplota, při které se následkem izobarického ochlazování stane vzduch nasyceným, aniž by mu byla z vnějšku dodána vodní pára [7].

2.3 Mísení výfukových plynů se vzduchem

Na grafu č. 1 je fázový diagram znázorňující několik scénářů mísení výfukových plynů s okolním vzduchem. Na horizontální ose je teplota, na vertikální ose je parciální tlak vodní páry reprezentující vlhkost vzduchu. Dvě hraniční křivky (plná – kondenzační a tečkovaná – sublimační) udávají mez nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě (plná čára) a vzhledem k ledu (tečkovaná čára). Nad křivkou kondenzace je oblast vyznačující se nízkou teplotou a vysokou vlhkostí, což jsou podmínky vhodné pro vznik kondenzačních stop. Zde tedy vodní pára kondenzuje a díky velmi nízkým teplotám poté zamrzá. Mezi kondenzační a sublimační křivkou je oblast s podmínkami, při kterých vzniklé ledové krystaly tvořící kondenzační stopy dále setrvávají. Pod křivkou sublimace ledové krystaly přechází ze skupenství pevného do skupenství plynného a kondenzační stopa vymizí [10].

Každá z čárkovaných křivek představuje křivku mísení pro jiné počáteční podmínky (pro jiný stav vzduchu v atmosféře). Spodní body křivek značí stav okolního nerozrušeného vzduchu reprezentovaný teplotou vzduchu a parciálním tlakem vodní páry. Okolní vzduch je velmi chladný a parciální tlak vodní páry je nízký. Druhý konec křivek odpovídá teplotě vzduchu a parciálnímu tlaku vodní páry výfukových plynů vycházejících z motoru. Ty se naopak vyznačují vysokou teplotou a vysokým parciálním tlakem vodních par. Křivky mezi krajními body značí stavy, kterými postupně prochází směs výfukových plynů a vzduchu [10].

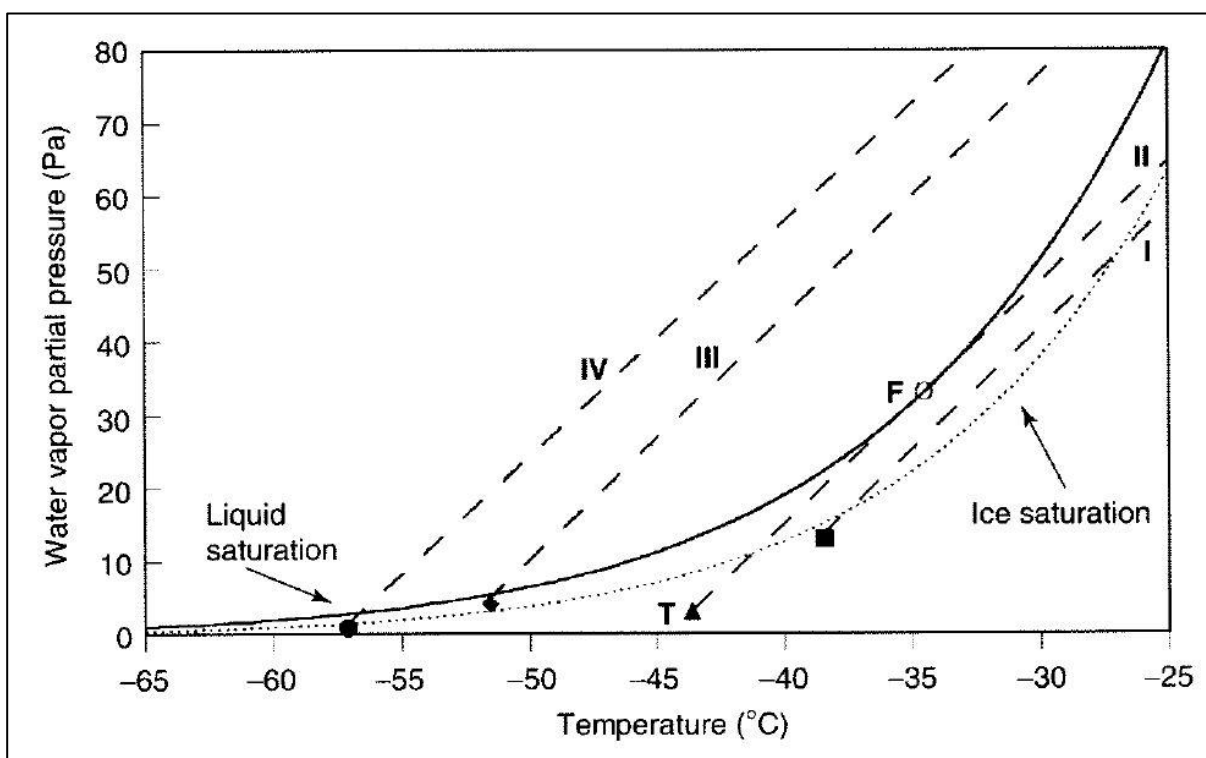
V případě I dosáhne parciální tlak vodní páry hodnoty nasycení vzhledem k ledu, avšak nedosáhne hodnoty nasycení vzhledem k vodě. Kondenzační stopa se nevytvoří, a to z toho důvodu, že směs nepřekročila křivku kondenzace [10].

V případě II se vytvoří krátkodobá kondenzační stopa. Směs se postupně ochlazuje, až dosáhne v bodě F teploty, při které dojde k nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě. Při této teplotě se utvoří kondenzační stopa a setrvá tak dlouho, dokud parciální tlak vodní páry neklesne pod hodnotu nasycení vzhledem k ledu, tedy až do bodu, než směs překročí hranici sublimace. Poté stopa vymizí přechodem krystalů zpět do plynného skupenství [10].

Případ IV reprezentuje vznik dlouhodobé kondenzační stopy. Křivka mísení zasahuje z velké části do oblasti nad hranici kondenzace a bod na konci křivky mísení leží v blízkosti sublimační křivky. Protože podmínky nasycení vzduchu vodní párou po počátečním vzniku stopy pokrývají oproti případu II větší spektrum teplot, setrvá takto vytvořená kondenzační stopa v atmosféře po delší dobu [10].

Bude-li mísení plynů probíhat dle křivky III, dojde opět k vytvoření kondenzační stopy. I v tomto případě křivka mísení značně zasahuje do oblasti kondenzace. Odlišné jsou však okolní podmínky. Bod, který označuje stav vzduchu v atmosféře, leží nad hranicí sublimace. Vzduch je tedy přesycen vzhledem k ledu. Kondenzační stopa nejenže setrvá v atmosféře po delší dobu, ale navíc může mít i tendenci k rozšiřování. To je způsobeno právě polohou spodního bodu křivky mísení. Když směs vzduchu a výfukových plynů dosáhne spodního bodu, nedojde k vysublimování ledových krystalů [10].

Krátkodobá kondenzační stopa je velmi úzká a rychle zaniká po průletu letadla. Délka stopy může být různá, avšak zůstává přibližně konstantní. Dlouhodobá kondenzační stopa setrvává na obloze dlouho poté, co daným místem proletělo letadlo. Její šířka nebývá o mnoho větší než u krátkodobých stop. Rozšiřující se dlouhodobá kondenzační stopa zůstává v atmosféře dlouhou dobu a postupně se rozrůstá. Takovéto stopy jsou vzhledově podobné přírodní cirrovité oblačnosti [14].



Graf 1. Fázový diagram mísení výfukových plynů s okolním vzduchem pro různé okolní podmínky [10]

2.4 Prahová teplota

Z grafu č. 1 je patrné, že se kondenzační stopy snadněji vytvářejí při nižších teplotách vzduchu. Pro každý případ lze vypočítat prahovou teplotu T_T , která je definována jako nejvyšší teplota vzduchu, při které se může vytvořit kondenzační stopa pro daný parciální tlak vodní páry

obsažené ve vzduchu, teplotu výfukových plynů a parciální tlak vodní páry obsažené ve výfukových plynech, přičemž poslední dvě hodnoty jsou závislé na daném motoru, provozních podmínkách a palivu. Zmíněné parametry ovlivňují sklon křivky mísení G . Teplota vzduchu v atmosféře v bodě T (případ II v grafu č. 1) je prahovou teplotou pro vytvoření kondenzační stopy pro tento případ, tzn. pro daný sklon křivky mísení G a parciální tlak vodní páry ve vzduchu e_a . Změní-li se hodnota G nebo e_a , změní se i prahová teplota umožňující vznik kondenzační stopy. Z toho vyplývá, že pro každý pár hodnot G a e_a existuje konkrétní prahová teplota. Pro nalezení této konkrétní hodnoty prahové teploty je nutné nejprve vypočítat teplotu T_F . Tato teplota je definována jako teplota v bodě F (viz graf č. 1). Bod F je společným bodem křivky kondenzace a tečnou, kterou představuje křivka mísení (přímka) se sklonem G a koncovým bodem T (bod odpovídající prahové teplotě T_T). Teplotu T_F v bodě dotyku F lze spočítat dle následujícího vztahu 2.2:

$$T_F = -44,46 + 9,43 \cdot \ln(G - 0,053) + 0,72 \cdot [\ln(G - 0,053)]^2, \quad (2.2)$$

kde G je sklon křivky mísení. Vztah 2.2 je platný pro teploty T_F v rozmezí od -10 °C do -60 °C. Pro výpočet prahové teploty pro vznik kondenzační stopy platí vzorec 2.3:

$$T_T = T_F - \frac{e_w(T_F) - U_w e_w(T_T)}{G}, \quad (2.3)$$

kde T_F je teplota, která se spočítá podle vztahu 2.2, e_w je parciální tlak nasycené vodní páry vzhledem k vodě (při teplotě T_F a T_T), U_w je relativní vlhkost vzduchu vzhledem k vodě a G je sklon křivky mísení. Sklon křivky mísení je obecně definován jako poměr změny parciálního tlaku vodní páry Δe ke změně teploty ΔT . Výpočet lze provést podle vzorce 2.4:

$$G = \frac{\Delta e}{\Delta T} = \frac{Cp}{\epsilon} = \frac{\frac{\Delta q}{\Delta h_p} c_p p}{\epsilon}, \quad (2.4)$$

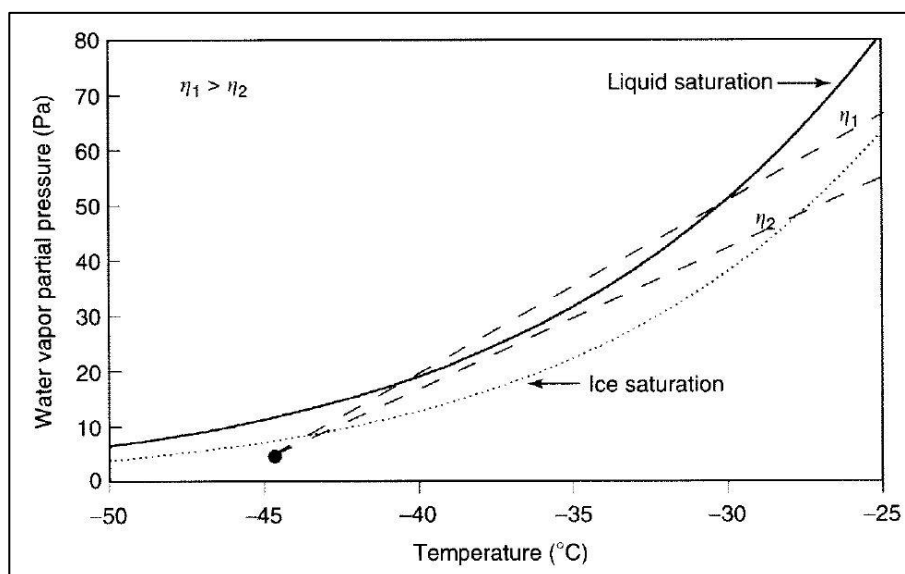
kde C je faktor kondenzační stopy ($[C] = \text{gkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), p je tlak vzduchu v atmosféře ($[p] = \text{Pa}$), ϵ je bezrozměrná konstanta udávající poměr mezi molárními hmotnostmi vodní páry a suchého vzduchu ($\epsilon = 0,622$). Faktor kondenzační stopy je definován $C = c_p \Delta q / \Delta h_p$; c_p je měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku ($c_p = 1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), q je směšovací poměr vodní páry ($[q] = \text{g/kg}$), h_p je měrná entalpie proudu za letadlem ($[h_p] = \text{Jkg}^{-1}$). Poslední dvě zmíněné veličiny lze nahradit indexem emise vodní páry EI_{H_2O} ($[EI_{H_2O}] = \text{kg/kg}$), spalným teplem Q ($[Q] = \text{MJkg}^{-1}$) a celkovou účinností η . Po úpravě lze sklon křivky mísení vypočítat dle vzorce 2.5 [10, 15].

$$G = \frac{EI_{H_2O} p c_p}{\epsilon Q (1 - \eta)} \quad (2.5)$$

Index emise vodní páry, který vyjadřuje množství vyprodukované vodní páry na jeden kilogram spáleného paliva, nahrazuje změnu směšovacího poměru vodní páry. Směšovací poměr vodní páry odpovídá množství vodní páry ve vzduchu čili počtu gramů vodní páry na jeden kilogram vzduchu. Rozdíl v entalpii je stanoven téměř zcela spalným teplem a celkovou účinností, protože teplo v okolním prostředí – vzduchu je oproti teplu vyprodukovanému motory zanedbatelné [10].

2.5 Vliv účinnosti na vytvoření kondenzační stopy

Jelikož se spalné teplo a index emise vodní páry vztahují k danému palivu, je primární proměnnou, která ovlivňuje sklon křivky mísení, celková účinnost. Se zvyšující se účinností roste i sklon křivky mísení. Každý motor má stanovenou účinnost, s jakou by měl pracovat, avšak díky odlišnostem způsobeným v údržbě, draku letadla, provozními podmínkami se účinnost mění. Průběh křivky mísení pro dvě různé účinnosti při zachování stejných okolních podmínek je vidět na grafu č. 2. Účinnost η_2 je o něco menší než η_1 . Rozdíl v účinnostech v tomto případě ovlivní vznik kondenzační stopy. Při účinnosti η_2 křivka mísení nedosáhne hranice kondenzace a kondenzační stopa se nevytvoří, kdežto při účinnosti η_1 bude mít křivka mísení větší sklon a dojde k vytvoření kondenzační stopy. Letadla s úspěšnějšími motory, které vykazují lepší účinnost, mohou způsobit vytvoření kondenzační stopy za vyšších okolních teplot. V praxi to znamená, že dvě různá letadla letící tím samým místem mohou vykazovat odlišné výsledky, co se vzniku kondenzačních stop týká. Jiným příkladem může být letadlo pohybující se ve stejném prostředí, za nímž při horizontálním letu vzniká kondenzační stopa a při stoupání, při kterém bude mít horší účinnost, stopa nevzniká [10].



Graf 2. Fázový diagram mísení výfukových plynů s okolním vzduchem pro různé účinnosti motorů [10]

2.6 Schmidt-Applemanovo kritérium

Podmínkou pro vznik kondenzační stopy je splnění Schmidt-Applemanova kritéria. Dle tohoto kritéria musí být v proudu za letadlem během izobarického mísení výfukových plynů se vzduchem v atmosféře dosaženo stavu nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě. Jak již bylo výše uvedeno, je důležité, aby došlo k nasycení vzhledem k vodě a nikoli pouze k ledu, resp. aby bylo dosaženo hodnoty tlaku nasycené vodní páry nad vodou [16].

Tato podmínka je splněna, není-li teplota vzduchu v atmosféře vyšší než prahová (kritická) teplota. Na základě znalosti kritických teplot pro jednotlivé případy lze výpočtem sestavit graf kritické teploty jako funkce výšky (tlaku) a relativní vlhkosti vzduchu. Z tohoto grafu lze tedy vyčíst nejvyšší možnou teplotu, při které se vytvoří kondenzační stopa za daných podmínek. Jinou interpretací grafu může být určení minimální relativní vlhkosti vzduchu (vzhledem k vodě) potřebné pro vznik kondenzační stopy při dané okolní teplotě a tlaku [17].

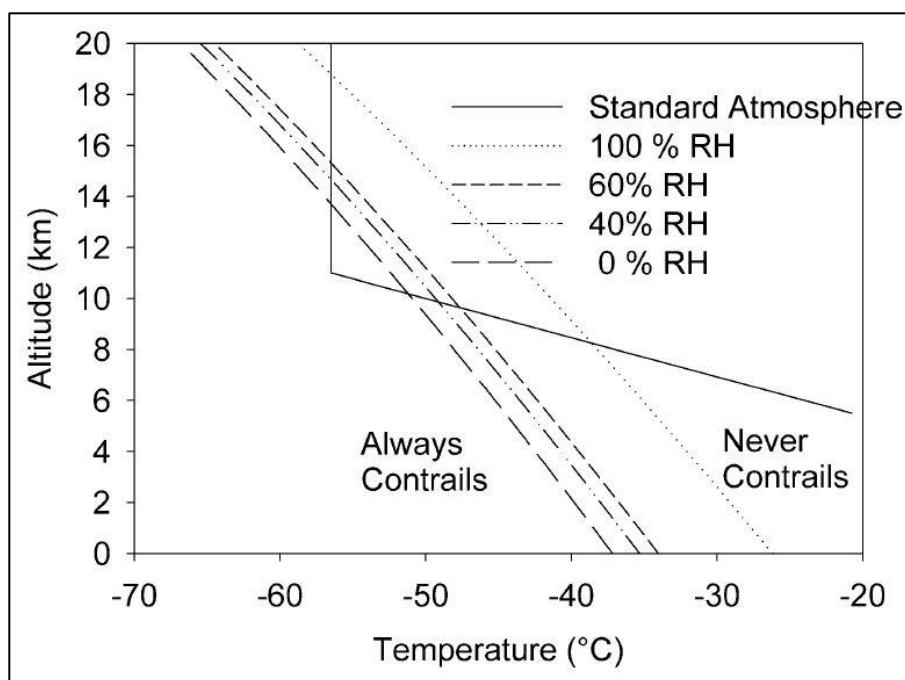
Výše popsaná závislost je vidět na grafu č. 3. Na svislé ose je zanesena výška určující tlak, na vodorovné ose teplota. Graf znázorňuje několik křivek pro různé relativní vlhkosti vzduchu pro letadlo, jehož motory spalující kerosin, který má index emise vodní páry 1,223 a spalné teplo $43,2 \text{ MJkg}^{-1}$, pracují s celkovou účinností 0,3. Za předpokladu, že okolní teplota odpovídá podmínkám mezinárodní standardní atmosféry⁹ (na grafu vyznačena plnou čarou), se kondenzační stopa vytvoří v rozmezí výšek od 8,2 km do 19 km při relativní vlhkosti 100 % (běžně se v těchto výškách s teplotou pod $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ nevyskytuje) a v rozmezí od 10,2 km do 14 km při nulové relativní vlhkosti [9].

Levá krajní čárkovaná křivka je mezní hranicí vzniku kondenzační stopy při nulové relativní vlhkosti. Za podmínek, jejichž hodnoty jsou vymezeny touto křivkou a plochou vlevo od ní, dojde vždy ke vzniku kondenzační stopy, i když okolní vzduch neobsahuje žádnou vodní páru. Pravá krajní tečkovaná křivka je mezní hranicí vzniku kondenzační stopy při 100% relativní vlhkosti. Na této křivce ještě dojde k vytvoření kondenzační stopy, avšak za podmínek v oblasti vpravo od této křivky k vytvoření nedojde nikdy, přestože by byl vzduch z hlediska vlhkosti nasycen. Oblast vymezená těmito dvěma křivkami je oblastí, v níž je vznik kondenzační stopy závislý na konkrétní hodnotě relativní vlhkosti. V grafu jsou znázorněny případy pro 40%

⁹ Mezinárodní standardní atmosféra je model atmosféry, který vystihuje převládající poměry v atmosféře během celého roku ve všech zeměpisných šířkách. Vychází z předpokladu platnosti stavové rovnice a rovnice hydrostatické rovnováhy. V nulové výšce (průměrná výška hladiny moře) je teplota vzduchu 288,15 K. Od hladiny moře do výšky 11 000 gpm (geopotenciální metr) je teplotní gradient roven poklesu teploty o $0,65 \text{ }^\circ\text{C}$ na 100 m. Od výšky 11 000 gpm do 20 000 gpm se teplotní gradient rovná nule [7].

a 60% relativní vlhkost. Z grafu je patrné, že čím je teplota vzduchu nižší, tím menší obsah vodní páry ve vzduchu je nutný pro vznik kondenzační stopy a tím snadněji se kondenzační stopy tvoří [17].

Tento graf bývá v literatuře někdy nazýván jako Schmidt-Applemanův graf. V příloze 2.1 je původní graf z Applemanova článku z roku 1953. Lze ho interpretovat stejným způsobem. Rozdílem je pouze svislá osa, na které je tlak v milibarech, a ne přepočet tlaku na výšku.



Graf 3. Závislost prahové teploty pro vznik kondenzační stopy na výšce a relativní vlhkosti vzduchu [9]

2.7 Ledové částice tvořící kondenzační stopu

V ideálním případě by produkty spalování paliva byly pouze oxid uhličitý a voda v podobě vodní páry, avšak ve skutečnosti obsahují výfukové plyny i menší množství oxidů dusíku, uhlovodíků, oxidu uhelnatého, oxidů síry, organické látky, saze a také mohou obsahovat malé kovové částičky. Částice vyskytující se ve výfukových plynech mají vliv na vytvoření kondenzační stopy, i když ne zásadní. Slouží jako kondenzační jádra, ale nejsou nutnou podmínkou pro vznik kondenzační stopy [9].

Ta může vzniknout i v případě, že by se ve výfukových plynech nevyskytovaly žádné aerosoly. V tom případě by se vytvořilo méně ledových částic, ale velikostně větších s menší optickou

tloušťkou¹⁰ a menším radiačním dopadem. I okolní vzduch obsahuje aerosoly, jejichž částice se mohou dostat do proudu za motorem při mísení výfukových plynů se vzduchem a které mohou posloužit jako kondenzační jádra. V horní troposféře se jich nachází velké množství, obvykle mezi 100 a 10 000 v 1 cm³ vzduchu. Nicméně ve výfukových plynech jsou mnohem vyšší koncentrace částic. V 1 cm³ výfukových plynů jich může být až jedna miliarda. Ty spolu s částicemi obsaženými ve vzduchu mohou posloužit jako kondenzační jádra. Takto vysoké koncentrace částic ve výfukových plynech mají sekundární vliv na vytvoření kondenzační stopy. Kondenzační stopy se skládají z ledových krystalů, které jsou typicky menší než ledové krystaly v přírodních cirrech [9, 19, 20].

Proces, při kterém se tvoří zárodečné kapičky vody či ledové krystalky z vodní páry, se nazývá nukleace. Může probíhat dvěma způsoby. Při homogenní nukleaci se tvoří kapičky vody bez přítomnosti dalších substancí, které by se podílely na tomto procesu. Přechlazené kapky vody zamrzají a tvoří ledové krystaly. Druhou možností je heterogenní nukleace, při které jsou přítomny další substance. K zamrznání dochází díky kontaktu s povrchem pevné částice [7, 9, 21, 22].

Při tvoření kondenzační stopy se koncentrace ledových částic pohybuje okolo 10⁴ cm⁻³ až 10⁵ cm⁻³. Ledové částice dále rostou a jsou turbulentně míseny s okolním vzduchem. Jejich koncentrace klesne na asi 10³ cm⁻³ až 10⁴ cm⁻³ a velikost většiny částic při této koncentraci bude menší než 1 μm. Když je kondenzační stopa stará okolo jedné minuty, dosahují její částice velikosti přibližně 2 μm. Po jedné hodině 8 μm, přičemž koncentrace klesne až na hodnotu mezi 10 cm⁻³ a 15 cm⁻³. Růst stopy je závislý na tom, jak je vzduch přesycen vzhledem k ledu, dále na tloušťce přesycené vrstvy atmosféry a na rychlosti a stříhu větru. U dlouhodobých stop nabývají částice velikosti 30 μm až 1 000 μm [10, 23].

Počet ledových částic ve vytvořené kondenzační stopě se přibližuje počtu částíček sazí. Provedená měření počtu ledových částic jsou vztažena ke spotřebě paliva a vychází, že na jeden kilogram spáleného paliva připadá 10¹⁴ až 10¹⁵ ledových částic. Není zaznamenán žádný významný trend týkající se počtu ledových částic během životního cyklu kondenzační stopy. Počet krystalů, které se utvoří v nasyceném prostředí, zůstává konstantní. To má za následek, že kondenzační stopa, jejíž částice se začnou srážet do nižší hladiny, může rychle slábnout. Počet částic se již dále nezvyšuje, a proto kondenzační stopa bledne. Je-li

¹⁰ Optická tloušťka udává, jak velkou část záření daná vrstva odráží. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která závisí na mohutnosti vrstvy a koeficientu odrazivosti. Je-li hodnota optické tloušťky x , pak dojde k zeslabení záření vrstvou o e^{-x} . Pokud je optická tloušťka rovna 1, jedná se o zeslabení záření vrstvou o e^{-1} , tedy o necelých 37 % [18].

parciální tlak vodní páry ve vzduchu těsně nad bodem nasycení vzhledem k ledu, je růst krystalů omezený. V takovýchto podmínkách se může stopa pomalu rozšiřovat difúzí, přičemž si zachovává svůj tvar čáry po dlouhou dobu [9, 10].

Ledové krystaly rostou depozicí. Množství ledové vody v kondenzační stopě narůstá tak dlouho, dokud částice nevydají nebo dokud není dosaženo rovnováhy mezi obsahem ledu v daném prostředí a tlakem nasycení vodní páry nad ledem. Podmínky, ve kterých je dosaženo této rovnováhy, zpravidla nevydrží příliš dlouho a kondenzační stopa nakonec vymizí [10].

Množství vody, které je obsaženo v kondenzační stopě, je jedním ze základních mikrofyzikálních parametrů a často se užívá v modelech pro stanovení optických vlastností oblačnosti. V literatuře je toto množství označováno jako „ice water content“ (zkratka IWC) a udává hmotnost vody, resp. ledu tvořícího kondenzační stopu na jednotku objemu. Při dosazení do následujících vzorců bude výsledná hodnota v gramech na metr krychlový. Odhad IWC v závislosti na teplotě je dán vztahem

$$IWC = \exp(6,97 + 0,103 \cdot T) \cdot 10^{-3}, \quad (2.6)$$

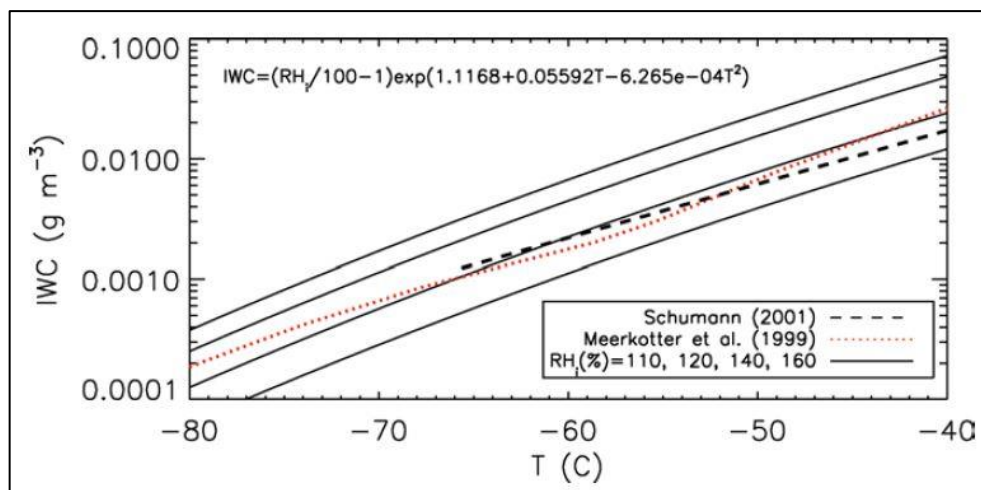
kde T je teplota okolního vzduchu ($[T] = ^\circ\text{C}$). Závislost IWC na teplotě dle vztahu 2.6 odpovídá teplotám od -37°C do -67°C a IWC od $0,001 \text{ gm}^{-3}$ do $0,07 \text{ gm}^{-3}$ (viz graf č. 4 – čárkovaná křivka). Jinou možností je stanovení IWC podle vlhkosti vzduchu vztahem

$$IWC = \rho_a \left[X_i \left(\frac{RH_i}{100} - 1 \right) \right], \quad (2.7)$$

kde ρ_a je hustota vzduchu ($[\rho_a] = \text{kgm}^{-3}$), X_i je směšovací poměr nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k ledu udávající maximální množství vodní páry na jednotku hmotnosti vzduchu ($[X_i] = \text{g/kg}$) a RH_i je relativní vlhkost vzduchu vzhledem k ledu vyjádřená v procentech. Pro podmínky odpovídající standardní atmosféře je možné vztah 2.7 upravit do tvaru

$$IWC = \left(\frac{RH_i}{100} - 1 \right) \cdot \exp(a_0 + a_1 T + a_2 T^2), \quad (2.8)$$

kde a jsou koeficienty o hodnotách $a_0 = -3,4889$, $a_1 = 0,05588$, $a_2 = 6,268 \cdot 10^{-4}$, T je teplota vzduchu ($[T] = ^\circ\text{C}$) a RH_i je relativní vlhkost vzduchu vzhledem k ledu v procentech. Tento vztah, stejně jako vztah 2.6, je pouze aproximací udávající odhad IWC. Závislost IWC na teplotě je znázorněna na grafu č. 4. Čárkovaná křivka odpovídá pozorování Schumanna (matematicky vyjádřeno vztahem 2.6), červená tečkovaná křivka odpovídá pozorování Meerkotera et al. a plnými křivkami je znázorněn průběh v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu vzhledem k ledu pro hodnoty 110 %, 120 %, 140 % a 160 %, přičemž spodní křivka je pro nejnižší vlhkost, horní pro nejvyšší [23].



Graf 4. Závislost IWC na teplotě [23]

2.8 Vývoj kondenzační stopy

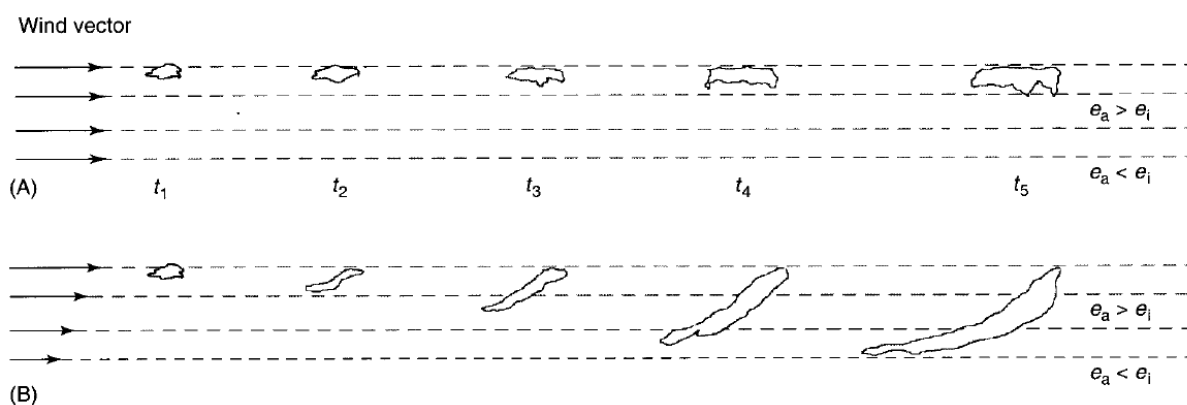
Kondenzační stopa nikdy nevzniká bezprostředně za letadlem. Výfukové plyny jsou za výstupem z motoru příliš horké, a proto se kondenzační stopa nevytvoří ihned, ale až v určité vzdálenosti za letadlem, kde teplota výfukových plynů dostatečně klesne díky mísení s okolním chladným vzduchem. Při vysoké teplotě dokáže vzduch pojmout velké množství vodní páry. Za předpokladu konstantní absolutní vlhkosti vzduchu¹¹ bude s klesající teplotou růst relativní vlhkost, až dosáhne bodu nasycení. V chladném vzduchu se už nedokáže udržet všechna vodní pára a začne se kondenzací měnit v kapky vody. Proces tvoření kondenzační stopy začíná ve vzdálenosti asi 30 m za letadlem, ale i menší. Struktura kondenzační stopy je závislá na mnoha faktorech, jako je velikost letadla, jeho geometrické uspořádání, hmotnost, rychlost, počet a umístění pohonných jednotek [9, 10].

Vytvoří-li se kondenzační stopa ve vzduchu s relativní vlhkostí vzhledem k ledu menší než 100 %, nesetrvá v atmosféře příliš dlouho. Stopa zaniká řádově po sekundách až minutách po svém vzniku ve vzdálenosti jednoho až několika kilometrů za letadlem. V případě překročení meze nasycení, při relativní vlhkosti vzduchu vzhledem k ledu vyšší než 100 %, může na obloze stopa setrvat dlouhou dobu. Označuje se jako perzistentní kondenzační stopa. Její životnost dosahuje i několika hodin. Rozrůst se může do šířky několika kilometrů a výšky 200 m až 400 m. Setrvat může tak dlouho, dokud okolní vzduch zůstane přesycený vodní párou. Kondenzační stopy jsou často pozorovány v oblastech nebo blízko oblastí s cirrovitou oblačností, avšak mohou se vyskytovat i v bezoblačných místech. Oproti kondenzačním

¹¹ Absolutní vlhkost vzduchu neboli hustota vodní páry udává hmotnost vodní páry na jednotku objemu vlhkého vzduchu. Jednotkou je $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [7].

stopám potřebuje cirrovitá oblačnost vyšší relativní vlhkost. K homogenní nukleaci dochází pouze v místech s vysokou relativní vlhkostí vzhledem k ledu dosahující hodnot 145 % až 165 % nebo vyšších. Pro heterogenní nukleaci je dostatečná vlhkost 110 % a více. Často je tak relativní vlhkost vzhledem k ledu dostatečná, aby se mohly vytvořit perzistentní kondenzační stopy a rozvinout se v cirrovitou oblačnost, ale nedosahuje hodnot pro přírodní cirry [2, 9].

Růst částic kondenzační stopy je v přesycených oblastech atmosféry velmi rychlý. Kondenzační stopa se rozšiřuje horizontálně a vertikálně do nižších vrstev v závislosti na stříhu větru, což je zobrazeno na obrázku č. 1. Zleva doprava je schematicky znázorněno pět časových okamžiků růstu kondenzační stopy. V horních vrstvách vzduchu je parciální tlak vodní páry (e_a) nad hodnotou nasycení vzhledem k ledu (e_i). Schéma A ukazuje, jak by se teoreticky stopa šířila za podmínek bez stříhu větru, schéma B za podmínek se stříhem větru. Je vidět, že pokud je přítomný stříh větru, kondenzační stopa se rozšíří do větší oblasti [10].



Obrázek 1. Šíření kondenzační stopy v závislosti na stříhu větru [10]

Pokud se ledové krystaly kondenzační stopy dostanou do nižší vrstvy, ve které je přesycený vzduch, budou buď pokračovat v růstu, nebo se rozdělí na více krystalů. Kondenzační stopa, která měla podobu přímé čáry, se zdeformuje a bude vypadat jako přírodní cirrovitá oblačnost. Stopy, které setrvávají v atmosféře dlouhou dobu, jsou často nerozlišitelné od cirrovité oblačnosti a je tedy obtížné určit, zda se jedná o jev vzniklý díky letecké dopravě či nikoli [10].

Dvě veličiny, které charakterizují atmosférické podmínky a které mají zásadní vliv na vznik kondenzačních stop, jsou teplota a vlhkost. Velikost těchto veličin není v prostoru rovnoměrně rozložena, proto se mohou vedle sebe vyskytovat i velmi malé sousedící oblasti s odlišnými podmínkami. Následkem může být vznik kondenzační stopy, která nebude souvislá. Znázornění tohoto jevu je vidět na obrázku č. 2. Schéma A ukazuje letadlo letící vlhkou vrstvou atmosféry, která je rozrušena vertikální vlnou nebo slabým konvektivním proudem.

vznik ledových krystalů jako důsledek turbulence a poklesu tlaku, které způsobí letadlo. V takto vytvořeném přesyceném prostředí ledové krystaly rostou, vy-padávají do nižších hladin a následně se vypařují. V původní hladině opět vznikne bezoblačné místo. Toto místo může mít tvar přímého pásu při vodorovném letu nebo oválu, pokud letadlo stoupá nebo klesá skrz oblačnou vrstvu. V závislosti na podmínkách, především původní tloušťce oblačné vrstvy, může rozpadový pruh po nějakou dobu setrvat nebo se opětovně naplnit kapkami vody – oblačností. Rozpadový pruh je nejčastěji pozorován v oblacích typu altostratus¹² nebo altocumulus¹³ [7, 10].

¹² Altostratus je druh oblaku šedavé a modravé barvy ve tvaru plochy nebo vrstvy s vláknitou nebo žebrovitou strukturou nebo i bez struktury, který pokrývá úplně nebo částečně oblohu. Často bývá velmi tenký, Slunce je vidět jako za matným sklem. Jedná se o smíšený, méně často kapalný oblak středního nebo i vysokého patra [7].

¹³ Altocumulus je druh oblaku charakterizovaný jako menší nebo větší skupiny nebo vrstvy oblaků. Má bílou a šedou barvu. Skládá se z malých částí v podobě vln, oblázků nebo valounů, které jsou oddělené nebo spolu souvisí. Mohou mít vláknitý nebo rozplývavý vzhled. Jedná se o kapalný nebo smíšený oblak středního patra [7].

3 Výskyt kondenzačních stop a jejich vliv na klima

3.1 Působení letecké dopravy na podnebí

Letadla emitují v horní troposféře a dolní stratosféře plyny a částice, které v těchto částech atmosféry ovlivňují její složení. Emitované plyny a částice způsobují změny v koncentracích skleníkových plynů (kapitola 3.2), jako je oxid uhličitý, ozón, metan; jsou příčinou vzniku kondenzačních stop a mohou se podílet na zvýšení cirrovité oblačnosti. Všechny tyto skutečnosti přispívají ke změně klimatu. Oproti emisím je kvantifikování dopadu zmíněných plynů a částic na klima obtížnější. Pro vyjádření se využívá koncept radiačního působení, které je vysvětleno v kapitole 3.3. Rozdíl v působení emitovaných látek či sloučenin je doba, po kterou setrvávají v atmosféře. Dlouhou dobu zůstává v atmosféře např. oxid uhličitý (zhruba sto let) a metan. Plyny se rozptýlí v atmosféře a dostanou se tak do míst po celém světě. Naopak oxidy dusíku, oxidy síry, vodní pára a pevné částice se vyznačují krátkou dobou setrvání v atmosféře. Nejvyšší koncentrace jsou tím pádem v místech, kudy prolétávají letadla. Tyto emise mají vliv na ozón a tvoření kondenzačních stop, které mají dále dopad na radiační působení. Díky krátkému času setrvání výše uvedených plynů a částic v atmosféře je způsobené radiační působení regionálního charakteru – v okolí letových cest [24].

3.2 Skleníkový efekt atmosféry

Skleníkový efekt je jev, který spočívá v absorbování a emisi záření v atmosféře a jehož důsledkem je udržování tepelné energie. To se projevuje oteplováním nižších vrstev atmosféry. Hlavní zdroj energie záření, které vstupuje do atmosféry, je Slunce. Pomocí Planckova zákona lze přibližně rozdělit energii ve spektru slunečního záření. Z Wienova zákona (vzorec 3.1) vyplývá, že Slunce, jehož povrch má teplotu 6 100 K, vyzařuje maximum energie na vlnové délce okolo 470 nm. Wienův zákon vyjadřuje vztah:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (3.1)$$

kde b je Wienova konstanta ($b = 2,898 \text{ mmK}$) a T je teplota tělesa. Záření s vlnovou délkou pohybující se okolo 470 nm je záření viditelné a dobře proniká přes atmosféru. Plyny v atmosféře ovlivňují toto záření jen minimálně, a proto většina záření pronikne až k zemskému povrchu. Část energie je předána zemskému povrchu, který se přijatou energií zahřívá, a část energie je odražena zpět. Podle výše uvedených zákonů závisí maximum vyzařené energie na teplotě tělesa. Průměrná teplota povrchu Země se pohybuje kolem 300 K. Z toho vyplývá, že maximum energie odraženého záření Země je na vlnových délkách okolo 10 μm , které spadají do oblasti infračerveného (dlouhovlnného) záření. To na rozdíl od krátkovlnného záření Slunce interaguje s některými plyny atmosféry, které se označují jako

skleníkové plyny. Patří mezi ně vodní pára, oxid uhličitý, oxid uhelnatý, metan, oxid dusný, freony, ozón a další. Tyto plyny přijímají energii dlouhovlnného záření, které je odraženo od povrchu Země. Absorbovanou energii poté vyzařují do prostoru kolem. Tím se ohřívá atmosféra a ve formě dlouhovlnného záření předává teplo zpět směrem k zemskému povrchu. Dochází tak ke snížení radiačního ochlazování povrchu Země. Skleníkový efekt je tím silnější, čím větší jsou koncentrace skleníkových plynů. Ze všech skleníkových plynů má největší absorpci infračerveného záření vodní pára. Účinnost oxidu uhličitého je oproti metanu či oxidu dusnému mnohonásobně nižší, avšak jeho množství je mimo vodní páru ze všech skleníkových plynů největší. Pokud vezmeme v úvahu množství plynů v atmosféře, tak největší podíl na skleníkovém efektu má vodní pára (z 60 %) a oxid uhličitý (z 26 %). Skleníkový efekt funguje po celou dobu existence atmosféry, a pokud by tomu tak nebylo, teplota na Zemi by klesla asi na -17 °C . Problém v dnešní době není existence skleníkového efektu, ale jeho zesilování díky antropogenním činnostem, které zvyšují množství skleníkových plynů v atmosféře [7, 25, 26].

3.3 Radiační bilance

Vliv jakéhokoliv faktoru, který může způsobit změnu v klimatu, je často kvantifikován jako jeho radiační působení (angl. radiative forcing, zkratka RF). Takovým faktorem může být např. skleníkový plyn, oblačnost či kondenzační stopa. Radiační působení udává míru, jakou je ovlivněna energetická bilance systému Země-atmosféra daným působícím faktorem. Faktor mění bilanci mezi solárním zářením a infračerveným zářením. Radiační bilance soustavy Země-atmosféra je rozdíl mezi množstvím slunečního záření, které vstupuje do atmosféry Země, a zářením Země, které zahrnuje záření povrchu Země a atmosféry unikajícího do světového prostoru. Význam radiační bilance spočívá v tom, že řídí teplotu na zemském povrchu [7, 27].

Radiační působení je definováno jako míra energetické změny vztažená na jednotku plochy zeměkoule měřené na vrcholu atmosféry. Jednotkou je watt na metr čtvereční. Pokud je radiační působení daného faktoru pozitivní, znamená to, že energie soustavy Země-atmosféra vzroste a výsledkem bude oteplení soustavy. Opačným případem je negativní radiační působení způsobující úbytek energie. Jeho důsledkem bude ochlazení soustavy. Experimenty ukázaly, že vztah mezi změnou RF a změnou teploty na zemském povrchu je přibližně lineární (vzorec 3.2). Změna teploty v závislosti na RF je dána vztahem

$$\Delta T_s \approx \lambda \cdot RF, \quad (3.2)$$

kde λ je „climate sensitivity parameter“ ($[\lambda] = \text{K}(\text{Wm}^{-2})^{-1}$). Dříve se předpokládalo, že parametr je konstantní pro daný klimatický model a nezávislý na působícím faktoru. Pozdější

studie udávají, že tomu tak není. Stejně RF tedy může ovlivňovat teplotu různě v závislosti na činiteli. Někdy se vliv konkrétního činitele vyjadřuje pomocí bezrozměrné veličiny r_i označované jako účinnost. Je definována vztahem

$$r_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_{CO_2}}, \quad (3.3)$$

kde λ_i je „climate sensitivity parameter“ daného činitele a λ_{CO_2} oxidu uhličitého. Účinnosti r_i jednotlivých činitelů spojených s letectvím (oxid uhličitý, ozón, metan, vodní pára, kondenzační stopy, indukovaná cirrovitá oblačnost) byly rozebrány ve studii Ponatera et al. z roku 2006. Podle této studie by hodnoty r_i pro letectví měly být následující:

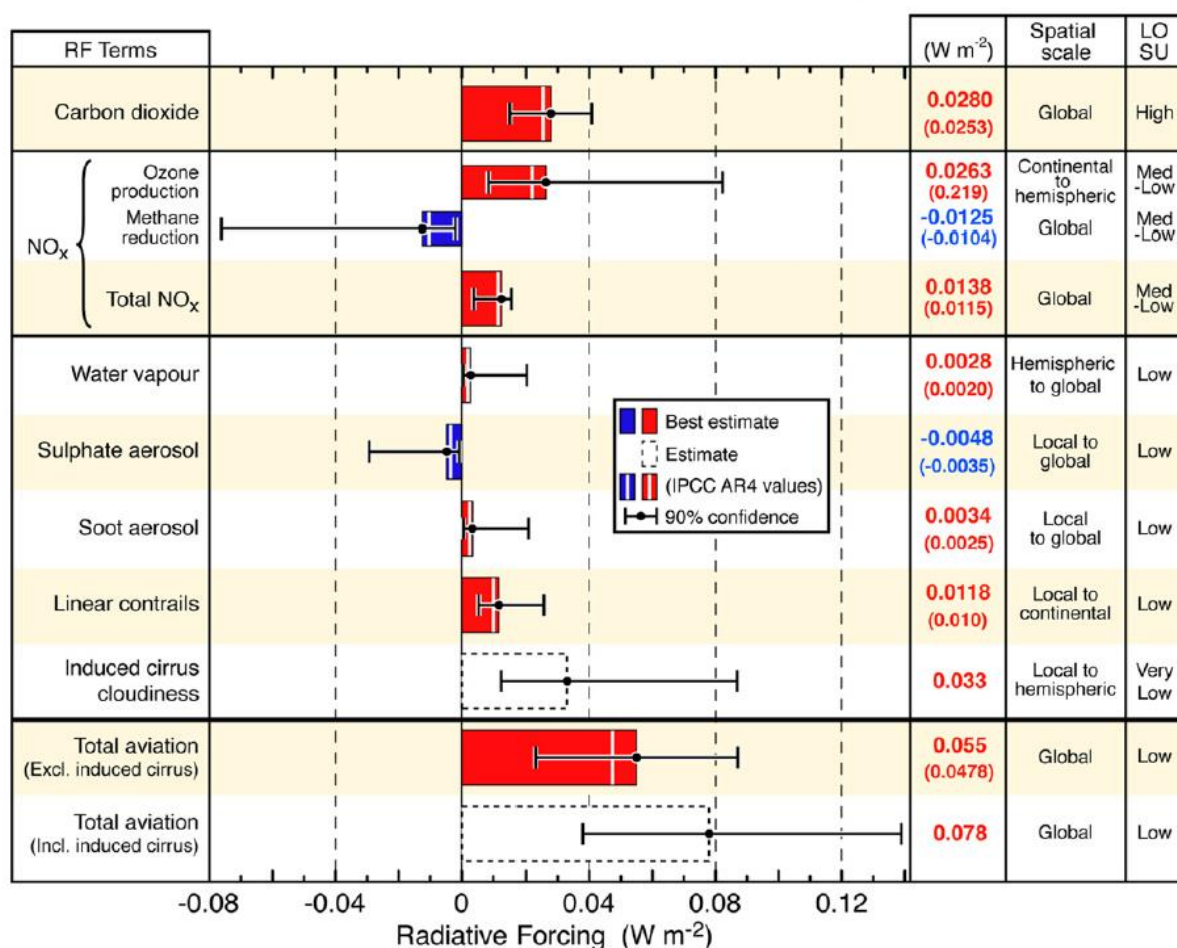
- $r_{CO_2} = 1$ (oxid uhličitý),
- $r_{O_3} = 1,37$ (ozón),
- $r_{CH_4} = 1,18$ (metan),
- $r_{H_2O} = 1,14$ (voda),
- $r_{contra\text{il}} = 0,59$ (kondenzační stopy).

Jaký je efekt indukované cirrovité oblačnosti, studie neuvádí vůbec. Poměr r_i daného činitele by měl být pro všechny klimatické modely přibližně konstantní. Z uvedených hodnot vyplývá, že vliv kondenzačních stop na změnu teploty na zemském povrchu je v porovnání s oxidem uhličitým menší. Ne všechny studie se na tomto shodují. Vliv kondenzačních stop oproti oxidu uhličitému je značně nejistý. Stanovené hodnoty nelze považovat za jednoznačně správné. V současné době není přesný dopad letectví stanoven a jednotlivé r_i jsou stále nejisté [27, 28].

IPCC pracuje ještě s tzv. efektivním radiačním působením (angl. effective radiative forcing, zkratka ERF). Jeho význam je podobný jako RF s tím rozdílem, že ERF počítá i s rychlými přizpůsobeními k odchýlkám, které se mohou projevit působením faktoru. Příkladem mohou být aerosoly. Jejich působení se může velmi rychle projevit ve změně teploty atmosféry a vlastnostech oblačnosti. Jinými slovy ERF zahrnuje jak efekt samotného faktoru, tak i efekt změn vyvolaných působením daného faktoru [20].

Na grafu č. 5 je znázorněno celkové RF připisované letecké dopravě a jednotlivé složky, které se na něm podílejí. Ve třetí části grafu jsou vidět RF vodní páry, síranů, sazí, kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti, která jsou rozebrána v dalších kapitolách. Čísla vycházejí ze studie Lee et al. z roku 2009 a vztahují se k roku 2005. Pro srovnání jsou v závorkách ještě uvedeny odhady IPCC z roku 2007. Černé úsečky ohraničují 90% interval spolehlivosti. V posledním sloupci je pro každou komponentu podílející se na RF uvedena

úroveň současného vědění. Největší nejasnosti jsou v odhadu indukované cirrovité oblačnosti. Celkové RF letecké dopravy bez zahrnutí indukované cirrovité oblačnosti v roce 2005 je podle Lee et al. 55 mWm^{-2} (90% interval spolehlivosti: 23 mWm^{-2} až 87 mWm^{-2}). To odpovídá 3,5 % z celkového antropogenního působení. Se započítáním indukované cirrovité oblačnosti je odhad RF 78 mWm^{-2} (90% interval spolehlivosti: 38 mWm^{-2} až 139 mWm^{-2}), což odpovídá 4,9 % z celkového RF daného antropogenními činnostmi [28, 35].



Graf 5. RF letecké dopravy v roce 2005 [35]

3.4 Aerosoly

Kromě emise mnoha plynů přináší spalování leteckého paliva i produkci aerosolů. Životnost aerosolů se pohybuje v troposféře mezi jedním dnem a dvěma týdny. Mezi nejdůležitější aerosoly patří saze a sírany. Saze jsou produkovány nedokonalým spalováním paliva, sírany vznikají díky přítomnosti síry v palivu. Jejich množství je sice oproti množství, které je dáno zemskými zdroji, mnohem menší, ale zdá se, že jejich vliv na podnebí zcela zanedbatelný není. Přispívá k tomu vypouštění aerosolů ve vysokých výškách, ve kterých se běžně pohybují letadla. Přítomnost aerosolů v atmosféře může přímo ovlivňovat radiační působení nebo může

vytvářet oblačnost či měnit již vzniklou oblačnost. Z hlediska radiačního působení mají letecké aerosoly pouze malý přímý dopad. Diskutabilní je nepřímý dopad v podobě tvoření oblačnosti a ovlivňování oblak vysokého patra. IPCC rozděluje ERF způsobené aerosoly na ERFari a ERFaci. ERFari je dáno efekty, kdy přítomnost aerosolů v atmosféře přímo ovlivňuje radiační působení. ERFaci je dáno interakcí aerosolů s oblačností. Změny v obsahu aerosolů ovlivňují vznik a mikrofyzikální vlastnosti oblačnosti, což má za následek změny v radiačním působení [20, 24, 27].

3.4.1 Přímý dopad aerosolů

Aerosoly mají v letectví pouze malý přímý dopad na klima. Velikost jejich vlivu na podnebí závisí na typu a koncentraci aerosolů. Přímý dopad aerosolů může mít obojí charakter – jak pozitivní RF, tak i negativní RF. Aerosoly rozptylují a absorbují sluneční záření. Když ho rozptylují, na zemský povrch dopadá méně záření a výsledkem je ochlazování. V případě absorpce aerosoly přijímají energii a výsledek je opačný, tedy oteplování [20, 24].

Zvýšení koncentrace sazí způsobuje pozitivní RF, má tendenci oteplovat zemský povrch. Naopak zvýšení koncentrace síranů způsobuje negativní RF, tudíž vede k ochlazování. Přímý radiační dopad sazí a síranů je v porovnání s ostatními leteckými emisemi menší. Odhad RF sazí podle IPCC pro rok 1992 je 3 mWm^{-2} a síranů -3 mWm^{-2} . Odhady byly aktualizovány pro rok 2000, ale pouze s malými změnami: RF sazí $2,5 \text{ mWm}^{-2}$, síranů $-3,5 \text{ mWm}^{-2}$. Lee et al. ve své studii udává hodnoty $3,4 \text{ mWm}^{-2}$ (saze) a $-4,8 \text{ mWm}^{-2}$ (síranů). Tato čísla se vztahují k roku 2005 [24, 28, 29].

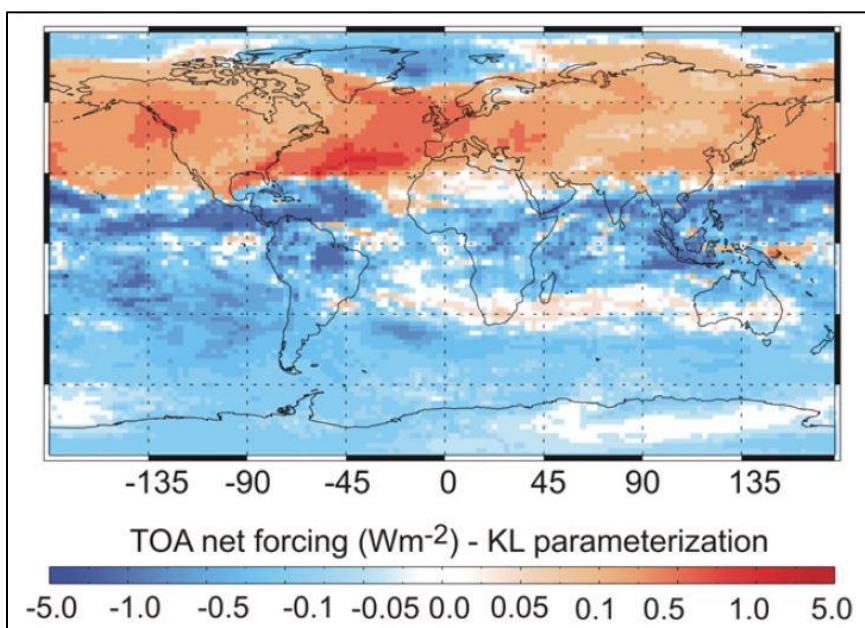
3.4.2 Nepřímý dopad aerosolů

V případě, kdy se nevytvoří kondenzační stopa, aerosoly emitované leteckými motory díky spalování paliva setrvávají v atmosféře a mísí se s okolním vzduchem a částicemi. Během tohoto procesu se aerosoly mohou stát heterogenními zárodečnými jádry, která jsou schopná zapříčinit vznik ledových krystalů heterogenní nukleací. Aerosoly tak mohou způsobit vznik ledových krystalů za podmínek menšího přesycení vzduchu vodní párou, než které by bylo zapotřebí pro aerosoly obsažené ve vzduchu. Ledové krystaly mohou následně vytvořit cirrovitou oblačnost. Letadla tedy mohou kromě oblačnosti vyvinuté z kondenzačních stop vytvářet i oblačnost díky emitovaným aerosolům. Mimo tvoření další oblačnosti jsou aerosoly schopné i měnit vlastnosti již přítomné oblačnosti, jež se vytvořila přírodně [23].

Aerosoly mohou mít díky změnám cirrovité oblačnosti radiační efekt jak pozitivní, tak i negativní. Negativní radiační působení nastane v případě oblačnosti tvořené kapkami vody. Vlivem aerosolů dojde k vytvoření většího množství menších kapek, což má za následek větší

albedo¹⁴. Taková oblačnost odráží více solárního záření a atmosféra se ochlazuje. Zejména v tropech je radiační působení citlivé na změny v obsahu aerosolů z důvodu nízkých teplot v horní troposféře a přítomnosti vysoké cirrovité oblačnosti. Negativní RF vlivem sazí se vyskytuje na mnoha místech v tropech a v okolí Jižního pólu, kde převažuje homogenní nukleace a vlivem sazí dochází k redukci ledových krystalů. Opačný efekt nastane v oblastech, kde převažuje heterogenní nukleace. Tam se při zvýšené koncentraci aerosolů předpokládá kladné RF z důvodu zvýšení počtu ledových krystalů a redukce jejich efektivního poloměru [20, 28].

Vliv emise sazí na cirrovitou oblačnost, aniž by se tvořily kondenzační stopy, záleží na podmínkách nukleace (podmínkách tvorby zárodečných krystalků ledu) a na koncentraci sazí, které se podílejí na tvorbě ledových krystalů. Vzhledem k tomu, že jsou tyto parametry velmi nejisté, nelze s určitostí říci, jaký efekt mají emise sazí na radiační bilanci. Zpráva z roku 2009 (autor Penner et al.) odhaduje radiační efekt sazí na hodnotu mezi $-0,16 \text{ Wm}^{-2}$ a $-0,12 \text{ Wm}^{-2}$. Na obrázku č. 3 je vidět rozložení RF sazí z letecké dopravy po celém světě. V severních zeměpisných šířkách je efekt sazí pozitivní radiační působení, okolo rovníku a na jižní polokouli negativní. Jiná zpráva (autor Liu et al.) z téhož roku uvádí RF mezi $-0,11 \text{ Wm}^{-2}$ a $0,26 \text{ Wm}^{-2}$ [28, 30].



Obrázek 3. Efekt emise sazí na RF [28]

¹⁴ Albedo je veličina určující schopnost plochy odrazet záření. Je dána poměrem množství dopadlého a odraženého záření na určitý povrch. Obvykle se vyjadřuje v procentech nebo jako bezrozměrné číslo z intervalu od 0 do 1 [7].

3.5 Vodní pára

Vodní pára je jednou z hlavních složek emisí vznikajících spalováním paliva. Jak bylo vysvětleno v kapitole 2, podílí se na tvorbě kondenzačních stop. Ne vždy je dosaženo podmínek k tomu nutných. I když se kondenzační stopy netvoří, vodní pára má negativní dopad na klima v jiné podobě. Většina vodní páry vyprodukované podzvukovými letadly je uvolněna do troposféry a během jednoho až dvou týdnů se vyloučí v podobě srážek. Menší část je vypouštěna do spodní stratosféry. Vodní pára se řadí mezi tzv. skleníkové plyny a má tendenci k oteplování povrchu Země. Avšak je nutné podotknout, že v porovnání s ostatními emisemi z letectví nemá vodní pára na tomto efektu největší podíl. Vliv oxidů dusíku a oxidu uhličitého na klima je větší. Odhad radičního dopadu vodní páry v roce 2000 je 2 mWm^{-2} , v roce 2005 $2,8 \text{ mWm}^{-2}$. Stále se jedná o malý zlomek z celkového dopadu letecké dopravy na radiční bilanci [19, 24, 28, 29].

3.6 Perzistentní kondenzační stopy

Kondenzační stopy, které se tvoří v relativně suchém prostředí, se rychle vypaří. Pokrytí těmito stopami, které setrvávají v atmosféře pouze okamžik, je menší než 0,001 %. Vzhledem k jejich krátkému trvání a malému pokrytí nemají na rozdíl od perzistentních kondenzačních stop a cirrovité oblačnosti na klima žádný vliv [19].

Vyznačuje-li se však prostředí vyšší vlhkostí, tvoří se kondenzační stopy perzistentní, které setrvávají dokonce až několik hodin, a navíc se i dále rozšiřují. Satelitní pozorování ukazují, že jejich životnost může dosahovat až 17 hodin. Ledové částice perzistentních kondenzačních stop rostou díky vodní páře obsažené v okolním vzduchu. Zhruba 10 až 20 % všech letů letadel s proudovým pohonem se vyskytuje v oblastech atmosféry, která má dostatečnou vlhkost na to, aby bylo dosaženo nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k ledu a aby se vytvořily perzistentní kondenzační stopy. Přesycené oblasti se tvoří v místech, ve kterých je značný letecký provoz a jsou částečně pokryty cirrovitou oblačností. Rozměry takovýchto oblastí dosahují horizontálně 150 km a vertikálně v průměru 500 m [9, 10, 30].

Jak již bylo zmíněno, kondenzační stopy se tvoří v horní troposféře a spodní stratosféře. Vlhkost ve stratosféře je v porovnání s troposférou velmi malá, neboť většina vody atmosféry je obsažena právě v troposféře. Z toho důvodu lety ve výškách nad tropopauzou nezpůsobují mnoho kondenzačních stop. Většina kondenzačních stop ve stratosféře je perzistentní. Dalším faktorem, který má vliv na tvorbu kondenzačních stop, je roční doba. S jejími změnami přicházejí i atmosférické změny, které ovlivňují vznik kondenzačních stop. V zimě je troposféra níže, v létě výše. Nejpriznivější podmínky pro vznik kondenzační stopy jsou ve středních zeměpisných šířkách během zimy a na začátku jara, kdy je troposféra nejchladnější. V létě je

troposféra teplejší a nemusí tak být dosaženo kritické teploty. Ve vysokých zeměpisných šířkách nad 50°, ve kterých troposféra sahá do menší výšky, se velké množství letů odehrává ve stratosféře, což má za následek vytvoření méně kondenzačních stop. Vhodné podmínky pro jejich vznik jsou v těchto oblastech během léta a podzimu. V teplých tropických oblastech jsou během roku příznivé letové hladiny nad 11 km. Frekvence, s jakou se v tropech ve výškách nad 11 km formují perzistentní kondenzační stopy, je oproti jiným oblastem vyšší. Je to způsobeno vyšší vlhkostí vzduchu [10].

Cirrovitá oblačnost vyvolaná kondenzačními stopami se tvoří ve vzduchu, jehož vlhkost je dostatečně vysoká na to, aby se kondenzační stopy mohly rozšiřovat, avšak nemusí dosahovat takových hodnot, aby se v daném prostředí mohla vyskytovat přírodní cirrovitá oblačnost. Oblačnost způsobená letectvím není pouze cirrovitá oblačnost, která vznikla postupem času z kondenzačních stop. Letectví ovlivňuje i přírodní cirry, u nichž se mění jejich výskyt a vlastnosti v závislosti na přítomnosti cirrovité oblačnosti vzniklé z kondenzačních stop, zvýšené koncentraci ledových jader v horní troposféře díky emisi sazí a přítomnosti aerosolů. Tyto změny mohou mít potencionálně značný efekt na oblačnost [19, 30].

3.7 Pokrytí indukovanou cirrovitou oblačností

Oblačnost způsobená kondenzačními stopami může být pozorována satelity. Od přírodní cirrovité oblačnosti ji lze odlišit díky lineárnímu tvaru, který si po nějakou dobu od vzniku zachovává. S postupem času je lineární tvar ztrácen a nelze již rozlišit, zda se jedná o přírodní či indukovanou oblačnost. Pokrytí cirrovitou oblačností, která nemá lineární tvar a která původně vznikla z kondenzačních stop nebo se na jejím vzniku podílely částice obsažené v emisích leteckých motorů, není přesně známé a změřené, a proto se i jeho odhady liší [19].

Odhaduje se, že v roce 1992 pokrývaly kondenzační stopy asi 0,1 % povrchu Země. V roce 1996 a 1997 bylo satelity zaznamenáno průměrné pokrytí kondenzačními stopami v době kolem poledne 0,5 % – 0,7 % prostoru nad střední Evropou. Během noci se pokrytí pohybovalo na třetinové hodnotě oproti denní době. Mezi roky 1995 a 2000 mělo pokrytí kondenzačními stopami nad střední Evropou během celého dne dosahovat průměrně hodnoty 0,55 % [9, 19, 24].

Více než 20 % Země je pokryto cirrovitou oblačností. Dlouhodobá pozorování výskytu oblačnosti některými meteorologickými stanicemi a satelity ukazují větší pokrytí oblačností a její častější výskyt z neznámých důvodů. Tato navýšení jsou větší zejména v oblastech, které se vyznačují vysokou hustotou leteckého provozu. Od doby, kdy byl zaveden v civilním letectví proudový pohon, zřejmě došlo k zvýšení cirrovité oblačnosti až o 0,2 %. K tomu je třeba ještě započítat pokrytí kondenzačními stopami (ve smyslu přímých čar) tvořící další 0,1 %. Je

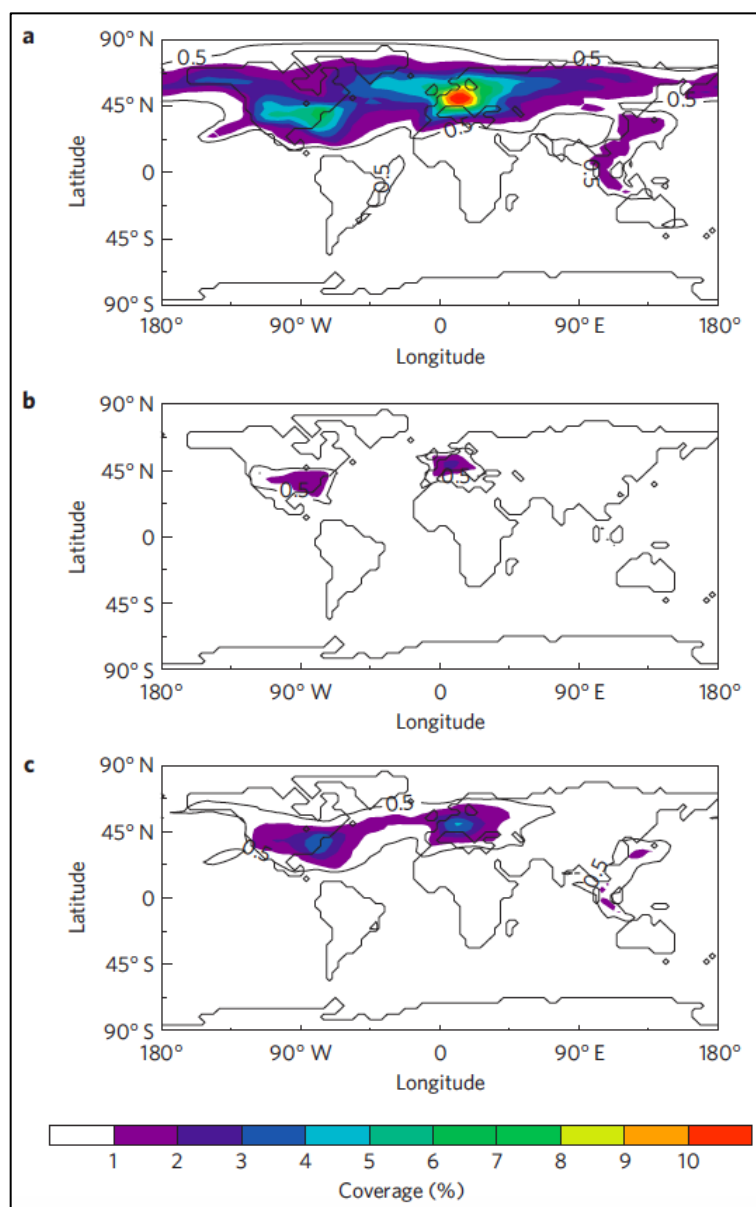
třeba počítat s tím, že uvedené hodnoty jsou pouze odhady a změny cirrovité oblačnosti nemohou být jednoznačně připisovány vlivům letecké dopravy [19, 24].

DLR vyvinulo contrail-cirrus module (CCMod), což je modul pro indukovanou cirrovitou oblačnost určený do globálního klimatického modelu ECHAM4. Tento modul umožňuje simulaci životního cyklu perzistentních kondenzačních stop. Výsledek simulace je vidět na obrázku č. 4, který znázorňuje situaci v roce 2002. Na první části (obr. 4 a) je pokrytí indukovanou cirrovitou oblačností, která na severní polokouli dosahuje několika procent. Druhá část (obr. 4 b) je pokrytí pouze perzistentními kondenzačními stopami s životností do pěti hodin. Největší pokrytí je v nejvíce exponovaných oblastech – nad Evropou, kde pokrytí dosahuje 2 %, a Spojenými státy americkými, ve kterých jsou vidět rozsáhlé oblasti s pokrytím 1 %. Celosvětově největší pokrytí indukovanou cirrovitou oblačností s hodnotou 10 % je ve střední Evropě, druhou nejvýznamnější oblastí je východní pobřeží Spojených států amerických s pokrytím 6 %, ačkoliv je zde hustota provozu srovnatelná se střední Evropou. Způsobeno je to převážně menším pokrytím kondenzačními stopami s životností delší než 5 hodin. Vysvětlení této skutečnosti je následující. Koridor mezi Evropou a Amerikou, který je z hlediska letecké dopravy také velmi vytížený, je místem, kde se tvoří mnoho kondenzačních stop. Velmi často jsou pak tyto perzistentní stopy advekci¹⁵ přesunovány do prostoru nad Evropou (opačným směrem jen zřídka). Druhou skutečností, která přispívá k vyšší frekvenci stop nad Evropou než Amerikou, jsou vyšší teploty nad Amerikou, a proto je zde o něco menší pravděpodobnost vzniku kondenzační stopy. Třetím nejvytíženějším prostorem je východní pobřeží jihovýchodní Asie. Zde je pokrytí kondenzačními stopami 0,2 % a indukovanou cirrovitou oblačností 1 %. V celosvětovém měřítku vychází průměrné pokrytí kondenzačními stopami 0,07 % a indukovanou cirrovitou oblačností 0,61 % [30].

Ne všechna oblačnost je viditelná. Značná část indukované cirrovité oblačnosti má velmi malou optickou tloušťku a není člověkem ze Země ani satelitem pozorovatelná. Vzhledem k jejímu vysokému výskytu nemusí být radiační efekt zanedbatelný. Indukovaná cirrovitá oblačnost s malou optickou tloušťkou je častější v chladnějších oblastech. V severněji položených místech ve výšce kolem 11 km nad hladinou moře je stav přesycení vzhledem k ledu velmi častý. Podmínky nutné pro vznik kondenzační stopy jsou splněny častěji, ale je málo pravděpodobné, že bude dosaženo velké optické tloušťky. Pokrytí indukovanou oblačností s malou optickou tloušťkou je tedy větší nad Evropou než v oblasti nad jihovýchodní Asií, ale i větší než nad Spojenými státy americkými [30].

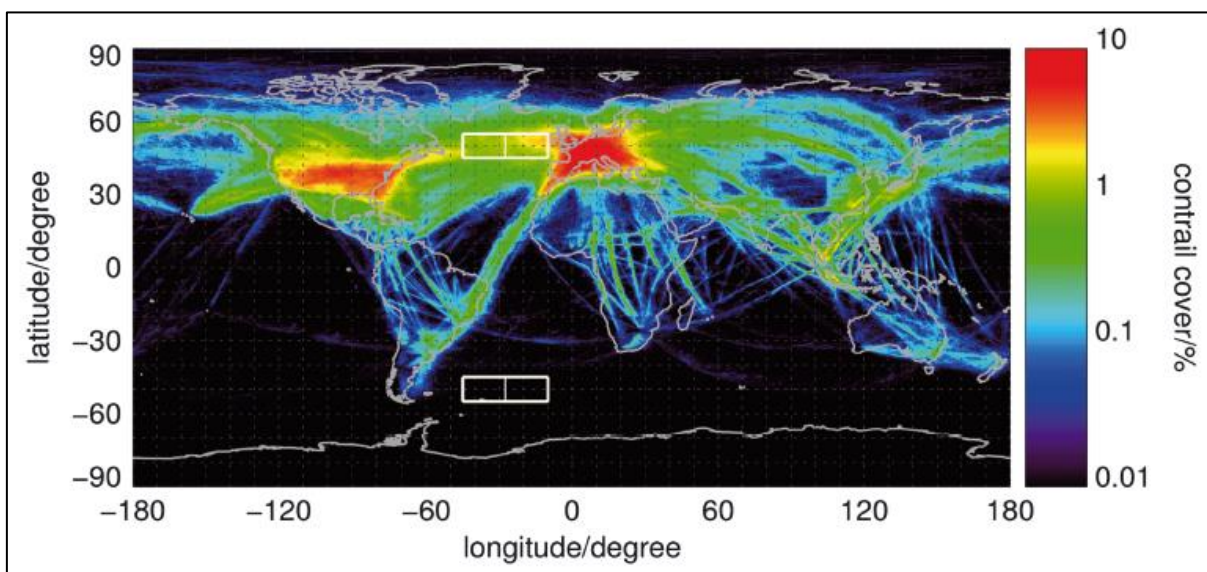
¹⁵ Advekce je přenos prouděním v atmosféře vodorovným směrem [7].

Na poslední části obrázku č. 4 je znázorněno pokrytí indukovanou cirrovitou oblačností s optickou tloušťkou větší než 0,2. Největší pokrytí touto viditelnou oblačností je opět nad Evropou a Amerikou, kde dosahuje 3 až 4 %. V jihovýchodní Asii je většina indukované cirrovité oblačnosti viditelná z důvodu vyššího obsahu vody ve vzduchu. Pokrytí se v těchto místech pohybuje okolo 0,5 %, lokálně může dosahovat až 1 %. Viditelné kondenzační stopy dosahují ve střední Evropě a jihovýchodní části USA 1% pokrytí, v jihovýchodní Asii 0,2 %. Celosvětové pokrytí viditelnými kondenzačními stopami činí 0,04 % a viditelnou indukovanou cirrovitou oblačností 0,23 % [30].



Obrázek 4. Pokrytí kondenzačními stopami a indukovanou cirrovitou oblačností v roce 2002 [30]

Schumann a Graf ve své zprávě z roku 2013 vycházejí z modelu Contrail Cirrus Prediction model (CoCiP), který simuluje životní cyklus kondenzačních stop od počátku jejich tvoření až do zániku, přičemž bere v úvahu meteorologické podmínky, daná letadla a jejich trasy. Model vychází z dat z roku 2006. Vizualizace pokrytí kondenzačními stopami a indukovanou cirrovitou oblačností s optickou tloušťkou větší než 0,1 v roce 2006 je na obrázku č. 5. Model udává ve střední Evropě pokrytí 5,4 %, globálně 0,23 %. Průměrná optická tloušťka indukované cirrovité oblačnosti je 0,2 [31].



Obrázek 5. Pokrytí kondenzačními stopami a indukovanou cirrovitou oblačností v roce 2006 [31]

3.8 Vliv kondenzačních stop na klima

Tvoření kondenzačních stop a indukované oblačnosti s sebou přináší i dopad na podnebí. Vznik kondenzační stopy může vést k úbytku srážek v oblačnosti. Stane se tak díky zmenšení částic v dané oblačnosti. Kondenzační stopa může mít i opačný účinek. Srážky způsobené kondenzačními stopami v jinak suchém vzduchu způsobí vlhkost ve středních vrstvách troposféry a vysušení atmosféry ve výšce letu [10].

Dalším efektem je dopad na radiační bilanci soustavy Země-atmosféra. Kondenzační stopy odrážejí krátkovlnné záření a pohlcují dlouhovlnné záření. Přítomnost kondenzačních stop tedy způsobuje odražení části solárního záření, které by jinak ohřívalo zemský povrch, a pohlcování části infračerveného záření Země, které ochlazuje soustavu Země-atmosféra. Celkové radiační působení závisí na více faktorech, mezi které patří kontrast mezi oblačností a povrchem Země, doba životnosti a optické vlastnosti kondenzační stopy, úhel Slunce nad horizontem. V závislosti na těchto faktorech může být výsledkem ochlazování či oteplování. Dřívější modely počítaly s danou optickou tloušťkou, ukázalo se však, že optická

tloušťka kondenzačních stop není konstantní a má vliv na RF. Novější modely už pracují s její predikcí. Některé studie také neberou v úvahu denní rozložení hustoty provozu. Jiné poukazují na to, že vliv rozložení letů během dne je zásadní. Udávají, že noční lety mají vliv na průměrné roční RF z 60 %, i když je během noci odlétáno z celkového ročního počtu nalétaných mil pouze 40 %. Efektem kondenzační stopy s velkou optickou tloušťkou, která se vytvoří během dne nad tmavým povrchem s malým albedem (takový povrch může mít např. zemědělská oblast, protože tmavá hlína pohlcuje záření), bude ochlazování. Opačný efekt nastane v případě, kdy se kondenzační stopa vytvoří nad teplým světlým povrchem během dne (např. nad pouští). Kondenzační stopa sice může odrážet malé množství záření, ale značné množství záření pohlcuje, protože je v porovnání se zemským povrchem velmi chladná a výsledkem je oteplování atmosféry. V noci bude efektem vždy oteplování, stejně tak když se kondenzační stopa vytvoří nad vrstvou oblačnosti [10, 18, 28, 30].

Kondenzační stopy mají efekt hlavně na dlouhovlnné záření. Způsobují pozitivní radiační působení, hlavně v noci a nad teplými a světlými povrchy. Krátkodobě může docházet k ochlazování, ale v průměru vychází, že zvýšení pokrytí kondenzačními stopami vede k ohřevu povrchu Země. Výsledný efekt kondenzačních stop je při neměnných okolních podmínkách daný především jejich optickou tloušťkou a rozsahem pokrytí [18, 19, 24].

Dojde-li k regionálnímu navýšení pokrytí cirrovitou oblačností o 0,5 %, předpokládá se, že se teplota při povrchu Země zvýší o 0,05 K. Modely však ukazují, že v oblastech s vysokou hustotou leteckého provozu by navýšení oblačnosti z 20 % na 25 % mohlo způsobit nárůst teploty o 1 K [19].

Odhady průměrné optické tloušťky perzistentních kondenzačních stop se různí. Její hodnota se pravděpodobně pohybuje mezi 0,15 a 0,25, ale existují i vyšší odhady. Obecně se tloušťka kondenzačních stop pohybuje v rozmezí od 0,1 do 0,5, ale může být i menší. Zřídka kdy dosahuje hodnoty 1. V Evropě se průměrná optická tloušťka pohybuje mezi 0,1 a 0,2, ve Spojených státech amerických je průměrná hodnota vyšší, pohybuje se mezi 0,2 a 0,26. Důvodem, proč je optická tloušťka kondenzačních stop v Evropě menší než v USA, je menší obsah vodní páry, která by mohla zkondenzovat. Pravděpodobně je to způsobeno nižší teplotou atmosféry nad Evropou [9, 28, 32].

Odhad radiačního působení pro leteckou dopravu v roce 1992 je $0,05 \text{ Wm}^{-2}$. Z toho $0,02 \text{ Wm}^{-2}$ je připisováno kondenzačním stopám. Zpráva IPCC z roku 2007 uvádí jako nejlepší odhad vlivu perzistentních kondenzačních stop pro rok 2002 RF $0,01 \text{ Wm}^{-2}$ (90% interval spolehlivosti: $0,003 \text{ Wm}^{-2}$ až $0,03 \text{ Wm}^{-2}$). Hodnoty radiačního působení pro rozšiřující se stopy, resp. indukovanou oblačnost, stejně jako vliv aerosolů, zpráva neuvádí. Stejný

odhad, RF $0,01 \text{ Wm}^{-2}$, zůstává i pro rok 2005 z důvodu malého nárůstu ve spotřebě paliva v období mezi roky 2000 a 2005. Změnám v cirrovité oblačnosti díky letectví je připisováno RF o hodnotě 10 mWm^{-2} až 80 mWm^{-2} , vztaženo k roku 2005. Vliv kondenzačních stop a indukované oblačnosti na globální oteplování by mohl být dle IPCC 2 až 4krát větší než samostatný efekt emise oxidu uhličitého letectvím [24, 27, 29].

Zpráva Spangenberg et al. z roku 2013 se vztahuje k roku 2006. Zabývá se pouze lineárními kondenzačními stopami, jejichž dopad počítá pro severní polokouli (všechny následující hodnoty RF se vztahují pouze k severní polokouli). Kromě celoročního odhadu poskytuje zpráva i hodnoty v závislosti na denní době a ročním období, které odrážejí výše uvedené předpoklady. Výsledky radiačního působení jsou vidět na obrázcích v příloze 3.1. Během dne (příloha 3.1, obrázek a) je největší radiační působení nad severním Atlantikem, severním Pacifikem, jihozápadní Asií, východní Evropou a Ruskem, kde dosahuje hodnot mezi 20 mWm^{-2} a 60 mWm^{-2} , někde dokonce až 70 mWm^{-2} . Na většině míst je RF pozitivní, ale na mnoha místech v tropech je negativní nebo nulové. Během noci (příloha 3.1, obrázek b) dochází k dramatickému nárůstu RF. V místech severního Atlantiku, jižní Asii a střední části Severní Ameriky je během noci RF 80 mWm^{-2} až 160 mWm^{-2} . K velkému efektu během noci dochází také v koridorech mezi Evropou a Jižní Amerikou, a Evropou a jižní Asií. Celkové radiační působení (příloha 3.1, obrázek c) je rozložením podobné nočnímu. Největší RF je v oblastech severního Atlantiku, Perského zálivu a Malajsie. Nad středem Pacifiku, kde je velmi malý letecký provoz, jsou i oblasti s nulovým či záporným RF. Radiační dopad kondenzačních stop je dán především jejich tvořením během noci. Průměrné celoroční RF během dne je pouze $4,6 \text{ mWm}^{-2}$, v noci $16,7 \text{ mWm}^{-2}$. Celkové krátkovlnné RF se pohybuje od -6 mWm^{-2} v říjnu do $-8,1 \text{ mWm}^{-2}$ v dubnu, celkové dlouhovlnné RF od 15 mWm^{-2} v říjnu do $19,6 \text{ mWm}^{-2}$ v dubnu. Celkové RF se během roku pohybuje následovně:

- v lednu $12,1 \text{ mWm}^{-2}$,
- v dubnu $11,5 \text{ mWm}^{-2}$,
- v červenci $9,8 \text{ mWm}^{-2}$,
- v říjnu $9,1 \text{ mWm}^{-2}$.

Celoroční průměrné RF vychází $10,6 \text{ mWm}^{-2}$. RF je v říjnu oproti lednu nižší o 28 %. Tento pokles odpovídá menšímu pokrytí kondenzačními stopami, které se snížilo o 25 %. Globální hodnoty (pro obě polokoule) vycházejí z rozložení hustoty leteckého provozu, přičemž 93 % všech letů se odehrává na severní polokouli. V globálním měřítku jsou hodnoty RF $-3,9 \text{ mWm}^{-2}$ (krátkovlnné), $9,6 \text{ mWm}^{-2}$ (dlouhovlnné), $5,7 \text{ mWm}^{-2}$ (celkové) [36, 37].

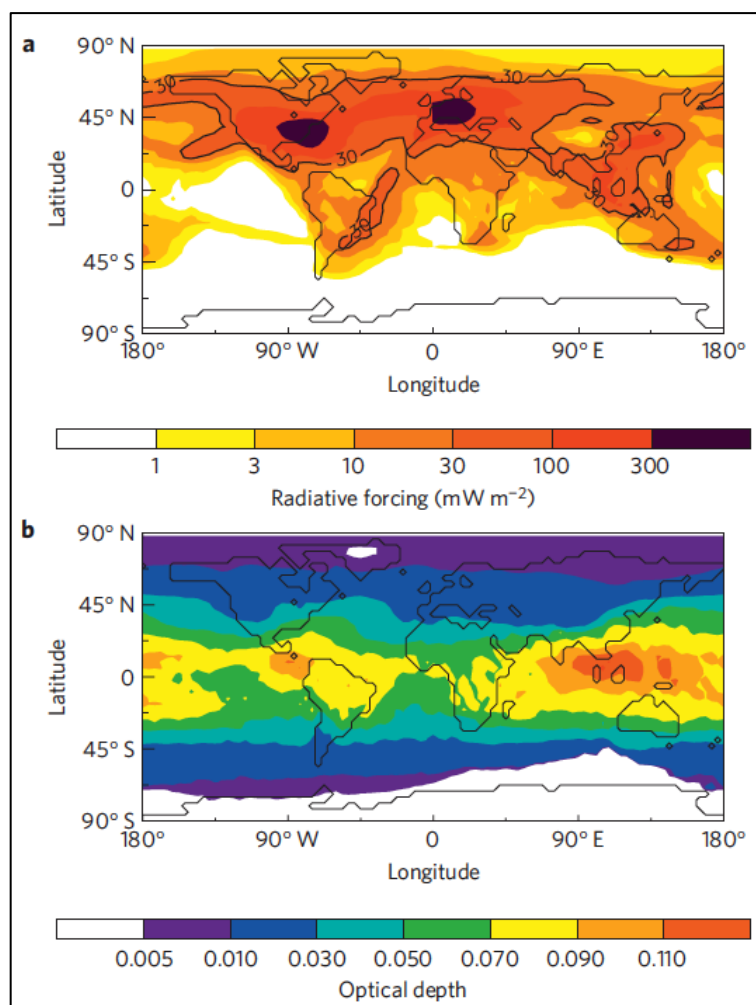
Další studií zabývající se vlivem lineárních kondenzačních stop je studie Yi et al. z roku 2012. Mapuje rozložení krátkovlnného a dlouhovlnného RF v roce 2006 a více se zaměřuje na tři nejlépe ovlivněné oblasti – Severní Ameriku, Evropu a východní Asii. Znázornění rozložení RF je v příloze 3.2. Obrázek (a) znázorňuje krátkovlnné, obrázek (b) dlouhovlnné a poslední obrázek celkové RF kondenzačních stop. Z těchto obrázků jasně vyplývá, že kondenzační stopy mají efekt hlavně na dlouhovlnné záření. Celosvětové krátkovlnné RF je dle studie $-6,24 \text{ mWm}^{-2}$, dlouhovlnné $17,56 \text{ mWm}^{-2}$. Celkové RF tedy vychází $11,32 \text{ mWm}^{-2}$. Největší radiační působení, více než desetinásobně větší oproti světovému průměru, je v místech Severní Ameriky (krátkovlnné $-105,9 \text{ mWm}^{-2}$, dlouhovlnné $260,8 \text{ mWm}^{-2}$, celkové $154,9 \text{ mWm}^{-2}$). Dále je velké v Evropě, kde dosahuje zhruba poloviny v porovnání se Severní Amerikou (krátkovlnné $-40,4 \text{ mWm}^{-2}$, dlouhovlnné $126,2 \text{ mWm}^{-2}$, celkové $85,8 \text{ mWm}^{-2}$). Na třetím místě je východní Asie (krátkovlnné $-10,7 \text{ mWm}^{-2}$, dlouhovlnné $35,7 \text{ mWm}^{-2}$, celkové 25 mWm^{-2}) [38].

Ze stejného modelu jako pokrytí kondenzačními stopami a indukovanou cirrovitou oblačností, které je na obrázku č. 4, vychází i jejich radiační působení a optická tloušťka – viz obrázek č. 6. Na první části (obr. 6 a) je znázorněno radiační působení indukované cirrovité oblačnosti v roce 2002. Největší radiační působení je ve střední Evropě a východní části USA, a to více než 300 mWm^{-2} . Nad většinou území USA, Evropou, severním Atlantikem v prostoru trati mezi Evropou a Amerikou a nad některými částmi jihovýchodní Asie dosahuje radiační působení 100 mWm^{-2} . Na většině míst středních zeměpisných šířek na severní polokouli je radiační působení 30 mWm^{-2} . Největší radiační působení je v místech s největším pokrytím indukovanou cirrovitou oblačností, ale rozšířené je i v oblastech s oblačností vyznačující se velkou optickou tloušťkou. Druhá část obrázku (obr. 6 b) ukazuje optickou tloušťku indukované cirrovité oblačnosti ve výšce odpovídající tlaku 250 hPa (výška asi 10 km). Pokud by bylo pokrytí oblačností všude stejné, radiační působení v jihovýchodní Asii by bylo oproti středním zeměpisným šířkám vyšší. O něco vyšší by bylo i ve východní části USA než ve střední Evropě. Z hlediska typu záření, které indukovaná cirrovitá oblačnost spolu s kondenzačními stopami ovlivňuje, jsou hodnoty radiačního působení v celosvětovém měřítku následující:

- $47,1 \text{ mWm}^{-2}$ pro dlouhovlnné záření,
- $-9,6 \text{ mWm}^{-2}$ pro krátkovlnné záření,

z čehož vyplývá, že celkové globální radiační působení je dle modelu ECHAM4-CCMod $37,5 \text{ mWm}^{-2}$ s možnou odchylkou $\pm 5 \text{ mWm}^{-2}$. Globální radiační působení samotných kondenzačních stop je odhadováno na $5,5 \text{ mWm}^{-2}$ (dlouhovlnné záření) a $-1,2 \text{ mWm}^{-2}$ (krátkovlnné záření), celkově tedy $4,3 \text{ mWm}^{-2}$ [30].

Zpráva DLR se zmiňuje i o potenciálu indukované cirrovité oblačnosti redukovat pokrytí přírodními cirry a zmenšovat jejich optickou tloušťku. Se vznikem oblačnosti díky letectví přichází změny v obsahu vody v atmosféře. Tvořící se kondenzační stopa spotřebovává kromě vodní páry obsažené v emisích spalování paliva i vlhkost nacházející se v okolním vzduchu atmosféry. Ledové částice indukované cirrovité oblačnosti spotřebovávají vodní páru okolního vzduchu, která by jinak mohla vytvořit přírodní cirrovitou oblačnost. Indukovaná oblačnost by tak mohla měnit optické vlastnosti přírodní oblačnosti, oddalovat její vznik a nahrazovat ji. To by teoreticky mohlo zčásti kompenzovat vliv indukované cirrovité oblačnosti. Menší pokrytí přírodní oblačností a zmenšení její optické tloušťky přináší záporné radiální působení. Ze simulace DLR vychází, že tyto změny v oblačnosti by mohly znamenat ochlazení odpovídající negativnímu RF -7 mWm^{-2} . Při započítání tohoto vlivu na přírodní oblačnost by se celkové radiální působení indukované cirrovité oblačnosti snížilo na hodnotu přibližně 31 mWm^{-2} . Avšak jedná se o hypotézu a možné změny v oblačnosti si žádají bližší zkoumání [30, 33].

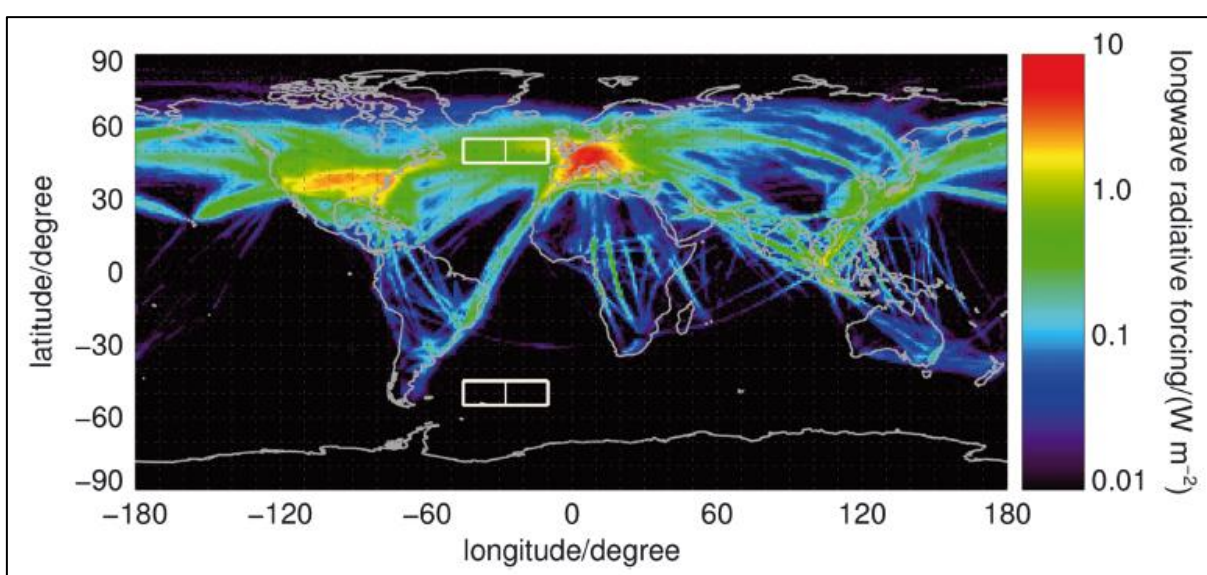


Obrázek 6. Radiální působení a optická tloušťka indukované cirrovité oblačnosti v roce 2002 [30]

Obrázek č. 7 ukazuje rozložení dlouhovlnného RF podle Schumanna a Grafa (simulace stejným modelem jako pokrytí kondenzačními stopami z obrázku č. 5). Lokálně může být podle zprávy u některých kondenzačních stop dosaženo až RF 50 Wm^{-2} . Regionálně však takto vysoké hodnoty dosaženo není. Ve střední Evropě je dlouhovlnné RF 3 Wm^{-2} , v USA 1 Wm^{-2} . Průměrné celosvětové hodnoty RF dle typu záření udává model takto:

- 126 mWm^{-2} pro dlouhovlnné záření,
- $-76,8 \text{ mWm}^{-2}$ pro krátkovlnné záření.

Celkové RF vychází $49,2 \text{ mWm}^{-2}$, správná hodnota leží pravděpodobně v intervalu mezi 40 mWm^{-2} a 80 mWm^{-2} [31].

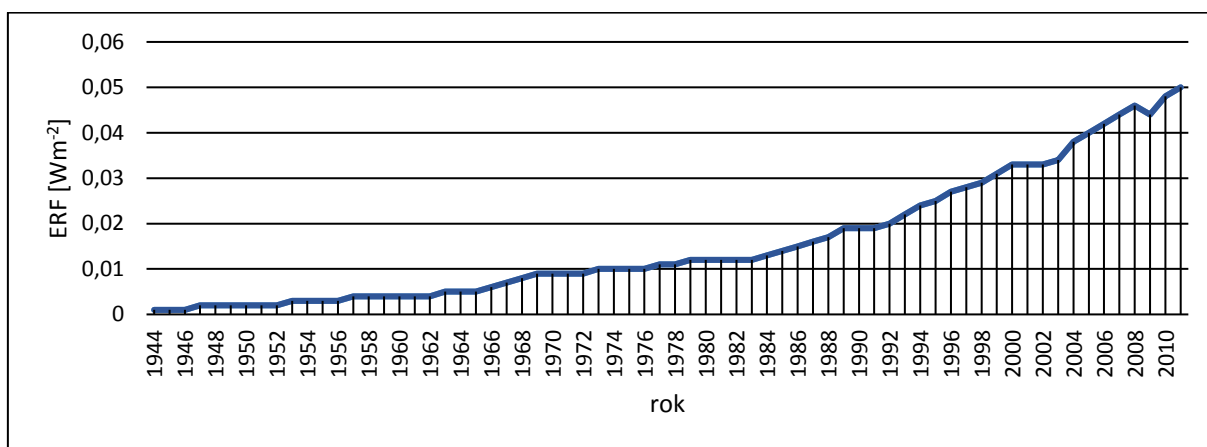


Obrázek 7. Dlouhovlnné RF indukované cirrovité oblačnosti v roce 2006 [31]

Zpráva IPCC z roku 2013 odhaduje radiační působení kondenzačních stop vztažené k roku 2011 na $0,01 \text{ Wm}^{-2}$ (90% interval spolehlivosti: $0,005 \text{ Wm}^{-2}$ až $0,03 \text{ Wm}^{-2}$). ERF kondenzačních stop spolu s indukovanou cirrovitou oblačností je $0,05 \text{ Wm}^{-2}$ (90% interval spolehlivosti: $0,02 \text{ Wm}^{-2}$ až $0,15 \text{ Wm}^{-2}$). Působení může být regionálně mnohem vyšší, avšak zdá se, že při současném pokrytí nezpůsobuje pozorovatelné změny v rozsahu teplot na zemském povrchu. IPCC ve svém odhadu vychází ze studií, které vypracovali Burkhardt a Kärcher v roce 2011, a Schumann a Graf v roce 2013 (viz výše), přičemž jsou v úvahu brány nejistoty týkající se optické tloušťky, tvaru ledových částic, radiačního přenosu, míry rozšiřování stop a pokračujícího růstu objemu letecké dopravy. Vzhledem k uvedeným nejistotám udává IPCC odhad RF kondenzačních stop jako středně jistý, odhad ERF indukované cirrovité oblačnosti jako nejistý [20].

3.9 Shrnutí radiačního efektu kondenzačních stop

Podle dosavadních výsledků z roku 2013 vypracovalo IPCC přibližný vývoj efektu kondenzačních stop na radiační bilanci za celou dobu existence letectví. Na následujícím grafu č. 6 je zaznamenán průběh ERF kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti v jednotlivých letech. Před rokem 1944 jsou hodnoty ERF nulové. Křivka začíná v roce 1944 na hodnotě $0,001 \text{ Wm}^{-2}$ a postupně narůstá vlivem nasazení proudového pohonu do leteckého provozu a celkového vzrůstu objemu letecké dopravy. Posledním bodem je rok 2011 s ERF $0,05 \text{ Wm}^{-2}$. Všechny hodnoty, které znázorňuje tento graf, jsou uvedeny v tabulce v příloze 3.3 [20].



Graf 6. Vývoj ERF kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti v rozmezí let 1944 a 2011 [20]

Radiační působení kondenzačních stop v porovnání s ostatními faktory danými antropogenními činnostmi dle odhadů IPCC vztaženými k období od roku 1750 (preindustriální doba) do roku 2011 je vidět v příloze 3.4. Pátou položkou odshora je vliv kondenzačních stop (contrails) a indukované cirrovité oblačnosti (contrail induced cirrus). Největší vliv na radiační bilanci mají skleníkové plyny, zejména oxid uhličitý (první položka). U jednotlivých sloupců jsou vyznačeny úsečky (plné pro RF, čárkové pro ERF) ohraničující 90% interval spolehlivosti [20].

S postupem času jsou sice výpočty a simulace tvoření a efektu kondenzačních stop zpřesňovány, přesto však tato oblast není dostatečně prozkoumána a současná úroveň porozumění tomuto jevu je stále malá. Prvním problémem je určení samotného výskytu, resp. pokrytí oblohy. Satelitní pozorování umožňují zaznamenání pouze krátkodobých kondenzačních stop a persistentních stop, které si zachovávají tvar přímých čar. Díky jejich tvaru je lze odlišit od ostatní oblačnosti. Indukovaná cirrovitá oblačnost je v podstatě nerozlišitelná od oblačnosti přírodní. Druhým problémem je stanovení radiačního dopadu

kondenzačních stop, a hlavně indukované cirrovité oblačnosti. Při výpočtu radiačního působení je třeba brát v úvahu mnoho faktorů, mezi které patří:

- doba životnosti kondenzačních stop,
- koncentrace ledových krystalů,
- velikost ledových krystalů,
- tvar krystalů,
- optická tloušťka,
- doba během dne,
- roční období,
- zeměpisná šířka a výška,
- hustota leteckého provozu,
- výskyt přírodní oblačnosti,
- kontrast mezi vytvořenou oblačností a povrchem Země,
- úhel Slunce nad horizontem.

Vzhledem k tomu, že je třeba určit velké množství parametrů, které jsou závislé na aktuálních podmínkách, není lehké stanovit výsledné radiační působení. Třetím problémem je stanovení vlivu radiačního působení na teplotu. Závislost změny teploty na zemském povrchu na radiačním působení by měla být přibližně lineární, ale koeficient v této závislosti není přesně dán. Není ani jasně stanoveno, jestli je vliv kondenzačních stop větší nebo menší oproti oxidu uhličitému. Podle výsledků dosavadních provedených studií se zdá, že RF kondenzačních stop nezpůsobuje pozorovatelné změny v rozsahu teplot na zemském povrchu. V tabulce č. 1 je přehled několika studií, které se zabývají kondenzačními stopami. U každé studie je uveden odhad RF a rok, ke kterému se odhad vztahuje. V první části jsou hodnoty pouze pro kondenzační stopy, v druhé části pro kondenzační stopy spolu s indukovanou cirrovitou oblačností. U některých studií je uveden ještě přepočtený RF pro rok 2011, který vypracovalo IPCC. V tabulce jsou střední hodnoty RF, příp. ještě 90% interval spolehlivosti.

Tabulka 1. Přehled studií radiačního efektu kondenzačních stop [20, 27, 28, 29, 30, 31, 34]

Studie	Vztažný rok	RF [Wm^{-2}] (vztažný rok)	RF [Wm^{-2}] (přepočet pro rok 2011)
Kondenzační stopy			
Burkhardt, Kärcher (2011)	2002	0,0043	0,07
Forster et al. (2007)	2000 (2005)	0,01 (-0,007; 0,02)	0,015 (-0,01; 0,03)
Frömming et al. (2011)	2000	0,0059 (0,0049; 0,0211)	0,009 (0,007; 0,032)
IPCC (1999)	1992	0,02	-
IPCC AR4 (2007)	2002	0,01 (0,003; 0,03)	-
IPCC AR5 (2013)	2011	0,01 (0,005; 0,03)	-
IPCC TAR (2001)	1998	0,02 (0,006; 0,07)	-
Kärcher et al. (2010)	2000	(0,008; 0,02)	(0,012; 0,03)
Lee et al. (2009)	2005	0,0118	-
Markowicz, Witek (2011)	2002	0,011 (0,006; 0,016)	0,017 (0,01; 0,024)
Rädel, Shine (2008)	2002	0,006	0,009
Rap et al. (2010) – offline	2002	0,012	0,018
Rap et al. (2010) – online	2002	0,008 (0,004; 0,012)	0,012 (0,006; 0,018)
Sausen et al. (2005)	2000	0,01 (0,006; 0,015)	-
Spengenberg et al. (2013)	2006	0,0057 (0,0028; 0,0171)	0,007 (0,003; 0,021)
Voigt et al. (2011)	2005	0,0159 (0,0111; 0,0477)	0,02 (0,014; 0,06)
Yi et al. (2012)	2006	0,0113 (0,0098; 0,0165)	0,014 (0,012; 0,02)
Indukovaná cirrovitá oblačnost a kondenzační stopy			
Burkhardt, Kärcher (2011)	2002	0,0375 ± 0,005	0,045
IPCC AR5 (2013)	2011	0,05 (0,02; 0,15)	-
IPCC TAR (2001)	1998	0 až 0,04	-
Lee et al. (2009)	2005	0,033	-
Sausen et al. (2005)	2000	0,03 (0,01; 0,08)	-
Schumann, Graf (2013)	2006	0,0492 (0,04; 0,08)	0,06 (0,04; 0,119)
Stordal et al. (2005) / Sausen et al. (2005)	2000	0,03 (0,01; 0,08)	0,045 (0,015; 0,12)

4 Budoucí vývoj

4.1 Letecká doprava

Všechny prognózy týkající se letecké dopravy předpovídají v dalších letech její růst. Poptávka cestujících po letecké dopravě by měla být stále vyšší a tím pádem se očekává rostoucí tendence počtu letů. IATA odhaduje, že v roce 2035 bude letecky přepraveno celkem 7,2 miliardy cestujících, což představuje téměř dvojnásobek oproti roku 2016, ve kterém bylo přepraveno 3,8 miliardy cestujících [39].

Největší růst se předpokládá na Blízkém východě a v oblasti Asie a Pacifiku. I v ostatních částech světa se počítá se zvýšením počtu cestujících. V Evropě se očekává průměrný nárůst počtu cestujících o 2,5 % ročně, v Severní Americe o 2,8 %, na Blízkém východě o 4,8 %, v Asii a Pacifiku o 4,7 %. Větší počty cestujících předznamenávají více letů. Podle nejnovější předpovědi Eurocontrolu by se měl počet IFR letů v Evropě v období 2017 až 2023 meziročně zvyšovat v průměru o 1,9 %. V roce 2023 by mělo být v evropském vzdušném prostoru uskutečněno 11,6 milionu letů, tj. o 14 % více než tomu bylo v roce 2016. Již v současné době se v Evropě, ale i v jiných oblastech, odhaduje velké pozitivní radiační působení vlivem kondenzačních stop, a další navýšení objemu letecké dopravy, které vyplývá z uvedené prognózy, tak může způsobit ještě větší radiační dopad [39, 40].

4.2 Pohonné hmoty a pokrytí kondenzačními stopami

V současné době není redukování vzniku kondenzačních stop legislativně řešeno. V popředí zájmu je hlavně omezení objemu produkce oxidu uhličitého. Nyní je letecká doprava zodpovědná za produkci 2 % z celkového množství oxidu uhličitého, které vzniká díky antropogenním činnostem. Vezmeme-li v úvahu pouze segment dopravy, pak na leteckou dopravu připadá 12% díl emise oxidu uhličitého. Snahou je vyvíjet stále úspornější pohonné jednotky pracující s vyšší účinností. 70 % ze všech proudových letadel používaných dnes je z hlediska spotřeby paliva počítané na sedačkové kilometry o 80 % úspornější než první proudová letadla v šedesátých letech. V roce 2010 přijalo ICAO cíl týkající se spotřeby paliva v letectví. Do roku 2050 by mělo každoročně dojít ke snížení spotřeby paliva o 2 %, čímž by bylo dosaženo, že emise oxidu uhličitého zůstanou na stejné úrovni jako v roce 2020 [41, 42].

Budoucí větší hustota leteckého provozu koresponduje s předpokládaným větším pokrytím kondenzačními stopami. Nárůst ve vývoji pokrytí kondenzačními stopami však neodpovídá odhadovanému zvýšení spotřeby paliva v letectví. Předpoklad je vyšší tempo růstu výskytu kondenzačních stop oproti spotřebě paliva. Tento nesoulad je dán dvěma předpoklady:

- 1) Objem letecké dopravy vzroste hlavně v oblasti horní troposféry. Právě zde jsou velmi vhodné podmínky pro tvoření kondenzačních stop, a proto se všechny stopy tvoří převážně v těchto místech.
- 2) Budoucí letouny a jejich pohonné jednotky přinesou větší úsporu paliva. Vyšší celková účinnost pohonných jednotek zapříčiní větší sklon křivky mísení, viz vztah 2.5. Výsledkem bude, že se kondenzační stopy budou tvořit za vyšších teplot [19, 24].

Cesta, kterou by se letectví mohlo v následujících letech ubírat, je využití biopaliv. V letectví připadají v úvahu tzv. drop-in fuels, jejichž výhodou je, že nevyžadují žádné technické úpravy. Taková paliva je možné dopravovat tou samou infrastrukturou, která se používá v dnešní době, a je možné je využívat v současných motorech buď jako směs s konvenčním palivem nebo samostatně. Zdrojem pro jejich výrobu mohou být obnovitelné zdroje, jako jsou rostliny, řasy, živočišný tuk. Vliv biopaliv na vznik kondenzačních stop se předpokládá pouze minimální, neboť vlastnosti takových paliv jsou podobné vlastnostem kerosinu. Odhaduje se, že při použití čistého alternativního paliva, by se kondenzační stopy tvořily při trochu vyšší teplotě než při použití kerosinu (asi o 0,75 °C), tzn. ve výškách o 100 až 150 m níže. Použila-li by se směs paliv, rozdíly by byly menší. Při použití alternativního paliva lze očekávat změny ve vlastnostech kondenzačních stop. Vzhledem k tomu, že by palivo neobsahovalo aromatické uhlovodíky a síru, ze kterých vznikají aerosoly sloužící jako kondenzační jádra, koncentrace ledových částic v kondenzačních stopách by byly menší. Kondenzační stopy by tak byly tvořeny menším množstvím ledových krystalů o větší velikosti. Sice by se tvořily ve výškách o něco nižších než v případě kerosinu, na druhou stranu by měly menší optickou tloušťku, která má příznivý efekt na radiační působení. Celkově se předpokládá menší dopad na radiační bilanci právě díky menší optické tloušťce a kratší životnosti kondenzačních stop [12, 43].

4.3 Radiační působení kondenzačních stop

Odhady radiačního působení vlivem kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti ukazují v příštích dekádách velký nárůst. Přestože by měla letecká doprava v roce 2050 co do uletěné vzdálenosti vzrůst oproti roku 2006 čtyřikrát, radiační působení by se mohlo zvýšit až sedmkrát. Vztah mezi emisemi (čím větší vzdálenost, tím více emisí) a radiačním působením není lineární, protože navýšení letů nebude ve všech oblastech světa rovnoměrné a efekt kondenzačních stop se různí v závislosti na místě, kde vznikají [44].

Následující odhady vycházejí ze studie Chena a Gettelmana z roku 2016. Pro simulaci byl využit model CAM5 (Community Atmosphere Model version 5). Studie se zabývá celkem čtyřmi možnými scénáři. První vychází z předpokládané populace a ekonomického růstu do roku 2050, přičemž letectví využívá současné technologie a spotřeba paliva v roce 2050

činí $1,1 \cdot 10^{12}$ kg. Druhý počítá se snížením spotřeby paliva odpovídající zvýšení účinnosti o 2 % ročně. Třetí bere v úvahu stejnou spotřebu jako scénář I, ale vlivem alternativních paliv jsou o polovinu menší emise sazí a žádné emise síranů. Čtvrtý je stejný jako předchozí, a navíc zahrnuje zvýšení emise vodní páry o 5 %. Všechny scénáře jsou vztaženy ke dvěma referenčním celkovým RF v roce 2100, a to $4,5 \text{ Wm}^{-2}$ a $8,5 \text{ Wm}^{-2}$. Scénáře vycházejí ze čtyřnásobného navýšení letecké dopravy do roku 2050. Podle scénáře I vzroste spotřeba paliva oproti roku 2006 5krát, podle scénáře II 2,7krát. Největší nárůst se díky ekonomickému růstu odhaduje ve východní Asii, kde by měla být do roku 2050 uletěná vzdálenost 6krát větší. V Evropě bude nárůst podobný tomu světovému, ve východní části USA menší (pouze 2,5krát větší) [44].

Celkové RF kondenzačních stop se bude v roce 2050 pohybovat mezi 75 mWm^{-2} a 87 mWm^{-2} . Tyto hodnoty jsou podle této simulace 6 až 7krát vyšší v porovnání s rokem 2006. Všechny hodnoty RF dle jednotlivých scénářů jsou uvedeny v tabulce č. 2. Je vidět, že při vyšším referenčním RF, jinými slovy při teplejší atmosféře, je RF kondenzačních stop menší. Z porovnání jednotlivých scénářů vyplývá, že největší RF je očekáváno při scénáři I. O něco menší je při scénáři IV a nejmenší při scénáři II a III. Stejně jako v současné době i v roce 2050 by mělo být největší RF ve střední Evropě a východní části Severní Ameriky. Lokálně může ve střední Evropě RF dosáhnout hodnoty až 2 Wm^{-2} , což je 2 až 3krát více než v roce 2006. Na východě USA se očekává RF až 800 mWm^{-2} . Největší nárůst je však v oblasti východní Asie, kde se očekává v roce 2050 největší zvýšení spotřeby paliva. RF by zde mohlo být o 600 % vyšší. Pokud se vezme v úvahu i dopad aerosolů, bude pozitivní RF kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti o něco menší. Negativní RF vlivem letectví bude hlavně nad oceány. Nad výše uvedenými třemi oblastmi s největší hustotou leteckého provozu by aerosoly mohly snížit RF kondenzačních stop asi o polovinu [44].

Tabulka 2. RF kondenzačních stop v roce 2050 [44]

Scénář	Referenční RF [Wm^{-2}]	RF kondenzačních stop [mWm^{-2}]			
		globální	S. Amerika	střední Evropa	východní Asie
I	4,5	87	798	1 682	272
II		76	724	1 568	231
III		76	724	1 568	231
IV		80	681	1 952	213
I	8,5	83	852	1 558	248
II		73	777	1 442	211
III		73	777	1 442	211
IV		75	865	1 597	221

5 Omezení vzniku kondenzačních stop

Možnosti, kterými by bylo možné omezit vznik kondenzačních stop, jsou v zásadě tři. První možností je úprava pohonné jednotky takovým způsobem, aby se dočasně snížila její účinnost. Druhou možností je úprava paliva. Buď přidáním aditiv do současně používaného paliva – kerosinu, která by zamezila kondenzaci vodní páry na aerosolech, nebo zcela novým palivem. V úvahu přicházejí kryogenní paliva, jako je metan a vodík. Třetí možností jsou změny operačního charakteru. Do této skupiny patří omezení nočních letů, omezení maximální výšky letu a změna trajektorie letu. Každá ze zmíněných možností přináší i dodatečné negativní dopady a je ke zvážení, zda u konkrétního řešení převažují benefity vyplývající ze zamezení vzniku perzistentních kondenzačních stop.

5.1 Úprava pohonné jednotky

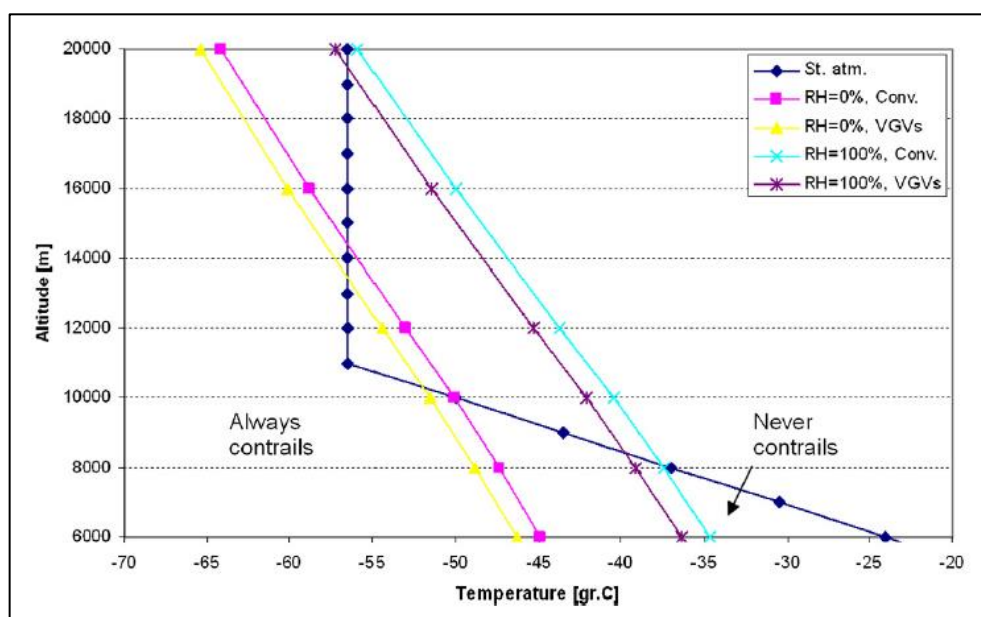
Pohonná jednotka ovlivňuje vznik kondenzačních stop celkovou účinností. Čím vyšší je celková účinnost, tím větší je parametr G neboli sklon křivky mísení (vztah 2.5), a tím je vytvoření kondenzační stopy pravděpodobnější. Větší sklon křivky mísení znamená posun křivky do oblasti nad křivkou kondenzace (viz graf č. 2). Celková účinnost roste s klesající teplotou výfukových plynů. Motory pracující s vyšší účinností způsobí, že během mísení výfukových plynů s okolním vzduchem bude dosaženo při stejné okolní teplotě vyšší relativní vlhkosti. Vyšší účinnost tedy přináší tvoření kondenzačních stop za vyšší okolní teploty, resp. umožňuje jejich vznik i v nižších letových hladinách. Možným řešením, jak zabránit vzniku kondenzačních stop, je dočasné snížení účinnosti pohonné jednotky její vhodnou úpravou [15, 45].

Následující úvaha a technické řešení se týká obecného dvouproudového dvouhřídelového motoru se separovanými proudy a vysokým obtokovým poměrem. Předpokládají se následující parametry: obtokový poměr 8, celková účinnost 0,336, teplota na vstupu do turbíny (TIT) 1 570 K. Pro vyšší teplotu TIT než je maximální přípustná, je nutné chlazení horkých kovových částí. To je možné zajistit odebráním části stlačeného vzduchu, který bude veden skrz chladicí kanálky v lopatkách. Pro tento účel se počítá s odběrem 17 % stlačeného vzduchu z generátoru, přičemž 9 % je určeno k chlazení statorových lopatek vysokotlaké turbíny, 6 % k chlazení rotorových lopatek vysokotlaké turbíny a zbývající 2 % k chlazení nízkotlaké turbíny. Za těchto podmínek je ve výšce 10 km tah motorů 45,4 kN, specifická

spotřeba paliva¹⁶ $16,2 \text{ gkN}^{-1}\text{s}^{-1}$ a celková účinnost 0,344. Při horizontálním letu v cestovní hladině je teplota na vstupu do turbíny 1 335 K, což odpovídá 85 % maximální hodnoty [45].

Princip technického opatření, které by zamezilo vzniku kondenzačních stop, je následující. Pokud by se letadlo pohybovalo v oblasti, kde by hrozilo vytvoření perzistentních kondenzačních stop, motory by se přepnuly do neefektivního módu. Dočasně by se zvýšila teplota výstupních plynů, čímž by klesla celková účinnost. Vzniklou ztrátu v tahu by bylo nutné kompenzovat zvýšením výkonu. Předpokládaná nejvyšší teplota na vstupu do turbíny při použití chlazení je z materiálových důvodů 1 700 K. Řešením, jak zvýšit teplotu výstupních plynů, by mohlo být vybavení ventilátoru variabilními vodícími lopatkami [45].

Použitím tohoto řešení by bylo možné snížit celkovou účinnost o 10 % až 11 %. Snížení účinnosti by samozřejmě znamenalo vyšší spotřebu paliva. Ve výšce 6 km by SFC vzrostlo o 48 %, ve výšce 20 km o 42 %. Na grafu č. 7 je vidět, jak by se změnila prahová teplota v závislosti na výšce při relativní vlhkosti 0 % a 100 %, pokud by byl motor vybaven variabilními vodícími lopatkami (žlutá a fialová křivka). Pro srovnání jsou pro obě krajní hodnoty relativní vlhkosti znázorněny křivky i pro standardní motor (růžová a tyrkysová křivka). Modrá křivka udává závislost výšky na teplotě dle mezinárodní standardní atmosféry [45].



Graf 7. Závislost prahové teploty na výšce a relativní vlhkosti vzduchu pro standardní motor a motor vybavený variabilními vodícími lopatkami [45]

¹⁶ Specifická spotřeba paliva se vypočítá jako podíl hmotnostního průtoku paliva a tahu. Udává hmotnost paliva spotřebovanou na jednotku tahu a času [15].

Při použití variabilních vodících lopatek lze při nulové relativní vlhkosti dosáhnout snížení prahové teploty pro vznik kondenzačních stop o 1,3 K až 1,5 K. Čím menší je výška letu, tím menší je redukce prahové teploty. Při 100% relativní vlhkosti vzduchu je možné snížení o 1,4 K až 1,6 K. Snížení prahové teploty znamená, že by se kondenzační stopy začaly tvořit až při nižších teplotách, resp. ve vyšších výškách. Při relativní vlhkosti vzduchu 0 % uvedená redukce teploty odpovídá výšce 290 m (ve stratosféře dokonce 960 m), při relativní vlhkosti 100 % pak výšce 340 m [45].

Samotné nasazení variabilních vodících lopatek by nezabránilo vzniku všech kondenzačních stop. V troposféře, kde se odehrává většina letů, by bylo možné dosáhnout snížení teploty zhruba o 1,5 K, což odpovídá posunu výškové hranice pro vznik kondenzačních stop asi o 300 m. Jako lepší řešení se jeví kombinace dočasného snížení celkové účinnosti a změny trasy letu tak, aby bylo zajištěno vyhnutí se přesycené oblasti a dosažení co nejmenšího časového intervalu, během kterého by motory spalovaly více paliva a produkovaly tak více emisí. Je však třeba ještě řádně propočítat dopad na klima. Zamezení vzniku perzistentních kondenzačních stop by přineslo snížení RF, na druhou stranu by bylo navýšeno RF díky vyšším emisím [45].

5.2 Palivová aditiva

Jednou z možností, jak předcházet vzniku kondenzačních stop, jsou palivová aditiva. Ta by mohla ovlivnit termodynamické podmínky vzniku kondenzačních stop tak, aby vznik stop byl méně pravděpodobný než při použití standardního kerosinu. Proces tvoření kondenzační stopy je dán sklonem křivky mísení G (vztah 2.5). Z pohledu letadla závisí na celkové účinnosti a vlastnostech paliva – indexu emise vodní páry a spalném teple. Problémem je, že aditiva změny vlastnosti paliva jen nepatrně a výše uvedené parametry tedy výrazně neovlivní. Proto musí aditiva ovlivnit vznik kondenzačních stop jinou cestou nezávisle na G . Myšlenka je taková, že by aditiva oddálila kondenzaci vodní páry na sazích, které slouží jako kondenzační jádra. Aditiva by vytvořila jakýsi povlak na sazích a pro kondenzaci vodní páry by pak bylo zapotřebí většího parciálního tlaku vodní páry vzhledem k vodě, jinými slovy většího přesycení [46].

Nejvyšší teplotou, při které se vytvoří kondenzační stopa během mísení výfukových plynů s okolním vzduchem, je teplota T_F . Tato teplota odpovídá stavu, kdy se křivka mísení dotkne křivky nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě (bod F na grafu č. 1). Derivace funkce parciálního tlaku nasycené vodní páry vzhledem k vodě v tomto bodě podle teploty odpovídá parametru G (vztah 5.1).

$$\frac{de_w(T)}{dT} = G \quad (5.1)$$

Vlivem aditiv se tato derivace změní následujícím způsobem

$$\frac{d[xe_w(T)]}{dT} = G, \quad (5.2)$$

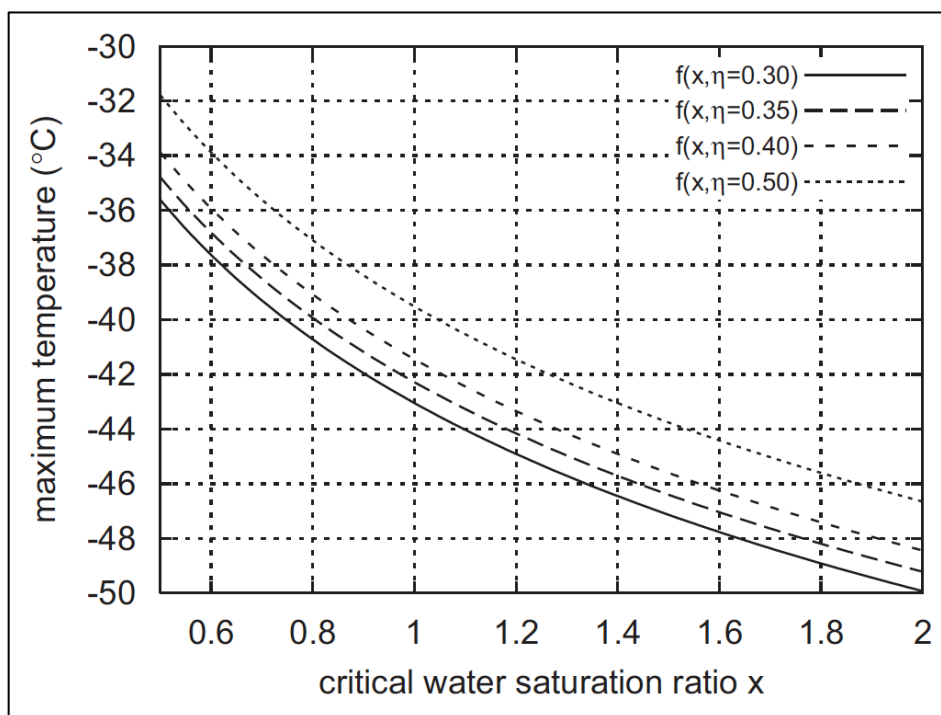
kde x je poměr, který udává, o kolik větší přesycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě je zapotřebí k vytvoření kondenzační stopy za přítomnosti aditiv oproti palivu bez aditiv. Vztah 5.2 lze upravit do tvaru

$$\frac{de_w(T)}{dT} = \frac{G}{x}. \quad (5.3)$$

Pro stanovení teploty T_F při použití palivových aditiv je možné využít původní vztah 2.2 s malou změnou. Místo parametru G je třeba počítat s poměrem G/x . Výsledný vztah pro výpočet teploty v bodě F bude mít podobu

$$T_F = -44,46 + 9,43 \cdot \ln\left(\frac{G}{x} - 0,053\right) + 0,72 \cdot \left[\ln\left(\frac{G}{x} - 0,053\right)\right]^2. \quad (5.4)$$

Na grafu č. 8 je vidět, jak se mění hodnota teploty T_F v závislosti na kritickém poměru nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě x pro okolní tlak vzduchu 220 hPa (zhruba 10,2 km). Teplota je na grafu znázorněna pro hodnoty poměru x v rozmezí od 0,5 do 2. Hodnota 0,5 přibližně odpovídá nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k ledu. Hodnota 2 znamená, že pro vytvoření kondenzační stopy by bylo zapotřebí dvakrát vyššího nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě. Teplota pro $x = 1$ odpovídá současnému používání kerosinu bez aditiv. Na grafu jsou celkem čtyři křivky pro celkovou účinnost od 0,3 do 0,5. V dnešní době neexistuje letadlo, jehož pohonné jednotky by pracovaly s celkovou účinností 50 %. Křivky pro vyšší hodnoty účinnosti představují pouze hypotetický budoucí stav. Při zvýšení celkové účinnosti z 0,3 na 0,5 se teplota T_F zvýší asi o 4 K. Pro hodnoty $x > 1$ platí, že čím vyšší je poměr x , tím nižší je nejvyšší teplota umožňující vytvoření kondenzační stopy. Za předpokladu, že by bylo použito aditivum, pro které by hodnota x byla rovna 2, maximální teplota pro vznik kondenzační stopy by klesla přibližně o 7 K. Takový pokles by znamenal tvoření kondenzačních stop v hladinách o 900 m výše [46].



Graf 8. Závislost teploty T_F na kritickém poměru nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě pro různé celkové účinnosti [46]

V minulosti byla provedena měření, která zkoumala vliv množství síry v kerosinu na tvoření kondenzačních stop. V roce 1995 provedl Busen a Schumann test, který spočíval v pozorování tvoření kondenzačních stop za letadlem při použití paliva Jet A-1 s různým obsahem síry. Pro tento účel bylo využito letadlo VFW-Fokker 614 s dvěma dvouproudovými motory, přičemž levá a pravá nádrž v křídlech nebyla propojena. Z každé nádrže tak bylo dodáváno palivo pouze do jednoho motoru. V jedné nádrži bylo palivo s obsahem síry 2 ppm, v druhé 250 ppm. Ostatní vlastnosti paliva byly přibližně stejné. Výsledkem nebyly žádné pozorovatelné rozdíly mezi kondenzační stopou za levým a pravým motorem [47].

O rok později byl proveden podobný pokus Schumannem et al. s palivem o obsahu síry 170 ppm a 5 500 ppm. Zde již byly zaznamenány menší rozdíly. Při použití paliva s vyšším obsahem síry se kondenzační stopa začala tvořit ve vzdálenosti 10 m za motorem, ale palivo s menším obsahem síry způsobilo tvoření stopy ve vzdálenosti 15 m za motorem. Při pozorování během různých výšek se ukázalo, že pokud jsou výfukové plyny bohatší na síru, kondenzační stopy se tvoří při teplotě o 0,2 K až 0,4 K vyšší. To odpovídá změně parametru x o 0,02 až 0,04. Z toho je patrné, že velké změny v obsahu síry v palivu vedou pouze k malé změně parametru x [46, 48].

V současné době není k dispozici vhodné aditivum, které by zabránilo vzniku kondenzačních stop a je otázkou, zda je toto řešení vůbec možné. Pro kompenzaci předpokládaného navýšení

účinnosti na 0,5 v roce 2050 by bylo zapotřebí dosáhnout parametru x o hodnotě alespoň 1,4. Dosažení tak vysoké hodnoty je podmíněno tím, aby látka byla velmi hydrofobní. Pravděpodobnější je, že by aditiva pouze částečně pokryla částičky sazí, poměr x by zůstal roven jedné, avšak příznivým výsledkem by mohlo být vytvoření méně krystalů větší velikosti, což by mělo za následek menší optickou tloušťku kondenzační stopy [46].

5.3 Alternativní paliva

Některé studie se zabývají možností využití alternativních paliv. Zvažují se kryogenní paliva, která se skladují při velmi nízkých teplotách, aby bylo zachováno jejich kapalné skupenství. Jako alternativní palivo místo kerosinu přichází v úvahu např. metan či tekutý vodík. Produkty dokonalého spalování metanu jsou oxid uhličitý a vodní pára (rovnice 5.5).



Při spalování vodíku vzniká pouze jedna sloučenina, a to vodní pára (rovnice 5.6).



Použitím metanu místo kerosinu by emise oxidu uhličitého klesly o 25 %, ale navýšilo by se množství produkované vodní páry o 60 %. Jako vhodnější se jeví vodík. Vodík jako palivo pro letectví má tu výhodu, že při jeho spalování se netvoří žádný oxid uhličitý, oxid uhelnatý, saze, oxid siřičitý, nespálené uhlovodíky. Také se předpokládá pokles emitování oxidů dusíku [49, 50].

V tabulce č. 3 jsou pro porovnání uvedeny hustoty a výhřevnosti kerosinu, metanu a vodíku. Výhřevnost vodíku vztažená na jednotku hmotnosti je téměř třikrát vyšší než výhřevnost kerosinu. Množství energie, které by bylo uloženo v určité hmotnosti kerosinu, se v případě vodíku bude pohybovat na zhruba třetinové hodnotě. Úspora v hmotnosti paliva přináší možnost navýšení platicího zatížení, nebo naopak možnost načerpání více paliva a zvýšit tak dolet. Na druhou stranu skladování a vedení vodíku palivovou soustavou představuje problémy. Aby byl vodík kapalný, je nutné ho chladit na teplotu $-253\text{ }^\circ\text{C}$. Objem vodíku je čtyřikrát větší oproti kerosinu a tvar nádrží musí být kulový či válcový [51].

Tabulka 3. Vlastnosti kerosinu a alternativních paliv [50]

Palivo	Hustota [kgm ⁻³]	Výhřevnost	
		[MJkg ⁻¹]	[GJm ⁻³]
kerosin	783	43,2	33,8
metan (tekutý)	421	50,0	21,0
vodík (tekutý)	70	119,7	8,4

V porovnání s kerosinem způsobuje vodík častější vznik kondenzačních stop. S obsahem vodíku v palivu stoupá prahová teplota pro vznik kondenzačních stop. Spálením vodíku vznikne asi dvaapůlkrát více vodní páry než při spálení kerosinu o stejném energetickém obsahu. Odhaduje se, že pokud by byla všechna letadla poháněna na vodík místo kerosinu, pokrytí kondenzačními stopami by vzrostlo přibližně o 30 %. Dopad na klima by se ale nejspíše příliš nelišil. Ve výfukových plynech by se nacházelo o mnoho méně aerosolů sloužících jako kondenzační jádra a předpokládá se tak, že by vzniklo o jeden až dva řády méně krystalů než v případě standardního paliva. Krystaly by měly čtyřikrát až šestkrát větší velikost. Menší počet větších krystalů by měl za následek menší optickou tloušťku kondenzační stopy [9, 52, 53].

Podle ICAO byla v roce 2014 celosvětová spotřeba paliva v leteckém odvětví 1 753 797 731 kg. Vzhledem k tomu, že index emise vodní páry kerosinu je 1,237 kg/kg, uvedená spotřeba odpovídá produkci vodní páry o hmotnosti $2\,169 \cdot 10^6$ kg. Kdyby všechny motory místo kerosinu spalovaly se stejnou účinností vodík, ekvivalentní množství ke spotřebovanému kerosinu v roce 2014 by vzhledem k vyšší výhřevnosti vodíku bylo $633 \cdot 10^6$ kg. Z jednoho kilogramu vodíku vznikne hořením asi 8,92 kg vodní páry. Roční spotřeba vodíku by tedy zapříčinila produkci $5\,646 \cdot 10^6$ kg vodní páry. Příznivým efektem by bylo snížení produkce oxidu uhličitého, jelikož každým spáleným kilogramem kerosinu vzniká 3,157 kg oxidu uhličitého. Došlo by tak k velkému celosvětovému snížení objemu oxidu uhličitého, a tím pádem i ke snížení pozitivního radiačního působení [54].

5.4 Operační změny

5.4.1 Doba během dne

Kondenzační stopy tvořící se během noci mají zásadní vliv na radiační bilanci systému Země-atmosféra. Průměrné RF kondenzačních stop v noci je zhruba třikrát vyšší oproti RF během dne, přestože je během noci uskutečňováno méně letů. Zmírnění radiačního dopadu by bylo možné omezením nočních letů. Myšlenka posunutí letů z noční doby do denní není příliš realizovatelná. Jednak není v místech s hustým leteckým provozem dostatečná kapacita vzdušného prostoru, a za další by bylo pro letecké dopravce velmi neekonomické, kdyby během noci jejich letadla stála na zemi.

5.4.2 Omezení výšky letu

Jednoduchým řešením, jak předcházet vzniku kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti, aniž by bylo nutné jakkoli upravovat letadlo po technické stránce či měnit pohonné hmoty, je omezení výšek letů. V nižších hladinách by nedocházelo k tak častému tvoření kondenzačních stop, neboť je k tomu zapotřebí většího množství vodní páry. K dosažení

velkého snížení pokrytí kondenzačními stopami by však byla potřeba značná redukce výšek. Pro snížení pokrytí o 45 % by muselo dojít k omezení výšky letu o 6 000 ft (1 830 m) [55].

Williams et al. se ve své studii zabývá omezením výšek pro letecký provoz nad západní Evropou v roce 2000. Jako nejvyšší povolenou hladinu uvádí tu, která je pod nejnižší výškou, ve které by pokrytí stop mohlo dosáhnout hodnoty 5 %. Nejvyšší povolená letová hladina by během roku byla:

- FL 240 v únoru,
- FL 250 v lednu, březnu, listopadu a prosinci,
- FL 260 v dubnu,
- FL 290 v květnu a říjnu,
- FL 310 v červnu, červenci, srpnu a září.

Větší omezení připadá na zimní měsíce, ve kterých je teplota vzduchu nižší, a tím pádem pravděpodobnost vzniku kondenzačních stop vyšší. Během února, kdy je dovolená výška nejmenší, by vzrostla spotřeba paliva o 7,2 %. Naopak v období od června do září, ve kterém je omezení nejmenší, by se spotřeba zvýšila jen o 1,6 %. Průměrná hodnota navýšení spotřeby paliva během celého roku vychází 3,9 %. Stejný nárůst by připadal i na produkci oxidu uhličitého [56].

Omezení výšek má však několik negativ. Vzrostla by spotřeba paliva, a tudíž by bylo produkováno více emisí, které zvyšují skleníkový efekt. Dále by se takové omezení v některých případech neobešlo bez navýšení doby letů, protože by se letadla pohybovala menší cestovní rychlostí. Také by vzrostla pracovní zátěž řídicích letového provozu z důvodu většího počtu letadel v nižších hladinách. A v neposlední řadě je třeba si uvědomit i ekonomický dopad. Jak vyšší spotřeba paliva, tak i delší lety představují pro letecké společnosti větší náklady.

5.4.3 4D trajektorie

Lepším řešením než redukování výšky letu bez ohledu na okolní podmínky by bylo její redukování pouze v určitých situacích. Ke změně výšky by se přistoupilo pouze v případech, kdy by byl vzduch přesycen vodní párou a očekávalo by se pozitivní RF během životního cyklu vytvořených kondenzačních stop. K vyvarování se vzniku poloviny kondenzačních stop by pak stačila změna výšky letu o 2 000 ft. Ještě menší změny by byly postačující, kdyby existovala přesná predikce polohy a rozsahu oblastí přesycených vodní párou vzhledem k ledu. Při znalosti nejbližší hladiny s malou vlhkostí by k polovičnímu snížení vzniku kondenzačních stop dostačovala změna výšky pouze o 1 000 ft [57].

Předcházení vzniku kondenzačních stop pomocí 4D trajektorie tedy spočívá v plánování trajektorie letadla dané zeměpisnou šířkou, zeměpisnou délkou a výškou v reálném čase. Pokud by se podél naplánované trajektorie vyskytovaly podmínky příhodné pro vznik perzistentních kondenzačních stop, letadlo by upravilo trajektorii změnou výšky, příp. i kurzu tak, aby se oblasti s takovými podmínkami vyhnulo. Zda stav atmosféry podél trati je či není vhodný pro perzistenci kondenzačních stop, by bylo možné určit na základě Schmidt-Applemanova kritéria a výpočtu prahové teploty. K tomu je však zapotřebí znalost aktuální teploty a relativní vlhkosti vzduchu v dané oblasti. Vzdálené měření možné není, a tak by tyto veličiny musely být měřeny přímo na letadle. Dalším krokem by bylo sdílení teploty a vlhkosti s ostatními letadly, aby se mohla vyvarovat vzniku kondenzačních stop změnou trajektorie.

Skutečnost, že vhodná trajektorie jako nástroj pro omezení dopadu letectví na podnebí je správnou cestou, dokazují i některé studie. Simulace pod vedením DLR se zabývala modelováním trajektorií transatlantických letů. Ukázalo se, že vhodným trasováním celkem osmi set letů mezi Evropou a Amerikou denně je možné docílit 10% snížení dopadu na klima. Kromě kondenzačních stop byly brány v úvahu i emise a jejich efekt. Uvedená redukce o jednu desetinu vychází jako nejlepší možnost při porovnání poměru dopadu na klima a zvýšení nákladů různých tratí. Náklady by se v tomto případě zvýšily pouze o 1 % [58, 59].

6 Vlastní pozorování a analýza dat

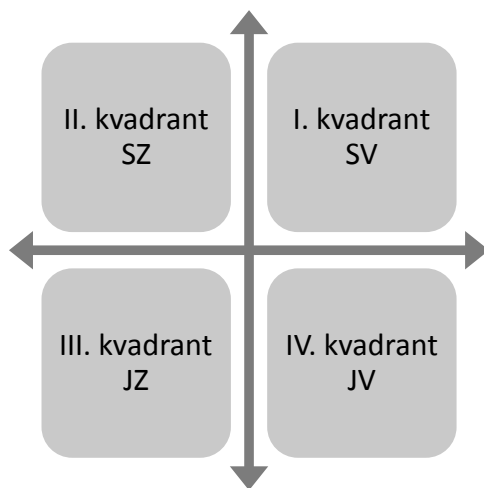
6.1 Popis měření a sběr dat

V dalších kapitolách jsou uvedeny výsledky pozorování kondenzačních stop. Pozorování je založeno na výskytu kondenzačních stop v okolí Děčína. Na Pracovišti Děčín Fakulty dopravní ČVUT jsou nainstalovány kamery snímající oblohu. Souřadnice umístění kamer jsou $50,77899^\circ$ severní šířky a $14,21602^\circ$ východní délky. Zpracovány byly záznamy ze dvou kamer, z nichž jedna je nastavena severním směrem a druhá západním směrem.

Postup při pozorování byl následující. Postupně byly procházeny kamerové záznamy z vybraných dnů, které byly pořízeny oběma kamerami vždy během denní doby. V nahrávkách byly hledány kondenzační stopy tvořící se za letadly, která v danou chvíli letěla oblastí snímanou kamerami. U každé nalezené stopy byl zaznamenán čas, ve kterém byla objevena, kamera, na které byla objevena a doba, po kterou stopa na obloze setrvala.

Informace o tom, kdy a kde se nacházela letadla ve sledované oblasti, byly získány ze zpráv ADS-B. Ze všech přijatých zpráv ADS-B přijímačem umístěným v Praze byla vyfiltrována pouze ta letadla, která se nacházela v okolí Děčína a mohla být tedy zaznamenána kamerami. Zprávy byly dekodovány v programu MATLAB a byly z nich získány údaje o zeměpisné šířce, zeměpisné délce a výšce letu. Výsledek si lze představit jako tabulku o čtyřech sloupcích, ve kterých je uveden čas, zeměpisná šířka, zeměpisná délka a výška letu. Porovnáním následujících řádků této tabulky lze zjistit, jak se měnila poloha letadla v závislosti na čase ve vymezeném prostoru v okolí kamer.

Dalším krokem bylo párování naměřených kondenzačních stop s konkrétními letadly, resp. se zprávami ADS-B. Čas objevení letadla na kamerovém záznamu by měl přibližně odpovídat časovému údaji v MATLABu v dekodované zprávě. V jednu chvíli se však může ve vytyčeném prostoru kolem kamer nacházet více letadel, a proto není samotný časový údaj k správnému spárování dostatečně spolehlivý. K přiřazení zprávy k objevenému letadlu se kromě času posuzovala i poloha letadla při vstupu do prostoru snímaného kamerami a jeho další trajektorie. Pro lepší názornost slouží obrázek č. 8. Místo protnutí horizontální a vertikální osy odpovídá místu, kde jsou umístěny kamery.



Obrázek 8. Schéma umístění kamer

Osy rozdělují okolí kamer do čtyř kvadrantů, které jsou definovány pomocí zeměpisných souřadnic takto:

- I. kvadrant
 - zeměpisná šířka $> 50,77899^\circ$ s. š.
 - zeměpisná délka $> 14,21602^\circ$ v. d.
- II. kvadrant
 - zeměpisná šířka $> 50,77899^\circ$ s. š.
 - zeměpisná délka $< 14,21602^\circ$ v. d.
- III. kvadrant
 - zeměpisná šířka $< 50,77899^\circ$ s. š.
 - zeměpisná délka $< 14,21602^\circ$ v. d.
- IV. kvadrant
 - zeměpisná šířka $< 50,77899^\circ$ s. š.
 - zeměpisná délka $> 14,21602^\circ$ v. d.

Podle prvních souřadnic v dekódované zprávě se určilo, ve kterém z kvadrantů se letadlo nacházelo při vstupu do sledované oblasti. Z následujících souřadnic pak bylo možné určit směr letadla. První kamera byla nastavena severním směrem a sledovala tedy část I. a II. kvadrantu. Druhá kamera byla nastavena západním směrem, což odpovídá II. a III. kvadrantu. Pokud se například ze zprávy zjistilo, že kurz letadla byl na jih a letadlo se pohybovalo z prvního do čtvrtého kvadrantu, mohlo být toto letadlo spatřeno na kameře nastavené severním směrem. Takto byly prozkoumány všechny zprávy, jejichž čas odpovídal času objevení letadla a podle polohy letadla byla vybrána odpovídající zpráva.

6.2 Analýza naměřených záznamů

Celkem byly zanalyzovány kamerové záznamy ze čtrnácti dnů, konkrétně se jednalo o dny od 5. února 2016 do 6. února 2016, 27. února 2016 a od 20. května 2016 do 30. května 2016. Ne vždy bylo možné pozorovat tvoření kondenzačních stop, a to z důvodu velké oblačnosti. Zejména v období mezi 24. a 26. květnem bylo naměřeno menší množství dat právě díky oblačnosti. V ostatních dnech se oblačnost vyskytovala na záznamech pouze občas. Všechny naměřené kondenzační stopy, ke kterým byly přiřazeny ADS-B zprávy, jsou uvedeny v tabulce v příloze 6.1. V prvním sloupci je pro lepší orientaci v záznamech uvedeno pořadové číslo (v další kapitole je na ně odkazováno), ve druhém sloupci je datum, v dalších dvou je křížkem označeno, na které kameře byla kondenzační stopa objevena (kamera S míří na sever, kamera Z na západ). Následuje čas z ADS-B, ve kterém by zhruba mělo být letadlo spatřeno, a čas, ve kterém bylo skutečně objeveno. V tabulce je ještě uvedena výška letadla, doba setrvání kondenzační stopy na obloze a poznámka, která upřesňuje, co se s kondenzační stopou stalo, pokud nebylo možné stanovit dobu, za kterou se vytratila. V některých případech jsou u výšky uvedeny dvě hodnoty. Jednalo se o letadla, která po dobu letu ve vymezené oblasti neletěla ve stejné výšce. Proto je uvedena počáteční a koncová výška.

V uvedených dnech bylo celkově zaznamenáno a spárováno s ADS-B zprávami 301 letadlo, z toho v 8 případech kondenzační stopa nevznikla. Stop bylo objeveno více, avšak ne ke všem se podařilo přiřadit záznam z ADS-B. Buď nebyl k dispozici ADS-B záznam o letadle nacházejícím se v oblasti okolo kamer v daném čase, kdy byla objevena kondenzační stopa, nebo pro daný čas byla k dispozici ADS-B zpráva, ale týkala se letadla, které díky jeho poloze nemohlo být na kamerových záznamech spatřeno. Objevené kondenzační stopy byly převážně krátkodobé, zanedlouho po svém vzniku vymizely. Jejich životnost se pohybovala v řádu sekund, maximálně dvou až tří minut. U ostatních kondenzačních stop, které tvořily 23% podíl ze všech naměřených a spárovaných stop, dosahovala doba životnosti větší hodnoty. U 46 kondenzačních stop se pohybovala délka životnosti mezi 3 a 10 minutami, u 20 stop mezi 10 a 20 minutami, a u 1 stopy byla delší než 20 minut.

V některých případech však nebylo možné přesně změřit dobu životnosti. Některé kondenzační stopy setrvaly dlouhou dobu, až byly nakonec odváty mimo obraz kamery a nebylo tak možné stanovit, kdy stopa zanikla. Někdy se také stalo, že se kondenzační stopa pomalu rozplývala a spojila se s okolní oblačností. Pokud v průběhu měření nastala některá z výše uvedených situací, je u dané kondenzační stopy v příloze 6.1 uvedena poznámka.

6.3 Korelace mezi délkou stopy a fuel flow

V naměřených záznamech bylo hledáno, zda existuje závislost mezi délkou kondenzační stopy a okamžitou spotřebou paliva. Přesnou hodnotu okamžité spotřeby paliva není možné zjistit, proto byly pro účely hledání závislosti porovnávány typy letadel. Větší typy letadel mají větší spotřebu paliva. Typ daného letadla, které vytvořilo kondenzační stopu, bylo možné zjistit z ADS-B zprávy, ve které je uvedena ICAO 24bitová adresa. Jedná se o jedinečnou adresu skládající se z šesti znaků. Typy letadel byly k ICAO adresám dohledány na internetové stránce <http://www.gatwickaviationsociety.org.uk/modeslookup.asp>. Adresy, které nebyly v této databázi obsaženy, byly dohledány na stránce <https://www.flightradar24.com>.

Spotřeba paliva letadla se mění v závislosti na hladině, ve které se pohybuje. Proto byla porovnávána pouze letadla letící ve stejné letové hladině. Letadla, která stoupala či klesala, nebyla brána v úvahu. S měnící se výškou se navíc mění i atmosférické podmínky, jako je teplota a vlhkost vzduchu, jejichž hodnoty jsou zásadní pro vznik kondenzační stopy. To je další důvod, proč je nutné porovnávat pouze stopy vytvořené ve stejné výšce (za stejnou výšku byla považována hodnota rozdílná maximálně o ± 75 ft). Délka kondenzační stopy je závislá na meteorologických podmínkách, které se mění v čase. Aby byly zajištěny podobné podmínky, byly vždy porovnávány kondenzační stopy v rámci jednoho dne.

V tabulce č. 4 jsou uvedeny kondenzační stopy, které byly vzájemně porovnávány z důvodu hledání závislosti mezi délkou stopy a typem letadla. Porovnávány byly kondenzační stopy vytvořené ve stejném dni a ve stejné letové hladině. Proto jsou v tabulce č. 4 uvedeny pouze ty kondenzační stopy, které v daném dni a letové hladině nebyly ojedinělé. V prvním sloupci tabulky je uvedeno pořadové číslo záznamu, které koresponduje s pořadovým číslem v tabulce v příloze 6.1, ve které je možné dohledat další údaje o zpozorované kondenzační stopě. Následuje datum, čas objevení letadla, výška, ve které letělo, typ letadla zapsaný čtyřmístnou ICAO zkratkou, doba trvání kondenzační stopy a poznámka. Barevně jsou odděleny skupiny kondenzačních stop, které byly vzájemně porovnány (každá skupina odpovídá jednomu dni a jedné letové hladině).

Tabulka 4. Porovnávané kondenzační stopy

#	Datum	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Typ letadla	Doba trvání	Poznámky
5	20.5.2016	11:19:54	35000	A321	0:00:20	
7	20.5.2016	12:22:28	35000	A333	0:00:16	
8	20.5.2016	12:23:24	35000	B77L	-	stopa nevznikla
10	20.5.2016	12:38:37	35000	A333	0:00:09	
18	20.5.2016	14:51:50	35000	B77W	0:00:04	
3	20.5.2016	11:13:36	35950/36000	A320	0:00:08	

#	Datum	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Typ letadla	Doba trvání	Poznámky
17	20.5.2016	13:59:40	36000	A320	0:00:08	
6	20.5.2016	12:16:56	37000	B738	0:00:39	
22	20.5.2016	17:25:52	37000	B738	0:00:50	
23	20.5.2016	17:43:59	37050/37000	A319	0:00:45	
1	20.5.2016	9:45:37	38000	A320	0:00:08	
20	20.5.2016	15:09:28	38025/37950	A319	0:00:06	
4	20.5.2016	11:17:09	39000	A332	0:00:14	
9	20.5.2016	12:38:10	39000	A332	0:00:08	
27	21.5.2016	6:38:03	34000	A320	0:02:24	
41	21.5.2016	12:19:48	34000	A320	0:00:06	
46	21.5.2016	15:00:08	34000	E190	0:00:18	
61	21.5.2016	17:40:48	34050/33950	A321	0:01:50	
25	21.5.2016	6:28:12	35000	B753	0:26:00	splynula s oblačností
33	21.5.2016	7:19:15	35000	B737	0:00:05	
42	21.5.2016	14:16:39	35000	A321	0:00:31	splynula s oblačností
49	21.5.2016	16:19:52	35000	A320	0:02:17	splynula s oblačností
52	21.5.2016	16:51:13	34975/35050	A320	0:04:06	
57	21.5.2016	17:23:35	34975	A319	0:01:00	
60	21.5.2016	17:35:16	35000/34975	B738	0:10:00	splynula s oblačností
63	21.5.2016	17:51:10	35050	A319	0:07:37	
65	21.5.2016	17:59:07	34975	B738	0:00:53	více než 0:00:53 – konec záznamu
28	21.5.2016	6:42:43	37000	B738	0:03:01	
29	21.5.2016	6:45:51	37000	A319	0:02:48	
35	21.5.2016	7:54:17	37000	A319	0:01:44	
37	21.5.2016	9:34:40	37000	B738	0:00:52	
39	21.5.2016	11:47:53	36975/37000	A319	0:00:42	
40	21.5.2016	12:19:20	37000	B738	0:00:13	
45	21.5.2016	14:49:24	37025/37075	A319	0:00:54	
48	21.5.2016	16:09:21	37000	B738	0:04:23	
50	21.5.2016	16:32:57	37000	B738	0:00:46	splynula s oblačností
54	21.5.2016	17:11:23	36975/37000	A320	0:06:00	
56	21.5.2016	17:14:02	36975/37000	A320	0:08:30	splynula s oblačností
58	21.5.2016	17:30:30	37000/36975	A319	0:01:58	splynula s oblačností
59	21.5.2016	17:34:06	37025/37000	A319	0:03:15	splynula s oblačností
62	21.5.2016	17:43:47	37000/37025	A320	0:00:52	
64	21.5.2016	17:51:34	37000	B738	0:01:32	
31	21.5.2016	7:08:34	38000	A320	0:00:08	
32	21.5.2016	7:10:48	38000	A319	0:00:56	
47	21.5.2016	15:04:42	38000	A319	0:00:30	
84	22.5.2016	11:20:37	33025	A320	0:07:00	odváta mimo obraz

#	Datum	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Typ letadla	Doba trvání	Poznámky
87	22.5.2016	11:30:15	33000	CRJ9	0:01:00	splynula s oblačností
104	22.5.2016	12:51:52	33000	A320	0:01:00	splynula s oblačností
106	22.5.2016	13:05:55	33000	B739	0:06:30	splynula s oblačností
77	22.5.2016	10:41:56	35000/35025	A320	0:01:41	splynula s oblačností
82	22.5.2016	11:16:48	35000	A321	0:09:00	odváta mimo obraz
90	22.5.2016	11:59:23	35000	B77W	0:09:00	odváta mimo obraz
96	22.5.2016	12:31:29	35000	B77W	0:10:44	splynula s oblačností
100	22.5.2016	12:39:55	35000	A333	0:08:00	splynula s oblačností
112	22.5.2016	14:27:25	34975/35000	A321	0:10:40	odváta mimo obraz
113	22.5.2016	14:40:06	35000	B739	0:00:13	
119	22.5.2016	15:35:43	35000	B772	0:07:10	odváta mimo obraz
69	22.5.2016	7:40:51	36000	A320	0:00:05	
71	22.5.2016	8:22:28	36050	A320	0:00:58	
115	22.5.2016	15:11:22	35975	A321	0:00:08	
118	22.5.2016	15:29:35	35975/36025	A320	0:08:17	
67	22.5.2016	6:31:52	36975/37000	A319	0:00:10	
70	22.5.2016	8:12:17	37000	B738	0:00:12	
75	22.5.2016	10:29:23	37000	A320	0:01:21	splynula s oblačností
76	22.5.2016	10:31:37	37000	B738	0:11:00	odváta mimo obraz
78	22.5.2016	10:56:36	36975/37000	A320	0:01:23	
79	22.5.2016	10:57:58	36975/37000	A319	0:05:42	
83	22.5.2016	11:18:28	37000	B738	0:09:00	odváta mimo obraz
85	22.5.2016	11:25:02	37000	B738	0:01:24	
86	22.5.2016	11:28:53	37000	B738	0:02:23	splynula s oblačností
89	22.5.2016	11:54:02	37000	B752	0:00:15	
91	22.5.2016	12:11:34	37000	B752	0:00:10	
93	22.5.2016	12:16:14	37050/37000	A320	0:01:04	
95	22.5.2016	12:20:00	37025/37000	A319	0:07:09	odváta mimo obraz
101	22.5.2016	12:40:24	37000/36975	A333	0:12:00	splynula s oblačností
102	22.5.2016	12:46:07	37000	A359	0:07:00	splynula s oblačností
105	22.5.2016	12:52:28	37000	B738	0:05:00	splynula s oblačností
108	22.5.2016	13:27:32	36975/37000	B738	0:01:32	
109	22.5.2016	13:29:33	37000	A320	0:01:57	
110	22.5.2016	13:43:42	37000	B738	0:00:12	
111	22.5.2016	14:24:57	37000	B738	0:08:41	
117	22.5.2016	15:23:19	37025/37000	A320	0:01:24	
121	22.5.2016	16:03:32	37025/36975	A320	0:00:42	
122	22.5.2016	16:10:38	37000	A332	0:00:20	
123	22.5.2016	16:18:12	37000	B77W	0:00:42	

#	Datum	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Typ letadla	Doba trvání	Poznámky
72	22.5.2016	8:30:32	38000	A343	0:00:05	
116	22.5.2016	15:15:54	38000	A319	-	stopa nevznikla
68	22.5.2016	7:10:27	39000	B737	0:00:12	
74	22.5.2016	10:27:02	39000	B738	0:05:00	splynula s oblačností
81	22.5.2016	11:18:06	39000	A333	0:04:44	splynula s oblačností
88	22.5.2016	11:37:56	39000	B788	0:08:10	splynula s oblačností
98	22.5.2016	12:33:48	39025	B737	0:03:34	splynula s oblačností
125	23.5.2016	6:55:32	35025/35000	A320	0:00:29	
134	23.5.2016	8:32:36	35000	B77L	0:00:50	
142	23.5.2016	10:26:28	35000	A321	0:00:13	
144	23.5.2016	11:53:45	35000	B738	0:00:10	
146	23.5.2016	12:57:17	35000	A333	0:01:00	
147	23.5.2016	14:13:45	34975/35000	B739	0:01:10	
126	23.5.2016	7:02:20	36000	A320	0:02:00	splynula s oblačností
129	23.5.2016	7:34:16	36000	A319	0:00:38	
141	23.5.2016	10:22:31	36000	A320	0:00:08	
131	23.5.2016	8:04:21	36950	B763	0:00:05	
133	23.5.2016	8:27:16	37000	B738	0:01:19	
135	23.5.2016	8:41:38	36975/37000	B738	0:01:01	
136	23.5.2016	9:00:14	37000	A320	0:00:14	
138	23.5.2016	9:54:30	36975/37000	B738	0:00:16	
140	23.5.2016	10:13:38	37000	B738	0:00:24	
128	23.5.2016	7:19:30	38025/37975	A320	0:06:06	odváta mimo obraz
148	23.5.2016	15:04:27	38000	A319	0:00:13	
176	28.5.2016	11:48:32	33000	B77W	0:00:05	
179	28.5.2016	12:19:17	33000	B77W	0:00:04	
166	28.5.2016	7:33:55	35000	B738	0:00:05	
169	28.5.2016	9:26:56	35000	A320	0:00:04	
180	28.5.2016	12:26:35	35000	B77W	0:00:04	
187	28.5.2016	16:57:58	35000	B77W	0:00:12	
188	28.5.2016	17:18:16	35025/35000	A320	0:00:11	
171	28.5.2016	9:29:31	37025/36975	A320	0:06:10	odváta mimo obraz
172	28.5.2016	9:42:30	37000	B738	0:00:05	
173	28.5.2016	10:09:02	37025/36975	A320	0:00:05	
174	28.5.2016	11:17:02	37000	A332	0:00:08	
175	28.5.2016	11:30:50	37000	B738	0:00:14	
181	28.5.2016	13:36:39	37000	B738	0:00:06	
184	28.5.2016	14:59:42	37000	B738	0:00:07	
189	28.5.2016	17:25:53	36850/37025	A319	0:00:09	
165	28.5.2016	7:12:17	38025	A320	0:00:04	
182	28.5.2016	14:43:59	38000	A320	0:00:07	
161	28.5.2016	6:38:59	38975/39025	A319	0:00:04	

#	Datum	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Typ letadla	Doba trvání	Poznámky
170	28.5.2016	9:27:32	39075/39050	A320	0:00:04	
186	28.5.2016	16:39:42	39000	B738	0:00:08	
204	29.5.2016	14:26:30	32975	A306	0:01:05	splynula s oblačností
219	29.5.2016	17:40:39	32975	B733	0:00:04	
194	29.5.2016	8:05:01	34050/34000	A321	0:00:06	
198	29.5.2016	10:15:36	34000	B738	0:01:06	splynula s oblačností
220	29.5.2016	17:46:03	34025/34050	A320	0:00:06	
202	29.5.2016	13:18:12	35000	B734	0:00:40	splynula s oblačností
203	29.5.2016	13:23:12	35000	B77W	0:01:35	
210	29.5.2016	15:49:56	34975/34950	A321	0:00:04	
216	29.5.2016	17:04:12	35000	B772	0:00:08	
218	29.5.2016	17:15:12	35000	B77W	0:00:07	
195	29.5.2016	8:07:18	36025/35975	A320	0:00:07	
200	29.5.2016	11:21:15	36000	A320	0:00:05	
191	29.5.2016	6:50:49	37025/36950	A320	0:00:11	
196	29.5.2016	10:07:30	37000/37050	A321	0:01:42	splynula s oblačností
192	29.5.2016	7:35:10	37975/38000	A319	0:00:10	
197	29.5.2016	10:13:20	38000/38050	A320	0:01:02	splynula s oblačností
207	29.5.2016	15:12:30	38025/37975	A319	0:00:16	
190	29.5.2016	6:34:44	38975/39050	A319	0:00:05	
205	29.5.2016	14:51:02	39000	B737	0:00:15	
213	29.5.2016	16:01:07	39000/38975	B788	0:00:06	
215	29.5.2016	16:44:53	39000	A388	0:11:00	splynula s oblačností
222	30.5.2016	7:48:47	37000	B738	0:01:00	splynula s oblačností
223	30.5.2016	11:54:18	37025/37000	B738	0:00:04	
228	30.5.2016	15:51:26	37000	B738	0:00:03	
232	5.2.2016	14:21:27	32975/33000	B748	0:04:42	odváta mimo obraz
233	5.2.2016	14:27:03	33000	A343	0:04:00	odváta mimo obraz
239	5.2.2016	16:29:30	33000	B77W	0:00:30	splynula s oblačností
230	5.2.2016	14:07:48	35000	A321	0:01:48	
236	5.2.2016	15:55:38	35000	A388	0:00:42	
237	5.2.2016	16:03:52	34975/35000	A320	0:00:15	
240	5.2.2016	16:38:27	34975/35000	A320	0:00:12	
229	5.2.2016	14:06:02	36975/37000	B738	0:00:49	splynula s oblačností
231	5.2.2016	14:14:52	37025/37000	A320	0:01:42	
235	5.2.2016	15:56:08	36975/37000	B788	0:00:28	
250	6.2.2016	10:48:06	33000	B77W	0:13:20	odváta mimo obraz
254	6.2.2016	11:16:28	33000	B77W	0:01:14	splynula s oblačností

#	Datum	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Typ letadla	Doba trvání	Poznámky
265	6.2.2016	14:31:54	33000	A343	0:00:58	splynula s oblačností
267	6.2.2016	14:55:50	33000	B738	0:00:22	
275	6.2.2016	16:55:12	32925/33025	A321	0:00:30	
242	6.2.2016	8:59:49	34025	A321	0:09:30	odváta mimo obraz
277	6.2.2016	17:08:45	34025/34075	A321	0:00:56	
241	6.2.2016	8:03:33	35000	B738	0:02:07	splynula s oblačností
249	6.2.2016	10:23:56	34950	A321	0:07:00	odváta mimo obraz
251	6.2.2016	10:53:36	35000	B77W	0:14:39	splynula s oblačností
255	6.2.2016	11:16:34	35000/34975	A320	0:11:11	odváta mimo obraz
258	6.2.2016	11:36:38	35000	B733	0:07:52	odváta mimo obraz
260	6.2.2016	11:45:30	35000	B77W	0:09:34	odváta mimo obraz
264	6.2.2016	14:18:07	35050/34975	A321	0:00:58	splynula s oblačností
278	6.2.2016	17:09:25	34975/35000	A320	0:09:25	
279	6.2.2016	17:42:06	34975	A320	0:01:02	
257	6.2.2016	11:25:52	35950/36025	A321	0:02:07	splynula s oblačností
277	6.2.2016	15:39:50	36000/35975	A319	0:03:58	
243	6.2.2016	9:13:08	37025	A319	0:07:50	
252	6.2.2016	11:05:38	37000	A332	0:11:09	odváta mimo obraz
261	6.2.2016	12:18:53	37000	B738	0:01:30	odváta mimo obraz
262	6.2.2016	12:28:07	37000	A320	0:04:20	splynula s oblačností
263	6.2.2016	12:38:26	36975	B738	0:13:15	odváta mimo obraz
271	6.2.2016	15:30:18	37000/36975	B789	0:02:47	splynula s oblačností
276	6.2.2016	16:57:22	37025/36950	A320	0:06:07	splynula s oblačností
245	6.2.2016	9:42:38	38000/38025	A319	0:18:11	odváta mimo obraz
246	6.2.2016	9:48:16	38000/37975	A319	0:01:49	splynula s oblačností
247	6.2.2016	9:56:09	38000	A343	0:11:20	splynula s oblačností
253	6.2.2016	11:14:19	39000	B738	0:07:18	splynula s oblačností
256	6.2.2016	11:22:04	39000/39025	A333	0:11:17	splynula s oblačností
268	6.2.2016	15:16:09	39000	B738	0:00:27	
270	6.2.2016	15:25:47	39000	A332	0:04:03	splynula s oblačností
273	6.2.2016	15:55:44	38975/39000	B788	0:12:00	odváta mimo obraz
285	27.2.2016	9:46:14	35000	A321	0:09:00	splynula s oblačností
291	27.2.2016	11:26:58	35000	B77W	0:00:52	splynula s oblačností
295	27.2.2016	12:31:42	35000	B738	0:01:04	

#	Datum	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Typ letadla	Doba trvání	Poznámky
299	27.2.2016	12:48:23	35025/34975	A319	0:01:04	
300	27.2.2016	13:19:20	35000/34975	A320	0:00:37	
281	27.2.2016	7:35:52	36000	B738	0:00:07	
283	27.2.2016	8:10:08	36025/36000	A319	0:06:30	odváta mimo obraz
282	27.2.2016	8:07:53	36975/37000	A321	0:00:16	
284	27.2.2016	9:13:31	37025/37000	A319	0:00:12	splynula s oblačností
288	27.2.2016	10:27:19	37000	B738	0:01:43	
290	27.2.2016	11:03:51	37000	B738	0:00:18	
294	27.2.2016	12:26:05	36975/37000	B738	0:00:17	
296	27.2.2016	12:38:01	37000	B738	0:00:19	
280	27.2.2016	7:01:16	38000/37975	A319	0:07:00	odváta mimo obraz
289	27.2.2016	10:43:35	38025	A319	0:01:56	

6.4 Vyhodnocení výsledků

Pro hledání závislosti mezi velikostí letadla a délkou kondenzační stopy bylo vytvořeno 46 skupin zpozorovaných kondenzačních stop. Každá skupina obsahuje kondenzační stopy, které byly naměřeny během jednoho dne a které byly vytvořeny za letadly ve stejné letové hladině. V těchto skupinách byla hledána závislost mezi délkou stopy a typem letadla. Kondenzační stopy, které bylo možné vzájemně porovnávat, byly vytvořeny v letových hladinách 330, 340, 350, 360, 370, 380 a 390.

V některých případech menší letadlo s menší okamžitou spotřebou paliva vytvořilo kratší stopu než větší letadlo. Byly však zaznamenány i situace, kdy stejný typ letadla ve stejné letové hladině způsobil kondenzační stopy, které se dobou životnosti velmi lišily. Stejně tak nastaly i situace, ve kterých letadlo s větší spotřebou vytvořilo krátkou stopu a menší letadlo stopu, která na obloze setrvala o mnoho déle.

Na základě provedeného pozorování a měření nebyla nalezena existence závislosti mezi délkou kondenzační stopy a okamžitou spotřebou paliva letadla. Ideální by bylo provést měření kondenzačních stop za různými letadly ve stejnou dobu a na stejném místě. To však není reálné, a proto bylo sledování omezeno vždy na určitou letovou hladinu a den, kdy se předpokládalo, že meteorologické podmínky budou přibližně stejné.

Problémy, které se objevily při měření a hledání závislosti, byly v zásadě dva. Prvním z nich je zastoupení jednotlivých typů letadel. Největší zastoupení měly menší stroje z rodiny Airbus A320 a Boeing 737. Oproti nim byl výskyt větších typů s větší spotřebou paliva menší, a proto

bylo v některých případech porovnání kondenzačních stop omezené. Druhý problém spočíval v tom, že u dlouhodobých kondenzačních stop nebylo vždy možné přesně stanovit jejich životnost, protože buď splynuly s okolní oblačností nebo byly odváty mimo prostor snímáný kamerami.

7 Závěr

Cílem práce bylo podat ucelený přehled o kondenzačních stopách letadel a analyzovat naměřené hodnoty získané vlastním pozorováním tvoření kondenzačních stop. Kondenzační stopy jsou jevem, který je často pozorovatelný v místě, kudy proletělo letadlo. Vzniká na základě dosažení meze nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě, což udává podmínka pro vznik kondenzačních stop, tzv. Schmidt-Applemanovo kritérium. Pokud je v daném místě dostatečné množství vodní páry vyskytující se ve vzduchu spolu s vodní párou obsaženou ve výfukových plynech letadlových motorů, dojde ke kondenzování vodní páry. Díky velmi nízkým okolním teplotám zkondenzované kapky vody rychle zamrzají a tvoří kondenzační stopu. Další průběh kondenzační stopy je závislý na více okolnostech, které jsou popsány na začátku práce.

Kondenzační stopy, které po chvilce vymizí, nepředstavují riziko pro ovlivnění podnebí a není tedy třeba jim věnovat velkou pozornost. Problémem je situace, kdy se kondenzační stopa vytvoří v prostředí, které je přesycené vodní párou vzhledem k ledu. V těchto podmínkách totiž může stopa setrvávat v atmosféře po velmi dlouhou dobu. Udává se, že doba trvání perzistentních kondenzačních stop může dosahovat až 17 hodin. Dlouhodobé stopy, které se mohou postupem času i dále rozšiřovat, zvyšují pokrytí oblačností, což má převážně negativní vliv na klima. Obecně platí, že kondenzační stopa může způsobit jak pozitivní, tak i negativní radiační působení. V závislosti na mnoha faktorech, mezi které patří mj. doba životnosti kondenzačních stop, koncentrace ledových krystalů, velikost ledových krystalů, optická tloušťka kondenzační stopy, doba během dne, roční období, zeměpisná poloha, kontrast mezi vytvořenou oblačností a povrchem Země, může být výsledkem oteplování i ochlazování atmosféry. Převažuje však první z efektů, a tak je tvoření kondenzačních stop obecně vnímáno negativně.

Největší pokrytí kondenzačními stopami a indukovanou cirrovitou oblačností se nachází v místech s vysokou hustotou leteckého provozu. Na těchto místech se odhaduje i největší radiační působení vlivem kondenzačních stop. Jedná se o oblast střední Evropy, východního pobřeží Spojených států amerických, jihovýchodní Asie a koridoru nad Atlantikem mezi Evropou a Amerikou. Globální průměrné hodnoty radiačního působení jsou oproti regionálním zanedbatelné. Regionální hodnoty, které jsou v porovnání s globálními mnohonásobně vyšší, by mohly mít vliv na změny teplot na povrchu Země, ale nelze nyní s jistotou říci, jak velký. Odhad tohoto vlivu je velmi složitý hned z několika důvodů. Distribuce kondenzačních stop po světě je heterogenní, a navíc je obtížné odlišit indukovanou cirrovitou oblačnost od přírodní oblačnosti. Výsledné radiační působení pak závisí na mnoha faktorech, které se mění s polohou i časem.

Málo je též prozkoumán vliv emitovaných aerosolů, které mají kromě přímého dopadu v podobě pohlcování a odražení záření i nepřímý dopad. Pokud se nevytvoří kondenzační stopa, mohou aerosoly vypouštěné do atmosféry posloužit jako zárodečná jádra pro vznik ledových krystalů, které mohou vytvořit cirrovitou oblačnost. Aerosoly mohou také měnit vlastnosti přírodně vytvořené oblačnosti.

Prognózy týkající se objemu letecké dopravy v budoucích letech předznamenávají růst počtu přepravených cestujících a větší počty pohybů letadel. S rostoucí hustotou leteckého provozu se očekává i rostoucí tempo spotřebovaného paliva a tím pádem vyšší emise vodní páry. S tím koresponduje i předpověď týkající se pokrytí kondenzačními stopami a jejich dopad na radiační bilanci soustavy Země-atmosféra. Největší zvýšení radiačního působení se odhaduje v oblasti východní Asie, kde se předpokládá velký nárůst ve spotřebě paliva díky rozvoji letecké dopravy v tomto regionu, a dále v místech, kde je již v současné době velké radiační působení – v Evropě a východní části Severní Ameriky.

Z důvodu negativního vlivu kondenzačních stop na podnebí se uvažuje o možnostech, jak tento vliv omezit. Nabízí se několik řešení. Jedním z nich je technické řešení spočívající v dočasném zvýšení teploty výfukových plynů, které by vedlo k nižší účinnosti a tím pádem k menšímu sklonu křivky mísení. Další řešení je přidání aditiv do paliva, které by zamezilo kondenzaci vodní páry na sazích. Také se uvažuje o možnostech alternativních paliv, jako je tekutý vodík a metan. Při jejich spalování však vzniká větší množství vodní páry. Kondenzační stopy by se sice tvořily i dále, ale měly by menší optickou tloušťku. Výsledný efekt kondenzačních stop by byl podobný, ale byly by zredukovány emise oxidu uhličitého. Poslední možností jsou změny operačního charakteru. Ty se týkají omezení nočních letů, omezení výšky letu a 4D trajektorie, která by se odvíjela od aktuálních atmosférických podmínek.

Vlastní měření kondenzačních stop probíhalo v okolí Děčína, kde byly umístěny kamery snímající oblohu. Na kamerových záznamech byly hledány kondenzační stopy, které byly následně přiřazeny ke konkrétním letadlům. Informace o letadlech, která se v průběhu měření pohybovala ve snímaném prostoru, byly dohledány v ADS-B zprávách. Naměřená data sloužila jako podklad pro hledání závislosti mezi délkou kondenzační stopy a spotřebou paliva, která se odvíjí od typu letadla. Pro zajištění přibližně stejných podmínek byly porovnávány pouze kondenzační stopy, které se vytvořily ve stejné letové hladině ve stejném dni. Na základě tohoto zkoumání nebyla zjištěna existence závislosti mezi délkou kondenzační stopy a typem letadla, resp. okamžitou spotřebou paliva. Komplikace při měření nastaly v některých případech u dlouhodobých stop, u kterých nebylo možné přesně stanovit dobu životnosti z důvodu jejich splnutí s okolní oblačností nebo odvtí mimo obraz kamer. Pro zkvalitnění výsledků by bylo třeba větší zastoupení větších typů letadel. V průběhu měření

se vyskytovala hlavně menší letadla s podobnou spotřebou paliva, a proto je v některých případech nebylo možné porovnat s většími typy, které nejsou tak časté.

Použité zdroje

- [1] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Aircraft Contrails Factsheet*. Washington, D.C., 2000, 6 s. Dostupné také z: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/00000LVU.PDF?Dockey=00000LVU.PDF>
- [2] LYNCH, David K. *Cirrus*. New York: Oxford University Press, 2002. ISBN 0-19-513072-3.
- [3] RYAN, A. C., A. R. MACKENZIE, S. WATKINS a R. TIMMIS. World War II contrails: a case study of aviation-induced cloudiness. *International Journal of Climatology* [online]. 2012, **32**(11), 1745-1753 [cit. 2017-03-27]. DOI: 10.1002/joc.2392. ISSN 08998418. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.2392>
- [4] DVOŘÁK, Petr. *Atlas oblaků*. 2., přeprac. vyd. Cheb: Svět křídel, 2007. ISBN 978-80-86808-42-0.
- [5] DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie*. Cheb: Svět křídel, 2004. ISBN 80-868-0809-2.
- [6] BOUCHER, Olivier. Atmospheric science: Seeing through contrails. *Nature Climate Change* [online]. 2011-3-29, **1**(1), 24-25 [cit. 2017-03-30]. DOI: 10.1038/nclimate1078. ISSN 1758-678x. Dostupné z: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nclimate1078>
- [7] Meteorologický slovník výkladový a terminologický: s cizojazyčnými názvy hesel ve slovenštině, angličtině, němčině, francouzštině a ruštině. Praha: Academia, 1993. ISBN 80-853-6845-5.
- [8] DVOŘÁK, Petr. Kondenzační pruhy za letadly, Contrails. In: Informační stránky Českého hydrometeorologického ústavu [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2012 [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1351335406>
- [9] SCHUMANN, Ulrich. Formation, properties and climatic effects of contrails. *Comptes Rendus Physique* [online]. 2005, **6**(4-5), 549-565 [cit. 2016-12-03]. DOI: 10.1016/j.crhy.2005.05.002. ISSN 16310705. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1631070505000563>
- [10] HOLTON, James R., Judith A. CURRY a J. A. PYLE. *Encyclopedia of atmospheric sciences*. Amsterdam; Boston: Academic Press, c2003. ISBN 01-222-7090-8.

- [11] SETVÁK, Martin. Kondenzační stopy za letadly. In: Český hydrometeorologický ústav [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2009 [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/informace-a-zajimovosti/kondenzacni-stopy>
- [12] GIERENS, K., M. BRAUN-UNKHOFF, P. LE CLERCQ, M. PLOHR, H. SCHLAGER a F. WOLTERS. DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR). Condensation trails from biofuels/kerosene blends scoping study: ENER/C2/2013-627. European Commission, 2016, 78 s. Dostupné také z: <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Contrails-from-biofuels-scoping-study-final-report.pdf>
- [13] Our fleet. Air Berlin [online]. Berlin: Air Berlin, 2016 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <https://www.airberlin.com/en/site/flotte.php>
- [14] NASA Langley Research Center's Science Directorate Education and Public Outreach Website [online]. Langley, Virginia: NASA, 2016 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <https://science-edu.larc.nasa.gov>
- [15] SCHUMANN, Ulrich. Influence of propulsion efficiency on contrail formation. *Aerospace Science and Technology* [online]. 2000, 4(6), 391-401 [cit. 2016-12-03]. DOI: 10.1016/S1270-9638(00)01062-2. ISSN 12709638. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1270963800010622>
- [16] SCHUMANN, U. Atmospheric physics: background, methods, trends. New York: Springer, 2012. Research topics in aerospace. ISBN 36-423-0182-7.
- [17] APPLEMAN, Herbert. The Formation of Exhaust Condensation Trails by Jet Aircraft. *Bulletin American Meteorological Society*. 1953, (34), 14-20.
- [18] HOSPODKA, Jakub a Stanislav PLENINGER. Vliv letecké dopravy na atmosféru: problematika začlenění leteckých společností do EU ETS. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. ISBN 978-80-01-05824-4.
- [19] Aircraft Emissions. *Encyclopedia of global environmental change: physical and chemical dimensions of global environmental change* [online]. Chichester: John Wiley, c2002, s. 178-186 [cit. 2016-12-03]. ISBN 0-471-97796-9. Dostupné z: http://www.dlr.de/pa/en/Portaldata/33/Resources/dokumente/mitarbeiter/Schumann_Encyclopedia_Aircraft_Emissions_c415-_o.pdf

- [20] STOCKER, Thomas F., Dahe QIN, Gian-Kasper PLATTNER, et al. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2013. ISBN 978-1-107-05799-1. Dostupné také z: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf
- [21] VALI, G., P. J. DEMOTT, O. MÖHLER a T. F. WHALE. Technical Note: A proposal for ice nucleation terminology. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2015, **15**(18), 10263-10270 [cit. 2017-03-27]. DOI: 10.5194/acp-15-10263-2015. ISSN 1680-7324. Dostupné z: <http://www.atmos-chem-phys.net/15/10263/2015/>
- [22] ŘEZÁČOVÁ, Daniela. *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia, 2007. Gerstner. ISBN 978-80-200-1505-1.
- [23] HEYMSFIELD, Andrew, Darrel BAUMGARDNER, Paul DEMOTT, Piers FORSTER, Klaus GIERENS a Bernd KÄRCHER. Contrail Microphysics. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2010, **91**(4), 465-472 [cit. 2017-03-30]. DOI: 10.1175/2009BAMS2839.1. ISSN 0003-0007. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009BAMS2839.1>
- [24] PENNER, Joyce E., David H. LISTER, David J. GRIGGS, David J. DOKKEN a Mack MCFARLAND. *IPCC Special Report - Aviation and the Global Atmosphere: Summary for Policymakers* [online]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 1999. Dostupné také z: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-en.pdf>
- [25] VYSOUDIL, Miroslav. *Meteorologie a klimatologie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2004. ISBN 80-244-0875-9.
- [26] DVOŘÁK, Petr. Skleníkový efekt. In: *Informační stránky Českého hydrometeorologického ústavu* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2012 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1338911962>

- [27] SOLOMON, Susan, Dahe QIN, Martin MANNING, Melinda MARQUIS, Kristen AVERYT, Melinda M.B. TIGNOR, Henry LeRoy MILLER a Zhenlin CHEN. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-88009-1. Dostupné také z: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf
- [28] LEE, D.S., G. PITARI, V. GREWE, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment* [online]. 2010, **44**(37), 4678-4734 [cit. 2017-04-13]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.06.005. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231009004956>
- [29] METZ, Bert, Ogunlade DAVIDSON, Peter BOSCH, Rutu DAVE a Leo MEYER. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2007 - Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-88011-4. Dostupné také z: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4_wg3_full_report.pdf
- [30] BURKHARDT, Ulrike a Bernd KÄRCHER. Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Climate Change* [online]. 2011-3-29, **1**(1), 54-58 [cit. 2017-03-12]. DOI: 10.1038/nclimate1068. ISSN 1758-678x. Dostupné z: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate1068>
- [31] SCHUMANN, Ulrich a Kaspar GRAF. Aviation-induced cirrus and radiation changes at diurnal timescales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2013, **118**(5), 2404-2421 [cit. 2017-04-13]. DOI: 10.1002/jgrd.50184. ISSN 2169897x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/jgrd.50184>
- [32] YANG, Ping, Gang HONG, Andrew E. DESSLER, Steve S. C. OU, Kuo-Nan LIOU, Patrick MINNIS a HARSHVARDHAN. Contrails and Induced Cirrus: Optics and Radiation. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2010, **91**(4), 473-478 [cit. 2017-03-30]. DOI: 10.1175/2009BAMS2837.1. ISSN 0003-0007. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009BAMS2837.1>

- [33] BURKHARDT, Ulrike a Bernard KÄRCHER. Climate impact of contrail cirrus assessed. In: *DLR: Institut of Atmospheric Physics* [online]. Oberpfaffenhofen: DLR, 2011 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: http://www.dlr.de/pa/en/desktopdefault.aspx/tabid-2342/6725_read-29898/
- [34] BOUCHNER, Olivier, David RANDALL, Paulo ARTAXO, et al. Clouds and Aerosols: Supplementary Material. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, 2013. Dostupné z: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/supplementary/WG1AR5_Ch07SM_FINAL.pdf
- [35] LEE, David S., David W. FAHEY, Piers M. FORSTER, Peter J. NEWTON, Ron C.N. WIT, Ling L. LIM, Bethan OWEN a Robert SAUSEN. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment* [online]. 2009, **43**(22-23), 3520-3537 [cit. 2017-03-26]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.024. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231009003574>
- [36] SPANGENBERG, Douglas A., Patrick MINNIS, Sarah T. BEDKA, Rabindra PALIKONDA, David P. DUDA a Fred G. ROSE. Contrail radiative forcing over the Northern Hemisphere from 2006 Aqua MODIS data. *Geophysical Research Letters* [online]. 2013, **40**(3), 595-600 [cit. 2017-04-13]. DOI: 10.1002/grl.50168. ISSN 00948276. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/grl.50168>
- [37] BRASSEUR, Guy P., Mohan GUPTA, Bruce E. ANDERSON, et al. Impact of Aviation on Climate: FAA's Aviation Climate Change Research Initiative (ACCRI) Phase II. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2016, **97**(4), 561-583 [cit. 2017-04-13]. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00089.1. ISSN 0003-0007. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-13-00089.1>
- [38] YI, Bingqi, Ping YANG, Kuo-Nan LIOU, Patrick MINNIS a Joyce E. PENNER. Simulation of the global contrail radiative forcing: A sensitivity analysis. *Geophysical Research Letters* [online]. 2012, **39**(24), n/a-n/a [cit. 2017-04-13]. DOI: 10.1029/2012GL054042. ISSN 00948276. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2012GL054042>
- [39] *IATA* [online]. Montreal: International Air Transport Association, 2017 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.iata.org/Pages/default.aspx>

- [40] EUROCONTROL. *EUROCONTROL Seven-Year Forecast: Flight Movements and Service Units 2017-2023*. Brussels, 2017. Dostupné také z: <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/official-documents/forecasts/seven-year-flights-service-units-forecast-2017-2023-Feb2017.pdf>
- [41] ATAG: *Air Transport Action Group* [online]. Geneva: Air Transport Action Group, 2017 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.atag.org>
- [42] EDENHOFER, Ottmar, Ramón PICHES-MADRUGA, Youba SOKONA, et al. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2014 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2014. ISBN 978-1-107-05821-7. Dostupné také z: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf
- [43] AIR TRANSPORT ACTION GROUP. *Beginner's Guide to Aviation Biofuels*. Geneva, 2011. Dostupné také z: <http://www.atag.org/component/downloads/downloads/97.html>
- [44] CHEN, Chih-Chieh a Andrew GETTELMAN. Simulated 2050 aviation radiative forcing from contrails and aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2016, **16**(11), 7317-7333 [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.5194/acp-16-7317-2016. ISSN 1680-7324. Dostupné z: <http://www.atmos-chem-phys.net/16/7317/2016/>
- [45] HAGLIND, Fredrik. Potential of lowering the contrail formation of aircraft exhausts by engine re-design. *Aerospace Science and Technology* [online]. 2008, **12**(6), 490-497 [cit. 2017-04-28]. DOI: 10.1016/j.ast.2007.12.001. ISSN 12709638. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1270963807001447>
- [46] GIERENS, K. Are fuel additives a viable contrail mitigation option? *Atmospheric Environment* [online]. 2007, **41**(21), 4548-4552 [cit. 2017-04-21]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.03.014. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231007002452>
- [47] BUSEN, R. a U. SCHUMANN. Visible contrail formation from fuels with different sulfur contents. *Geophysical Research Letters* [online]. 1995, **22**(11), 1357-1360 [cit. 2017-04-21]. DOI: 10.1029/95GL01312. ISSN 00948276. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/95GL01312>

- [48] SCHUMANN, U., J. STRÖM, R. BUSEN, R. BAUMANN, K. GIERENS, M. KRAUTSTRUNK, F. P. SCHRÖDER a J. STINGL. In situ observations of particles in jet aircraft exhausts and contrails for different sulfur-containing fuels. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 1996, **101**(D3), 6853-6869 [cit. 2017-04-21]. DOI: 10.1029/95JD03405. ISSN 01480227. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/95JD03405>
- [49] GAUSS, M. Impact of H₂O emissions from cryoplanes and kerosene aircraft on the atmosphere. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2003, **108**(D10), - [cit. 2017-04-27]. DOI: 10.1029/2002JD002623. ISSN 0148-0227. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2002JD002623>
- [50] PENNER, Joyce E., David H. LISTER, David J. GRIGGS, David J. DOKKEN a Mack MCFARLAND. *Aviation and the global atmosphere: A Special Report of IPCC Working Groups I and III in collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. ISBN 05-216-6300-8.
- [51] FAAß, Reinhard. AIRBUS DEUTSCHLAND GMBH. *Cryoplane*. Hamburg, 2001. Dostupné také z: http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dgIrr/hh/text_2001_12_06_Cryoplane.pdf
- [52] PONATER, Michael, Susanne PECHTL, Robert SAUSEN, Ulrich SCHUMANN a Gerhard HÜTTIG. Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: A state-of-the-art assessment. *Atmospheric Environment* [online]. 2006, **40**(36), 6928-6944 [cit. 2017-04-27]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.036. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231006006686>
- [53] AGARWAL, Ramesh, Fayette COLLIER, Andreas SCHÄFER a Allan SEABRIDGE. *Green Aviation*. Chichester: Wiley, 2016. ISBN 978-1-118-86635-1.
- [54] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *ICAO Environmental Report 2016: Aviation and Climate Change*. Montreal, 2016. Dostupné také z: <http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202016.pdf>

- [55] FICHTER, Christine, Susanne MARQUART, Robert SAUSEN a David S. LEE. The impact of cruise altitude on contrails and related radiative forcing. *Meteorologische Zeitschrift* [online]. 2005, **14**(4), 563-572 [cit. 2017-04-28]. DOI: 10.1127/0941-2948/2005/0048. ISSN 0941-2948. Dostupné z: http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/14/54293/The_impact_of_cruise_altitude_on_contrails_and_rel?af=crossref
- [56] WILLIAMS, Victoria, Robert B. NOLAND a Ralf TOUMI. Reducing the climate change impacts of aviation by restricting cruise altitudes. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2002, **7**(6), 451-464 [cit. 2017-04-28]. DOI: 10.1016/S1361-9209(02)00013-5. ISSN 13619209. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920902000135>
- [57] MANNSTEIN, Hermann, Peter SPICHTINGER a Klaus GIERENS. A note on how to avoid contrail cirrus. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2005, **10**(5), 421-426 [cit. 2017-04-28]. DOI: 10.1016/j.trd.2005.04.012. ISSN 13619209. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136192090500026X>
- [58] Climate-friendly aircraft routing could cut damage. In: *Environmental Research Web* [online]. Bristol: IOP Publishing, 2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://environmentalresearchweb.org/cws/article/news/67954>
- [59] Climate-friendly aircraft routing could significantly reduce climate impact of aviation. In: *DLR: Institut of Atmospheric Physics* [online]. Oberpfaffenhofen: DLR, 2017 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: http://www.dlr.de/pa/en/desktopdefault.aspx/tabid-2342/6725_read-48892/

Seznam obrázků

Obrázek 1. Šíření kondenzační stopy v závislosti na stříhu větru [10]	22
Obrázek 2. Vznik přerušované kondenzační stopy [10].....	23
Obrázek 3. Efekt emise sazí na RF [28].....	30
Obrázek 4. Pokrytí kondenzačními stopami a indukovanou cirrovitou oblačností v roce 2002 [30]	34
Obrázek 5. Pokrytí kondenzačními stopami a indukovanou cirrovitou oblačností v roce 2006 [31]	35
Obrázek 6. Radiační působení a optická tloušťka indukované cirrovité oblačnosti v roce 2002 [30]	39
Obrázek 7. Dlouhovlnné RF indukované cirrovité oblačnosti v roce 2006 [31]	40
Obrázek 8. Schéma umístění kamer.....	57

Seznam grafů

Graf 1. Fázový diagram mísení výfukových plynů s okolním vzduchem pro různé okolní podmínky [10]	14
Graf 2. Fázový diagram mísení výfukových plynů s okolním vzduchem pro různé účinnosti motorů [10]	16
Graf 3. Závislost prahové teploty pro vznik kondenzační stopy na výšce a relativní vlhkosti vzduchu [9]	18
Graf 4. Závislost IWC na teplotě [23]	21
Graf 5. RF letecké dopravy v roce 2005 [35]	28
Graf 6. Vývoj ERF kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti v rozmezí let 1944 a 2011 [20]	41
Graf 7. Závislost prahové teploty na výšce a relativní vlhkosti vzduchu pro standardní motor a motor vybavený variabilními vodíci lopatkami [45]	48
Graf 8. Závislost teploty T_F na kritickém poměru nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě pro různé celkové účinnosti [46]	51

Seznam tabulek

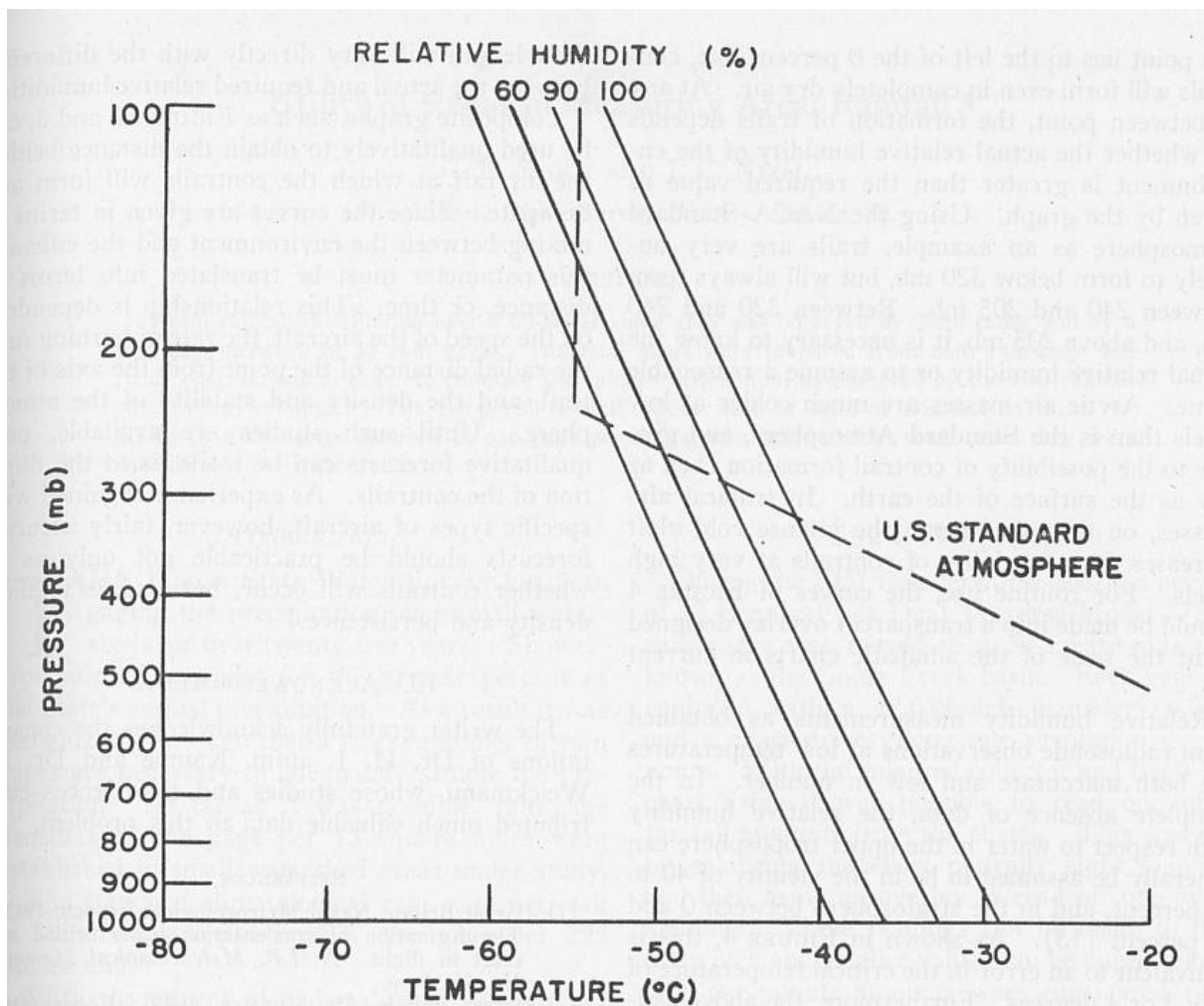
Tabulka 1. Přehled studií radiačního efektu kondenzačních stop [20, 27, 28, 29, 30, 31, 34]	43
Tabulka 2. RF kondenzačních stop v roce 2050 [44].....	46
Tabulka 3. Vlastnosti kerosinu a alternativních paliv [50]	52
Tabulka 4. Porovnávané kondenzační stopy.....	59

Seznam příloh

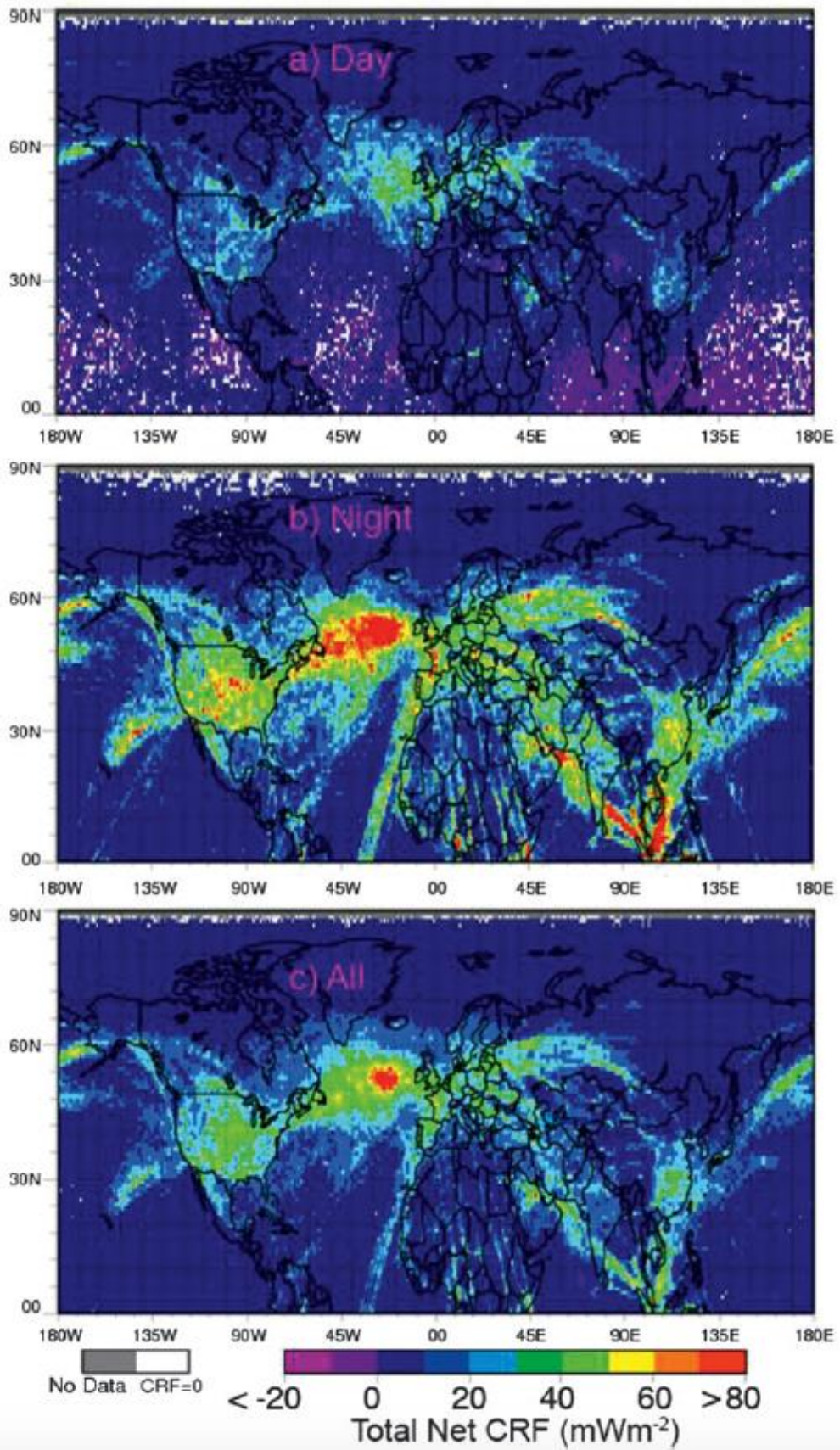
Příloha 2.1 Graf závislosti prahové teploty na tlaku a relativní vlhkosti vzduchu dle Applemana (1953) [17]	82
Příloha 3.1 Denní, noční a celkové RF kondenzačních stop v roce 2006 [37]	83
Příloha 3.2 Krátkovlnné, dlouhovlnné a celkové RF kondenzačních stop v roce 2006 [38] ..	84
Příloha 3.3 ERF kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti v letech 1944 až 2011 [20]	85
Příloha 3.4 ER/ERF dané antropogenními činnostmi v roce 2011 [20]	86
Příloha 6.1 Naměřené kondenzační stopy	87

Přílohy

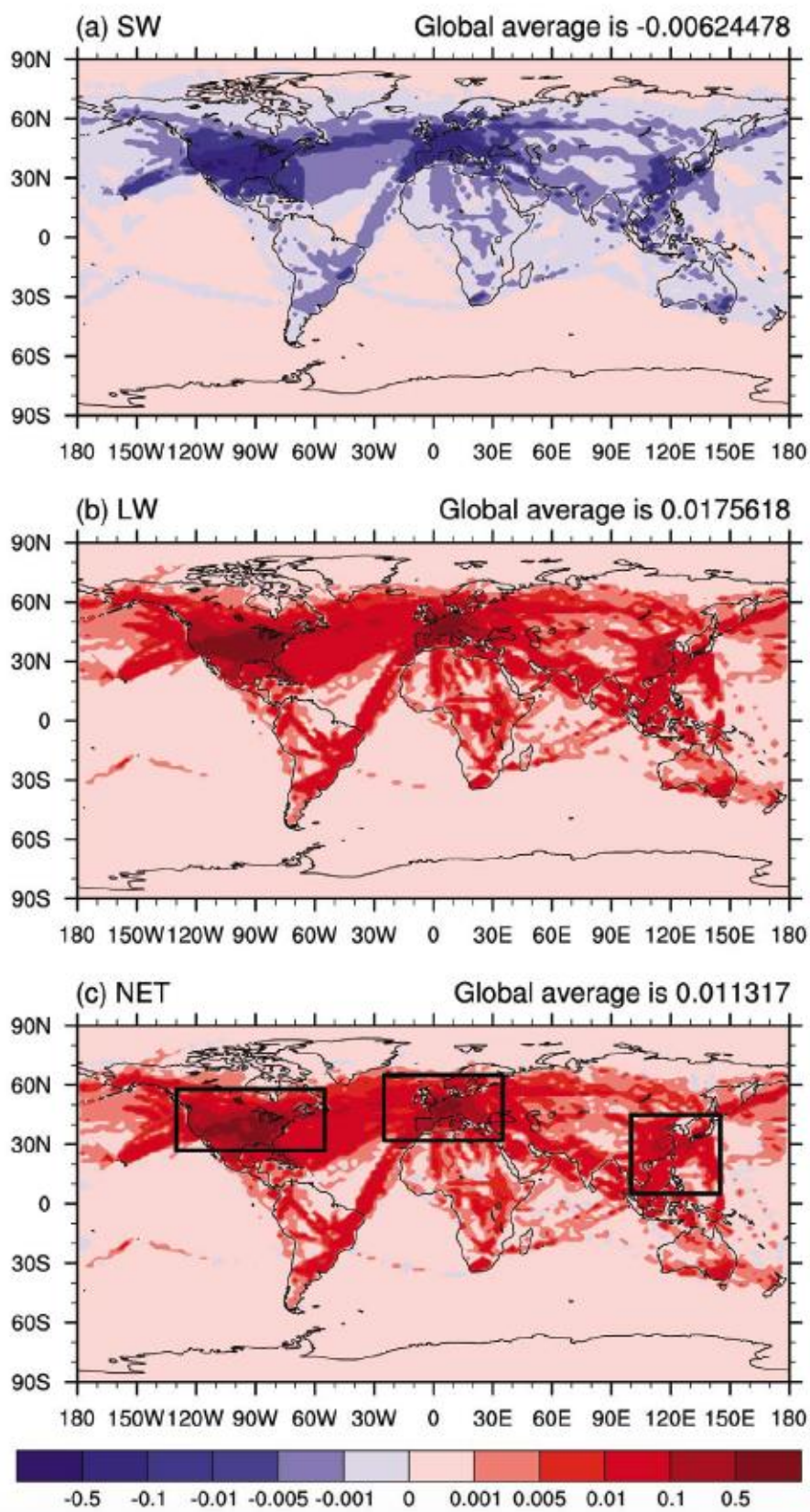
Příloha 2.1 Graf závislosti prahové teploty na tlaku a relativní vlhkosti vzduchu dle Applemana (1953) [17]



Příloha 3.1 Denní, noční a celkové RF kondenzačních stop v roce 2006 [37]



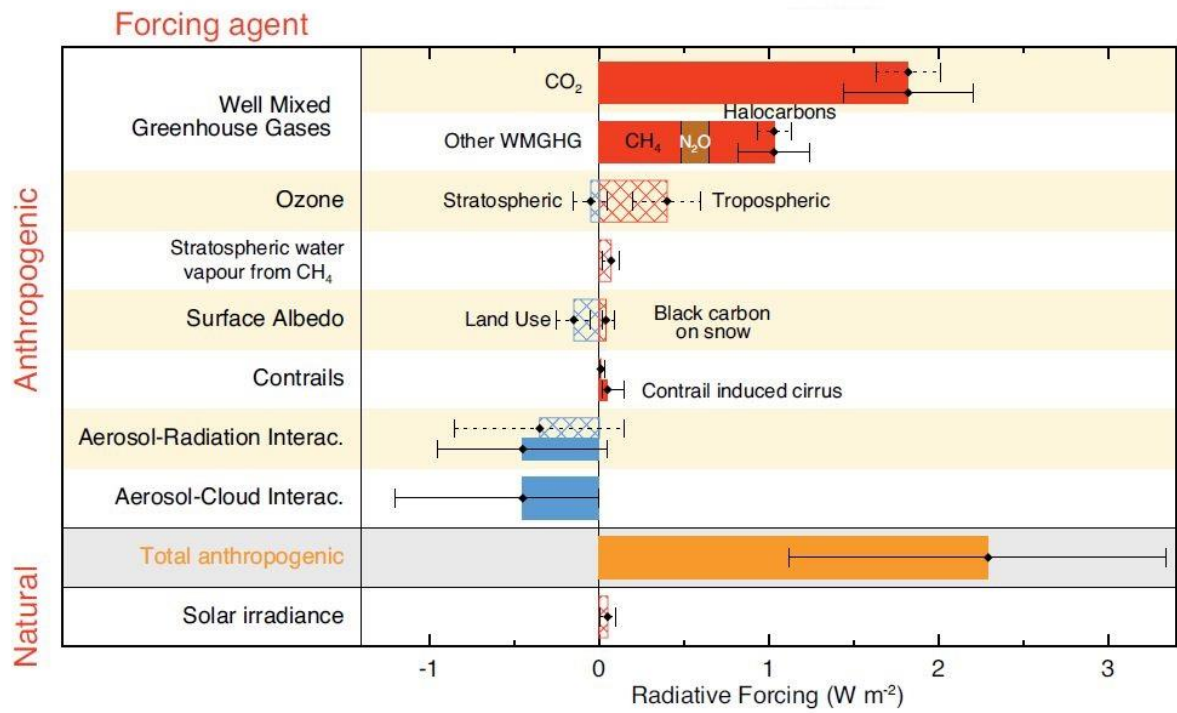
Příloha 3.2 Krátkovlnné, dlouhovlnné a celkové RF kondenzačních stop v roce 2006 [38]



Příloha 3.3 ERF kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti v letech 1944 až 2011 [20]

Rok	ERF [Wm^{-2}]	Rok	ERF [Wm^{-2}]
1944	0,001	1978	0,011
1945	0,001	1979	0,012
1946	0,001	1980	0,012
1947	0,002	1981	0,012
1948	0,002	1982	0,012
1949	0,002	1983	0,012
1950	0,002	1984	0,013
1951	0,002	1985	0,014
1952	0,002	1986	0,015
1953	0,003	1987	0,016
1954	0,003	1988	0,017
1955	0,003	1989	0,019
1956	0,003	1990	0,019
1957	0,004	1991	0,019
1958	0,004	1992	0,020
1959	0,004	1993	0,022
1960	0,004	1994	0,024
1961	0,004	1995	0,025
1962	0,004	1996	0,027
1963	0,005	1997	0,028
1964	0,005	1998	0,029
1965	0,005	1999	0,031
1966	0,006	2000	0,033
1967	0,007	2001	0,033
1968	0,008	2002	0,033
1969	0,009	2003	0,034
1970	0,009	2004	0,038
1971	0,009	2005	0,040
1972	0,009	2006	0,042
1973	0,010	2007	0,044
1974	0,010	2008	0,046
1975	0,010	2009	0,044
1976	0,010	2010	0,048
1977	0,011	2011	0,050

Příloha 3.4 RF/ERF dané antropogenními činnostmi v roce 2011 [20]



Příloha 6.1 Naměřené kondenzační stopy

#	Datum	ICAO adresa	Kamera S	Kamera Z	Čas MATLAB (UTC)	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Doba trvání	Poznámky
1	20.5.2016	3C6626		x	7:46:02	9:45:37	38000	0:00:08	
2	20.5.2016	4B187D		x	8:30:35	10:30:44	40000	0:00:05	
3	20.5.2016	4B18F5		x	9:12:21	11:13:36	35950/ 36000	0:00:08	
4	20.5.2016	89613B	x		9:15:48	11:17:09	39000	0:00:14	
5	20.5.2016	471F66		x	9:18:39	11:19:54	35000	0:00:20	
6	20.5.2016	484131	x		10:16:03	12:16:56	37000	0:00:39	
7	20.5.2016	800720	x		10:21:26	12:22:28	35000	0:00:16	
8	20.5.2016	896357		x	10:23:43	12:23:24	35000	-	stopa nevznikla
9	20.5.2016	4BA92C		x	10:39:34	12:38:10	39000	0:00:08	
10	20.5.2016	80071E		x	10:41:04	12:38:37	35000	0:00:09	
11	20.5.2016	47A5BC	x		11:01:40	13:01:06	20475/ 24625	0:00:42	
12	20.5.2016	4BCCAA		x	11:05:38	13:05:57	37000	0:00:15	
13	20.5.2016	3C09EC	x		11:09:34	13:12:00	38000	0:00:11	
14	20.5.2016	780217	x		11:12:31	13:14:45	33000	0:00:07	
15	20.5.2016	4BB146		x	11:18:13	13:17:51	37000/ 36975	0:00:10	
16	20.5.2016	3C5CB5	x		11:58:34	13:56:38	18125/ 20575	0:00:08	
17	20.5.2016	471F5F		x	11:58:34	13:59:40	36000	0:00:08	
18	20.5.2016	4BA950		x	12:51:49	14:51:50	35000	0:00:04	
19	20.5.2016	4BCCB0		x	13:05:19	15:03:40	30750/ 34000	0:00:10	
20	20.5.2016	4B16B9	x		13:09:45	15:09:28	38025/ 37950	0:00:06	
21	20.5.2016	800732	x		13:35:41	15:35:45	41000/ 40975	0:00:09	
22	20.5.2016	400FF4	x		15:28:01	17:25:52	37000	0:00:50	
23	20.5.2016	4BA994	x		15:45:38	17:43:59	37050/ 37000	0:00:45	
24	21.5.2016	3C4982	x		4:24:30	6:24:32	18575/ 21125	0:00:09	
25	21.5.2016	3C49EE		x	4:30:57	6:28:12	35000	0:26:00	splynula s oblačností
26	21.5.2016	8990D3		x	4:34:16	6:34:18	36000/ 35975	0:01:00	
27	21.5.2016	4951D0		x	4:39:42	6:38:03	34000	0:02:24	
28	21.5.2016	484506	x		4:43:56	6:42:43	37000	0:03:01	
29	21.5.2016	3C09EC	x		4:46:36	6:45:51	37000	0:02:48	
30	21.5.2016	A9FA34		x	4:59:25	7:02:01	30025/ 33000	0:01:02	
31	21.5.2016	4B1616		x	5:09:45	7:08:34	38000	0:00:08	
32	21.5.2016	4407C1	x		5:12:28	7:10:48	38000	0:00:56	
33	21.5.2016	3C0CA2	x		5:20:01	7:19:15	35000	0:00:05	
34	21.5.2016	3C4581	x		5:41:10	7:44:48	30175/ 33900	0:02:40	splynula s oblačností

#	Datum	ICAO adresa	Kamera S	Kamera Z	Čas MATLAB (UTC)	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Doba trvání	Poznámky
35	21.5.2016	3C09EE	x		5:53:14	7:54:17	37000	0:01:44	
36	21.5.2016	3C5EEC	x		7:02:12	9:05:09	18200/ 20425	0:00:38	
37	21.5.2016	484162	x		7:38:23	9:34:40	37000	0:00:52	
38	21.5.2016	06A0BC		x	9:44:25	11:46:13	39000	0:00:10	
39	21.5.2016	4BA99A		x	9:47:55	11:47:53	36975/ 37000	0:00:42	
40	21.5.2016	4CA4ED		x	10:19:25	12:19:20	37000	0:00:13	
41	21.5.2016	43BE87		x	10:19:41	12:19:48	34000	0:00:06	
42	21.5.2016	4BAA45	x		12:20:46	14:16:39	35000	0:00:31	splynula s oblačností
43	21.5.2016	3C4982	x		12:32:58	14:34:02	18575/ 21375	0:00:41	
44	21.5.2016	780A3A		x	12:47:28	14:46:51	33000	0:01:00	splynula s oblačností
45	21.5.2016	3C5EF5	x		12:50:12	14:49:24	37025/ 37075	0:00:54	
46	21.5.2016	3C5465		x	12:58:43	15:00:08	34000	0:00:18	
47	21.5.2016	4B16BA		x	13:09:49	15:04:42	38000	0:00:30	
48	21.5.2016	485061	x		14:05:15	16:09:21	37000	0:04:23	
49	21.5.2016	40690E	x		14:20:21	16:19:52	35000	0:02:17	splynula s oblačností
50	21.5.2016	3C0CB2	x		14:35:00	16:32:57	37000	0:00:46	splynula s oblačností
51	21.5.2016	4BCEB5	x		14:43:11	16:40:18	29375/ 30800	0:00:20	
52	21.5.2016	471F4A	x		14:48:15	16:51:13	34975/ 35050	0:04:06	
53	21.5.2016	4BBC5A	x		14:55:20	16:58:50	25550/ 25025	0:01:07	
54	21.5.2016	406E64	x		15:11:14	17:11:23	36975/ 37000	0:06:00	
55	21.5.2016	484F15		x	15:11:13	17:11:18	14725/ 10050	0:00:31	
56	21.5.2016	406E66	x		15:15:23	17:14:02	36975/ 37000	0:08:30	splynula s oblačností
57	21.5.2016	3C5EE2		x	15:25:34	17:23:35	34975	0:01:00	
58	21.5.2016	3C6DCE	x		15:28:18	17:30:30	37000/ 36975	0:01:58	splynula s oblačností
59	21.5.2016	3C5EF9	x		15:34:45	17:34:06	37025/ 37000	0:03:15	splynula s oblačností
60	21.5.2016	4067F0	x		15:35:52	17:35:16	35000/ 34975	0:10:00	splynula s oblačností
61	21.5.2016	461F96		x	15:41:05	17:40:48	34050/ 33950	0:01:50	
62	21.5.2016	406A95		x	15:46:57	17:43:47	37000/ 37025	0:00:52	
63	21.5.2016	3C6DC7	x		15:54:27	17:51:10	35050	0:07:37	
64	21.5.2016	4794FD	x		15:56:00	17:51:34	37000	0:01:32	
65	21.5.2016	4067EE	x		16:01:21	17:59:07	34975	0:00:53	více než 0:00:53 – konec záznamu
66	22.5.2016	3C5463		x	4:25:21	6:29:38	34000	0:00:05	
67	22.5.2016	3C09DD		x	4:35:46	6:31:52	36975/ 37000	0:00:10	

#	Datum	ICAO adresa	Kamera S	Kamera Z	Čas MATLAB (UTC)	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Doba trvání	Poznámky
68	22.5.2016	4841D8		x	5:11:31	7:10:27	39000	0:00:12	
69	22.5.2016	392AF1		x	5:39:55	7:40:51	36000	0:00:05	
70	22.5.2016	4BD147		x	6:09:49	8:12:17	37000	0:00:12	
71	22.5.2016	4BAA04		x	6:25:23	8:22:28	36050	0:00:58	
72	22.5.2016	899116		x	6:28:00	8:30:32	38000	0:00:05	
73	22.5.2016	471EA8	x		8:03:47	10:03:55	33025/ 32975	0:01:37	splynula s oblačností
74	22.5.2016	484FDE		x	8:26:21	10:27:02	39000	0:05:00	splynula s oblačností
75	22.5.2016	471F60	x		8:29:59	10:29:23	37000	0:01:21	splynula s oblačností
76	22.5.2016	4CA848	x		8:32:51	10:31:37	37000	0:11:00	odváta mimo obraz
77	22.5.2016	4BAA04		x	8:41:53	10:41:56	35000/ 35025	0:01:41	splynula s oblačností
78	22.5.2016	471F87	x		8:54:47	10:56:36	36975/ 37000	0:01:23	
79	22.5.2016	4C01E3	x		8:59:07	10:57:58	36975/ 37000	0:05:42	
80	22.5.2016	47A034	x		9:10:58	11:10:02	21525/ 25525	0:00:25	
81	22.5.2016	4BA9CC	x		9:17:20	11:18:06	39000	0:04:44	splynula s oblačností
82	22.5.2016	471F64		x	9:17:50	11:16:48	35000	0:09:00	odváta mimo obraz
83	22.5.2016	4CA302	x		9:18:34	11:18:28	37000	0:09:00	odváta mimo obraz
84	22.5.2016	4407F3	x		9:22:52	11:20:37	33025	0:07:00	odváta mimo obraz
85	22.5.2016	4BD155	x		9:25:05	11:25:02	37000	0:01:24	
86	22.5.2016	4BCCAE	x		9:27:20	11:28:53	37000	0:02:23	splynula s oblačností
87	22.5.2016	3C4DD7	x		9:29:24	11:30:15	33000	0:01:00	splynula s oblačností
88	22.5.2016	06A0AD	x		9:38:10	11:37:56	39000	0:08:10	splynula s oblačností
89	22.5.2016	400F4C	x		9:53:46	11:54:02	37000	0:00:15	
90	22.5.2016	4BA94D	x		9:58:51	11:59:23	35000	0:09:00	odváta mimo obraz
91	22.5.2016	400D27	x		10:10:54	12:11:34	37000	0:00:10	
92	22.5.2016	3C4899	x		10:12:52	12:12:58	28550/ 26500	0:00:08	
93	22.5.2016	4BAA14	x		10:16:21	12:16:14	37050/ 37000	0:01:04	
94	22.5.2016	505C54	x		10:19:06	12:19:20	23750/ 27675	0:01:22	
95	22.5.2016	4BA99A		x	10:20:49	12:20:00	37025/ 37000	0:07:09	odváta mimo obraz
96	22.5.2016	8960DD		x	10:30:57	12:31:29	35000	0:10:44	splynula s oblačností
97	22.5.2016	A1775F	x		10:30:24	12:32:38	21150/ 25900	0:01:00	splynula s oblačností
98	22.5.2016	48455C	x		10:33:45	12:33:48	39025	0:03:34	splynula s oblačností
99	22.5.2016	4BCCA5		x	10:36:45	12:34:32	28875/ 31875	0:10:43	

#	Datum	ICAO adresa	Kamera S	Kamera Z	Čas MATLAB (UTC)	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Doba trvání	Poznámky
100	22.5.2016	800720	x		10:38:16	12:39:55	35000	0:08:00	splynula s oblačností
101	22.5.2016	4BA9E8		x	10:41:12	12:40:24	37000/ 36975	0:12:00	splynula s oblačností
102	22.5.2016	76CDA2	x		10:43:40	12:46:07	37000	0:07:00	splynula s oblačností
103	22.5.2016	3C0A4D	x		10:49:15	12:48:46	25000/ 27800	0:10:00	odváta mimo obraz
104	22.5.2016	451D87		x	10:49:26	12:51:52	33000	0:01:00	splynula s oblačností
105	22.5.2016	484165	x		10:51:19	12:52:28	37000	0:05:00	splynula s oblačností
106	22.5.2016	738057	x		11:06:53	13:05:55	33000	0:06:30	splynula s oblačností
107	22.5.2016	406ADF	x		11:08:23	13:09:34	33025/ 34525	0:12:37	
108	22.5.2016	4BCEB5	x		11:28:46	13:27:32	36975/ 37000	0:01:32	
109	22.5.2016	471F4B	x		11:29:34	13:29:33	37000	0:01:57	
110	22.5.2016	4BA8E8	x		11:44:30	13:43:42	37000	0:00:12	
111	22.5.2016	4BA90F	x		12:23:15	14:24:57	37000	0:08:41	
112	22.5.2016	4BAA86	x		12:26:59	14:27:25	34975/ 35000	0:10:40	odváta mimo obraz
113	22.5.2016	4BAB2C	x		12:39:26	14:40:06	35000	0:00:13	
114	22.5.2016	3C6423	x		12:48:42	14:48:36	23125/ 26025	0:00:07	
115	22.5.2016	3C6496		x	13:10:03	15:11:22	35975	0:00:08	
116	22.5.2016	4B16BB		x	13:14:16	15:15:54	38000	-	stopa nevznikla
117	22.5.2016	406C72	x		13:23:10	15:23:19	37025/ 37000	0:01:24	
118	22.5.2016	424052	x		13:27:35	15:29:35	35975/ 36025	0:08:17	
119	22.5.2016	4843F2	x		13:35:43	15:35:43	35000	0:07:10	odváta mimo obraz
120	22.5.2016	471E16		x	13:46:27	15:50:34	40000	0:00:03	
121	22.5.2016	471F8A	x		14:02:45	16:03:32	37025/ 36975	0:00:42	
122	22.5.2016	484411	x		14:10:04	16:10:38	37000	0:00:20	
123	22.5.2016	896113	x		14:19:02	16:18:12	37000	0:00:42	
124	23.5.2016	4D0102		x	4:52:46	6:51:04	33975/ 34000	0:00:19	
125	23.5.2016	3C4882		x	4:53:49	6:55:32	35025/ 35000	0:00:29	
126	23.5.2016	47340E		x	5:01:04	7:02:20	36000	0:02:00	splynula s oblačností
127	23.5.2016	3C5447		x	5:03:30	7:02:47	35000/ 33400	0:10:00	splynula s oblačností
128	23.5.2016	4404E0	x		5:16:26	7:19:30	38025/ 37975	0:06:06	odváta mimo obraz
129	23.5.2016	3430C3		x	5:35:13	7:34:16	36000	0:00:38	
130	23.5.2016	505C54	x		5:40:54	7:38:48	20425/ 24975	0:00:57	
131	23.5.2016	40067F		x	6:05:18	8:04:21	36950	0:00:05	
132	23.5.2016	4841D5	x		6:24:20	8:24:10	41000	0:05:32	odváta mimo obraz

#	Datum	ICAO adresa	Kamera S	Kamera Z	Čas MATLAB (UTC)	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Doba trvání	Poznámky
133	23.5.2016	484F13	x		6:27:58	8:27:16	37000	0:01:19	
134	23.5.2016	AA8499		x	6:33:54	8:32:36	35000	0:00:50	
135	23.5.2016	4067F2	x		6:42:02	8:41:38	36975/ 37000	0:01:01	
136	23.5.2016	4CA76F	x		6:59:00	9:00:14	37000	0:00:14	
137	23.5.2016	4404E0	x		7:17:44	9:18:01	39000/ 39025	0:00:15	
138	23.5.2016	4067F1	x		7:55:33	9:54:30	36975/ 37000	0:00:16	
139	23.5.2016	3C0A4D	x		8:09:43	10:09:00	27100/ 23100	0:00:20	
140	23.5.2016	4066D0		x	8:13:09	10:13:38	37000	0:00:24	
141	23.5.2016	4B161C		x	8:20:06	10:22:31	36000	0:00:08	
142	23.5.2016	4BAA69		x	8:27:46	10:26:28	35000	0:00:13	
143	23.5.2016	451DBB	x		9:49:17	11:49:56	33000	0:03:49	
144	23.5.2016	406CAA	x		9:54:14	11:53:45	35000	0:00:10	
145	23.5.2016	505C54	x		10:02:27	12:03:02	19625/ 24425	0:00:50	
146	23.5.2016	800720	x		10:58:39	12:57:17	35000	0:01:00	
147	23.5.2016	4BAB2F		x	12:11:55	14:13:45	34975/ 35000	0:01:10	
148	23.5.2016	4BA98F	x		13:04:50	15:04:27	38000	0:00:13	
149	23.5.2016	4BD149	x		13:18:26	15:18:52	25050/ 24775	0:00:06	
150	24.5.2016	C04081	x		7:23:52	9:22:37	38975	-	neměřitelná
151	24.5.2016	4A082A	x		11:17:40	13:16:07	33000/ 32975	0:00:12	
152	26.5.2016	4242C3		x	10:18:12	12:17:36	34025/ 34000	0:00:03	
153	26.5.2016	896463		x	10:23:06	12:25:56	39000	0:00:04	
154	26.5.2016	3C70C1		x	11:59:40	14:00:40	31000/ 30975	-	stopa nevznikla
155	26.5.2016	8960F7		x	14:44:56	16:44:30	37000	-	stopa nevznikla
156	26.5.2016	4066FA		x	15:19:53	17:22:07	33000	-	stopa nevznikla
157	27.5.2016	3C4585		x	4:13:36	6:15:12	28100/ 31400	0:02:00	splynula s oblačností
158	27.5.2016	3C0CA6		x	4:27:38	6:30:10	36975/ 37000	0:00:05	
159	27.5.2016	3C65A5		x	4:36:32	6:35:23	38000	0:00:05	
160	28.5.2016	3C4982		x	4:18:37	6:16:37	13950/ 21350	0:00:08	
161	28.5.2016	3C09DD	x		4:38:39	6:38:59	38975/ 39025	0:00:04	
162	28.5.2016	3C65A3		x	4:38:39	6:37:32	40000	0:00:07	
163	28.5.2016	3C4882		x	4:52:17	6:50:27	37000	0:00:04	
164	28.5.2016	3C0A4D		x	5:08:28	7:06:43	28625/ 30900	0:00:08	
165	28.5.2016	4404E1		x	5:12:28	7:12:17	38025	0:00:04	
166	28.5.2016	484EE5		x	5:33:48	7:33:55	35000	0:00:05	
167	28.5.2016	485206		x	5:45:40	7:43:05	16450/ 15350	0:00:06	

#	Datum	ICAO adresa	Kamera S	Kamera Z	Čas MATLAB (UTC)	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Doba trvání	Poznámky
168	28.5.2016	3C4588		x	6:08:05	8:06:04	25450/ 28200	0:03:00	splynula s oblačností
169	28.5.2016	3C674F		x	7:26:46	9:26:56	35000	0:00:04	
170	28.5.2016	440552		x	7:27:09	9:27:32	39075/ 39050	0:00:04	
171	28.5.2016	4404E1	x		7:29:33	9:29:31	37025/ 36975	0:06:10	odváta mimo obraz
172	28.5.2016	484555	x		7:45:36	9:42:30	37000	0:00:05	
173	28.5.2016	471F55		x	8:07:01	10:09:02	37025/ 36975	0:00:05	
174	28.5.2016	8961A2	x		9:16:20	11:17:02	37000	0:00:08	
175	28.5.2016	4CA4F3	X		9:29:41	11:30:50	37000	0:00:14	
176	28.5.2016	896353	x		9:47:54	11:48:32	33000	0:00:05	
177	28.5.2016	4BA8D2		x	9:51:20	11:53:33	30950/ 33625	0:00:04	
178	28.5.2016	406B91		x	10:02:04	12:02:07	16450/ 11025	-	stopa nevznikla
179	28.5.2016	896306		x	10:18:38	12:19:17	33000	0:00:04	
180	28.5.2016	896326		x	10:26:15	12:26:35	35000	0:00:04	
181	28.5.2016	4B8E04		x	11:34:21	13:36:39	37000	0:00:06	
182	28.5.2016	3C6464	x		12:43:39	14:43:59	38000	0:00:07	
183	28.5.2016	3C6427	x		12:48:47	14:51:00	30475/ 21025	0:00:14	
184	28.5.2016	3C60D7	x		13:03:39	14:59:42	37000	0:00:07	
185	28.5.2016	ABC948	x		14:29:13	16:28:48	36000	0:00:11	
186	28.5.2016	4B8E0D	x		14:39:11	16:39:42	39000	0:00:08	
187	28.5.2016	896212	x		14:58:44	16:57:58	35000	0:00:12	
188	28.5.2016	471F4D	x		15:17:11	17:18:16	35025/ 35000	0:00:11	
189	28.5.2016	3C6DD3	x		15:24:20	17:25:53	36850/ 37025	0:00:09	
190	29.5.2016	3C09DB		x	4:36:44	6:34:44	38975/ 39050	0:00:05	
191	29.5.2016	3C4882	x		4:50:27	6:50:49	37025/ 36950	0:00:11	
192	29.5.2016	3430C3		x	5:37:24	7:35:10	37975/ 38000	0:00:10	
193	29.5.2016	3C6427		x	5:48:57	7:49:35	23125/ 25675	0:00:07	
194	29.5.2016	424057		x	6:03:43	8:05:01	34050/ 34000	0:00:06	
195	29.5.2016	3C6612		x	6:09:18	8:07:18	36025/ 35975	0:00:07	
196	29.5.2016	471F63		x	8:06:33	10:07:30	37000/ 37050	0:01:42	splynula s oblačností
197	29.5.2016	4B1617		x	8:13:32	10:13:20	38000/ 38050	0:01:02	splynula s oblačností
198	29.5.2016	4CA8AF		x	8:15:08	10:15:36	34000	0:01:06	splynula s oblačností
199	29.5.2016	3C0A47	x		8:47:25	10:49:06	28000	0:00:13	
200	29.5.2016	4249B2		x	9:22:04	11:21:15	36000	0:00:05	
201	29.5.2016	4841A9	x		9:28:10	11:28:18	41000	0:00:23	

#	Datum	ICAO adresa	Kamera S	Kamera Z	Čas MATLAB (UTC)	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Doba trvání	Poznámky
202	29.5.2016	4A0832		x	11:17:28	13:18:12	35000	0:00:40	splynula s oblačností
203	29.5.2016	4BB145		x	11:20:24	13:23:12	35000	0:01:35	
204	29.5.2016	732442	x		12:23:11	14:26:30	32975	0:01:05	splynula s oblačností
205	29.5.2016	484B90	x		12:52:04	14:51:02	39000	0:00:15	
206	29.5.2016	49D093		x	12:59:29	15:00:22	25925/ 19950	0:00:20	
207	29.5.2016	4B16BB		x	13:13:52	15:12:30	38025/ 37975	0:00:16	
208	29.5.2016	3C5464		x	13:32:05	15:31:35	32000/ 34000	0:00:05	
209	29.5.2016	3C6427		x	13:44:21	15:44:27	24825/ 27350	0:00:10	
210	29.5.2016	4BBC59	x		13:50:16	15:49:56	34975/ 34950	0:00:04	
211	29.5.2016	45AC54		x	13:51:32	15:51:31	22100/ 26850	0:00:11	
212	29.5.2016	800B15		x	13:53:01	15:53:31	40000	0:00:05	
213	29.5.2016	406A9C		x	14:00:48	16:01:07	39000/ 38975	0:00:06	
214	29.5.2016	3C4586	x		14:01:56	16:01:21	28900/ 33000	0:00:10	
215	29.5.2016	896184	x		14:45:21	16:44:53	39000	0:11:00	splynula s oblačností
216	29.5.2016	4007ED	x		15:02:50	17:04:12	35000	0:00:08	
217	29.5.2016	461F65	x		15:13:49	17:13:08	38000/ 37375	0:00:07	
218	29.5.2016	89620B	x		15:15:05	17:15:12	35000	0:00:07	
219	29.5.2016	40104F	x		15:39:34	17:40:39	32975	0:00:04	
220	29.5.2016	3C4B4C	x		15:45:43	17:46:03	34025/ 34050	0:00:06	
221	29.5.2016	406CAB	x		15:59:52	17:59:13	37000	-	neměřitelná – konec záznamu
222	30.5.2016	4CA80E	x		5:49:09	7:48:47	37000	0:01:00	splynula s oblačností
223	30.5.2016	406A62		x	9:52:17	11:54:18	37025/ 37000	0:00:04	
224	30.5.2016	479EE7		x	10:10:10	12:09:46	18700/ 23300	0:00:04	
225	30.5.2016	406B91		x	13:20:13	15:19:32	15725/ 10350	-	stopa nevznikla
226	30.5.2016	4B160D		x	13:29:06	15:31:40	36000	0:00:03	
227	30.5.2016	4A08E2		x	13:39:48	15:38:48	35000	-	stopa nevznikla
228	30.5.2016	4BD149	x		13:50:02	15:51:26	37000	0:00:03	
229	5.2.2016	4BA912	x		13:05:43	14:06:02	36975/ 37000	0:00:49	splynula s oblačností
230	5.2.2016	4BAA84	x		13:07:38	14:07:48	35000	0:01:48	
231	5.2.2016	471F84	x		13:12:58	14:14:52	37025/ 37000	0:01:42	
232	5.2.2016	780A3E	x		13:19:21	14:21:27	32975/ 33000	0:04:42	odváta mimo obraz
233	5.2.2016	899116	x		13:24:58	14:27:03	33000	0:04:00	odváta mimo obraz

#	Datum	ICAO adresa	Kamera S	Kamera Z	Čas MATLAB (UTC)	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Doba trvání	Poznámky
234	5.2.2016	3C6424	x		13:57:56	14:58:09	24950/ 27375	0:00:54	splynula s oblačností
235	5.2.2016	8005EB	x		14:53:54	15:56:08	36975/ 37000	0:00:28	
236	5.2.2016	8960EB	x		14:53:35	15:55:38	35000	0:00:42	
237	5.2.2016	471F50	x		15:01:34	16:03:52	34975/ 35000	0:00:15	
238	5.2.2016	06A0A6	x		15:19:47	16:21:32	41000/ 40975	0:00:50	
239	5.2.2016	896120	x		15:27:16	16:29:30	33000	0:00:30	splynula s oblačností
240	5.2.2016	4BAA0C	x		15:35:57	16:38:27	34975/ 35000	0:00:12	
241	6.2.2016	4BD14C		x	7:02:39	8:03:33	35000	0:02:07	splynula s oblačností
242	6.2.2016	461FA0	x		7:57:45	8:59:49	34025	0:09:30	odváta mimo obraz
243	6.2.2016	4407C1	x		8:10:50	9:13:08	37025	0:07:50	
244	6.2.2016	4BCCA9	x		8:30:36	9:32:56	31000/ 32350	0:08:50	odváta mimo obraz
245	6.2.2016	3C5EF8	x		8:43:54	9:42:38	38000/ 38025	0:18:11	odváta mimo obraz
246	6.2.2016	3C5EF0	x		8:49:04	9:48:16	38000/ 37975	0:01:49	splynula s oblačností
247	6.2.2016	4B1904	x		8:57:54	9:56:09	38000	0:11:20	splynula s oblačností
248	6.2.2016	3C4584	x		9:07:46	10:06:17	31000/ 34950	0:01:52	splynula s oblačností
249	6.2.2016	4BAA75	x		9:22:40	10:23:56	34950	0:07:00	odváta mimo obraz
250	6.2.2016	8963A7	x		9:46:00	10:48:06	33000	0:13:20	odváta mimo obraz
251	6.2.2016	896312	x		9:51:33	10:53:36	35000	0:14:39	splynula s oblačností
252	6.2.2016	8961E6	x		10:03:38	11:05:38	37000	0:11:09	odváta mimo obraz
253	6.2.2016	484164		x	10:12:04	11:14:19	39000	0:07:18	splynula s oblačností
254	6.2.2016	8963D6	x		10:14:20	11:16:28	33000	0:01:14	splynula s oblačností
255	6.2.2016	47340B	x		10:14:18	11:16:34	35000/ 34975	0:11:11	odváta mimo obraz
256	6.2.2016	4BA9CD	x		10:20:22	11:22:04	39000/ 39025	0:11:17	splynula s oblačností
257	6.2.2016	45AC4B		x	10:25:01	11:25:52	35950/ 36025	0:02:07	splynula s oblačností
258	6.2.2016	400B44	x		10:34:30	11:36:38	35000	0:07:52	odváta mimo obraz
259	6.2.2016	76CEF6	x		10:38:17	11:40:23	30975/ 31000	0:10:00	odváta mimo obraz
260	6.2.2016	8962E6	x		10:43:26	11:45:30	35000	0:09:34	odváta mimo obraz
261	6.2.2016	4BCDCA	x		11:17:05	12:18:53	37000	0:01:30	odváta mimo obraz
262	6.2.2016	4691C1	x		11:25:11	12:28:07	37000	0:04:20	splynula s oblačností
263	6.2.2016	4B8E06	x		11:36:04	12:38:26	36975	0:13:15	odváta mimo obraz

#	Datum	ICAO adresa	Kamera S	Kamera Z	Čas MATLAB (UTC)	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Doba trvání	Poznámky
264	6.2.2016	4BAA81	x		13:15:36	14:18:07	35050/ 34975	0:00:58	splynula s oblačností
265	6.2.2016	899117	x		13:29:49	14:31:54	33000	0:00:58	splynula s oblačností
266	6.2.2016	4BA945	x		13:38:44	14:39:13	32000	0:00:14	
267	6.2.2016	4BA8D0	x		13:53:45	14:55:50	33000	0:00:22	
268	6.2.2016	484442		x	14:15:50	15:16:09	39000	0:00:27	
269	6.2.2016	896313	x		14:22:33	15:24:29	33500/ 35000	0:08:00	splynula s oblačností
270	6.2.2016	484445	x		14:24:09	15:25:47	39000	0:04:03	splynula s oblačností
271	6.2.2016	4851AD	x		14:28:32	15:30:18	37000/ 36975	0:02:47	splynula s oblačností
272	6.2.2016	48434C		x	14:40:12	15:39:50	36000/ 35975	0:03:58	
273	6.2.2016	06A0B5	x		14:54:01	15:55:44	38975/ 39000	0:12:00	odváta mimo obraz
274	6.2.2016	06A0AC	x		15:18:25	16:20:12	41000	0:10:10	odváta mimo obraz
275	6.2.2016	4BAA67	x		15:53:08	16:55:12	32925/ 33025	0:00:30	
276	6.2.2016	406669	x		15:55:26	16:57:22	37025/ 36950	0:06:07	splynula s oblačností
277	6.2.2016	471F63	x		16:06:53	17:08:45	34025/ 34075	0:00:56	
278	6.2.2016	47340B	x		16:07:40	17:09:25	34975/ 35000	0:09:25	
279	6.2.2016	4BAA13	x		16:40:03	17:42:06	34975	0:01:02	
280	27.2.2016	4407DA		x	5:59:21	7:01:16	38000/ 37975	0:07:00	odváta mimo obraz
281	27.2.2016	4243D5		x	6:35:18	7:35:52	36000	0:00:07	
282	27.2.2016	3C666A		x	7:06:06	8:07:53	36975/ 37000	0:00:16	
283	27.2.2016	34264A		x	7:09:26	8:10:08	36025/ 36000	0:06:30	odváta mimo obraz
284	27.2.2016	4407DA	x		8:14:05	9:13:31	37025/ 37000	0:00:12	splynula s oblačností
285	27.2.2016	471F62	x		8:43:39	9:46:14	35000	0:09:00	splynula s oblačností
286	27.2.2016	4BA993	x		9:02:36	10:02:40	28525/ 25500	0:08:00	odváta mimo obraz
287	27.2.2016	780A28	x		9:09:59	10:12:21	33050	0:07:18	odváta mimo obraz
288	27.2.2016	4BCDC8		x	9:25:34	10:27:19	37000	0:01:43	
289	27.2.2016	49D027		x	9:42:26	10:43:35	38025	0:01:56	
290	27.2.2016	4CA2D4	x		10:00:31	11:03:51	37000	0:00:18	
291	27.2.2016	8962E5	x		10:23:53	11:26:58	35000	0:00:52	splynula s oblačností
292	27.2.2016	76CEE7	x		10:40:12	11:43:00	31000	0:05:07	odváta mimo obraz
293	27.2.2016	4BA993		x	11:02:04	12:03:41	30200/ 33725	0:01:34	splynula s oblačností
294	27.2.2016	4BA90F	x		11:23:18	12:26:05	36975/ 37000	0:00:17	
295	27.2.2016	4BCCAB	x		11:29:02	12:31:42	35000	0:01:04	

#	Datum	ICAO adresa	Kamera S	Kamera Z	Čas MATLAB (UTC)	Čas objevení (LT)	Výška [ft]	Doba trvání	Poznámky
296	27.2.2016	4CA5F1	x		11:37:11	12:38:01	37000	0:00:19	
297	27.2.2016	48455B	x		11:38:16	12:39:53	39000	0:00:23	
298	27.2.2016	4A815C	x		11:38:41	12:43:14	30000	0:02:20	odváta mimo obraz
299	27.2.2016	3C5EF2	x		11:45:35	12:48:23	35025/ 34975	0:01:04	
300	27.2.2016	3C6463		x	12:17:57	13:19:20	35000/ 34975	0:00:37	
301	27.2.2016	406FD9	x		12:42:57	13:45:37	35675/ 36975	0:05:36	odváta mimo obraz