



HIDROTERMINIS APATINIO TROPOSFEROS SLUOKSNIO ZONDAVIMAS BEPILOČIU ORLAIVIU (KOPTERIU)

Dainius FRIŠMANTAS¹, Laimonas JANUŠKA, Gintautas STANKŪNAVIČIUS²

VU CHGF Geomokslų institutas, LHMT aviacijos skyrius

El. paštas: ¹dainius.frismantas@gf.vu.lt; ²gintas.stankunavicius@gf.vu.lt

Anotacija. Apatiniame troposferos sluoksnyje yra didžiausias meteorologinių parametų kintamumas horizontalioje ir vertikaloje plotmėje. Šiame sluoksnyje susidaro priežeminės oro temperatūros inversijos, kurių struktūra dar mažai ištirta, o ypač urbanizuotose teritorijose. Inversijos lemia oro priemaišų (dujiniai teršalai ir aerosoliai) kaupimąsi po inversiniame sluoksnyje bei susijęs su horizontalaus matavimo sumažėjimu. Inversijos struktūra priklauso nuo sinoptinės situacijos: debesų dangos, reljefo, kraštovaizdžio, absoliutaus aukščio, augmenijos tipo. Troposferos hidroterminis zondavimas dronais yra unikalus tyrimas Lietuvoje. Dėl techninių ir finansinių priežasčių jau 4 metus nėra atliekami jokie atmosferos vertikalaus zondavimo matavimai. Tyrimui pasirinktos kelios skirtingos vietos Vilniaus mieste: Belmonto ir Vingio parkai bei palankios inversijoms formuoti sinoptinės sąlygos. 2017–2018 m. žiemos empiriniai matavimai palyginti su skaitmeninio modelio išvesties duomenimis. Hidroterminio zondavimo rezultatai parodė, kad ne visada palankios inversijos susidarymo sąlygos susijusios su atitinkamu realiu temperatūros profiliu. Be to, matavimo tikslumui įtakos turėjo ir temperatūros fonas zondavimo metu: nustatyta, kad žema temperatūra didina nuotolinių jutiklių inerciją. 2018 m. kovo 5 d. 8 val. ryte užfiksuotas storiausias pažemio inversijos sluoksnis ir didžiausias temperatūros gradientas $\Gamma = -2,7 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$.

Reikšminiai žodžiai: paribio sluoksnis, inversijos, zondavimas, kopteris.

Įvadas

Hidroterminis apatinio troposferos sluoksnio zondavimas bepiločiais orlaiviais yra naujas būdas tiriant vertikalią temperatūros ir drėgnumo parametų pasiskirstymą paribio sluoksnyje (toliau – PSS) apatinėje dalyje. Radiozondavimas yra vienas tiksliausių būdų įvertinti temperatūros ir drėgnumo lauką. Temperatūros inversija (toliau – TI) – atmosferos sluoksnis, kuriame oro temperatūra didėja kylant aukštyn (Ahrens, 2008). Pačios stipriausios TI – tiek pakiliosios, tiek pažemio – formuojasi vykstant anticikloninei cirkuliacijai (Li et al., 2014). Inversijos skirstomos pagal formavimosi sąlygas, sluoksnio apatinės ribos aukštį ir storį. Jos susidaro priežemyje arba aukštesniuose atmosferos sluoksniuose (Schnelle ir Brown, 2002). Šiame tyrime buvo nustatomos pažemio inversijos, kurios formavosi daugiausia dėl spindulinio atvėsimo ir pasižymi didžiausia erdvine kaita.

Inversijos ir jų lemiami orai yra aktuali tema iki šiol. Manahan (2000) teigia, kad nuo 3-čio XX a. dešimtmečio mokslinėje literatūroje atsiranda informacija apie TI, kaip

nepalankių teršalų sklaidos viena pagrindinių sąlygų, kuomet susilpnėjusi turbulencija ir pramonės išmetamosios dujos bei aerosoliai kaupiasi atmosferos pažemio sluoksnyje. 1952 metais Londone po inversinis rūkas per kelias paras prisisotino suodžiais, dujinėmis priemaišomis ir aerosoliu ir transformavosi į smogą, kuris lėmė 4000 žmonių mirčių. Inversijos ne tik sulaiko išmetamus į atmosferą teršalus, bet ir sudaro palankias sąlygas formuoti rūkui, smogui, rūgščiajam lietai (Manahan, 2000). Informacija apie inversijų susidarymo sąlygų sinoptines situacijas, jų aukštį ir storį gali žymiai pagerinti teršalų sklaidos prognozių kokybę ir visuomenės informuotumą apie pavojingas žmogaus sveikatai teršalų koncentracijas. Daug teršalų sklaidos matematinių modelių naudoja inversijų charakteristikas, kaip vieną pagrindinių veiksnių, lemiančių staigius priemaišų koncentracijų pokyčius (Li et al., 2014).

Vertikalus atmosferos zondavimas radiozondais Lietuvoje nevyksta jau ilgiau kaip 4 metus dėl finansinių

sunkumų ir techninių kliūčių, o atitinkamos alternatyvos jiems nėra: nuotolinis zondavimas iš dirbtinių Žemės palydovų pažemio sluoksnyje nėra tikslus, skaitmeninių orų prognozės modelių vertikalė raiška dar per maža, o tokie prietaisai kaip SODAR ar LIDAR kol kas nuolatiniams matavimams nenaudojami. Mokslininkų (Li et al., 2014) nustatyta, kad temperatūros inversijos daro didelį poveikį vertikalčiai oro sąmaišai, spinduliuotės balansui, PSS debesuotumui, oro teršalų sklaidai ir kitiems procesams. Dėl spindulinio atvėsimo susidariusios TI ryto metu daro didelę įtaką CO, NO, NO₂, SO₂ ir kitų dujų koncentracijoms urbanizuotose teritorijose. Labai nepalankios teršalų sklaidai sąlygos susidaro nejudrios aukšto slėgio srities, kuri išsilaiko virš vieno geografinio rajono dvi savaites ir ilgiau, poveikio zonoje – vyraujant silpnam vėjui, spinduliniam vėsimumui nakties metu, o efektą sustiprina priežeminių ir pakiliųjų inversijų kompleksas (Bailey, Chase, Cassano ir Noone, 2011). Yra įrodymų, kad kietųjų dalelių (PM_{2.5}) koncentracija JAV žiemos metu padidėja daugiau negu 40 % (Pei ir Shiliang, 2016). Pavyzdžiui, San Paule net ir dėl silpnų inversijų 200–400 m aukštyje virš paklotinio paviršiaus sparčiai kaupiasi SO₂, CO, NO₂ dujos, kurių koncentracija gali kelis kartus viršyti leistinas normas. Vidutiniškai palankiausias užterštumui sąlygos susidaro vyraujant didelio masto žemynėigių oro srautų inicijuotoms inversijoms (Ahrens, 2008).

Bepiločiai orlaiviai paribio sluoksnio procesams ir teršalų sklaidai pradėti naudoti tik prieš 7–10 metų. L. Haszpra ir kiti tyrėjai (2015) Vengrijos teritorijoje matavo CO₂ koncentraciją paribio sluoksnyje skirtingais būdais: bepiločiu orlaiviu ir naudodami gradientinius matavimo stiebus. Tokiu būdu siekta nustatyti gradientinio stiebo matavimų rezultatų neapibrėžtumą. Detalesni gradientinio stiebo matavimai gali būti įtraukti į matematinis atmosferos modelius. Jie gali pakeisti modelius, kurie iki dabar netiksliai nustato priežemio gradientus. Empiriniai matavimai pasitvirtino tik dienos metu, nes naktį PSS labai mažas, pastoviai stratifikuotas, taigi dėl silpnos oro pernašos išmatuoti duomenys buvo netinkami taikytiems modeliams. Vasaros sezonu labiausiai pasitvirtino žemų gradientų stiebų matavimo rezultatai.

Paribio sluoksnio vertikalų horizontalaus vėjo greičio profilio pasiskirstymą išmatuodavo Danijoje naudojant vėjo greičio lidarai. Vėjo greičio lidarai vertikalčiai vėjo greitį ir kryptį matuoja kas 50 m iki 2 km, priklausomai nuo aerozolių koncentracijos. Nauji lidarai, lyginant su WRF (angl. *The Weather Research and Forecasting model* – WRF) modeliu, pasitvirtino nustatant

PSS vėjo lauko struktūrą (Floors, Peña, Vincent, Gryning ir Batchvarova, 2012).

Amerikos tyrėjai bepiločiais orlaiviais JAV matavo oro temperatūros ir drėgnumo profilius apatiniame 213 m storio sluoksnyje, kai vyko intensyvūs tornadai (Dumas, Lee, Buban ir Baker, 2017). Tyrimo tikslas buvo išsiaiškinti paklotinio paviršiaus bei meteorologinių sąlygų poveikį uraganų genezei virš pietrytinės JAV. Matavimai buvo vykdomi bepiločiu kopteriu DJI S-1000 bei MD4-1000 (*sUAS – small Unmanned Aircraft System*), kuris priklauso NOAA orų tyrimo laboratorijai. Kiti tyrėjai (Lee ir Wekker, 2015) savo darbe mobiliojo radiozondavimo būdu lygino (PSS) storį viename iš Apalačių kalnų slėnių bei artimiausiame nuo jo oro uoste. Jie nustatė, kad PSS slėnyje yra 20–400 m aukštesnis nei oro uoste. Tokį skirtumą jie aiškino mažesne dirvos drėgme bei intensyvesne turbulentinės šilumos apykaita slėnyje vasaros metu.

Teigiama (Stull, 2017), kad PSS – tai sluoksnis, kuriame dar jaučiama paklotinio paviršiaus sukelta trintis per turbulencinę sąmaišą. Šio sluoksnio storis naudojamas kaip pagrindinis parametras oro priemaišoms modeliuoti. PSS viršutinėje dalyje yra pereinamasis sluoksnis tarp jo ir laisvosios atmosferos, kuris dažniausiai atitinka pakiliają inversiją (Nemuc, Taliunu, Belegante, Ngo ir Derognat, 2012). Pakilioji inversija dėl žemynėigių oro srautų yra stlegiama ir stumiama arčiau paklotinio paviršiaus ir PSS plonėja. Priežeminis PSS apima 20–200 m atmosferos sluoksnį. Nepastoviai stratifikuotoje atmosferoje turbulencija bei konvekcija gali išmaišyti apatinį 0,2–4,0 km, o pastoviai stratifikuotoje atmosferoje – turbulencinius sluoksnis niekad neviršija 20–500 m (Stull, 2017), todėl aukšto slėgio sritys, mažo gradiento bariniai laukai ir gūbriai glaudžiai susiję su oro užterštumu miestuose (Sillman ir Samson, 1995).

Tyrimo tikslas – nustatyti inversijos struktūrą paribio sluoksnio apatinėje dalyje: oro temperatūros ir drėgnumo vertikalį kaitą bei susieti šiuos profilius su vyraujančia sinoptinio masto orų sistema. Hidroterminį zondavimo tyrimą galima taikyti teršalų dispersijų modeliams. Tokio pobūdžio tyrimai Lietuvoje turi perspektyvą – juos galima taikyti nepastovioms atmosferos stratifikacijos sąlygoms ir konvekciniams audroms tirti.

Metodika

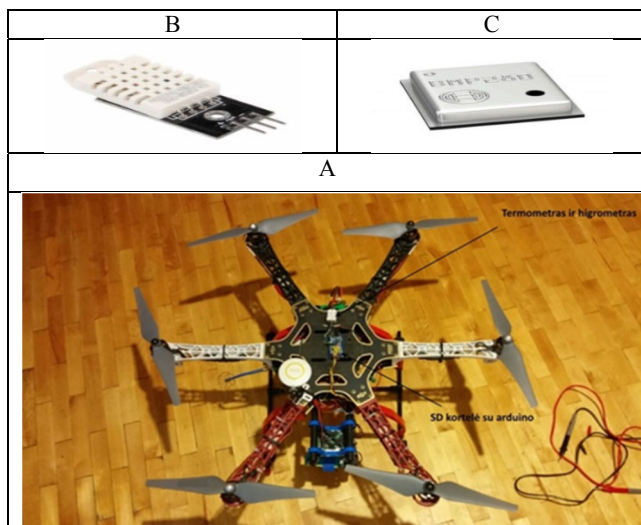
Bepiločio orlaivio veikimo principas

Hidroterminiam apatinės troposferos zondavimui buvo pritaikytas bepilotis orlaivis (toliau – kopteris) su

1 lentelė. Pagrindiniai kopterio meteorologinių jutiklių: oro temperatūros, santykinio drėgnumo, atmosferos slėgio parametrai

Meteorologiniai elementai	Matavimo prietaisai	Matavimo amplitudė	Tikslumas
Oro temperatūra (T °C)	Termistorius	-40–80 °C	+/-0.5 °C
Santykinis drėgnumas (RH, %)	Polimerinis kondensatorius	0–100 %	+/-2 %
Atmosferos slėgis (P, hPa)	Pjezoelektrinis (rezistorius)	300–1100 hPa	+/-0.12 hPa

temperatūros ir drėgno jutikliais (1 paveikslas). Tyrimo laikotarpiu šis kopteris buvo naudojamas oro temperatūros inversijoms aptikti. Zondavimas buvo vykdomas sluoksnyje 0–300 m, todėl didelės įtakos tam turėjo vietovės reljefas, kraštovaizdis, absoliutus aukštis, aplinkiniai statiniai ir augmenija. Pirmieji matavimai parodė, kad oro temperatūros ir drėgno jutikliai pasižymėjo didele inercija.



1 paveikslas. Hidroterminiam apatinės troposferos sluoksnio zondavimui naudoti prietaisai (bendras vaizdas): A – bepilotis kopteris, B – oro temperatūros ir santykinio drėgnumo jutiklis (DHT22), C – barometras (Bosch BMP280). Rodyklė rodo DHT22 jutiklio bei SD kortelės padėtis kopteryje

Daugiasraigčio bepiločio orlaivio pasirinkimą lėmė jo konstrukcijos savybės: orlaivio gabaritai, galimybė kilti ir leistis vertikalia kryptimi reguliuojant jo vertikalų greitį ir dėl galimybės ilgesnį laiką išsilaikyti norimame erdvės taške. Orlaivio stabilumas, jo horizontalaus skrydžio kryptis ir greitis užtikrinamas keičiant kiekvieno iš esančių motorų sukimosi greitį paverčiant orlaivį į reikiamą pusę ir išlaikant stabilų orlaivio aukštį. Visą šį darbą atlieka orlaivyje įmontuotas skrydžio valdiklis.

Kopterio charakteristika: šešių motorų orlaivis, kurio masė 2,5 kg (AUW), 6 kg keliamoji galia, motorai – DJI 2212 920kv tipo, propeleriai – DJI 9443 tipo, 4 celių 5,2 Ah talpos ličio-polimerų akumuliatorių baterijos. Atmosferos parametrų matavimo ir registravimo įranga

paremta atviro kodo programine bei aparatine įranga: duomenų registravimui naudojamas *Arduino Mini Pro* valdiklis, aprūpintas duomenų kaupikliu su galimybe duomenis įrašyti į *Micro SD* kortelę, duomenų perdavimu realiu laiku į kompiuterį naudojant 433 MHz radijo dažniu veikiančią duomenų perdavimo įrangą (3DR telemetrijos moduliai), realaus laiko modulį (RTC DS1307). Valdiklis užprogramuotas nuskaityti jutiklių duomenis 1 Hz dažniu. Tyrimo metu buvo matuojami oro temperatūros (T) ir santykinio drėgno (RH) profiliai žemiausiame atmosferoje sluoksnyje. Dėl finansavimo trūkumo nebuvo įsigyti didžiausiu tikslumu pasižymintys jutikliai. Termistoriaus, polimerinio kondensatoriaus bei pjezoelektrinio rezistoriaus meteorologinių kintamųjų matavimo amplitudės yra didelės, tačiau, kaip vėliau pasirodė, prietaisai per lėtai reaguoja į greitus aplinkos oro pokyčius (1 lentelė).

Orlaivis buvo aprūpintas vaizdo stebėjimo ir perdavimo sistema, turėjo pozicionavimo sistemą ir automatinio grįžimo į paleidimo vietą funkciją, dingus ryšiui tarp orlaivio bei orlaivio piloto (valdymo pulto) arba orlaivio akumuliatoriui išsikrovus iki ribos, kuomet įkrovos likutis tampa pakankamas tik grįžti į orlaivio paleidimo vietą.

Eksperimentiniai ir modelio duomenys

Prieš atliekant matavimus buvo numatyti atmosferos cirkuliacijos bei orų sąlygų reikalavimai. Buvo atrinktos tokios zondavimui tinkamos atmosferos cirkuliacijos sąlygos: a) priežemio slėgio laukas pietrytinėje Baltijos jūros regiono dalyje aukštesnis už normą, b) nežymus slėgio laukų horizontalus judėjimas, c) arti (<300 km) nėra atmosferos frontų, d) viršutinėje troposferoje virš matavimo vietos nėra atmosferos sraujyčių bei kitų veiksnių, skatinančių didelio masto turbulenciją, pavyzdžiui, didelio vertikalus vėjo poslinkio. Pasirinktos tokios TI matavimui palankios orų sąlygos: 1) silpnas vėjas priežemyje (≤ 5 m/s), 2) nėra ir prieš tai nebuvo kritulių, 3) debesų danga: nėra, nežymi arba tik poinversiniai sluoksniniai ar sluoksniniai kamuoliniai debesys. Dažniausiai matavimai vyko rytinėmis valandomis (vidutiniškai didžiausias apatinių atmosferos sluoksnių

stabilumas) arba dienos metu, kai neišreikštas oro temperatūros paros ciklas, taip pat galimas rūkas, tačiau susidaręs tik dėl spindulinio vėsimo, bet ne advekcinės – spindulinės kilmės ar susijęs su apatiniais sluoksniniais debesimis.

Tinkamiausios oro sąlygos buvo giedromis dienomis bei tykos metu, kai nebuvo sąlygų vystytis turbulentiniams srautams paribio sluoksnyje. Hidroterminiai matavimai buvo vykdomi vyraujant mažų gradientų aukštesnio slėgio laukui arba stipriai anticikloninei cirkuliacijai.

Priežemio slėgio lauko ir oro masės tipai buvo nustatyti remiantis Karališkojo Nyderlandų meteorologijos instituto (KNMI) orų žemėlapių schemomis (3 paveikslas) ir GFS modelio (JAV) analizės laukais (4 lentelė). Oro temperatūros inversijos (TI) buvo nustatomos pagal T ir RH profilių struktūrą, kurią daugiausia lėmė konkreti sinoptinė situacija, debesų danga, reljefas, kraštovaizdis ir kai kurie kiti veiksniai.

TI struktūrai įtakos turėjo ir sniego danga. Vėjo greitis, nors ir labai svarbus meteorologinis rodiklis, tačiau tokio specialaus jutiklio kopteryje nebuvo. Orų sąlygoms nustatyti buvo naudotasi *Ogimet* – orų informacijos tarnyba, kuri pateikia apibendrintą meteorologinių matavimų informaciją iš viso pasaulio. Matavimų dienomis buvo nustatytas debesuotumas, vėjo greitis, oro temperatūra, meteorologinio matavimo nuotolis bei

atmosferos reiškiniai (Ogimet, 2016). Eksperimentiniams tyrimams buvo pasirinktos dvi Vilniaus miesto vietos: Belmonto ir Vingio parkai (2 paveikslas). Iš viso buvo atlikti 8 eksperimentiniai matavimai (4 – Belmonte, 4 – Vingio parke). Vingio parke matavimo vieta buvo – 106 m, o Belmonto parke – 132 m virš jūros lygio.

Zondavimas buvo vykdomas 2017–2018 m. šaltuoju metų sezonu (lapkritis–kovas). Dėl dažnai pasitaikiusių nepalankių zondavimui sąlygų, kai vyravo cikloninė cirkuliacija, matavimai buvo nereguliarūs. Tačiau ne visada



2 paveikslas. Zondavimo vietos Vilniaus miesto ribose (pažymėtos raudonais taškais): I – Vingio (š. pl. 54° 40' ir 54° 41' r. ilg.), II – Belmonto parkas (š. pl. 54° 41' ir 25° 21' r. ilg.). Žemėlapiai paimti iš <http://www.geoportal.lt/map/>. Mastelis – M1:2000

2 lentelė. Matavimų datos, vietos ir vyraujantis atmosferos slėgis. Slėgio įvertinimui pasinaudota OGIMET 2017–2018 metų archyviniais sinoptiniais duomenimis

Matavimų Nr.	Data	Matavimo vieta	Atmosferos slėgis stoties lygyje pagal Trakų Vokės meteorologijos stoties duomenis (hPa)
1	2017-11-22. 08 val.	Belmontas	1014,7
2	2017-12-18 09 val.	Belmontas	1026,2
3	2018-01-09 15 val.	Belmontas	1033,7
4A	2018-01-10 15 val.	Belmontas	1026,0
5B	2018-01-12 13 val.	Vingis	1037,5
6	2018-01-14 10 val.	Vingis	1041,8
7C	2018-02-22 09 val.	Vingis	1030,0
8D	2018-03-05 08 val.	Vingis	1012,7

3 lentelė. Dviejų hipsometrinių formulių taikymo rezultatai sluoksnio storio / pakilimo aukščio Δz (m) tikslumui nustatyti, paryškintu šriftu pažymėti mažiausią paklaidą teikiantys rezultatai

Data	1 formulė (m)	2 formulė (m)	Pagal kopterio GPS (m)	Mažiausia paklaida (m)
2018.01.10	223,2	223,0	268	44,8
2018.01.12	237,4	237,2	247	9,6
2018.02.22	212,9	212,7	240	27,1
2018.03.05	262,1	261,9	290	27,9

4 lentelė. Atmosferos cirkuliacijos sąlygos – tipai pagal tris kriterijus: slėgio jūros lygyje, ekvivalentinės potencinės temperatūros 850 hPa lygyje ir 500 hPa lygio geopotencialaus aukščio pasiskirstymą erdvėje

Data	Priežemio slėgio lauko tipas	Oro masės charakteristika (oro masės tarptautinis kodas)	500 hPa barinis laukas
2017-11-22	Mažų gradientų nejudrus laukas	Vidutinių platumų šalta (mP)	Slėnio vakarinė periferija
2017-12-18	Mažų gradientų nejudrus laukas	Vidutinių platumų šalta (mP)	Slėnio ašis
2018-01-09	Anticiklono centrinė dalis	Vidutinių platumų šalta transformuota (mP)	Gūbrio rytinė periferija
2018-01-10	Anticiklono gūbrys	Vidutinių platumų šalta transformuota (mP)	Gūbrio ašis
2018-01-12	Stipraus anticiklono pietinė dalis	Vidutinių platumų šalta (cP)	Blokuojančio gūbrio rytinė dalis
2018-01-14	Stipraus anticiklono centrinė dalis	Vidutinių platumų šalta (cP)	Blokuojančio gūbrio pietrytinė dalis
2018-02-22	Stipraus anticiklono centrinė dalis	Arktinė kilmės (cA)	Slėnio pietinė dalis
2018-03-05	Mažų gradientų nejudrus laukas	Vidutinių platumų šalta (cP)	Gūbrio rytinė dalis

ir palankiausiomis sąlygomis pavykdavo atlikti zondavimą dėl trijų bendraautorių darbo grafiko nesuderinamumo. 2 lentelėje pateiktos zondavimo datos ir vieta, kurioje buvo atliekamas matavimas bei atmosferos slėgis stoties lygyje pagal meteorologijos stotį Trakų Vokėje. Palyginimui taip pat buvo naudojama globali trimatė atmosferos kintamųjų duomenų bazė – sistema GDAS (angl. *Global Data Assimilation System* – GDAS), jos skaitmeninės atmosferos vertikalios struktūros duomenys, kurie laisvai pasiekiami iš NOAA Atmosferos tyrimų laboratorijos (NOAA ARL) interaktyvaus tinklapio (NOAA, 2018).

GDAS duomenų erdvinė raiška yra: horizontali – $0.5 \times 0.5^\circ$ platumos ir ilgumos; vertikali – 55 hibridiniai sigma (ζ) – slėgio (P) lygiai, iš kurių 12 žemiausių lygių patenka į apatinį 1000–1400 m sluoksnį. Iš šio archyvo naudoti vėjo greičio (m/s), oro ($T^\circ\text{C}$) bei rasos taško (Td) temperatūros duomenys. Artimiausias erdvinis taškas Vilniaus miesto koordinatėms yra $54,63^\circ$ š. pl. ir $25,28^\circ$ r. ilg.; šio taško aukštis GDAS sistemoje – 156 m virš jūros lygio. Pagal vertikalų oro temperatūros profilį buvo skaičiuojami oro temperatūros vertikalūs gradientai (Γ) inversiniuose ir izotermijos sluoksniuose ($0^\circ\text{C}/100\text{ m}$). Pagal 2 lentelėje pateiktas zondavimo datas buvo analizuotos orų sąlygos Vilniuje. Atmosferos oro kokybės sąlygoms įvertinti naudotasi Aplinkos apsaugos agentūros archyviniais duomenimis (Aplinkos apsaugos..., 2018).

Neapdoroti duomenys buvo susieti tik su atmosferos slėgiu, o žinant maksimalų pakilimo virš žemės paviršiaus aukštį naudojantis hipsometriniu formule oro temperatūros ir drėgumo matavimo taškai susieti su geometriniu aukščiu virš vietovės. Paklaidos susidarė dėl žemos oro temperatūros ir prietaisų instrumentinių paklaidų (3 lentelė). Buvo naudotos 3 hipsometrinės formu-

lės (Valiuškevičius, 1999), bet pateiktos 2 iš jų (formulės (1), (2)), kurias taikant gautos mažiausios paklaidos:

$$\Delta z = (Z_2 - Z_1) = \frac{R_d}{g} * T_{vid} * \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right). \quad (1)$$

Hipsometriniu formule (1) taikyta nustatyti zondavimo bei inversijos sluoksnio storiui. R_d – dujų konstanta vandens garams ($\text{J}/(\text{Kg} * \text{K})$), T_{vid} – vidutinė sluoksnio temperatūra ($^\circ\text{K}$), p_1 , p_2 – slėgis atitinkamai viršutinėje ir apatinėje sluoksnio dalyje, g – sunkio jėgos pagreitis (m/s^2)

$$\Delta z = (Z_2 - Z_1) = B(1 + \alpha t) * \lg\left(\frac{p_1}{p_2}\right). \quad (2)$$

Hipsometriniu formule (2) B – barometrinė konstanta, lygi 18400 m, α – temperatūrinio oro plėtimosi koeficientas, t – vidutinė sluoksnio oro temperatūra, p_1 ir p_2 – slėgis atitinkamai viršutinėje ir apatinėje sluoksnio dalyje (Rimkus, 2011).

Rezultatai ir jų analizė

Empiriniai oro temperatūros ir drėgumo profiliai ir modelių rezultatų interpretacija

Hidroterminio zondavimo rezultatai ir jų kokybė priklauso nuo daugybės atmosferos cirkuliacijos ir orų sąlygų (4 lentelė). 1, 2 ir 8 (D) (3 paveikslas) zondavimo metu vyravo nejudrus mažų gradientų slėgio laukas. Šios atmosferos cirkuliacijos kategorijos matavimo dienomis vyravo: du kartus – vidutinių platumų jūrinės oro masės (1, 2), kurios lėmė didelį 8–9 balų debesuotumą bei vieną kartą – vidutinių platumų žemyninė oro masė (8), kuri lėmė giedrus orus bei palankias rūkui formotis sąlygas. 8 (D) zondavimui priklauso didžiausia išmatuota priežeminė TI, kurios $\Gamma = -2,7^\circ\text{C}/100\text{ m}$. D kategorijai būdingas silpnas vėjas (1–2 m/s). Remiantis GDAS

modelio temperatūros profiliais nustatyta viena priežeminė ($\Gamma = -0,98 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$) ir dvi pakiliosios TI.

4 (A) (3 paveikslas) zondavimo metu orus lėmė anticiklono gūbrys bei vidutinių platumų šalta oro masė (4 lentelė). Matavimo metu buvo stebimas rūkas, vyravo giedri ir ramūs ($<1 \text{ m/s}$) orai. Oro temperatūros profilis rodė esant pakiliajai inversijai, kurios apatinės ribos aukštis buvo 207 m ($\Gamma = -1,28 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$). Pagal GDAS modelį šiai kategorijai priklauso viena pakilioji inversija ($\Gamma = -1,40 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$), kurios apatinis aukštis – 308 m.

5 (B) (3 paveikslas) atveju Pietryčių Lietuva pateko į stipraus anticiklono pietinę dalį (4 lentelė). Šiai kategorijai būdinga izotermija ($\Gamma = 0 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$). Dėl stipresnio vėjo gūsiuose ($>5 \text{ m/s}$) bei dėl ištisinio debesuotumo nebuvo tinkamos sąlygos formuoti TI. GDAS modelio temperatūros profiliai rodė vieną pakiliają inversiją ($\Gamma = -1,18 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$).

6, 7 (C) (3 paveikslas) atvejais virš Lietuvos įsivirtino stipraus anticiklono centrinė dalis (4 lentelė). Šioje kategorijos atvejais vyravo skirtingos oro masės: (6) – vidutinių platumų žemyninė, o 7 (C) – Arktinės kilmės oro masė. Stiprūs anticiklonai lėmė žemą paviršiaus oro temperatūrą: atitinkamai $-8,9$ ir $-11,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (6 ir 7 atveju).

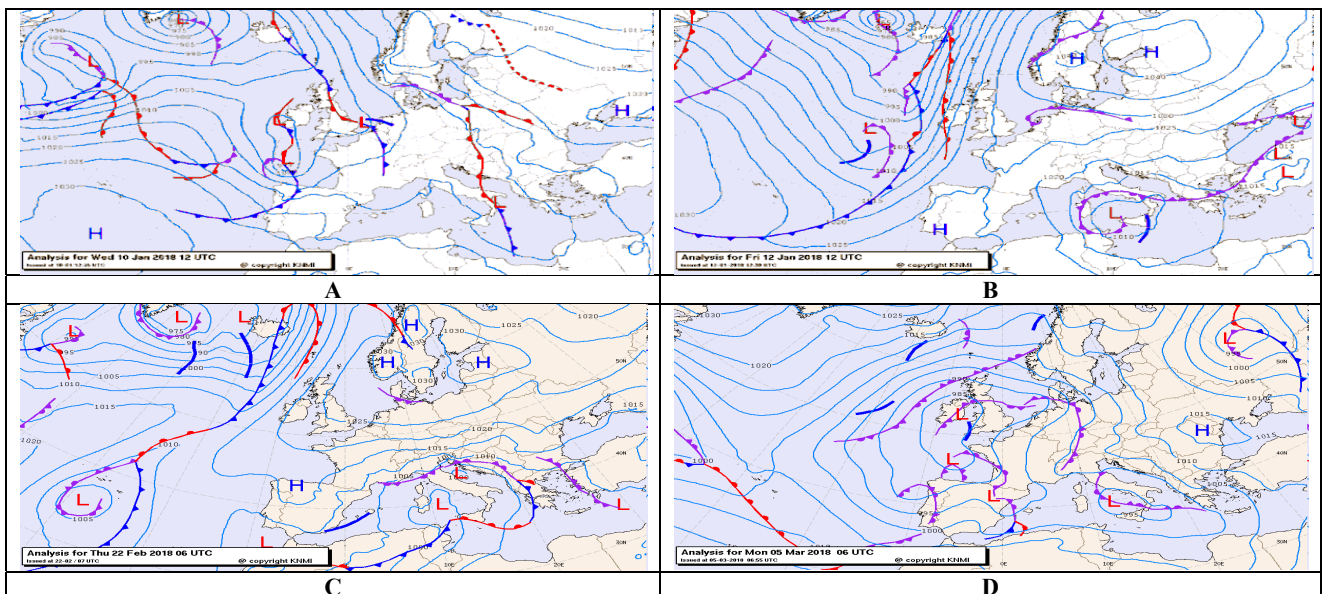
7 (C) matavimo metu buvo giedra ir silpnas vėjas iki 2 m/s. Pakiliosios inversijos ($\Gamma = -1,70 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$) apatinės ribos aukštis – 135 m. GDAS modelio temperatūros profiliai rodė pačią stambiausią pakiliają inversiją ($\Gamma = -1,00 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$) iš visų nustatytų, kurios apatinė riba buvo 107 metrai (4 paveikslas).

Modelio profiliai ir atmosferos užterštumas

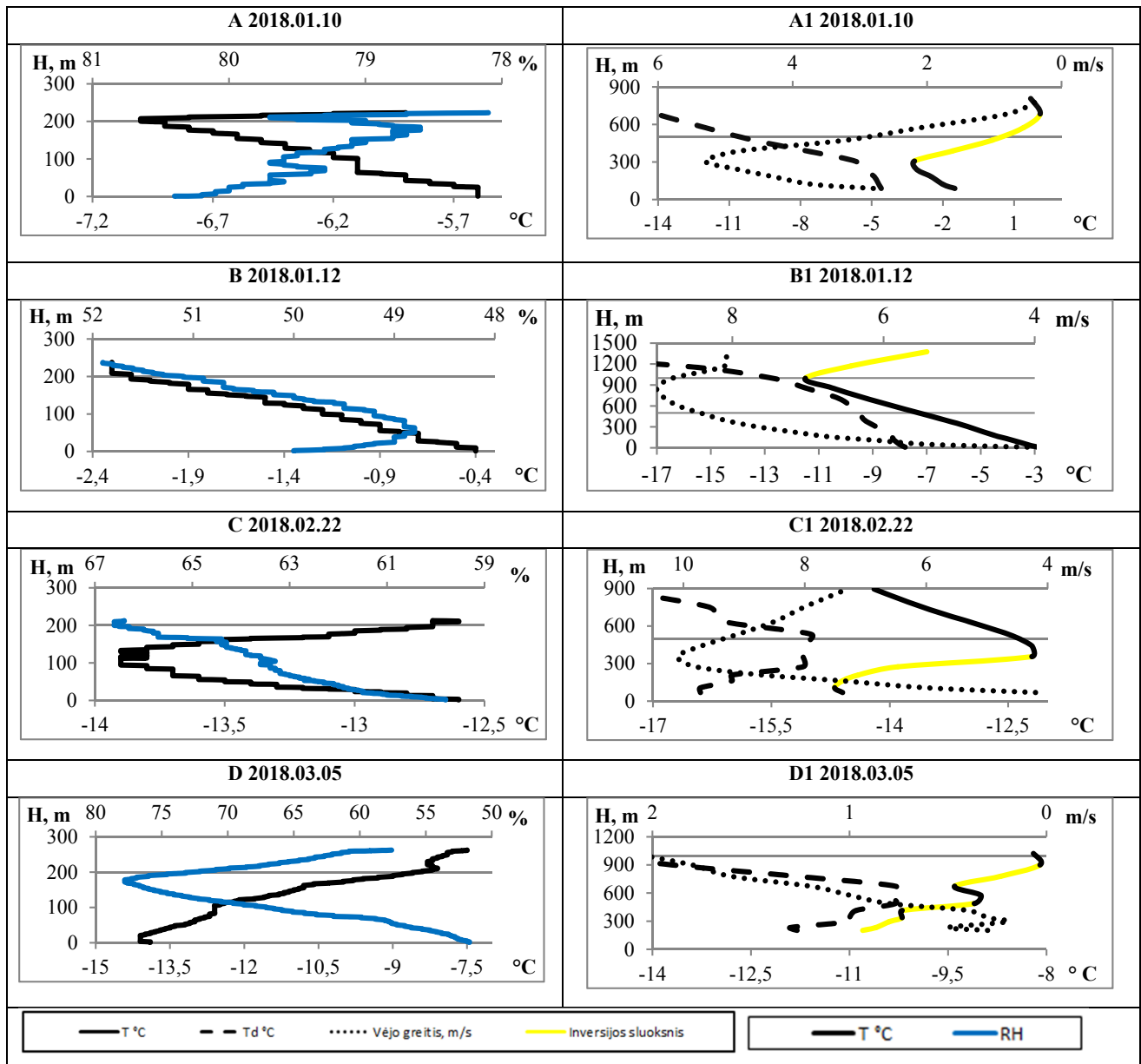
Hidroterminis zondavimas kopteriu gali būti pritaikomas stebėti bei užfiksuoti inversijas, dėl kurių teršalų koncentracijos viršija pagal 2017–2018 m. nustatytas leistinas normas. Apatiniame troposferos sluoksnyje teršalų koncentracija priklauso nuo meteorologinių sąlygų. Remiantis Aplinkos apsaugos agentūros duomenimis, 2018-01-30 KD_{10} koncentracija neviršijo Žirmūnuose 19, o Senamiestyje – $10 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ ir atitinkamai buvo 3 ir 6 kartus mažesnė, palyginti su 2018-02-23 duomenimis. CO koncentracijos Senamiestyje ir Žirmūnuose buvo atitinkamai 6 ir daugiau nei 3 kartus mažesnės, o NO_2 Lazdijuose ir Žirmūnuose buvo atitinkamai 5 ir 2 kartus mažesnės, palyginti su 2018-02-23 duomenimis (5 lentelė).

5 lentelė. Oro kokybės tyrimų stotelės Vilniuje, matuojančios KD_{10} , $\text{KD}_{2,5}$, CO, SO_2 , NO_2 daleles troposferoje

(OKT) stotys Vilniuje 2018.02.23	Kietosios dalelės (KD_{10}) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Anglies monoksidas (CO) (mg/m^3)	Azoto dioksidas (NO_2) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	Vid. paros	Max 8 val. vidurkis	Max 1 val. vidurkis
Senamiestis	63	2,5	72
Lazdynai	20	–	76
Žirmūnai	67	1,2	95
Savanorių pr.	44	0,8	85
2018 m. normos	50	10	200

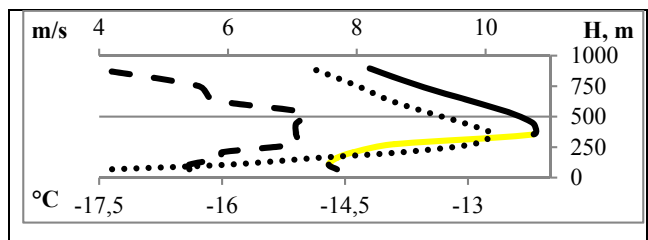


3 paveikslas. Zondavimo metu vyraujančios sinoptinės situacijos paimtos iš KNMI orų žemėlapių archyvo (<http://www.knmi.nl/nederlandnu/klimatologie/daggegevens/weerkaarten>): A (2018.01.10), B (2018.01.12), C (2018.02.22), D (2018.03.05) – atitinka analizuotus grafikus pagal 4 paveikslą. Sinoptinės schemas vaizduoja: priežemio slėgio lauką: anticiklonus, ciklonus ir jų centrus (atitinkamai žymimus H ir L) bei atmosferos frontų padėtį



4 paveikslas. Hidroterminių matavimų kopteriu ir GDAS modelio temperatūros ir drėgnumo rodiklių profilių palyginimas. T °C – oro temperatūra, Td °C – rasos taško temperatūra, RH – santykinis drėgnumas

2018-01-30 pietrytinė Lietuvos dalis buvo ciklono poveikio zonoje. Stiprią oro srauto turbulenciją, nepastoviai stratifikuotą atmosferą bei palankias sąlygas sklaidytis teršalams lėmė atmosferos frontas su krituliais virš Lietuvos, staigus horizontalaus slėgio laukų judėjimas. 2018-02-23 yra vienas iš pavyzdžių, kai padidėjusios (KD₁₀) koncentracijos Senamiesčio (63) ir Žirmūnų (67) oro taršos stotelėse viršijo leistinas normas 50 μg/m³ (5 lentelė). Nuo Skandinavijos buvo atslinkęs anticiklono gūbris, kuris ryte ir vakare lėmė rūko formavimąsi.



5 paveikslas. Vertikali atmosferos struktūra taške su koordinatėmis 54,63 ° š. pl. ir 25,28 ° r. ilg. gauta iš GDAS modelio Vilniuje 2018 m. vasario 23 d. 8 val. Paaiškinimai: H – aukštis (m) nuo stoties lygio, T °C – oro temperatūra, Td – rasos taško temperatūra (°C), geltona spalva – pažymėta TI

Pagal GDAS modelį ties Vilniumi buvo susidariusi TI, kurios storis buvo 287 m, o ($\Gamma = -0,91 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$). Vėjo greitis priežemyje buvo silpnas ($<5 \text{ m/s}$). Šiuo atveju priežeminė TI sulaukė išmetamuosius teršalus PSS (5 paveikslas).

Išvados

1. Visi (8) matavimai, nepaisant visiškai skirtingos sinoptinių situacijų raidos, vyko mažų gradientų lauko poveikyje: anticiklono centrinė dalis, mažų gradientų laukas, gūbrys. 3 iš 8 matavimų vyko nejudriame mažų gradientų lauke, o likusieji (5) – stipraus anticiklono įtakoje.

2. 7 iš 8 matavimų metu vyravo vidutinių platumų oro masės, o tik vieno matavimo metu – Centrinėje Arktyje susidariusi oro masė. 4 iš 8 oro masių tipų buvo jūrinės kilmės ir 4 – žemyninės kilmės, tarp jų ir arktinė oro masė. Didžiausi oro temperatūros vertikalūs gradientai (Γ) susidarė ne Arktinėje, bet vidutinių platumų žemyninėje oro masėje. Jūrinės masės visais jų fiksavimo atvejais pasižymi gerai išmaišytu apatiniu paribio sluoksniu.

3. Mažiausi aukščio virš žemės paviršiaus ir sluoksnio storio skirtumai nustatyti tarp GPS sistemos kopteryje bei taikant (1) hipsometrinę formulę. Mažiausia paklaida tarp kopterio GPS ir hipsometrinės formulės buvo 2018-01-12 – 9,6 m dėl santykinai aukštos oro temperatūros bei mažo oro drėgnumo.

4. Skirtumas tarp modelio ir tiesioginio matavimo susidarė dėl jutiklių inertiškumo, modelio raiškos ir įves ties duomenų. Modelis 4 iš 8 nagrinėtų situacijų TI viršutinę dalį aptinka aukščiau nei buvo nustatyta empiriniais matavimais.

5. Nė vieną iš 8 zondavimo parų nebuvo viršytos smulkiųjų kietųjų dalelių koncentracijos leistinos normos. Artimiausia zondavimui data buvo 2018-02-23, kai kietųjų dalelių koncentracija Senamiestyje ir Žirmūnuose viršijo leistiną $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ribinę vertę.

6. Didžiausias neigiamas vertikalus oro temperatūros gradientas ($\Gamma = -2,7 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$) nustatytas 2018-03-05 8 val. Didžiausią neigiamą Γ lėmė intensyvus spindulinis vėsimas priežemyje ir šilumos advekcija paribio sluoksnio viršuje.

Literatūra

Ahrens, D. (2008). *Meteorology Today: An introduction to weather, climate, and the environment*. Belmont: BROOKS/COLE.

Aplinkos apsaugos agentūra. (2018). *Paros oro kokybės rodikliai*. Prieiga per internetą 2018 m. kovo 11 d.: <http://oras.gamta.lt/cms/index?rubricId=3c923924-6bb5-42dc-89ba-55a91f603103>

Bailey, A., Chase, N. T., Cassano, J., & Noone, D. (2011). *Changing temperature inversion characteristics in the U.S. southwest and relationships to large-scale atmospheric circulation*. American Meteorological Society.

Dumas, E. J., Lee, T. R., Buban, M., & Baker, B. (2017). *Small Unmanned Aircraft System (sUAS) measurements during the 2017 Verifications of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment Southeast (VORTEX-SE)*. NOAA Technical Memorandum OAR ARL-274. [dx.doi.org/10.7289/V5/TM-OAR-ARL-274](https://doi.org/10.7289/V5/TM-OAR-ARL-274).

Floors, R., Peña, A., Vincent, C. L., Gryning, S. E., & Batchvarova, E. (2012). *Wind lidar profile measurements in the coastal boundary layer: comparison with WRF modelling*. EMS Annual Meeting Abstracts Vol. 9, EMS2012-270.

Haszpra, L., Barcza, Z., Haszpra, T., Patkai, Z., & Davis, K. J. (2015). How well do tall-tower measurements characterize the CO₂ mole fraction distribution in the planetary boundary layer? *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(4), 1657-1671. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1657-2015>

Lee, T. R., & De Wekker, S. F. J. (2015). Estimating daytime planetary boundary layer heights over a valley from rawinsonde observations at a nearby airport: An application to the Page Valley in Virginia, USA. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54.

Li, J., Chen, H., Zhanqing, L., Wang, P., Maureen, C., & Fan, X. (2014). Low-level temperature inversions and their effect on aerosol condensation nuclei concentrations under different large-scale synoptic circulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(7), 898-908. <https://doi.org/10.1007/s00376-014-4150-z>

Manahan, S. (2000). *Environmental science, technology, and chemistry*. Environmental Chemistry. Boca Raton: CRC Press LLC.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2018). *Global Data Assimilation System*. Prieiga per internetą 2018 m. kovo 11 d.: <https://ready.arl.noaa.gov/READYamet.php>.

Nemuc, A., Taliunu, C., Belegante, L., Ngo, R., & Derognat, C. (2012). The Boundary layer height and entrainment zone assessment from lidar, meteorological and forecast model. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Tropospheric Profiling*. ISBN: 978-90-815839-4-7.

Ogimet. (2016). *Archyviniai sinoptiniai duomenys*. Prieiga per internetą 2018 m. kovo mėn. 12 d.: <http://www.ogimet.com/>

Pei, H., & Shiliang, W. (2016). *Long term changes in extreme air pollution meteorology and the implications for air quality*. Scientific reports.

Rimkus, E. (2011). *Meteorologijos įvadas*. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla.

Schnelle, B. K., & Brown, A. C. (2002). *Air pollution control technology handbook*. The Mechanical Engineering Handbook Series. Direct all inquiries to CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431.

Sillman, S., & Samson, P. J. (1995). Impact of temperature on oxidant photochemistry in urban, polluted rural, and

remote environments. *Journal of Geophysical Research*, 100(D6), 11497-11508.
<https://doi.org/10.1029/94JD02146>

Stull, R. (2017). *Practical meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science*. Version 1.02b. Univ. of British Columbia. 940 p. ISBN: 978-0-88865-283-6.

Valiuškevičius, G. (1999). *Meteometrija*. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla.

HYDROTHERMAL SOUNDING OF THE LOWER TROPOSPHERIC LAYER USING A QUADCOPTER

D. Frišmantas, L. Januška, G. Stankūnavičius

Summary

The boundary layer of atmosphere has the highest variability of meteorological parameters on a horizontal and vertical plane. In this layer temperature inversion is forming whose structure is still under the research, especially in urban areas. The influence

of inversion layer on accumulation of air impurities (gaseous pollutants and aerosols) is associated with a decrease in horizontal visibility. The structure of the inversion depends on the synoptic situation, cloud cover, relief, landscape, absolute height, vegetation type. The hydrothermal sounding of troposphere by drones is a unique study in Lithuania because such research has not been carried out in Lithuania for 4 years. Two areas in Vilnius were selected for radio-sounding: Belmontas and Vingis parks. 2017/18 winter empirical measurements were compared with the weather forecast model output data from NOAA. Hydrothermal sounding is important for monitoring atmospheric contamination because inversion blocks all contaminants in the boundary layer of troposphere. The strongest inversion layer was recorded on 5 March 2018 at 8 am and the highest temperature gradient was $\Gamma = -2.7$ ($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$).

Keywords: boundary layer, temperature inversion, sounding, drone.