



HISTÓRIA LETECKEJ METEOROLÓGIE

Timon Havlík
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Miriam Jarošová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article traces the evolution of aviation meteorology from its earliest synoptic observations to today's AI-driven forecasting systems. Through a structured literature review and analysis of key milestones—ranging from Aristotle's *Meteorologica* and early instruments (anemometer, barometer) to the establishment of Meteor R.E. in World War I, the METAR/TAF standardization in 1968, and the founding of ECMWF—this study highlights how terminology, data formats and distribution methods have continuously advanced. A comparative assessment of past and present practices reveals dramatic improvements in data timeliness (hours to seconds), measurement accuracy, and global coverage via ASOS/AWOS, GTS/SWIM and satellite networks (MetOp, Meteosat). Finally, it examines emerging applications of AI and support vector machines for hyper-local nowcasting and 4D trajectory planning, underscoring the need for ongoing international collaboration and technological innovation to meet the challenges of an ever-changing atmosphere.

Keywords

history, terminology, communication, automatization, aviation meteorology

1. Úvod

Počasiu sprevádza letectvo už od prvého úspešného letu bratov Wrightovcov v roku 1903, keď piloti museli spoliehať na jednoduché pozorovania vetra a oblačnosti [1]. Počas prvej svetovej vojny bola v lete 1915 zriadená prvá operatívna vojenská meteorologická služba „Meteor R.E.“, ktorá zásadne zlepšila predpovede pre letecké operácie [2]. V civilnom sektore bol potom od 1. januára 1968 zavedený jednotný formát METAR a TAF pre pravidelné správy o počasí na letiskách [3] [4]. Dnešné služby využívajú prepojené siete pozemných staníc, automatizované systémy ako ASOS/AWOS, satelitné dáta aj globálne telekomunikačné siete, aby pilotom i dispečerom priniesli presné a včasné meteorologické informácie [5]. Tento článok teda obsahuje prepojenie historických míľnikov, vývoja terminológie a moderné technológie, aby sa poukázalo, ako sa letecká meteorológia formovala od úplného začiatku až po predpovede riadené AI.

2. Metodika a metódy skúmania

Pre spracovanie tejto problematiky som si ju rozdelil na tri časti:

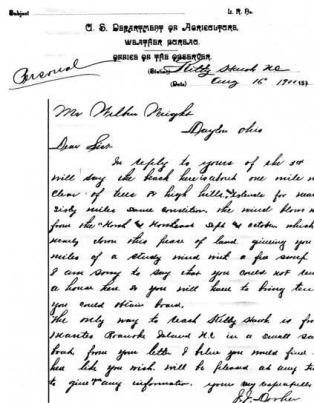
- História leteckej meteorológie
- Vývoj názvoslovia, distribúcie informácií pre letectvo
- Porovnanie minulosti a súčasnosti

Informácie pre spracovanie určitých bodov tejto problematiky boli čerpané z rôznych internetových zdrojov. Na doplnenie a overenie faktov som využil oficiálne stránky ako ICAO, WMO či EUMETSAT, ako aj rôzne odborné články.

3. Začiatky leteckej meteorológie

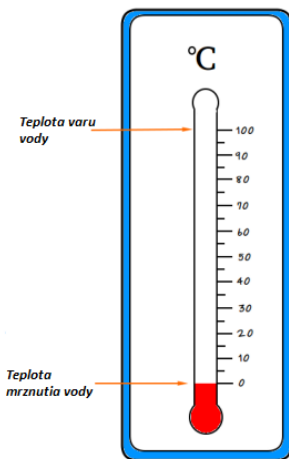
Aj keď sa meteorológia ako veda formovala už počas antiky a renesancie, jej priama aplikácia v letectve bola stále iba v počiatkoch. K niektorým z kľúčových prác a prístrojov, ktoré položili základy pre neskorší rozvoj leteckej meteorológie patria:

- Dielo *Meteorologica* – Aristoteles (4. st. p.n.l.) vo svojom diele popísal a klasifikoval vietor, oblačnosť, zrážky a hmlu, čím stanovil prvé systematické rozdelenie atmosférických javov, aj keď dnes už vieme že jeho tvrdenia boli nepravdivé [6]
- Anemometer – Leon Battista Alberti – prvé anemometre (1450) premieňali silu vetra na rotačný pohyb lopatiek a tým umožnili prvé kvantitatívne meranie rýchlosti vetra [7]
- Teploměr – Santorio Santorio (1612) – bolo zariadenie so vzduchom a kvapalinou v trubici reagujúce na zmeny teploty vizuálnym posunom hladiny (predchodca kalibrovaného teplomera) [8]



Obrázok 1: List pre bratov Wrightovcov obsahujúci aj informácie o poveternostných podmienkach [1]

- Barometer – Evangelista Torricelli (1643 - 1644) – vynášiel ortuťový barometer na meranie atmosférického tlaku, vďaka ktorému bolo možné spoľahlivejšie odhadovať zmeny počasia [9]
- Predpovede – aj keď meteorologické stanice dokázali zaznamenávať dáta, konzistentné a presné predpovede pred Prvou svetovou vojnou stále chýbali [10]
- Celsiova teplotná stupnica (18. stor.) – Anders Celsius zaviedol Celsiovu stupnicu, ktorá mala pri bode varu vody hodnotu 0°C a pri bode mrazenia vody 100°C, avšak do dnešnej podoby bola otočená po jeho smrti [11]
- Synoptické mapy (60. roky 19. stor.) – Francis Galton vytvoril prvú mapu zobrazujúcu tlak, teplotu a počasie z údajov z telegrafickej siete, čím položil základy moderných synoptických máp [6]



Obrázok 2: Celsiova stupnica v dnešnej podobe [12]

4. Vývoj v období Prvej svetovej vojny do 90. rokov 20. storočia

Počas Prvej svetovej vojny (1915) Britská armáda zriadila prvú vojenskú meteorologickú jednotku pod názvom *Meteor R.E.*, ktorá pilotom poskytovala delostrelecké korekcie a prvé operatívne letecké predpovede. [13] Počas medzivojnového obdobia sa civilné meteorologické služby rozširovali aj na našom území. V decembri 1921 vznikla Letecká poveternostná stanica č. 2 Košice, zriadená na starom košickom letisku [14] a v júli 1922 Letecká poveternostná stanica Bratislava-Vajnory [15], ktoré poskytovali pravidelnú správy pre pilotov civilného i vojenského letectva. V roku 1937 vyšla odborná publikácia od Gustava Swobodu s názvom *Letecká meteorologie i poveternostní služba letecká* a zároveň bola do českého jazyka preložená aj publikácia od Sergeja Chromovova *Úvod do synoptického rozboru počasí* Mikulášom Končekom. [16] Druhá svetová vojna urýchlila technologický rozvoj – zaviedli sa rádiové sondy, radarové merania oblačnosti a taktické predpovedanie počasia pre invázne operácie. [17] Povojnová konsolidácia začala Chicagskou konvenciou (1944) [18] a založením ICAO (1947), ktoré v roku 1948 prijalo Annex 3 s prvými medzinárodnými štandardmi pre letecké meteorologické služby [19] a v roku 1950 vznikla WMO na koordináciu globálnej výmeny údajov. [20] Následné desaťročia sa postupne budovali rádiové sondy

pre výškové merania a začleňovali sa národné stanice do globálnych sietí. Zlomovým bodom sa stal rok 1975, keď vzniklo Európske centrum pre strednodobé predpovede počasia (ECMWF), ktoré zjednotilo modelovanie predpovedí v celej Európe. [21] Z oblasti terminológie boli v tomto období zavedené aj dve dôležité formy poskytovania informácií o meteorologických podmienkach na letisku, a to METAR a TAF. METAR poskytuje informácie o aktuálnom počasi na letisku, pričom TAF poskytuje predpoveď počasia na dobu 24-30 hodín [22].

METAR LZIB 220230Z 29006KT 9999 FEW016 14/11 Q1013 NOSIG=

Obrázok 12: Príklad správy METAR [23]

5. Súčasný stav a budúcnosť leteckej meteorológie

Od začiatku 90. rokov prišlo k zásadnej transformácii leteckej meteorológie. Manuálne pozorovacie a komunikačné metódy nahradili automatizované systémy a digitálna výmena dát. Súčasný a možná budúcnosť tohto odvetvia je možná obsiahnuť v nasledujúcich bodoch:

- Automatizované systémy ASOS/AWOS – poskytujú kontinuálne merania teploty, tlaku, vetra a viditeľnosti priamo na letiskách bez potreby neustálej ľudskej prítomnosti [24]
- Globálny komunikačný systém GTS – je prevádzkovaný Svetovou meteorologickou organizáciou a zabezpečuje rýchlu a štandardizovanú výmenu meteorologických údajov [25]
- EUMETNET – je medzinárodné zoskupenie 33 európskych národných meteorologických služieb, ktoré koordinuje programy ako OPERA, E-AMDAR, teda výskumné projekty zamerané na zlepšenie kvality a jednotnosti meteorologických dát v Európe [26]
- MetOp satelity – sú polárne orbitálne družice, ktoré neustále zbierajú vysokorozlišné údaje o atmosfére, oceánoch a povrchu, kľúčové pre numerické modelovanie a klimatickú monitorovaciu sieť [27]
- SWIM – súčasť SESARu ako štandardizovaná výmena meteorologických a letových dát, vrátane 4D „weather cube“, ktorý umožňuje plynulú integráciu presných predpovedí priamo do riadenia letovej prevádzky [28]
- AI predpovede – od februára 2025 je v prevádzke prvý plne operačný, strojovo učeními riadený model AIFS, ktorý beží súbežne s IFS. AIFS dosahuje približne 20% lepšiu presnosť v trasách tropických cyklón a spotrebuje tisícnásobne menej energie na jeden prognostický cyklus [29]
- 4D trajektórie – integrujú čas ako štvrtú dimenziu, čo umožňuje optimalizovať plánovanie a bezpečnosť letov s ohľadom na predpovedané poveternostné zmeny [30]
- ATN/IPS (Aeronautical Telecommunication Network – Internet Protocol Suite) – systém, ktorý ponúka výmenu OPMET dát vo formáte IWXXM/XML, ktorý od 90. rokov nahrádza staršie telegrafné siete [31]

- AI a SVM – moderné systémy využívajú strojové učenie (neurónové siete, SVM – support vector machines) na automatizovanú detekciu nebezpečných javov, optimalizáciu trás a krátkodobé predpovede s vyššou presnosťou [32] [33]

6. Porovnanie minulosti a súčasnosti

Kedysi bola letecká meteorológia záležitosťou jednotlivcov, ktorý získavali potrebné meteorologické informácie manuálnymi meraniami. Ručne sa skladali synoptické mapy a správy sa šírili telegrafom v hodinových a niekedy až denných intervaloch. Bezpečnosť letov závisela od skúseností meteorológov a pilotov, ktorí vyhodnocovali obmedzené meteorologické informácie s často veľkými medzerami v pokrytí vysokých výšok či oceánov. Dnes už máme k dispozícii nepretržite plne automatické pozorovacie siete (ASOS/AWOS), globálnu telekomunikačnú infraštruktúru GTS/SWIM s prenášaním OPMET správ v reálnom čase a rozsiahlu sieť rádiových sond a satelitov (MetOp, Meteostat), ktoré nám poskytujú trojrozmerné dáta z celej planéty. Numerické modely ECMWF vrátane AI-riadeného AIFS a SVM-algoritmov automaticky riadia presnejšie predpovede a hyperlokálny nowcasting, čo znamená lepšiu optimalizáciu trás, flexibilnejšie plánovanie a výrazne vyššiu odolnosť voči rôznym nebezpečným javom. Výsledkom je nárast letovej bezpečnosti, efektivity paliva aj dostupnosti meteorologickej podpory pre každý typ letov.

7. Záver

Prehľad histórie leteckej meteorológie nám ukazuje, že táto disciplína prešla od prvotných synoptických pozorovaní a ručne zhotovených máp k vojenským predpovediam počas dvoch vojenských konfliktov k neskôr medzinárodným štandardom ako sú METAR a TAF. Súčasná sieť ASOS/AWOS, GTS/SWIM a satelitné programy MetOp či Meteostat zabezpečujú takmer okamžitý prenos a vysokú presnosť meteorologických dát, čo zásadne zvyšuje bezpečnosť a efektivitu leteckej dopravy. Z terminologického hľadiska sme prešli od rôznych pomenovaní v rôznych krajinách k digitálnym formátom IWXXM a protokolom ATN/IPS, ktoré umožňujú plne automatizovanú výmenu OPMET údajov. Budúcnosť leteckej meteorológie spočíva v ďalšej integrácii umelej inteligencie, strojového učenia a hyperlokálneho nowcastingu do existujúcich systémov SWIM, čo otvorí nové možnosti o predikcii krátkodobých nebezpečných javov a optimalizácii letových trás v reálnom čase. Aby bola letecká meteorológia dosiahnuť týchto cieľov, je nevyhnutná medzinárodná spolupráca, inovácia technológií a štandardizácia protokolov, aby sme boli pripravení čeliť výzvam meniacich sa klimatických podmienok.

Referencie

- [1] National Weather Service, „weather,“ 2013. [Online]. Available: <https://www.weather.gov/mhx/FirstFlight>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [2] Met Office, „metoffice,“ [Online]. Available: <https://www.metoffice.gov.uk/research/library-and-archive/archive-hidden-treasures/end-of-world-war-one>. [Cit. 27 Apríl 2025].

- [3] Isle of wight weather, „isleofwightweather,“ [Online]. Available: <https://www.isleofwightweather.co.uk/skymet.htm>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [4] T. Vasquez, „ifr-magazine,“ [Online]. Available: <https://ifr-magazine.com/weather/taf-dissected/>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [5] Pilot Institute, „pilotinstitute,“ 23 Máj 2023. [Online]. Available: <https://pilotinstitute.com/atis-vs-awos-vs-asos/>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [6] C. A. d. S. Valdir Adlison Steinke, „mdpi,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2225-1154/5/1/23>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [7] APPEL News Staff, „appel.nasa,“ 29 Máj 2007. [Online]. Available: https://appel.nasa.gov/2010/02/28/ao_2-3_f_anemometer-html/. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [8] istranet, „istranet,“ 23 Október 1999. [Online]. Available: <https://www.istranet.org/istria/illustri/santorio/index.htm>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [9] S. P. Raikar, „britannica,“ 31 December 2024. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/mercury-barometer>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [10] B. Sheils, „smithsonianmag,“ 18 Máj 2017. [Online]. Available: <https://www.smithsonianmag.com/history/how-world-war-i-changed-weather-good-180963360/>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [11] astro, „astro,“ [Online]. Available: https://www.astro.uu.se/history/Celsius_eng.html. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [12] math-dictionary, „math-dictionary,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.math-dictionary.com/celsius-scale.html>. [Cit. 24 Apríl 2025].
- [13] Met Office, „metoffice,“ [Online]. Available: <https://www.metoffice.gov.uk/research/library-and-archive/archive-hidden-treasures/first-military-forecast>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [14] D. V. Jozef Pecho, „shmu,“ 29 December 2021. [Online]. Available: <https://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=1186>. [Cit. 27 Apríl 2025].
- [15] Jozef Pecho, Dalibor Výberčim Branislav Chvíla, „shmu,“ 13 Január 2022. [Online]. Available: <https://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=1188>. [Cit. 24 Apríl 2025].

- [16] vojzesl, „vojzesl,“ [Online]. Available: www.vojzesl.cz/prispevky/100_let_SUM.html. [Cit. 27 April 2025].
- [17] P. Edward J. Hopkins, „meteor.wisc,“ 10 Jún 1996. [Online]. Available: www.meteor.wisc.edu/~hopkins/aos100/wxi-raob.htm. [Cit. 27 April 2025].
- [18] I. M. Čech, „dspace.cuni,“ 14 December 2015. [Online]. Available: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/80844/DPTX_2013_1_11220_0_177424_0_145560.pdf. [Cit. 27 April 2025].
- [19] pacificmet, „pacificmet,“ [Online]. Available: <https://www.pacificmet.net/sites/default/files/inline-files/documents/WP%2012.2.1%20Att%201.pdf>. [Cit. 27 April 2025].
- [20] WMO, „wmo,“ [Online]. Available: <https://wmo.int/about-wmo/history-of-imo-and-wmo>. [Cit. 27 April 2025].
- [21] ECMWF, „ecmwf,“ [Online]. Available: www.ecmwf.int/en/about/who-we-are. [Cit. 27 April 2025].
- [22] DroneTribe, „dronetribe,“ [Online]. Available: <https://dronetribe.io/remote-pilot-metars-tafs/>. [Cit. 27 April 2025].
- [23] SHMÚ, „shmu,“ 22 April 2025. [Online]. Available: <https://www.shmu.sk/sk/?page=483>. [Cit. 24 April 2025].
- [24] SkyBrary, „skybrary,“ [Online]. Available: <https://skybrary.aero/articles/automated-weather-observing-system-awos>. [Cit. 27 April 2025].
- [25] WMO, „community.wmo,“ [Online]. Available: <https://community.wmo.int/en/activity-areas/global-telecommunication-system-gts>. [Cit. 27 April 2025].
- [26] EUMETNET, „eumetnet,“ [Online]. Available: <https://www.eumetnet.eu/about-us-2/>. [Cit. 27 April 2025].
- [27] EUMETSAT, „eumetsat,“ [Online]. Available: <https://www.eumetsat.int/metop>. [Cit. 27 April 2025].
- [28] SesarJoint Undertaking, „sesarju,“ [Online]. Available: <https://www.sesarju.eu/sesar-solutions/meteorological-information-exchange>. [Cit. 27 April 2025].
- [29] ECMWF, „ecmwf,“ 25 Február 2025. [Online]. Available: <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/news/2025/ecmwf-ai-forecasts-become-operational>. [Cit. 27 April 2025].
- [30] SKYbrary, „skybrary,“ [Online]. Available: <https://skybrary.aero/articles/4d-trajectory-concept>. [Cit. 27 April 2025].