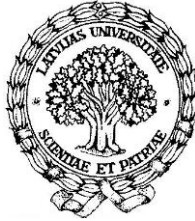


University of Latvia
Faculty of Geography and Earth Sciences



Zanita Avotniece

*CHARACTERISTICS AND LONG-TERM CHANGES OF EXTREME
CLIMATE EVENTS AND HAZARDOUS HYDROMETEOROLOGICAL
PHENOMENA IN LATVIA*

Summary of Doctoral Thesis

Submitted for the degree of Doctor of Geography in
Environmental Science, subfield of Nature protection

Rīga, 2018

The doctoral thesis was carried out in the Department of Environmental Science, Faculty of Geography and Earth Sciences over the period from 2012 to 2017.

The work has been carried out with a financial support from the Latvian Council of Science (grant No. 526/2016).

Scientific advisors:

Dr.geogr., prof. Agrita Briede

Dr.habil.chem., prof. Māris Kļaviņš

Reviewers:

Dr.geogr., assoc.prof. Iveta Šteinberga, University of Latvia

PhD, assoc.prof. Piia Post, University of Tartu

PhD, prof. Egidijus Rimkus, Vilnius University

Doctoral Committee:

Dr.geogr., assoc.prof. Iveta Šteinberga, chairman of the Committee

Dr.geogr., prof. Oļģerts Nikodemus

Dr.habil.chem., prof. Māris Kļaviņš

Dr.habil.paed., prof. Raimonds Ernšteins

Dr.geogr., prof. Agrita Briede

Dr.geogr., assist. prof. Oskars Purmalis, secretary of the Committee

The defense of doctoral thesis will be held on 7th September 2018 at 13:00 in a public session of the Doctoral Committee at the Faculty of Geography and Earth Sciences of the University of Latvia, 1 Jelgavas Street, Riga.

The dissertation is available at the Scientific Library of the University of Latvia, 4 Kalpaka blvd. and Academic Library of the University of Latvia, 24 Lielvārdes Street, Riga.

References should be addressed to *Dr.geogr. Iveta Šteinberga*, University of Latvia, Faculty of Geography and Earth Sciences, 19 Raiņa blvd, LV-1586, Riga. E-mail: Iveta.Steinberga@lu.lv.

© University of Latvia, 2018

© Zanita Avotniece, 2018

ABSTRACT

Climate change has been recognized as a major challenge to human beings and natural ecosystems, and has been associated with changes in extreme and hazardous climate and weather events that pose much more significant threats than climate change itself. So far, little knowledge exists on extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia. Therefore this thesis aims at the provision of a comprehensive analysis of the climatic characteristics, favourable atmospheric conditions and long-term changes in the frequency and intensity of extreme climate events and such hazardous hydrometeorological phenomena as the occurrence of sea ice, thunderstorms and fog in Latvia.

During the analysis carried out in the study, significant changes in extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia have been found under the conditions of recent climate change. Since the middle of the past century there has been a significant decrease in the number of extremely cold days and hazardous hydrometeorological events characteristic for the winter season, but the number of extremely hot days as well as the frequency and intensity of extreme precipitation has increased. The spatial differences in the distribution of such events are associated with the geographical location of the meteorological observation stations used in the analysis and the differences in the atmospheric conditions favourable for the occurrence of extreme and hazardous meteorological events. The obtained results highlight the importance of the applications of remote sensing observations for the monitoring and analysis of hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia, as well as the applicability of the produced datasets and body of research for further investigations and development of hydrometeorological and climate services in Latvia.

This Doctoral thesis is based on thematically unified set of eight scientific papers published in various scientific periodicals.

Keywords: *climate change, extreme climate events, hazardous hydrometeorological phenomena, fog, thunderstorms, sea ice.*

TABLE OF CONTENTS

INTRODUCTION	5
Topicality of the study.....	5
Aim, hypothesis and scientific questions addressed in the thesis	5
Novelty of the research.....	6
Practical applicability and significance of the research.....	6
Approbation of the results	7
Structure of the thesis	11
1. LITERATURE REVIEW	12
2. DATA AND METHODS	15
3. RESULTS AND DISCUSSION	17
3.1. Extreme climate events in Latvia	17
3.1.1. Trends in the frequency of extreme climate events in Latvia..	17
3.1.2. Large-scale atmospheric circulation patterns associated with extreme climate events in Latvia.....	19
3.2. Sea ice changes in the Baltic Sea and the Gulf of Rīga near the Latvian coast	20
3.2.1. Climatic characteristics of sea ice in the coastal areas of Latvia.....	20
3.2.2. Long-term changes in sea ice in the coastal areas of Latvia ...	20
3.3. Climatic characteristics and long-term changes of fog in Latvia ...	21
3.3.1. Climatic characteristics of fog in Latvia	21
3.3.2. Long-term changes in fog frequency in Latvia	23
3.4. Characteristics of thunderstorms in Latvia	24
3.4.1. Climatic characteristics of thunderstorms in Latvia	24
3.4.2. Long-term changes in the frequency and intensity of thunderstorms in Latvia	25
3.4.3. Assessment of the use of remote sensing observations for the identification and analysis of thunderstorms in Latvia	26
CONCLUSIONS	28
REFERENCES	62

INTRODUCTION

Topicality of the study

Climate change has been recognized as a major challenge to human beings and natural ecosystems. A significant worldwide increase in the mean temperature near the surface of the Earth has been reported, indicating that the climate is changing. Climate change affects all elements of the climate system: air and water temperature, precipitation, river runoff, ice, snow cover, hazardous hydrometeorological phenomena and others. Thus, climate change is not only characterized by changes in the mean values, but also by changes in the variability of climate indicators and extreme and hazardous events, such as, for instance: extreme heat events and heat waves, extreme precipitation, floods and changes in the behaviour of hazardous hydrometeorological phenomena. In respect to the damage to the society and natural ecosystems, changes in extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena may pose much more significant threats than climate change itself. Nevertheless, compared with existing knowledge on the long-term changes in mean climate indicators, much less is known about the changes in extremes. Therefore analysis of national climate and weather characteristics is essential for building of a deeper understanding of the climatic processes taking place on a regional and global scale.

Aim, hypothesis and scientific questions addressed in the thesis

The aim of this thesis is to assess the characteristics and long-term changes in extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia by using comprehensive analysis and advanced methodology.

The proposed hypothesis of this thesis is that there have been significant changes in the frequency and intensity of extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia since the middle of the past century. Therefore, the following scientific questions are set to be addressed within this thesis:

1. What are the climatic characteristics and long-term trends of changes in the frequency of extreme climate events and such hazardous meteorological phenomena as fog and thunderstorms in Latvia?
2. What are the climatic characteristics and long-term changes in the occurrence and persistence of sea ice as a hazardous hydrometeorological phenomenon in the Latvian coastal areas of the Baltic Sea and the Gulf of Rīga?
3. How are remote-sensing observations applicable for the observations and analysis of hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia?

4. What are the atmospheric conditions favourable for the occurrence of extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia?

Novelty of the research

The study presented within this thesis provides the results of investigations, which for the very first time provide comprehensive characteristics and complex analysis of extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia. Thus the results of this thesis comprise the following novelties:

- climatic and spatial distribution as well as long-term changes in the frequency and intensity of extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia have been determined, characterized and assessed;
- atmospheric conditions associated with the occurrence of extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena have been identified and characterized;
- applicability of remote sensing observations for the observation and analysis of hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia has been assessed and identifiers of increased thunderstorm severity obtained from remote sensing observations have been determined;
- representivity of the existing thunderstorm warning criteria in Latvia has been assessed by analysing the long-term observation time-series of thunderstorm frequency and intensity.

Practical applicability and significance of the research

The results obtained within this thesis can be used both for the development and improvement of the national hydrometeorological and climate service provided by the Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre, as well as for the development of national climate policy initiatives and actions for climate change adaptation and mitigation. The obtained results can be used as a supplement to the existing national climatologies, as well as for the development of improved forecasting, nowcasting and warning techniques, thus contributing to an increased adaptation and resilience capacity. The developed databases and datasets can be used for further studies contributing to the increase in knowledge and capacity regarding the investigations of extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia.

Approbation of the results

The results of the study have resulted in eight scientific publications and presentations in 16 international and 8 local conferences.

Scientific papers on the topic of the thesis

- Paper 1. **Avotniece, Z.**, Rodinov, V., Lizuma, L., Briede, A., Kļaviņš, M. (2010). Trends in the frequency of extreme climate events in Latvia. *Baltica*, **23** (2), 135–148. (Scopus and ISI Web of Science)
- Paper 2. **Avotniece, Z.**, Kļaviņš, M., Rodinovs, V. (2012). Changes of Extreme Climate Events in Latvia. *Environmental and Climate Technologies*, **9** (1), 4–11. (Scopus)
- Paper 3. Kļaviņš, M., **Avotniece, Z.**, Rodinovs, V. (2016). Dynamics and Impacting Factors of Ice Regimes in Latvia Inland and Coastal Waters. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*, **70** (6), 400–408. (Scopus)
- Paper 4. **Avotniece, Z.**, Klavins, M., Lizuma, L. (2014). Fog Climatology in Latvia. *Theoretical and Applied Climatology*, **122** (1–2), 97–109. (Scopus and ISI Web of Science)
- Paper 5. **Avotniece, Z.**, Klavins, M. (2013). Temporal and Spatial Variation of Fog in Latvia. *Environmental and Climate Technologies*, **3**, 5–10.
- Paper 6. **Avotniece, Z.**, Aniskevich, S., Briede, A., Klavins, M. (2017). Long-term changes in the frequency and intensity of thunderstorms in Latvia. *Boreal Environment Research*, **22**, 415–430. (Scopus and ISI Web of Science)
- Paper 7. Wrona, B., **Avotniece, Z.** (2015). The Forecasting of Tornado Events: the Synoptic Background of Two Different Tornado Case-studies. *Meteorology Hydrology and Water Management*, **3** (1), 51–58. (ISI Web of Science)
- Paper 8. **Avotniece, Z.**, Klavins, M., Briede, A., Aniskevich, S. (2017). Remote Sensing Observations of Thunderstorm Features in Latvia. *Environmental and Climate Technologies*, **21**, 28–46. (ISI Web of Science)

Other scientific papers

Kļaviņš, M., Kokorīte, I., Rodinovs, V., **Avotniece, Z.**, Sprinģe, G., Briede, A. (2011). Hydrometeorological Parameters and Aquatic Chemistry of the Lake Engure: Trends of Changes Due to Human Impact and Natural Variability. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*, **65** (5–6), 138–145. (Scopus)

Avotniece, Z., Rodinovs, V., Kļaviņš, M. (2011). Climate Related Mortality Changes in Latvia. 1996–2008. *Scientific Papers of the University of Latvia*, **762**, 188–195.

Lizuma, L., **Avotniece, Z.**, Rupainis, S., Teilans, A. (2013). Assessment of the Present and Future Offshore Wind Power Potential: A Case Study in a Target Territory of the Baltic Sea Near the Latvian Coast. *The Scientific World Journal*, 1–10. (Scopus and ISI Web of Science)

Avotniece, Z., Dimants, M. (2018). The use of Satellite Scatterometry and Altimetry Data for Wind and Wave Monitoring in the Central part of the Baltic Sea and the Gulf of Riga. *Journal of Maritime Transport and Engineering* [In Press].

Other publications

Kļaviņš, M., **Avotniece, Z.**, Rodinovs, V. (2012). Heat Waves in Latvia: Occurrence, Impacts and Consequences In: Kļaviņš, M., Briede, A. (eds.), *Climate Change in Latvia and Adaptation to it* (pp. 62–78). Riga: University of Latvia Press.

Avotniece, Z., Aņiškeviča, S., Maļinovskis, E. (2017). *Klimata pārmaiņu scenāriji Latvijai* [Climate Change Scenarios for Latvia] (in Latvian with summary in English). Available: <http://www2.meteo.lv/klimatariks/> [Accessed 19.03.2018].

Avotniece, Z. (2018). Ekstremālās un bīstamās atmosfēras parādības [Extreme and Hazardous Atmospheric Phenomena]. In: Kļaviņš, M., Krišjāne, Z., Nikodemus, O., Zelčs, V. (eds.) *Latvija. Zeme, daba, tauta, valsts* [Latvia. Land, Nature, People, Country] (In Latvian with summary in English) (pp. 259–262). Riga: University of Latvia Press.

International conferences

Avotniece, Z., Rodinov, V., Lizuma, L., Kļaviņš, M. Trends of Changes of Extreme Climate Events in Latvia. In: *The XXVI Nordic Hydrological Conference, 9–11.08.2010 Riga, Latvia*.

Avotniece, Z., Rodinov, V., Lizuma, L., Briede, A., Kļaviņš, M. Trends in the Frequency of Extreme Climate Events in Latvia. In: *ESF-COST High-level research Conference on Extreme Environmental Events, 13–17.12.2010 Cambridge, United Kingdom*.

Avotniece, Z., Rodinov, V., Lizuma, L., Briede, A., Kļaviņš, M. Trends in the Frequency of Extreme Climate Events in Latvia. In: *BalticClimate Conference 'Pathfinding through Climate Change', 8–9.11.2011 Riga, Latvia*.

Avotniece, Z., Rodinov, V., Lizuma, L., Kļaviņš, M. Trends in the Frequency of Extreme Climate Events in Latvia as Influenced by Large Scale Atmospheric Circulation Processes. In: *11th EMS Annual Meeting / 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM), 12–16.09.2011 Berlin, Germany*.

Briede, A., **Avotniece, Z.**, Lizuma, L. Extreme Weather Events in the Baltic Sea Coastline Areas of Latvia. In: *11th EMS Annual Meeting / 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM), 12–16.09.2011 Berlin, Germany*.

Avotniece, Z., Kļaviņš, M., Rodinovs, V. Changes of Extreme Climate Events in Latvia. In: *The 53rd International Scientific Conference of Riga Technical University*, 11–12.11.2012 Riga, Latvia.

Avotniece, Z., Kļaviņš, M., Rodinovs, V., Briede, A., Lizuma, L. Trends in the Frequency of Extreme and Hazardous Weather Events in Latvia. In: *12th EMS Annual Meeting & 9th European Conference on Applied Climatology (ECAC)*, 10–14.09.2012 Łódź, Poland.

Avotniece, Z., Lizuma, L., Viksna, A. The Estimation of Cloudiness and Solar Surface Irradiance in Latvia by Using Satellite Data. In: *12th EMS Annual Meeting & 9th European Conference on Applied Climatology (ECAC)*, 10–14.09.2012 Łódź, Poland.

Avotniece, Z., Kļaviņš, M., Briede, A., Lizuma, L. Climatic characteristics of thunderstorms in Latvia. In: *The 7th European Conference on Severe Storms (ECSS 2013)*, 03–07.06.2013 Helsinki, Finland.

Avotniece, Z., Briede, A., Lizuma, L. Long-term trends and variability of daily minimum and maximum air temperatures in Latvia. In: *13th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applications of Meteorology*, 09–13.09.2013 Reading, United Kingdom.

Avotniece, Z., Higgins, M., Roebeling, R. The experience and instructions for creating a satellite-based climate atlas for Europe and Latvia. In: *The 2014 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, 22–26.09.2014 Geneva, Switzerland.

Avotniece, Z., Higgins, M., Roebeling, R. The experience and instructions for creating a satellite-based climate atlas for Europe and Latvia. In: *The Climate Symposium 2014*, 13–17.10.2014 Darmstadt, Germany.

Avotniece, Z., Šmite, S. Severe Thundershowers Over the Central Part of Latvia on 29 July 2014. In: *8th European Conference on Severe Storms (ECSS 2015)*, 14–18.09.2015 Wiener Neustadt, Austria.

Avotniece, Z., Koreļska, L., Kļaviņš, M., Briede, A. Changes in the variability of extreme climate events in Latvia. In: *EGU General Assembly 2015*, 12–17.04.2015 Vienna, Austria.

Avotniece, Z., Dimants, M. The use of ASCAT and JASON data in operational storm forecasting in the Central part of the Baltic Sea and in the Gulf of Riga. In: *The 2015 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*. 21–25.09.2015 Toulouse, France.

Avotniece, Z., Klavins, M., Briede, A., Aniskevica, S. Long-term changes in the frequency and intensity of thunderstorms in Latvia: analysis based on observations from 14 surface weather stations. In: *6th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC)*, 12–16.09.2016 Trieste, Italy.

Briede, A., **Avotniece, Z.,** Koreļska, L. The trends and variability of climate extremes in Latvia. In: *6th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC)*, 12–16.09.2016 Trieste, Italy.

Walawender, J.P., **Avotniece, Z.**, Kilpys, J., Vint, K., Pārg, R., Bogdańska, B., Trentmann, J., Pfeifroth, U. Solar Radiation Atlas for Poland and the Baltic States based on CM SAF data. In: *The 2016 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*. 26–30.09.2016 Darmstadt, Germany.

Avotniece, Z., Dimants, M. The use of satellite scatterometry and altimetry data for wind and wave monitoring in the Central part of the Baltic Sea and the Gulf of Riga. In: *20th International Conference 'Maritime Transport and Infrastructure'*, 19–20.04.2018 Riga, Latvia.

Local conferences

Avotniece, Z. Ekstremālo klimatisko parādību mainība Latvijā [Variability of Extreme Climate Events in Latvia] (in Latvian). In: *69th Scientific Conference of the University of Latvia*, 02.02.2011. Riga, Latvia.

Avotniece, Z. Saules radiācijas un mākoņainuma novērtēšana, izmantojot satelītu novērojumu datus [The Estimation of Solar Radiation and Cloudiness by Using Satellite Observation Data] (in Latvian). In: *The IV Congress of Geography in Latvia 'Geography in the Variable World'* 16–17.03.2012. Riga, Latvia. A

Avotniece, Z. Ekstremālo un bīstamo klimatisko parādību ilggadīgo izmaiņu raksturs Latvijā [Trends in the Frequency of Extreme and Hazardous Weather Events in Latvia] (in Latvian). In: *The IV Congress of Geography in Latvia 'Geography in the Variable World'* 16–17.03.2012. Riga, Latvia.

Lizuma, L., Briede, A., **Avotniece, Z.** Hidrometeoroloģisko parametru izmaiņu analīze Baltijas jūras Latvijas piekrastes teritorijās [Long-term Trends of Hydrometeorological Parameters in the Baltic Sea Coastline Areas of Latvia] (in Latvian). In: *The IV Congress of Geography in Latvia 'Geography in the Variable World'* 16–17.03.2012. Riga, Latvia.

Avotniece, Z. Satelītu novērojumu datu izmantošanas iespējas klimata pētījumos Latvijā [The Use of Satellite Data in Climatological Studies in Latvia] (in Latvian). In: *71st Scientific Conference of the University of Latvia*, 30.01.2013. Riga, Latvia.

Lizuma, L., Briede, A., **Avotniece, Z.** Augsnes temperatūras ilgtermiņa izmaiņas Latvijā [Long-term Changes in Soil Temperature in Latvia] (in Latvian). In: *72nd Scientific Conference of the University of Latvia*, 30.01.2014. Riga, Latvia.

Avotniece, Z., Higgins, M., Roebeling, R. Uz satelītu novērojumiem balstīta atlanta izveide Latvijai un Eiropai [Satellite-based Climate Atlas for Latvia and Europe] (in Latvian). In: *73rd Scientific Conference of the University of Latvia*, 04.02.2015. Riga, Latvia.

Avotniece, Z., Briede, A., Koreļska, L. Ekstremālo klimatisko parādību mainības izmaiņas Latvijā 1923.-2010. gadā [Changes in the variability of extreme climate events in Latvia over the period 1923–2010] (in Latvian). In: *73rd Scientific Conference of the University of Latvia, 04.02.2015. Riga, Latvia.*

Avotniece, Z., Aņiskeviča, S., Kilpys, J., Walawender, J.P., Vint, K., Pārg, R., Rosin, K. Augstas izšķirtspējas saules radiācijas atlants Baltijas valstīm [High Resolution Solar Radiation Atlas for the Baltic States] (in Latvian). In: *74th Scientific Conference of the University of Latvia, 02.02.2016. Riga, Latvia.*

Avotniece, Z., Aņiskeviča, S., Briede, A., Kļaviņš, M. Pērkona negaisu biežums un intensitāte Latvijā [Frequency and Intensity of Thunderstorms in Latvia] (in Latvian). In: *75th Scientific Conference of the University of Latvia, 30.01.2017. Riga, Latvia.*

Briede, A., **Avotniece, Z.**, Sprinģe, G., Kļaviņš, M., Kokorīte, I., Koreļska, L., Skuja, A., Ozoliņš, D., Apsīte, E., Rodinovs, V. Latvijas klimata mainības tendences un ietekmes [Trends and impacts of the variability of climate in Latvia] (in Latvian). In: *75th Scientific Conference of the University of Latvia, 30.01.2017. Riga, Latvia.*

Avotniece, Z., Briede, A., Kļaviņš, M., Aņiskeviča, S. Pērkona negaisiem raksturīgās attālinātajos novērojumos Latvijā [Features in Remote Sensing Observations Characteristic for Thunderstorms in Latvia] (in Latvian). In: *76th Scientific Conference of the University of Latvia, 31.01.2018. Riga, Latvia.*

Structure of the thesis

The thesis consists of a thematically united collection of publications. The main results of the study on four topics are presented in 8 scientific papers. The thesis also contains a section of literature review and summary of the obtained results.

1. LITERATURE REVIEW

In order to develop effective climate change adaptation and mitigation strategies and activities, it is essential to obtain comprehensive knowledge and understanding of the behaviour of extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena, especially in the context of recent climate change. However, while a large body of research has focused on the analysis of the climatic means, certain limitations in the available concepts and data have resulted in several problems for observing, analysing and building credible climatologies of extreme and hazardous events (Klein Tank, 2004). Amongst these limitations first of all is the complex nature of extreme and hazardous phenomena: high-impact events are usually local and they can also be short-lived, thus they might not be observed and fully represented by the surface observation networks (Burroughs, 2003). Another limitation for the identification and analysis of such events is the inequality of the concepts associated with extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena (Meteoalarm, 2017; Beniston *et al.*, 2007; Easterling *et al.*, 2000; Klein Tank, 2004). At the same time research shows that economic losses from weather and climate-related disasters have increased, and continued changes in climate will lead to an even increased magnitude of impacts on various socioeconomic sectors (Handmer *et al.*, 2012; Kovats *et al.*, 2014).

The changes in climate occurring worldwide, have led to changes in the frequency, timing, duration, spatial extent and intensity of weather and climate extremes (Karl and Trenberth, 2003). In several studies in Europe, significant increasing trends have been found in a variety of extreme indices over the latter part of the 20th century (Heino *et al.*, 1999; Wibing and Glowicki 2002; Klein Tank and Können, 2003; Moberg and Jones, 2005; Kažys *et al.*, 2011). Research studies have confirmed a long-term increase in the frequency of occurrence of extremely warm days and nights, while extremely cold days and nights have become more seldom (IPCC, 2014). Observed increase in air temperatures has resulted in rising concerns regarding the adverse effects of heat waves. An increase in mortality related to heat waves has been reported from various industrialized countries (Dessai, 2002; Diaz *et al.*, 2006; Beniston, 2007; Unkaševica and Tošić, 2009), and with the aging societies in much of the developed world it is expected that their vulnerability will continue increasing (Handmer *et al.*, 2012).

According to studies carried out in Europe, there are significant spatial differences in the trends of changes for extreme precipitation events (Klein Tank, 2004; Beniston *et al.*, 2007), though the most significant increasing tendency has been observed in the Baltic Sea region (Bhend and Storch, 2007; Kjellström and Ruosteenoja, 2007). The occurrence of heavy

precipitation events in the winter season has increased in Central and Northern Europe, while an increase in summertime heavy precipitation events has been characteristic for the northeastern regions of Europe. At the same time both wintertime and summertime cases of heavy precipitation have become more seldom in the Southern part of Europe (Beniston *et al.*, 2007; Kjellström and Ruosteenoja, 2007). Studies claim that in the Baltic Sea basin the annual total precipitation amount has increased by 8.24 mm per decade (Bhend and Storch, 2007).

While extreme events pose the greatest threat to the society and individuals, extreme weather-related impacts can also occur from events that may not be considered as extreme. Even though hazardous hydrometeorological phenomena cause extensive socioeconomic damage and loss in Europe, their long-term trends of changes so far have been poorly represented by research studies. Amongst the hazardous hydrometeorological phenomena which vary both by the season of occurrence and the sectors affected, each phenomenon is associated with a different set of impacts. For instance, the formation of sea ice in the coastal areas of the Baltic Sea and the Gulf of Rīga has been common for winter seasons of the past century, while recent climate change has led to an increase in winter temperatures and thus deteriorated the formation of sea ice (IPCC, 2014b). However, the observed changes have not been linear, and due to variability, cold and icy winters have also been observed in the beginning of the 21st century resulting in difficulties for the navigation of ships.

Another hazardous phenomenon affecting transportation is the occurrence of fog (Cermak and Bendix, 2008; Heo *et al.*, 2010). Fog is a hazardous weather phenomenon worldwide, which can cause accidents and affect urban air quality, especially in combination with impacts of air pollutants (Lange *et al.*, 2003; Singh and Dey, 2012; Bendix, 2002; Witiw and LaDochy, 2008). On the other hand, fog as a source of humidity is also very important to the health of ecosystems and humans (Sachweh and Koepke, 1997). The most intense fog events in both persistence and thickness were observed in many sites of the industrialized world in the 1940s and 1950s. Since this time, owing to the introduction of clean air legislation and a decrease in total suspended particulates, fog climatology has changed considerably and many sites have experienced a decrease in fog frequency (Bendix, 2002; Witiw and LaDochy, 2008; Shi *et al.*, 2008).

The most hazardous weather phenomenon observed in Latvia in the summer season is the occurrence of thunderstorms. Severe weather associated with thunderstorms has been observed in every country in Europe and poses a significant threat to life, property and economy. Numerous hazards that lead to fatalities, injuries, property damage, economic disruptions and environmental degradation are associated with thunderstorm activity. Such hazards belonging to a group defined as small-scale severe

weather phenomena include hail, lightning, damaging straight-line winds, tornadoes and heavy rainfall leading to flooding (Parsons, 2015; Zwiers *et al.*, 2013; Czernecki *et al.*, 2016; Dotzek *et al.*, 2009; Doswell *et al.*, 1990). In recent years, the number of reported severe convection events has risen largely because of the increased ability to detect them using radar and satellites and because of the volunteer observer activities established in many countries. At the same time studies carried out in Europe do not confirm an increase in thunderstorm frequency – a decrease in thunderstorm frequency has been identified for Lithuania and Estonia (Enno *et al.*, 2014), while no significant changes in thunderstorm frequency have been found in Finland (Tuomi and Mäkelä, 2008) and Poland (Bielec-Bakowska, 2003). Such findings emphasize the pronounced spatial variability in the dynamics of annual thunderstorm frequency. The lack of firm conclusions regarding the past and future behaviour of thunderstorm environments is highly associated with their observational limitations (Zwiers *et al.*, 2013), and therefore the development of effective national warning systems and mechanisms is essential for mitigation of adverse effects of any possible changes to come.

2. DATA AND METHODS

This section contains the description of the data and main methodology used for the identification, characteristic and assessment of extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia. Additional and more detailed information on the data and methodology can be obtained from the corresponding sections of the research papers supplemented to this thesis.

The basis for the performed analysis lies on the investigation of surface hydrometeorological observation data obtained from the long-term data archive maintained and managed by the Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre (hereafter – LEGMC). The information was obtained from hydrometeorological stations of Latvia with uninterrupted long-term data records available for each of the hydrometeorological parameters analysed. The surface observation data were obtained from the historical data archive as well as extracted from the electronic hydrometeorological observation database CLIDATA. As the thesis contains an investigation of a variety of hydrometeorological parameters, information obtained from the archived data of surface observations include daily values of the following parameters:

- mean, minimum and maximum air temperature;
- precipitation amount;
- mean wind speed and maximum wind gusts;
- mean water temperature and occurrence of sea ice;
- mean relative humidity;
- mean atmospheric pressure at the station level;
- observations of atmospheric phenomena – fog, thunderstorms, hail, snow pellets.

For the assessment of the climatic characteristics and trends of changes in extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia, the long-term data records covering the period from 1924 till 2015 (for Rīga-Universitāte station data records since 1852) have been used in this study. The data have been subjected to basic quality control and homogeneity assessment, ensuring the use of reliable and representative information for the analysis.

Indices derived from daily temperature and precipitation data, describing changes in the mean and extreme values, were computed and analysed. The indices follow the definitions recommended by the CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ECA&D, 2017), with a primary focus on extreme events.

For the investigation of thunderstorm severity the occurrence and intensity of additional meteorological parameters has been used following an approach comparable to the existing national warning criteria. The

national thunderstorm warning criteria are currently based on the intensities of severe weather phenomena associated with thunderstorms, and these are hail, wind gusts and precipitation amount, which, according to their intensity, identify thunderstorms of green, yellow, orange and red warning level in line with the Meteoalarm warning levels (LEGMC, 2017; Meteoalarm, 2017).

In addition to surface meteorological station data, remote sensing observations were used for the analysis of hazardous hydrometeorological phenomena. These include information obtained from the Nordic Lightning Information System (NORDLIS) (Mäkelä *et al.*, 2010), Doppler Weather Radar METEOR 500C (SELEX Sistemi Integrati GmbH, 2006) located near Rīga Airport, spectral images obtained from weather satellites and satellite-based datasets (CM SAF, 2009). Data obtained from the weather radar and satellite measurements provide both qualitative and quantitative estimates beneficial for meteorological analysis. During the thunderstorm severity assessment performed within the analysis, various theory-based and widely used thunderstorm features were identified from the remote-sensing data (Stalker and Knupp, 2001; Rigo and Pineda, 2016; Lemon and Doswell, 1979; Setvak *et al.*, 2010; Žibert and Žibert, 2013).

Atmospheric circulation patterns for the Baltic Sea region were examined in order to assess the atmospheric conditions favourable for the occurrence of extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia. These 18 large-scale atmospheric circulation patterns were derived from modifications of the circulation patterns created by Gerstengarbe and Werner (Hoy *et al.*, 2013) and made available for scientific research by the European Cooperation in Science and Technology Action 733 (COST733, 2013). In order to determine relationship of sea ice changes to wide-scale climatic forcing factors, the extended North Atlantic Oscillation (NAO) index (Luterbacher *et al.*, 2002) and the Baltic winter index (WIBIX) was used (Hagen and Feistel, 2005).

Trends in the meteorological event time series were analysed by applying the Mann-Kendall test separately to each data series. For this purpose the MAKESENS tool was used, which was developed for detecting and estimating trends in the time series of annual data (Salmi *et al.*, 2002). The procedure is based on the nonparametric Mann-Kendall test (Richard, 1987) for the trend and the nonparametric Sen's method for the magnitude of the trend. The Mann-Kendall test is applicable to the detection of a monotonic trend of a time series with no seasonal or other cycle. This is a relatively robust method concerning missing data and has no strict requirements regarding data heteroscedasticity, and for these reasons it is a comparatively popular tool used for trend analysis for climate applications (Salmi *et al.*, 2002).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Climate in Latvia is influenced by its location in the northwest of the Eurasian continent (continental climate impacts) and proximity to the Atlantic Ocean (maritime climate impacts). A highly variable weather pattern is determined by the strong cyclonic activity over Latvia. Such conditions contribute to differences in the regimes of air temperature and precipitation, and also to the spatial inhomogeneity in the occurrence of extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena.

3.1. Extreme climate events in Latvia

3.1.1. Trends in the frequency of extreme climate events in Latvia

The analysis revealed significant changes in the frequency of extreme climate events in Latvia. The study confirms a statistically significant increase in the mean values of daily minimum, maximum and mean air temperatures. The mean of daily maximum and minimum air temperature showed a statistically significant increasing trend at all meteorological observation stations investigated, while a significant increasing trend in the lowest values of daily minimum air temperature was also detected at 12 meteorological observation stations since 1950. Trends in the frequency of the highest annual value of daily minimum air temperature, highest and lowest annual value of daily maximum air temperature demonstrated lower statistical significance, especially for the observation stations located in the eastern part of the country. Such differences reveal the spatial heterogeneity of changes in temperature extremes and the impact of local factors affecting climate at regional/local level. In addition, the increase in temperature values has not been even throughout the year. The trends of changes observed in Rīga can be considered as alarming, since statistically significant increasing trends are common for nearly full year (except October and December), pointing out the role of the city microclimate (Gabriel and Endlicher, 2011; Lizuma, 2008).

It was found that trends in extreme temperature indices were stronger for the climatic indices related to the cold seasons. For example, the number of frost days (FD) and number of ice days (ID) both show statistically significant decreasing trends in all the studied stations (Figure 1). However, due to the observed warming in the mean values of air temperature, there has also been an increase in the frequency of extremely hot days and nights. A statistically significant increase in the number of summer days (SU) and tropical nights (TR) has been observed in the majority of meteorological observation stations.

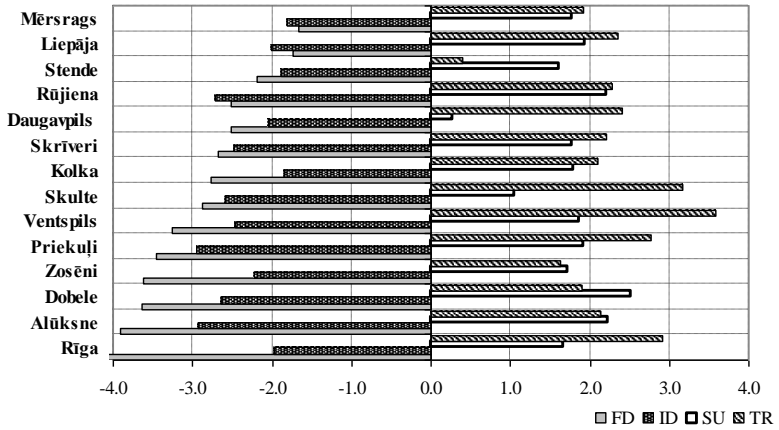


Figure 1. Long-term trends in the frequency of extreme temperature events in Latvia over the period 1950–2010 (Mann-Kendall test statistics). The abbreviations correspond to the following climate indices: FD – frost days; ID – ice days; SU – summer days; TR – tropical nights.

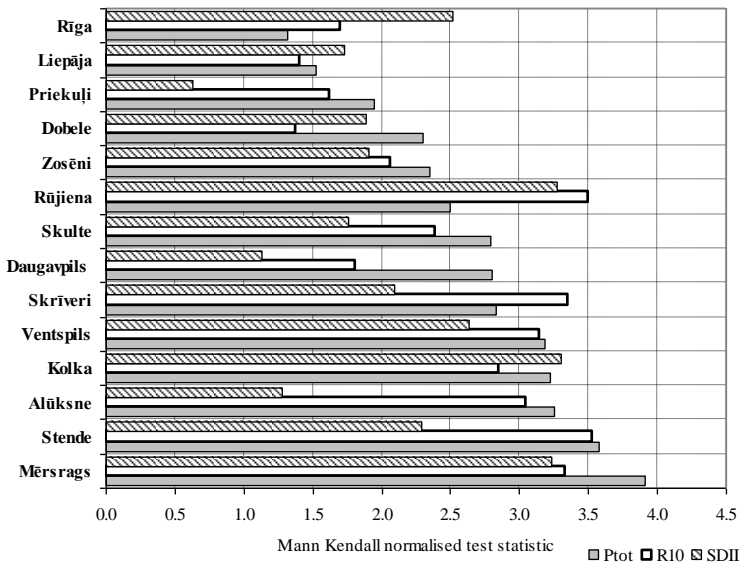


Figure 2. Long-term trends in the frequency and intensity of precipitation in Latvia over the period 1950–2010 (Mann-Kendall test statistics). The abbreviations correspond to the following climate indices: Ptot – annual total precipitation amount on wet days; R10 – days with heavy precipitation; SDII – simple daily intensity index.

Moreover, warm spell duration indicator characterizing the length of prolonged heat events has a statistically significant increasing trend all over Latvia. This can be considered as the most alarming result of this analysis, because an increase in the frequency and length of the periods of prolonged heat can have a significant negative effect on human morbidity and mortality (Diaz *et al.*, 2006; Beniston, 2007; Unkaševica and Tošic, 2009).

The analysis of the long-term data records shows statistically significant changes observed in the frequency and intensity of precipitation in Latvia. The results of this study demonstrate a statistically significant increase in the annual total precipitation amount on wet days (Ptot) in most of the observation stations and major changes in a simple daily intensity index (SDII), pointing out significant changes in the character of precipitation intensity and consequently the damaging potential of heavy precipitation events (Figure 2). In addition, in all of the meteorological observation stations studied there has been an increase in the number of days with heavy (R10) and very heavy precipitation. For most of the observation stations the trends of precipitation intensity changes are increasing and statistically significant. However, it becomes evident that impacts of regional factors are affecting the precipitation regime. So, for example, the well-expressed increase in the number of days with heavy precipitation in Rīga, especially evident throughout the past ~80 years, could be associated with the influence of the Gulf of Rīga and the urban climate specifics (Birkmann *et al.*, 2010).

3.1.2. Large-scale atmospheric circulation patterns associated with extreme climate events in Latvia

In order to assess the atmospheric conditions favourable for the occurrence of extreme climate events in Latvia, daily large-scale atmospheric circulation patterns over the period 1957–2002 were analysed. It was found that the most favourable conditions for the occurrence of extremely hot days and nights can be observed under the influence of a southwesterly and southerly anticyclonic flow, in the case of a high pressure area being located over the eastern part of Europe. However, extremely hot weather can also be associated with the warm sector of a cyclone.

The days with heavy precipitation were mainly associated with cyclones, however, there were some differences in the dominant synoptic processes between the cold and warm times of the year. In the summer, heavy precipitation events were mainly associated with convective processes and the cold fronts of cyclones, while in winter these events were mostly the result of prolonged precipitation (Jakimavičius and Kovalenkoviėnė, 2010; Kriaučiūniene *et al.*, 2008) associated with a warm front. However, when the

centre of a low pressure area was situated over Latvia, heavy precipitation was observed at any time of the year.

3.2. Sea ice changes in the Baltic Sea and the Gulf of Rīga near the Latvian coast

3.2.1. Climatic characteristics of sea ice in the coastal areas of Latvia

According to the analysis of the available long-term data records, in the coastal areas of Latvia, initial ice development usually begins in the bay of Pärnu, where the first new ice formations occur in the middle of December. Thereafter the ice-covered area extends along the northeastern coast of the Gulf of Rīga, while at the same time some new ice formation near the southern and western coast of the Gulf occurs. The most rapid ice development usually occurs in February, when under favourable conditions the Gulf of Rīga becomes completely ice-covered. During very cold winters, ice may form also at the coastline of the Baltic Sea. However, the expansion of ice varies widely from year to year, depending on the prevailing weather conditions. With the prevailing westerly winds the ice break-up begins in the western part of the Gulf and gradually progresses to the east. The first area of the Gulf to become completely ice-free is the Irbe Strait followed by western and southern part of the Gulf, but in the north, northeastern areas the melting and rotten pack ice remains the longest.

The average length of the ice season is the longest in the Bay of Pärnu and in the northern part of the Gulf of Rīga – 145 days or almost 5 months. The shortest ice season of ~2 months is characteristic for the southwestern part of the Gulf, the Irbe Strait and the coastal areas of the Baltic Sea. The maximum observed length of the ice season in the Gulf of Rīga has been 168 days, but in the coastal waters of the Baltic Sea – 127 days.

3.2.2. Long-term changes in sea ice in the coastal areas of Latvia

The observed increase in the mean values of air temperature has led to significant changes in ice conditions both at the Latvian coastline of the Baltic Sea and in the Gulf of Rīga. A significant decreasing tendency in the length of the ice season over the period 1949–2013 was detected (Figure 3).

Such changes are strongly related to the dynamics and changes in large-scale atmospheric circulation processes taking place over the North Atlantic: a strong negative correlation between the NAO index and the number of days with ice cover along the coastline of Latvia exists. These findings highlight the fine linkages between the large-scale NAO forcing factors and the regional scale climate processes in the Baltic region. Also, a

strong negative correlation between the NAO index, the WIBIX index and the ice-break up events shows that processes over the North Atlantic are the driving force for the sea ice regime at the coastline of Latvia.

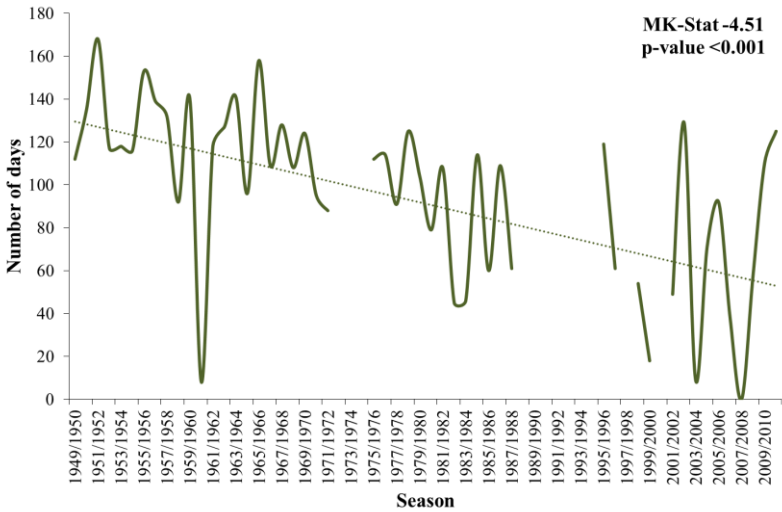


Figure 3. Long-term changes in the length of the ice season in the Gulf of Rīga near the Latvian coast (represented by the time-series from the Salacgrīva observation station) over the period 1949–2013

Even though the length of the ice season has significantly decreased in the longer period (Gebre *et al.*, 2014), during the past decade there still have been some winters with extensive ice cover over the coastal waters of Latvia. For instance, during the winter of 2010/2011, the Gulf of Rīga was already completely ice-covered by the middle of February and the remains of rotten drifting ice persisted in the Gulf until the beginning of May.

3.3. Climatic characteristics and long-term changes of fog in Latvia

3.3.1. Climatic characteristics of fog in Latvia

Fog is considered to be one of the most dangerous meteorological phenomena affecting transportation, especially air traffic, and causing flight delays and cancellations. The analysis of the available long-term data records revealed that fog is a comparatively frequent weather phenomenon in Latvia, observed 19–59 days per year on average.

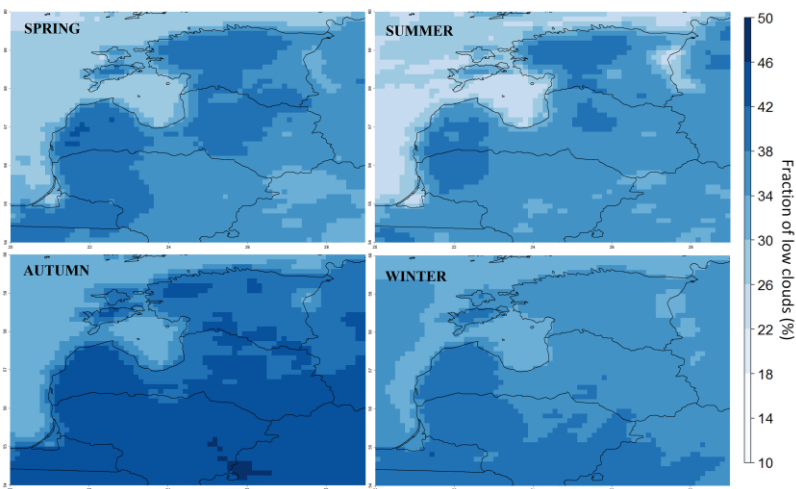


Figure 4. Mean amount of low clouds (%) in autumn (SON), winter (DJF), spring (MAM) and summer (JJA) obtained from meteorological satellite observations over the period 2008–2013

The formation of fog is closely related to the local geographical features of a site, such as orography and slope exposure, proximity to the Baltic Sea and the Gulf of Rīga, as well as the different meteorological processes favourable for the formation of fog. Therefore, there are significant differences in the annual mean number of days with fog in different parts of the country. Fog can be observed most frequently in the western areas of the upland regions of Latvia, while the lowest number of days with fog is observed in the eastern areas of the uplands and in the coastal areas of the Gulf of Rīga. It is important to note that there are considerable year-to-year and inter-annual variations in the occurrence of fog in Latvia. In the inland stations, the maximum fog frequency is between August and December. During the autumn months, radiation fog forms more frequently, while during winter and spring, advection fog gradually becomes more frequent. Therefore, in the coastal observation stations, the maximum frequency of fog is characteristic in spring – during March, April and May – when warm advection from the west triggers the formation of advection fog. Similar distribution has been found during the analysis of satellite-based observations of low cloud cover (Figure 4).

Fog can be classified by its formation in the processes of advection, radiative cooling or a mix of both processes (Ahrens, 2007), and each of these processes can trigger the formation of fog in Latvia throughout the year. During the analysis it was found that the most common conditions for the formation of fog in Latvia have been days with westerly or southwesterly air flows under anticyclonic conditions. In such conditions, both radiation

and advection fog can form. Also, a detailed analysis of fog formation at the Rīga Airport revealed that the majority of poor visibility cases have been associated with the formation of radiation fog. However, a significant proportion of fog cases in Latvia has also formed under cyclonic conditions. In such cases, the formation of fog is usually associated with frontal systems or the warm sector of a cyclone. Thus it is evident that the formation of fog in Latvia is mainly associated with the inflow of warm and moist air from the southwest and west.

3.3.2. Long-term changes in fog frequency in Latvia

The annual number of days with fog in Latvia has decreased significantly during the past 53 years (Table 1), and such changes have been evident in all 14 meteorological observation stations.

Table 1

The long-term trends of changes in the seasonal and annual number of days with fog in Latvia (Mann-Kendall test statistics) during the period 1960–2012.
The statistically significant values are highlighted in bold.

	Winter (DJF)	Spring (MAM)	Summer (JJA)	Autumn (SON)	Annual
Alūksne	-5.09	-5.40	-3.87	-4.88	-6.59
Daugavpils	-5.30	-4.96	-4.41	-4.34	-6.42
Dobeles	-2.81	-3.67	-2.26	-1.93	-3.71
Kolka	-4.73	-3.70	-3.45	-3.85	-4.15
Liepāja	-2.92	-1.91	-0.86	-1.89	-3.01
Mērsrags	-2.84	-0.67	-1.18	-1.24	-2.44
Priekule	-3.48	-2.85	-3.31	-2.15	-4.58
Rīga	-1.99	-3.02	-4.22	-2.94	-4.28
Rūjiena	-4.32	-4.86	-6.17	-4.18	-6.35
Skrīveri	-2.47	-1.71	-3.06	-1.96	-4.01
Skulte	-2.82	-3.22	-4.30	-4.29	-5.08
Stende	-2.98	-3.46	-4.07	-3.13	-5.15
Ventspils	-3.33	-2.19	-2.21	-1.49	-4.48
Zosēni	-2.75	-2.54	-2.91	-2.66	-3.24
Overall in Latvia	-4.34	-3.41	-5.20	-4.08	-5.78

Fog frequency has decreased in all seasons; however, the most significant changes have been observed in the winter. When compared, the trend analysis of fog and air temperature changes show some similar signs: the most significant changes have occurred in the winter season. Therefore,

it may be suggested that the long-term decreasing tendency in fog frequency in Latvia could be associated also with the increase in air temperature.

However, the correlation between temperature values and the occurrence of fog does not show a consistent pattern over spatial and temporal scales, suggesting the role of additional meteorological factors, such as for instance humidity, availability of condensation nuclei and atmospheric circulation, in affecting the occurrence and spatial distribution of fog in Latvia.

3.4. Characteristics of thunderstorms in Latvia

3.4.1. Climatic characteristics of thunderstorms in Latvia

Thunderstorms are one of the most hazardous weather phenomena in Latvia, and they are clearly the most hazardous phenomena affecting the country in the summer season. The analysis of climatic characteristics of thunderstorm frequency and intensity in Latvia over the period 1960–2015 shows, that thunderstorms can be observed in Latvia at any time of the year, however the greatest majority of these hazardous weather events take place between May and September. The annual number of thunderstorm days in the country varies from 14.5 to 16.4 days on average in the coastal areas near the Baltic Sea up to 23 days on average in the highland areas of the eastern part of the country (Figure 5). The occurrence of thunderstorm events is strongly associated with local geographical features in the country and also the atmospheric conditions triggering their formation, therefore there has been a great variability in thunderstorm day frequency in all 14 weather stations analysed.

For the purpose of assessing the long-term characteristics of thunderstorm intensity in Latvia, observed thunderstorm events have been classified according to the intensity of hazardous weather phenomena associated with thunderstorm events. Such approach was adopted from the currently used national warning criteria. According to the analysis, 71–85% of the observed thunderstorm days since 1966 have been classified as non-severe (green level of severity). Thunderstorm days of yellow severity level were observed 4.6 to 13% of the cases, while thunderstorm days of orange severity level were observed 9.7 to 14% of the cases. Red severity level thunderstorm days are defined as extreme events accompanied by wind gusts exceeding 25 m/s or very heavy rainfall of more than 50 mm during 24 hours – such events have been relatively rare, observed only 0.2 to 1.7% of the events analysed.

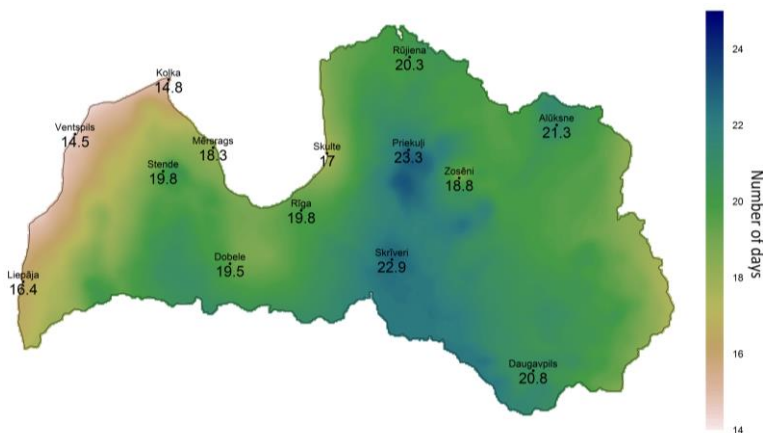


Figure 5. The annual mean number of days with thunderstorms in Latvia over the period 1960–2015

The obtained results suggest that the currently used national thunderstorm warning criteria represent the climatic distribution of severe thunderstorm events, with an exception of orange severity level thunderstorms, which occur more frequently than the less hazardous yellow severity level thunderstorms.

3.4.2. Long-term changes in the frequency and intensity of thunderstorms in Latvia

In comparison to the climatic reference period of 1961–1990, the recent 30-year normal period of 1981–2010 has seen about 2 days less of thunderstorm events per year. The results of the trend analysis confirm an overall decreasing tendency in thunderstorm day frequency – there has been a significant decreasing tendency in eight out of 14 weather stations included in the study (Table 2). Similar findings have been obtained within studies of thunderstorms in Lithuania and Estonia (Enno *et al.*, 2014), while no significant changes in thunderstorm frequency have been found in Finland (Tuomi and Mäkelä, 2008) and Poland (Bielec-Bakowska, 2003). The changes in frequency and intensity of heavy precipitation and hail events during thunderstorm days have been spatially inconsistent, while the most evident changes in the long-term data series have been observed for wind parameters on thunderstorm days.

Table 2

Long-term trends (Mann-Kendal test statistics) in the number of thunderstorm days, fraction of thunderstorms of different severity levels (%), number of hail events, mean and maximum precipitation (mm) and wind gusts (m/s) on thunderstorm days and number of cases exceeding the given precipitation and wind gust intensity thresholds over the period 1960–2015.

The statistically significant values are highlighted in bold.

Parameter	Meteorological observation station													Overall in Latvia	
	Alūksne	Daugavpils	Dobele	Kolka	Liepāja	Mērsrags	Priekulī	Rīga	Rājiena	Sarīveri	Skulte	Stende	Ventspils		Zosēni
Thunderstorm days	-2.3	-3.4	-0.5	-2.5	-0.6	-0.7	-1.5	-3.0	-2.5	-3.4	-3.4	-0.7	-1.1	-3.8	-2.7
Green severity level	-1.6	1.9	-2.8	-2.3	-0.3	-1.0	-3.2	-3.9	-1.9	-2.4	-1.0	0.3	-1.6	-0.7	-3.6
Yellow severity level	2.0	0.5	2.6	1.6	0.5	0.4	4.7	2.0	3.3	2.3	0.2	-0.3	1.6	1.4	3.6
Orange severity level	0.7	-2.7	1.3	0.6	0.1	0.7	0.7	3.3	-0.4	0.6	1.1	0.3	0.9	0.2	1.6
Red severity level	1.2	-1.9	0.4	1.3	-0.8	2.4	-1.3	-0.8		0.0	-0.1	-1.9	1.4	-0.5	0.1
Hail events	3.7	-2.2	-0.7	0.8	-0.5	3.0	1.3	-2.7	1.6	-0.2	-2.3	-1.0	0.4	-0.4	-0.0
Mean precipitation	2.1	-1.4	1.4	3.4	0.2	2.4	1.1	3.1	1.5	1.3	2.1	1.7	0.7	1.4	3.7
Maximum precipitation	0.4	-2.6	1.5	1.7	-0.6	1.1	-0.3	0.5	0.6	-0.6	-0.5	1.1	-0.3	-1.2	0.7
Precipitation ≥ 15 mm	0.1	-1.7	1.5	1.2	0.3	1.3	-0.8	1.1	-0.7	-0.4	-0.1	0.6	1.0	-1.1	0.2
Precipitation ≥ 50 mm	1.0		-0.3	1.5	-0.3	3.2	-0.4	0.2	0.7	-1.6	2.4	-0.2	0.0	0.1	0.9
Mean wind gusts	5.5	0.0	5.5	4.0	-0.3	5.2	4.7	6.5	4.7	4.4	3.5	3.4	3.9	3.7	6.5
Maximum wind gusts	2.3	-2.0	4.1	0.4	-1.4	-0.0	1.2	2.7	1.5	1.8	0.4	-1.4	-1.0	1.4	1.3
Wind gusts 15–19 m/s	2.0	-1.4	4.7	1.7	-0.3	0.7	4.1	4.6	2.4	2.4	0.8	-1.0	0.9	1.0	2.5
Wind gusts 20–24 m/s	1.1	-3.5	2.4	0.3	-0.8		0.0	1.4	-0.0	0.6	-1.5	-2.3	-0.3	0.2	-1.1
Wind gusts ≥ 25 m/s	-0.6	-1.5	1.3	-0.7	-0.9		-1.1	-1.2		0.8			1.0		-0.5

It is important to note that the observed increase in wind gusts on thunderstorm days is evident despite the findings of recent studies, which have revealed a significant decreasing tendency in the mean wind speed in Latvia (Briede, 2016).

3.4.3. Assessment of the use of remote sensing observations for the identification and analysis of thunderstorms in Latvia

Climatological analysis of thunderstorm events presented before describes the overall activity of convective phenomena in the country. However, it is particular thunderstorm events that occur in Latvia almost every year and lead to the most devastating damage. Thus in order to mitigate the adverse effects of such events by the provision of timely and effective advisory, it is essential to increasingly investigate the atmospheric conditions, precursors and indicators of increased thunderstorm severity potential. For this reason, the occurrence of several theory-based features

characteristic for severe thunderstorm events in Latvia were analysed by using daily weather radar and satellite observations.

The analysis of meteorological radar observations revealed that among the theory-based indicators of increased thunderstorm severity, the occurrence of a tilted updraft is a frequently observed convective storm feature in Latvia, the occurrence of the weak echo region feature has been more rare (13–43% of the analysed cases), while the most seldom severe thunderstorm feature is the hook echo (2–16% of the analysed cases). In addition, several features characteristic for severe thunderstorms – the structures of cold-ring storms and V-shaped storms (5–28% of the analysed cases), the presence of small ice particles at the top of the cloud (20–50% of the analysed cases), overshooting tops (22–63% of the analysed cases) and gravity waves (4–15% of the analysed cases) – were identified from satellite observations. It was estimated, that the maximum radar reflectivity exceeding 50 dBZ and the occurrence of overshooting tops are the main indicators useful for the identification of high impact thunderstorms. On the other hand, it was found that the most intense precipitation occurred during events with gravity waves, V-shaped storm structures and small ice particles visible, while wind gusts were the strongest on days with gravity waves, small ice particles or radar reflectivity <50 dBZ observed. Thus, the occurrence of these features can serve as an indicator of an increased thunderstorm severity potential.

CONCLUSIONS

Significant changes in the frequency of extreme climate events have been observed in Latvia since the first half of the 20th century. The trend analysis of extreme climate event indicators shows a significant increase in the number of meteorological events associated with increased summer temperatures and a decrease in the number of extremely low temperature events in winter. There has also been an increase in the frequency and intensity of heavy precipitation, however the magnitude and statistical significance of these trends has shown a spatially inconsistent pattern.

Observed changes in extreme climate events in Latvia show spatial differences, which highlight areas where the most significant changes have taken place. The strongest signal of changes in the frequency and intensity of heavy precipitation has been observed in the coastal areas of the Gulf of Rīga, thus emphasizing the effect of the Gulf on the spatial distribution of precipitation. Trends in the climate indicators were also found to be stronger in the capital city Rīga, which could be associated with the effects of the specific urban climate.

Some regularities in the association of the occurrence of extreme climate events with the prevailing atmospheric circulation patterns were found during the study. It was estimated that the most common synoptic situations for the occurrence of extremely high air temperatures can be found under the conditions of southwesterly, southerly anticyclonic flows and westerly, southwesterly cyclonic flows, while extreme precipitation events were mainly associated with cyclonic activity.

Due to the observed warming, the duration of ice cover on the Baltic Sea and the Gulf of Rīga has been decreasing since the middle of the 20th century, and is related to a later onset and earlier disappearance of the ice cover. However, the trends of sea ice regime are not consistent over different periods of time, and the regime of the sea ice appears to be greatly influenced by large-scale atmospheric circulation processes over the North Atlantic.

Fog is a comparatively frequent hazardous meteorological phenomenon in Latvia, observed on average 19–59 days per year and characterised by a significant spatial and temporal inhomogeneity. However, the occurrence of fog in Latvia has decreased significantly since the middle of the 20th century, which could be associated both with the effects of natural factors as well as the gradual decrease in industrial activities and the resultant improvements of air quality. In spite of the observed decrease in fog frequency, it is still one of the hazardous meteorological phenomena affecting aviation in Latvia.

Even though the majority of fog cases in Latvia have been associated with anticyclonic conditions, fog is commonly accompanied by light precipitation, which could be an indicator for the dominance of advection

type of fog in the country. However, the analysis of fog formation in the area of the Rīga Airport revealed that the most intense of the observed fog events can be classified as radiation fog, which, due to its short persistence, is not of as great danger to the aviation traffic as advection fog. Since advection fog plays an important role in the air traffic organization, timely information provided by weather satellites is an essential tool for the forecasting of movement and persistence of the fog and low-cloud areas.

Thunderstorms are one of the most hazardous meteorological phenomena observed in Latvia, and they occur on average 14.5–23 days per year. The spatial distribution of thunderstorm days highlights the role of orography and proximity to the Baltic Sea in the distribution of convective processes in the country.

Thunderstorms are complex meteorological phenomena commonly associated with the occurrence of additional small-scale weather hazards such as heavy precipitation, hail and strong wind gusts. Precipitation is the most frequent atmospheric phenomenon registered on thunderstorm days in Latvia, with daily precipitation amount on thunderstorm days reaching 4.3–9.3 mm on average, and the multi-year maximum values varying between 25 and 29 mm. Hail is rarely observed at the official observation sites in Latvia – only 0.3 to 1.1 thunderstorm days per year on average. Wind gusts on average reach 14–20 m/s on thunderstorm days, with the highest values observed in the coastal areas of the Baltic Sea. However, thunderstorm day gustiness was found to be higher in the inland meteorological observation stations.

The climatological assessment of thunderstorm severity reveals that on average 71–85% of the thunderstorm day cases can be classified as non-severe. Thunderstorm days of yellow, orange and red severity level have been significantly less frequent, with yellow severity level cases on average observed 4.6 to 13%, orange severity level cases 9.7 to 14% and red severity level cases – 0.2 to 1.7% of the time. The obtained results suggest that the currently used national thunderstorm warning criteria represent the climatic distribution of severe thunderstorm events, while the criteria for orange severity level thunderstorms should be reassessed.

In comparison to the climatic reference period of 1961–1990, thunderstorm day frequency in Latvia has decreased by about 2 days in the period 1981–2010. In addition, the trend analysis reveals significant decreasing tendencies in thunderstorm day frequency in 8 out of 14 meteorological observation stations. However, despite the observed decrease in thunderstorm day frequency, indicators of increased thunderstorm intensity have been observed. Long-term trends in precipitation intensity and frequency of heavy precipitation cases on thunderstorm days show a significant increasing tendency in the coastal areas of the Gulf of Rīga. However, the most prominent changes have been observed for wind

parameters, which show significant increasing tendencies in majority of the sites.

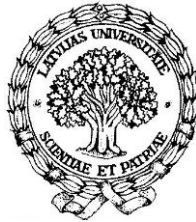
In-depth analysis of particular severe thunderstorm events give a much more detailed insight in the processes triggering, driving and characterizing the development of convective processes, which still pose challenges to the scientific community. The analysis of two tornado cases in Latvia and Poland highlights the complexity of the occurrence, dynamics and intensity of convective phenomena as events causing comparably adverse effects can be triggered by different atmospheric processes.

Thoughtful exploitation of remote sensing data undoubtedly gives a more detailed insight in the atmospheric conditions characteristic for the development of thunderstorms. Analysis of weather radar observations suggests that on thunderstorm days in Latvia the radar echo of the thunderstorm clouds on average extends from 1–2 km to 6–11 km above ground level, and maximum radar reflectivities most often reach 50 dBZ, while information obtained from meteorological satellite data reveals that convective cloud top temperatures generally vary between 210–230 K (–63 to –43°C).

During the analysis, it was found that theory-based remote sensing thunderstorm features under analysis contribute to the assessment of different thunderstorm severity levels as well as inference of the conditions for convective development in Latvia. It was estimated that the occurrence of overshooting tops as well as maximum radar reflectivities exceeding 50 dBZ serve as good initial indicators for the identification of severe thunderstorms, while the presence of additional features such as gravity waves, small ice particles and V-shaped storm structures can be used as indicators of an increased thunderstorm severity potential.

The results obtained within this thesis may contribute to the development and improvement of the national hydrometeorological and climatological service as well as the nowcasting and warning processes and routines at the Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre. In addition, the databases and knowledge produced during the research phase might lead to further investigations of extreme climate events and hazardous hydrometeorological phenomena in Latvia.

Latvijas Universitāte
Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte



Zanīta Avotniece

*EKSTREMĀLU KLIMATISKO PARĀDĪBU UN BĪSTAMU
HIDROMETEOROLOĢISKO PARĀDĪBU RAKSTURS UN ILGGADĪGO
IZMAIŅU TENDENCES LATVIJĀ*

Promocijas darba kopsavilkums

Ģeogrāfijas doktora grāda iegūšanai
Vides zinātnes nozarē, Dabas aizsardzības apakšnozarē

Rīga, 2018

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē, Vides zinātnes nodaļā laika posmā no 2012. līdz 2017. gadam.

Promocijas darbs izstrādāts ar Latvijas Zinātnes padomes finansiālu atbalstu (granta Nr. 526/2016).

Promocijas darba zinātniskie vadītāji:

*Dr.geogr., prof. **Agrita Briede***

*Dr.habil.chem., prof. **Māris Kļaviņš***

Darba recenzenti:

*Dr.geogr., asoc.prof. **Iveta Šteinberga**, Latvijas Universitāte*

*PhD, asoc.prof. **Piia Post**, Tartu Universitāte*

*PhD, prof. **Egidijus Rimkus**, Viļņas Universitāte*

Promocijas padomes sastāvs:

*Dr.geogr., asoc.prof. **Iveta Šteinberga**, promocijas padomes priekšsēdētāja*

*Dr.geogr., prof. **Olģerts Nikodemus***

*Dr.habil.chem., prof. **Māris Kļaviņš***

*Dr.habil.paed., prof. **Raimonds Ernšteins***

*Dr.geogr., prof. **Agrita Briede***

*Dr.geogr., doc. **Oskars Purmalis**, promocijas padomes sekretārs*

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2018. gada 7. septembrī plkst. 13:00 Latvijas Universitātes Vides zinātnes nozares promocijas padomes atklātā sēdē Rīgā, Jelgavas ielā 1.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Zinātniskajā bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4, kā arī Latvijas Universitātes Akadēmiskajā bibliotēkā Lielvārdes ielā 24.

Atsauksmes sūtīt *Dr.geogr. Ivetai Šteinbergai*: Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte, Raiņa bulvāris 19, LV-1586, Rīga. E-pasts: Iveta.Steinberga@lu.lv.

© Latvijas Universitāte, 2018

© Zanita Avotniece, 2018

ANOTĀCIJA

Klimata pārmaiņas tiek uzskatītas par vienu no galvenajiem izaicinājumiem, kas 21. gadsimtā skars cilvēci un dabas sistēmas, turklāt ekstremālu un bīstamu parādību izmaiņas ir saistītas ar ievērojami lielākiem riskiem, nekā klimata pārmaiņas kopumā. Līdz šim ekstremālās klimatiskās parādības un bīstamās hidrometeoroloģiskās parādības Latvijā ir maz pētītas. Līdz ar to šī promocijas darba mērķis ir ar aptverošas analīzes un mūsdienīgas metodikas palīdzību apzināt ekstremālu klimatisko parādību un tādu bīstamu hidrometeoroloģisko parādību kā jūras ledus, migla un pērkona negaiss klimatiskās izplatības raksturu un ilggadīgās izmaiņas Latvijā.

Pētījuma rezultāti ilustrē būtiskas izmaiņas ekstremālu klimatisko parādību un bīstamu hidrometeoroloģisko parādību raksturā līdzšinējo klimata pārmaiņu ietekmē. Kopš pagājušā gadsimta vidus Latvijā novērota būtiska ekstremāli aukstu dienu un ziemas sezonai raksturīgu hidrometeoroloģisko parādību skaita samazināšanās, kamēr ekstremāli karstas dienas un dienas ar stipriem nokrišņiem ir kļuvušas biežākas. Konstatēto izmaiņu telpiskās atšķirības ir saistāmas ar pētījumā izmantoto hidrometeoroloģisko novērojumu staciju ģeogrāfiskās atrašanās vietas raksturu, kā arī ar valdošajiem atmosfēras cirkulācijas apstākļiem. Pētījuma rezultāti ilustrē attālināto novērojumu nozīmi bīstamu hidrometeoroloģisko parādību novērošanā Latvijā, un vienlaikus arī iezīmē darba gaitā radīto datu kopu un zināšanu pārnēsi izmantošanai turpmāku pētījumu, kā arī hidrometeoroloģisko un klimata pakalpojumu izstrādē.

Šis promocijas darbs ir tematiski vienota astoņu zinātnisko publikāciju kopa.

Atslēgas vārdi: *klimata pārmaiņas, ekstremālas klimatiskās parādības, bīstamas hidrometeoroloģiskās parādības, migla, pērkona negaiss, jūras ledus.*

SATURA RĀDĪTĀJS

IEVADS	35
Pētījuma aktualitāte	35
Pētījuma mērķis, hipotēze un izvirzītie pētnieciskie jautājumi	35
Pētījuma novitāte.....	36
Pētījuma rezultātu praktiskā pielietojamība	36
Rezultātu aprobācija.....	36
Promocijas darba uzbūve.....	41
1. LITERATŪRAS APSKATS	42
2. DATI UN METODES	45
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	48
3.1. Ekstremālās klimatiskās parādības Latvijā	48
3.1.1. Ekstremālu klimatisko parādību izmaiņu tendences Latvijā ...	48
3.1.2. Ar ekstremālajām klimatiskajām parādībām Latvijā saistītie liela mēroga atmosfēras cirkulācijas tipi.....	50
3.2. Jūras ledus izmaiņas Baltijas jūras un Rīgas līča Latvijas piekrastē.....	51
3.2.1. Jūras ledus klimatiskais raksturojums Latvijas piekrastē.....	51
3.2.2. Jūras ledus ilggadīgās izmaiņas Latvijas piekrastē	51
3.3. Mīgla klimatiskais raksturojums un ilggadīgo izmaiņu tendences Latvijā.....	52
3.3.1. Mīgla klimatiskais raksturojums Latvijā	52
3.3.2. Mīglu biežuma ilggadīgās izmaiņas Latvijā.....	54
3.4. Pērkona negaisu raksturojums Latvijā.....	55
3.4.1. Pērkona negaisu klimatiskais raksturojums Latvijā	55
3.4.2. Pērkona negaisu biežuma un intensitātes ilggadīgo izmaiņu tendences Latvijā	56
3.4.3. Attālināto novērojumu izmantošana pērkona negaisu identifikācijai un analīzei Latvijā.....	57
SECINĀJUMI	59
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	62

IEVADS

Pētījuma aktualitāte

Klimata pārmaiņas ir atzītas par vienu no nozīmīgākajiem izaicinājumiem, kas mūsdienās skar cilvēci un ekosistēmas. Uz Zemes klimata izmaiņām norāda ne tikai globālā mērogā novērotā būtiskā vidējās gaisa temperatūras paaugstināšanās, bet arī šo pārmaiņu ietekme uz visām klimata sistēmas sastāvdaļām: ūdens temperatūru, atmosfēras nokrišņiem, upju noteci, ledus un sniega segas veidošanos, bīstamajām hidrometeoroloģiskajām parādībām u.c. Līdz ar to klimata pārmaiņas raksturo ne tikai izmaiņas meteoroloģisko parametru vidējās vērtībās, bet arī klimata indikatoru mainībā un ekstremālu un bīstamu hidrometeoroloģisko parādību – piemēram, spēcīga karstuma un karstuma viļņu, intensīvu nokrišņu, plūdu – raksturā. Turklāt izmaiņām, kas skar ekstremālas klimatiskās parādības un bīstamas hidrometeoroloģiskās parādības, var būt ievērojami lielāka negatīva ietekme uz sabiedrību un ekosistēmām nekā klimata pārmaiņām kopumā. Tomēr par ekstremālu un bīstamu notikumu ilggadīgajām izmaiņām aizvien ir zināms daudz mazāk nekā par vidējo klimatisko rādītāju izmaiņām. Līdz ar to klimata un laika apstākļu rakstura analīze nacionālā mērogā ir būtisks solis ceļā uz aptverošu izpratni par klimatiskajiem procesiem, kas norit arī reģionālā un globālā mērogā.

Pētījuma mērķis, hipotēze un izvirzītie pētnieciskie jautājumi

Šīs disertācijas mērķis ir ar aptverošas analīzes un mūsdienīgas metodikas palīdzību izvērtēt ekstremālu klimatisko parādību un bīstamu hidrometeoroloģisko parādību raksturu un ilggadīgās izmaiņas Latvijā.

Disertācijas ietvaros izvirzītā hipotēze nosaka, ka kopš pagājušā gadsimta vidus ekstremālu klimatisko parādību un bīstamu hidrometeoroloģisko parādību biežumu un intensitāti Latvijā ir skārušas būtiskas izmaiņas. Līdz ar to disertācija ietvaros tiek risināti šādi pētnieciskie jautājumi:

1. Kāds ir ekstremālu klimatisko parādību un tādu bīstamu meteoroloģisko parādību kā migla un pērkona negaiss klimatiskais raksturojums un ilggadīgo izmaiņu tendences Latvijā?

2. Kāds ir jūras ledus kā bīstamas hidrometeoroloģiskas parādības klimatiskais raksturojums un ilggadīgo izmaiņu tendences Baltijas jūras un Rīgas līča piekrastes teritorijās Latvijā?

3. Kāda ir attālināto novērojumu pielietojamība bīstamu hidrometeoroloģisko parādību novērošanā un analīzē Latvijā?

4. Kādi atmosfēras apstākļi ir labvēlīgi ekstremālu klimatisko parādību un bīstamu hidrometeoroloģisku parādību attīstībai Latvijā?

Pētījuma novitāte

Šī promocijas darba rezultāti sniedz vispusīgu ekstremālu klimatisko parādību un bīstamu hidrometeoroloģisku parādību raksturojumu un kompleksu analīzi, kas Latvijā izstrādāta pirmo reizi. Līdz ar to promocijas darba rezultāti ietver šādas novitātes:

- noteikta, raksturota un analizēta ekstremālu klimatisko parādību un bīstamu hidrometeoroloģisko parādību klimatiskā un telpiskā izplatība, kā arī to biežuma un intensitātes ilggadīgo izmaiņu tendences;
- noteikti un raksturoti ekstremālu klimatisko parādību un bīstamu hidrometeoroloģisko parādību attīstībai raksturīgie atmosfēras apstākļi;
- apzināta attālināto novērojumu pielietojamība bīstamu hidrometeoroloģisko parādību monitoringam un analīzei Latvijā, kā arī attālināto novērojumu informācijā identificēti paaugstinātas bīstamības pērkona negaisu indikatori;
- analizējot ilggadīgās pērkona negaisu biežuma un intensitātes novērojumu laika rindas, izvērtēta Latvijā izmantoto pērkona negaisu brīdinājumu kritēriju atbilstība.

Pētījuma rezultātu praktiskā pielietojamība

Promocijas darbā ietvertie rezultāti var tikt pielietoti gan, lai attīstītu un pilnveidotu nacionālos hidrometeoroloģiskos un klimata pakalpojumus, ko sniedz Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs, gan arī, lai izstrādātu efektīvas rīcībpolitikas un iniciatīvas klimata pārmaiņu adaptācijas un mazināšanas jomā. Iegūtie rezultāti papildina esošās nacionāla līmeņa klimatoloģijas, kā arī tie var tikt izmantoti, lai uzlabotu un papildinātu prognozēšanas un brīdinājumu procedūras, tādējādi paaugstinot adaptācijas un noturības pret klimata pārmaiņu radītajām ietekmēm kapacitāti Latvijā. Pētījuma ietvaros izstrādātās datubāzes un datu kopas var tikt izmantotas turpmākiem pētījumiem par ekstremālām klimatiskajām parādībām un bīstamām hidrometeoroloģiskajām parādībām Latvijā.

Rezultātu aprobācija

Pētījuma rezultāti publicēti astoņās zinātniskajās publikācijās, kā arī par tiem ziņots kopumā 16 starptautiskās un 8 vietējās zinātniskajās konferencēs.

Zinātniskās publikācijas par promocijas darba tēmu

1. Publikācija. **Avotniece, Z.**, Rodinov, V., Lizuma, L., Briede, A., Kļaviņš, M. (2010). Trends in the frequency of extreme climate events in Latvia. *Baltica*, **23** (2), 135–148. (Scopus un ISI Web of Science)

2. Publikācija. **Avotniece, Z.**, Kļaviņš, M., Rodinovs, V. (2012). Changes of Extreme Climate Events in Latvia. *Environmental and Climate Technologies*, **9** (1), 4–11. (Scopus)
3. Publikācija. Kļaviņš, M., **Avotniece, Z.**, Rodinovs, V. (2016). Dynamics and Impacting Factors of Ice Regimes in Latvia Inland and Coastal Waters. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*, **70** (6), 400–408. (Scopus)
4. Publikācija. **Avotniece, Z.**, Klavins, M., Lizuma, L. (2014). Fog Climatology in Latvia. *Theoretical and Applied Climatology*, **122** (1–2), 97–109. (Scopus un ISI Web of Science)
5. Publikācija. **Avotniece, Z.**, Klavins, M. (2013). Temporal and Spatial Variation of Fog in Latvia. *Environmental and Climate Technologies*, **3**, 5–10.
6. Publikācija. **Avotniece, Z.**, Aniskevich, S., Briede, A., Klavins, M. (2017). Long-term changes in the frequency and intensity of thunderstorms in Latvia. *Boreal Environment Research*, **22**, 415–430. (Scopus un ISI Web of Science)
7. Publikācija. Wrona, B., **Avotniece, Z.** (2015). The Forecasting of Tornado Events: the Synoptic Background of Two Different Tornado Case-studies. *Meteorology Hydrology and Water Management*, **3** (1), 51–58. (ISI Web of Science)
8. Publikācija. **Avotniece, Z.**, Klavins, M., Briede, A., Aniskevich, S. (2017). Remote Sensing Observations of Thunderstorm Features in Latvia. *Environmental and Climate Technologies*, **21**, 28–46. (ISI Web of Science)

Citas zinātniskās publikācijas

Kļaviņš, M., Kokorīte, I., Rodinovs, V., **Avotniece, Z.**, Sprīģe, G., Briede, A. (2011). Hydrometeorological Parameters and Aquatic Chemistry of the Lake Engure: Trends of Changes Due to Human Impact and Natural Variability. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*, **65** (5–6), 138–145. (Scopus)

Avotniece, Z., Rodinovs, V., Kļaviņš, M. (2011). Climate Related Mortality Changes in Latvia. 1996–2008. *Scientific Papers of the University of Latvia*, **762**, 188–195.

Lizuma, L., **Avotniece, Z.**, Rupainis, S., Teilans, A. (2013). Assessment of the Present and Future Offshore Wind Power Potential: A Case Study in a Target Territory of the Baltic Sea Near the Latvian Coast. *The Scientific World Journal*, 1–10. (Scopus un ISI Web of Science)

Avotniece, Z., Dimants, M. (2018). The use of Satellite Scatterometry and Altimetry Data for Wind and Wave Monitoring in the Central part of the Baltic Sea and the Gulf of Riga. *Journal of Maritime Transport and Engineering* [In Press].

Citas publikācijas

Kļaviņš, M., **Avotniece, Z.**, Rodinovs, V. (2012). Heat Waves in Latvia: Occurrence, Impacts and Consequences In: Kļaviņš, M., Briede, A. (eds.), *Climate Change in Latvia and Adaptation to it* (pp. 62–78). Riga: University of Latvia Press.

Avotniece, Z., Aņiskeviča, S., Maļinovskis, E. (2017). *Klimata pārmaiņu scenāriji Latvijai* [Climate Change Scenarios for Latvia] (in Latvian with summary in English). Available: <http://www2.meteo.lv/klimatariks/> [Accessed 19.03.2018]

Avotniece, Z. (2018). Ekstremālās un bīstamās atmosfēras parādības [Extreme and Hazardous Atmospheric Phenomena]. In: Kļaviņš, M., Krišjāne, Z., Nikodemus, O., Zelčs, V. (eds.) *Latvija. Zeme, daba, tauta, valsts* [Latvia. Land, Nature, People, Country] (In Latvian with summary in English) (pp. 259–262). Riga: University of Latvia Press.

Starptautiskas zinātniskās konferences

Avotniece, Z., Rodinov, V., Lizuma, L., Kļaviņš, M. Trends of Changes of Extreme Climate Events in Latvia. In: *The XXVI Nordic Hydrological Conference, 9–11.08.2010 Riga, Latvia*.

Avotniece, Z., Rodinov, V., Lizuma, L., Briede, A., Kļaviņš, M. Trends in the Frequency of Extreme Climate Events in Latvia. In: *ESF-COST High-level research Conference on Extreme Environmental Events, 13–17.12.2010 Cambridge, United Kingdom*.

Avotniece, Z., Rodinov, V., Lizuma, L., Briede, A., Kļaviņš, M. Trends in the Frequency of Extreme Climate Events in Latvia. In: *BalticClimate Conference 'Pathfinding through Climate Change', 8–9.11.2011 Riga, Latvia*.

Avotniece, Z., Rodinov, V., Lizuma, L., Kļaviņš, M. Trends in the Frequency of Extreme Climate Events in Latvia as Influenced by Large Scale Atmospheric Circulation Processes. In: *11th EMS Annual Meeting / 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM), 12–16.09.2011 Berlin, Germany*.

Briede, A., **Avotniece, Z.**, Lizuma, L. Extreme Weather Events in the Baltic Sea Coastline Areas of Latvia. In: *11th EMS Annual Meeting / 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM), 12–16.09.2011 Berlin, Germany*.

Avotniece, Z., Kļaviņš, M., Rodinovs, V. Changes of Extreme Climate Events in Latvia. In: *The 53rd International Scientific Conference of Riga Technical University, 11–12.11.2012 Riga, Latvia*.

Avotniece, Z., Kļaviņš, M., Rodinovs, V., Briede, A., Lizuma, L. Trends in the Frequency of Extreme and Hazardous Weather Events in Latvia. In: *12th EMS Annual Meeting & 9th European Conference on Applied Climatology (ECAC), 10–14.09.2012 Łódź, Poland*.

Avotniece, Z., Lizuma, L., Vīksna, A. The Estimation of Cloudiness and Solar Surface Irradiance in Latvia by Using Satellite Data. In: *12th EMS*

Annual Meeting & 9th European Conference on Applied Climatology (ECAC), 10–14.09.2012 Łódź, Poland.

Avotniece, Z., Kļaviņš, M., Briede, A., Lizuma, L. Climatic characteristics of thunderstorms in Latvia. In: *The 7th European Conference on Severe Storms (ECSS 2013), 03–07.06.2013 Helsinki, Finland.*

Avotniece, Z., Briede, A., Lizuma, L. Long-term trends and variability of daily minimum and maximum air temperatures in Latvia. In: *13th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applications of Meteorology, 09–13.09.2013 Reading, United Kingdom.*

Avotniece, Z., Higgins, M., Roebeling, R. The experience and instructions for creating a satellite-based climate atlas for Europe and Latvia. In: *The 2014 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 22–26.09.2014 Geneva, Switzerland.*

Avotniece, Z., Higgins, M., Roebeling, R. The experience and instructions for creating a satellite-based climate atlas for Europe and Latvia. In: *The Climate Symposium 2014, 13–17.10.2014 Darmstadt, Germany.*

Avotniece, Z., Šmite, S. Severe Thundershowers Over the Central Part of Latvia on 29 July 2014. In: *8th European Conference on Severe Storms (ECSS 2015), 14–18.09.2015 Wiener Neustadt, Austria.*

Avotniece, Z., Koreļska, L., Kļaviņš, M., Briede, A. Changes in the variability of extreme climate events in Latvia. In: *EGU General Assembly 2015, 12–17.04.2015 Vienna, Austria.*

Avotniece, Z., Dimants, M. The use of ASCAT and JASON data in operational storm forecasting in the Central part of the Baltic Sea and in the Gulf of Riga. In: *The 2015 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. 21–25.09.2015 Toulouse, France.*

Avotniece, Z., Klavins, M., Briede, A., Aniskevica, S. Long-term changes in the frequency and intensity of thunderstorms in Latvia: analysis based on observations from 14 surface weather stations. In: *6th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC), 12–16.09.2016 Trieste, Italy.*

Briede, A., **Avotniece, Z.,** Koreļska, L. The trends and variability of climate extremes in Latvia. In: *6th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC), 12–16.09.2016 Trieste, Italy.*

Walawender, J.P., **Avotniece, Z.,** Kilpys, J., Vint, K., Pārg, R., Bogdańska, B., Trentmann, J., Pfeifroth, U. Solar Radiation Atlas for Poland and the Baltic States based on CM SAF data. In: *The 2016 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. 26–30.09.2016 Darmstadt, Germany.*

Avotniece, Z., Dimants, M. The use of satellite scatterometry and altimetry data for wind and wave monitoring in the Central part of the Baltic Sea and the Gulf of Riga. In: *20th International Conference 'Maritime Transport and Infrastructure', 19–20.04.2018 Riga, Latvia.*

Vietējas zinātniskās konferences

Avotniece, Z. Ekstremālo klimatisko parādību mainība Latvijā [Variability of Extreme Climate Events in Latvia] (in Latvian). In: *69th Scientific Conference of the University of Latvia, 02.02.2011. Riga, Latvia.*

Avotniece, Z. Saules radiācijas un mākoņainuma novērtēšana, izmantojot satelītu novērojumu datus [The Estimation of Solar Radiation and Cloudiness by Using Satellite Observation Data] (in Latvian). In: *The IV Congress of Geography in Latvia 'Geography in the Variable World' 16–17.03.2012. Riga, Latvia.*

Avotniece, Z. Ekstremālo un bīstamo klimatisko parādību ilggadīgo izmaiņu raksturs Latvijā [Trends in the Frequency of Extreme and Hazardous Weather Events in Latvia] (in Latvian). In: *The IV Congress of Geography in Latvia 'Geography in the Variable World' 16–17.03.2012. Riga, Latvia.*

Lizuma, L., Briede, A., **Avotniece, Z.** Hidrometeoroloģisko parametru izmaiņu analīze Baltijas jūras Latvijas piekrastes teritorijās [Long-term Trends of Hydrometeorological Parameters in the Baltic Sea Coastline Areas of Latvia] (in Latvian). In: *The IV Congress of Geography in Latvia 'Geography in the Variable World' 16–17.03.2012. Riga, Latvia.*

Avotniece, Z. Satelītu novērojumu datu izmantošanas iespējas klimata pētījumos Latvijā [The Use of Satellite Data in Climatological Studies in Latvia] (in Latvian). In: *71st Scientific Conference of the University of Latvia, 30.01.2013. Riga, Latvia.*

Lizuma, L., Briede, A., **Avotniece, Z.** Augsnes temperatūras ilgtermiņa izmaiņas Latvijā [Long-term Changes in Soil Temperature in Latvia] (in Latvian). In: *72nd Scientific Conference of the University of Latvia, 30.01.2014. Riga, Latvia.*

Avotniece, Z., Higgins, M., Roebeling, R. Uz satelītu novērojumiem balstīta atlanta izveide Latvijai un Eiropai [Satellite-based Climate Atlas for Latvia and Europe] (in Latvian). In: *73rd Scientific Conference of the University of Latvia, 04.02.2015. Riga, Latvia.*

Avotniece, Z., Briede, A., Koreļska, L. Ekstremālo klimatisko parādību mainības izmaiņas Latvijā 1923.-2010. gadā [Changes in the variability of extreme climate events in Latvia over the period 1923–2010] (in Latvian). In: *73rd Scientific Conference of the University of Latvia, 04.02.2015. Riga, Latvia.*

Avotniece, Z., Aņiskeviča, S., Kilpys, J., Walawender, J.P., Vint, K., Pārg, R., Rosin, K. Augstas izšķirtspējas saules radiācijas atlants Baltijas valstīm [High Resolution Solar Radiation Atlas for the Baltic States] (in Latvian). In: *74th Scientific Conference of the University of Latvia*, 02.02.2016. Rīga, Latvia.

Avotniece, Z., Aņiskeviča, S., Briede, A., Kļaviņš, M. Pērkona negaisu biežums un intensitāte Latvijā [Frequency and Intensity of Thunderstorms in Latvia] (in Latvian). In: *75th Scientific Conference of the University of Latvia*, 30.01.2017. Rīga, Latvia.

Briede, A., **Avotniece, Z.,** Sprinģe, G., Kļaviņš, M., Kokorīte, I., Koreļska, L., Skuja, A., Ozoliņš, D., Apsīte, E., Rodinovs, V. Latvijas klimata mainības tendences un ietekmes [Trends and impacts of the variability of climate in Latvia] (in Latvian). In: *75th Scientific Conference of the University of Latvia*, 30.01.2017. Rīga, Latvia.

Avotniece, Z., Briede, A., Kļaviņš, M., Aņiskeviča, S. Pērkona negaisiem raksturīgās attālinātajos novērojumos Latvijā [Features in Remote Sensing Observations Characteristic for Thunderstorms in Latvia] (in Latvian). In: *76th Scientific Conference of the University of Latvia*, 31.01.2018. Rīga, Latvia.

Promocijas darba uzbūve

Promocijas darbs ir tematiski vienota publikāciju kopa. Galvenie pētījuma rezultāti par četrām tēmām ir apkopoti astoņās zinātniskajās publikācijās. Promocijas darbs ietver arī literatūras apskatu un iegūto rezultātu kopsavilkumu.

1. LITERATŪRAS APSKATS

Efektīvu un pārdomātu klimata pārmaiņu adaptācijas un mazināšanas stratēģiju un pasākumu izstrādes stūrakmens ir aptverošas zināšanas un izpratne par ekstremālu un bīstamu parādību raksturu līdzšinējo klimata pārmaiņu kontekstā. Tomēr, lai gan plašs pētījumu klāsts apraksta meteoroloģisko parametru vidējo vērtību izmaiņas, līdz šim konceptu neviennozīmības un pieejamo datu ierobežojumu radīti šķēršļi ir apgrūtinājuši ekstremālu un bīstamu gadījumu novērojumus, analīzi un reprezentatīvu to klimatoloģiju izveidi (Klein Tank, 2004). Starp šiem šķēršļiem, pirmkārt, ir ekstremālu un bīstamu parādību kompleksā daba: augstas ietekmes gadījumi bieži vien ir lokāli un var būt arī īslaicīgi. Līdz ar to novērojumi piezemes meteoroloģisko novērojumu tīklā var būt nepilnīgi vai tikai daļēji reprezentatīvi (Burroughs, 2003). Citi šķēršļi ekstremālu klimatisko parādību un bīstamu hidrometeoroloģisko parādību identifikācijai un analīzei ir ar tiem saistīto konceptu neviennozīmība (Meteoalarm, 2017; Beniston *et al.*, 2007; Easterling *et al.*, 2000; Klein Tank, 2004). Vienlaikus pētījumi norāda uz laikapstākļu un specifisku klimatisko apstākļu radīto ekonomisko zaudējumu pieaugumu. Turklāt tiek prognozēts, ka turpmākas klimata pārmaiņas šīs negatīvās ietekmes uz dažādiem socioekonomiskiem sektoriem palielinās vēl vairāk (Handmer *et al.*, 2012; Kovats *et al.*, 2014).

Globālā mērogā noritošās klimata pārmaiņas ir izraisījušas izmaiņas arī ekstremālu klimatisko gadījumu un bīstamu laika apstākļu biežumā, sezonālītātē, ilgumā, telpiskajā izplatībā un intensitātē (Karl and Trenberth, 2003). Vairāki pētījumi norāda uz būtiskām ekstremālu klimatisko parādību indeksu vērtību izmaiņām Eiropā kopš 20. gadsimta vidus (Heino *et al.*, 1999; Wibing and Glowicki 2002; Klein Tank and Können, 2003; Moberg and Jones, 2005; Kažys *et al.*, 2011). Pētījumi apstiprina ilggadīgā laika periodā pieaugošu ekstremāli siltu dienu un nakšu skaita palielināšanos, kamēr ekstremāli aukstas dienas un naktis ir kļuvušas retākas (IPCC, 2014). Novērotā gaisa temperatūras paaugstināšanās ir radījusi satraukumu par karstuma viļņu nelabvēlīgajām ietekmēm – vairākās industrializētās valstīs konstatēts karstuma izraisītas mirstības pieaugums (Dessai, 2002; Diaz *et al.*, 2006; Beniston, 2007; Unkaševica and Tošic, 2009). Turklāt, līdz ar sabiedrības novecošanos lielā daļā attīstīto valstu pieaug arī sabiedrības ievainojamība pret ekstremāla karstuma gadījumiem (Handmer *et al.*, 2012).

Eiropā veikti pētījumi liecina, ka ekstremālu atmosfēras nokrišņu izmaiņu tendencēm raksturīgas ievērojamas telpiskas atšķirības (Klein Tank, 2004; Beniston *et al.*, 2007), tomēr visbūtiskākā ekstremālu nokrišņu biežuma palielināšanās tendence ir novērota Baltijas jūras reģionā (Bhend and Storch, 2007; Kjellström and Ruosteenoja, 2007). Stipru nokrišņu gadījumu skaits ziemas sezonā ir palielinājies Centrāleiropā un Eiropas

ziemeļu daļā, savukārt vasaras sezonā stipru nokrišņu gadījumu skaita pieaugums ir raksturīgs Eiropas ziemeļaustrumu apgabaliem. Vienlaikus Dienvidēiropā gan ziemas, gan vasaras sezonā stipri nokrišņi kļuvuši retāki (Beniston *et al.*, 2007; Kjellström and Ruosteenoja, 2007). Baltijas jūras sateces baseinā par 8,24 mm/dekādē palielinājies arī gada kopējais atmosfēras nokrišņu daudzums (Bhend and Storch, 2007).

Ekstremālas parādības rada visievērojamākos draudus sabiedrībai un indivīdiem, tomēr postošas laika apstākļu ietekmes var radīt arī meteoroloģiski notikumi, kas paši nav uzskatāmi par ekstremāliem. Lai gan bīstamās hidrometeoroloģiskās parādības rada plašus socioekonomiskus zaudējumus un postījumus Eiropā, to ilggadīgo izmaiņu tendences līdz šim ir pētītas visai maz. Bīstamās hidrometeoroloģiskās parādības ir atšķirīgas pēc to veidošanās sezonas, kā arī ietekmes uz tautsaimniecības sektoriem. Piemēram, pagājušā gadsimta laikā ierasta parādība bijusi jūras ledus veidošanās Baltijas jūras un Rīgas līča piekrastē, bet līdzšinējo klimata pārmaiņu ietekmē pieaugošās ziemas sezonu temperatūras ir kavējušas jūras ledus attīstību (IPCC, 2014b). Tomēr šīs izmaiņas nav bijušas lineāras, arī 21. gadsimta sākumā novērotas atsevišķas aukstas un ledus bagātas ziemas, kas radījušas būtiskus apgrūtinājumus kuģu navigācijai.

Cita bīstama parādība, kas negatīvi ietekmē transporta sistēmas, ir migla (Cermak and Bendix, 2008; Heo *et al.*, 2010). Migla daudzviet pasaulē ir atzīta par bīstamu meteoroloģisku parādību, kas var radīt transporta negadījumus un, līdz ar gaisa piesārņotāju ietekmi, blīvi apdzīvotās un apbūvētās teritorijās pasliktināt gaisa kvalitāti (Lange *et al.*, 2003; Singh and Dey, 2012; Bendix, 2002; Witiw and LaDochy, 2008). Vienlaikus migla kā mitruma avots ir arī ļoti nozīmīga ekosistēmu un cilvēku veselības nodrošināšanai (Sachweh and Koepke, 1997). Noturības un biežuma ziņā visintensīvākās miglas daudzās industrializētās pasaules valstīs novērotas pagājušā gadsimta 40-os un 50-os gados. Kopš tā laika, pieaugot gaisa kvalitātes prasībām un samazinoties atmosfēras gaisā suspendēto daļiņu koncentrācijai, miglu klimatoloģija ir ievērojami mainījies un vairākās valstīs novērota miglu biežuma samazināšanās (Bendix, 2002; Witiw and LaDochy, 2008; Shi *et al.*, 2008).

Visbīstamākā meteoroloģiskā parādība, kas Latvijā novērojama vasaras sezonā, ir pērkonu negaiss. Ar pērkonu negaisiem saistīti bīstami laika apstākļi ir novēroti visās Eiropas valstīs, un tie ievērojami apdraud dzīvības, īpašumus un tautsaimniecību. Turklāt ar pērkonu negaisiem ir saistītas vairākas bīstamas meteoroloģiskas parādības, kas var radīt apdraudējumu cilvēku veselībai un dzīvībai, īpašumu bojājumus, ekonomiskas sekas un vides degradāciju. Šīs bīstamās parādības, kas ietilpst maza mēroga bīstamu meteoroloģisko parādību grupā, ietver krusu, zibeni, postošus taisnlinijas vējus, virpuļstabus un intensīvas lietusgāzes, kas var izraisīt plūdus (Parsons, 2015; Zwiers *et al.*, 2013; Czernecki *et al.*, 2016; Dotzek *et al.*, 2009; Doswell *et al.*, 1990). Pēdējo gadu laikā reģistrēto

spēcīgu negaisu gadījumu skaits ir palielinājies – tas gan lielā mērā ir saistīts ar paaugstinātu iespēju tos identificēt ar meteoroloģisko radaru un satelītu palīdzību, kā arī dēļ vairākās valstīs izveidotajiem brīvprātīgo novērotāju tīkliem. Vienlaikus Eiropā veikti pētījumi neapstiprina pērkonu negaisu biežuma palielināšanos – Lietuvā un Igaunijā konstatēta pērkonu negaisu skaita samazināšanās (Enno *et al.*, 2014), savukārt Somijā (Tuomi and Mäkelä, 2008) un Polijā (Bielec-Bakowska, 2003) nav konstatētas būtiskas izmaiņas. Šie atklājumi uzsver izteiktās pērkonu negaisu biežuma dinamikas telpiskās atšķirības. Viennozīmīgu secinājumu trūkums par līdzšinējām un nākotnē sagaidāmajām pērkonu negaisu rakstura izmaiņām ir lielā mērā saistīts ar to reprezentatīvas novērošanas ierobežojumiem (Zwiers *et al.*, 2013). Līdz ar to efektīvu nacionālo brīdinājumu sistēmu un mehānismu izveide ir nozīmīga jebkādu iespējamo izmaiņu negatīvo ietekmju mazināšanā.

2. DATI UN METODEDES

Šajā nodaļā apkopota informācija par galvenajām pētījuma īstenošanā izmantotajām datu kopām un to analīzes metodēm. Pilnīgs un detalizēts izmantoto datu un metožu apraksts pieejams atbilstošajās promocijas darbā ietvertο zinātnisko publikāciju nodaļās.

Pētījuma pamatā ir piezemes hidrometeoroloģisko novērojumu ilggadīgo datu rindu analīze. Novērojumu dati iegūti no ilggadīgā datu arhīva, ko uztur un pārvalda Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs (turpmāk arī – LVĢMC). Pētījumā iekļauta novērojumu informācija no Latvijas piezemes hidrometeoroloģisko novērojumu stacijām, kurās par pētījuma ietvaros analizētajiem meteoroloģiskajiem parametriem pieejamas nepārtrauktas ilggadīgo datu rindas. Dati tika iegūti no vēsturiskā arhīva, kas tiek uzturēts papīra formātā, kā arī ekstrahēti no elektroniskās hidrometeoroloģisko novērojumu datubāzes CLIDATA. Tā kā promocijas darbs ietver daudzveidīgu hidrometeoroloģisko parametru analīzi, no datu arhīva tika iegūta novērojumu informācija ar diennakts laika soli par šādiem rādītājiem:

- vidējā, minimālā un maksimālā gaisa temperatūra;
- atmosfēras nokrišņu daudzums;
- vidējais vēja ātrums un maksimālās vēja brāzmas;
- vidējā ūdens temperatūra un jūras ledus esamība;
- vidējais relatīvais gaisa mitrums;
- vidējais atmosfēras spiediens stacijas līmenī;
- atmosfēras parādību novērojumi – migla, pērkona negaiss, krusa, sniega graudi.

Lai raksturotu ekstremālo klimatisko parādību un bīstamo hidrometeoroloģisko parādību klimatisko izplatību un ilggadīgo izmaiņu tendences Latvijā, tika izmantotas ilggadīgās novērojumu datu rindas par laika periodu no 1924. līdz 2015. gadam (Rīga-Universitāte novērojumu stacijai par laika periodu no 1852. gada). Lai nodrošinātu pētījumā izmantotās informācijas uzticamību un reprezentativitāti, meteoroloģisko novērojumu datu rindām tika veikta pamata kvalitātes kontrole un homogenitātes novērtējums.

No piezemes meteoroloģisko novērojumu gaisa temperatūras un atmosfēras nokrišņu datiem tika aprēķināti indeksi, kas raksturo izmaiņas to vidējās un ekstremālās vērtībās. Pētījuma izstrādē iekļauti CCI/CLIVAR/JCOMM Klimata pārmaiņu un indeksu ekspertu grupas (ETCCDI – *The Expert Team on Climate Change Detection and Indices*) izstrādātie indeksi (ECA&D, 2017).

Pērkona negaisu intensitātes novērtējuma veikšanai atbilstoši nacionālajiem brīdinājumu kritērijiem tika izmantota informācija par papildus meteoroloģisko parametru novērojumiem. Šobrīd Latvijā

izmantotie pērkona negaisu brīdinājumu kritēriji ir balstīti uz to pavadošo bīstamo meteoroloģisko parādību – krusas, vēja brāzmu un atmosfēras nokrišņu – intensitāti. Atkarībā no pavadošo parādību intensitātes, pērkona negaisi tiek iedalīti zaļā, dzeltenā, oranžā un sarkanā bīstamības līmeņa negaisos, atbilstoši *Meteoalarm* brīdinājumu līmeņiem (LEGMC, 2017; *Meteoalarm*, 2017).

Papildus piezemes meteoroloģisko novērojumu informācijai, bīstamo hidrometeoroloģisko parādību analīzei tika izmantota arī attālināto novērojumu informācija. Tika izmantoti daudzveidīgi attālināto novērojumu avoti, tai skaitā Ziemeļvalstu zibens izlāžu informācijas sistēmas NORDLIS (*Nordic Lightning Information System*) (Mäkelä *et al.*, 2010), Rīgas lidostas tuvumā novietotā meteoroloģiskā Doplera radara METEOR 500C (SELEX Sistemi Integrati GmbH, 2006) informācija, kā arī no vairākiem meteoroloģiskajiem satelītiem iegūti spektrālie attēli un uz satelītu novērojumiem balstītas datu kopas (CM SAF, 2009). No meteoroloģiskā radara un satelītiem iegūtā informācija nodrošina gan kvalitatīvus, gan kvantitatīvus rādītājus meteoroloģiskās analīzes veikšanai. Pērkona negaisu intensitātes novērtējuma ietvaros no attālināto novērojumu datiem tika identificēti daudzveidīgi teorijā balstīti un operatīvajā meteoroloģijā plaši pielietoti rādītāji (Stalker and Knupp, 2001; Rigo and Pineda, 2016; Lemon and Doswell, 1979; Setvak *et al.*, 2010; Žibert and Žibert, 2013).

Lai raksturotu ekstremālu klimatisko parādību un bīstamu hidrometeoroloģisko parādību attīstībai labvēlīgos atmosfēras apstākļus, pētījuma ietvaros tika izmantota informācija par liela mēroga atmosfēras cirkulācijas raksturu. Tika izmantoti uz Gerstengarbes un Vernera (*Gerstengarbe and Werner*) (Hoy *et al.*, 2013) izstrādāto cirkulācijas tipu modifikācijām balstīti 18 liela mēroga atmosfēras cirkulācijas tipi, kas padarīti pieejami starptautiskai izmantošanai Eiropas Zinātnes un tehnoloģiju sadarbības projekta 733 (COST 733 – *European Cooperation in Science and Technology Action 733*) ietvaros (COST733, 2013). Savukārt, lai noteiktu saistību starp izmaiņām jūras ledus veidošanās apstākļos un liela mēroga klimatisko apstākļu noteicošajiem faktoriem, tika izmantots Ziemeļatlantijas oscilācijas (NAO – *North Atlantic Oscillation*) indekss (Luterbacher *et al.*, 2002) un Baltijas ziemas indekss (WIBIX – *Baltic winter index*) (Hagen and Feistel, 2005).

Meteoroloģisko parametru ilggadīgās izmaiņas tika novērtētas, izmantojot Manna-Kendala testu. Šim nolūkam tika izmantots rīks MAKESENS, kas izveidots izmaiņu tendenču identifikācijai un novērtēšanai ikgadēju datu rindās (Salmi *et al.*, 2002). Novērtējuma procedūra ir balstīta uz neparametrisko Manna-Kendala testu (Richard, 1987) tendences noteikšanai un Sena metodi šīs tendences apmēru novērtēšanai. Manna-Kendala tests ir pielietojams, lai noteiktu izmaiņu tendences laika rindās, kurās nepastāv sezonāls vai cita veida cikliskums. Šī ir salīdzinoši robusta metode attiecībā pret datu iztrūkumiem, un tai nav

stingru prasību pret datu iekšējo mainību, līdz ar to tā ir salīdzinoši populārs rīks tendenču novērtējumam klimata pārmaiņu kontekstā (Salmi *et al.*, 2002).

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

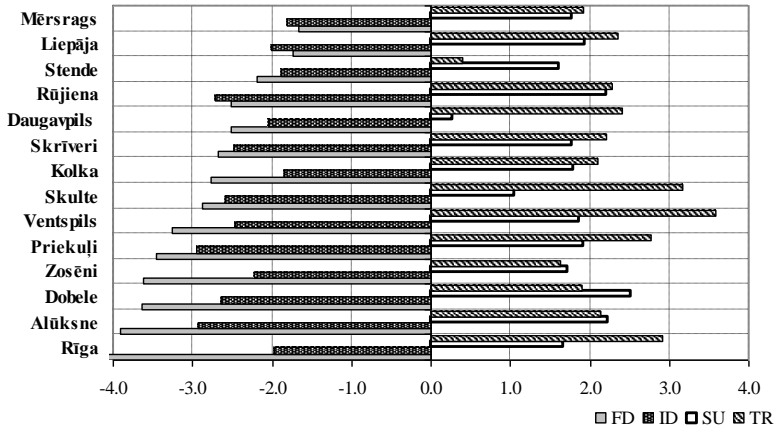
Klimatiskos apstākļus Latvijā ietekmē tās novietojums Eirāzijas kontinenta ziemeļrietumu daļā (kontinentāla klimata ietekmes), kā arī Atlantijas okeāna tuvums (jūras klimata ietekmes). Izteiktā ciklonu aktivitāte virs Latvijas nosaka izteikti nepastāvīgus un mainīgus laika apstākļus. Šādi apstākļi rada atšķirības gaisa temperatūras un atmosfēras nokrišņu režīmā, kā arī ekstremālo klimatisko parādību un bīstamo hidrometeoroloģisko parādību telpiskās izplatības nevienmērību.

3.1. Ekstremālās klimatiskās parādības Latvijā

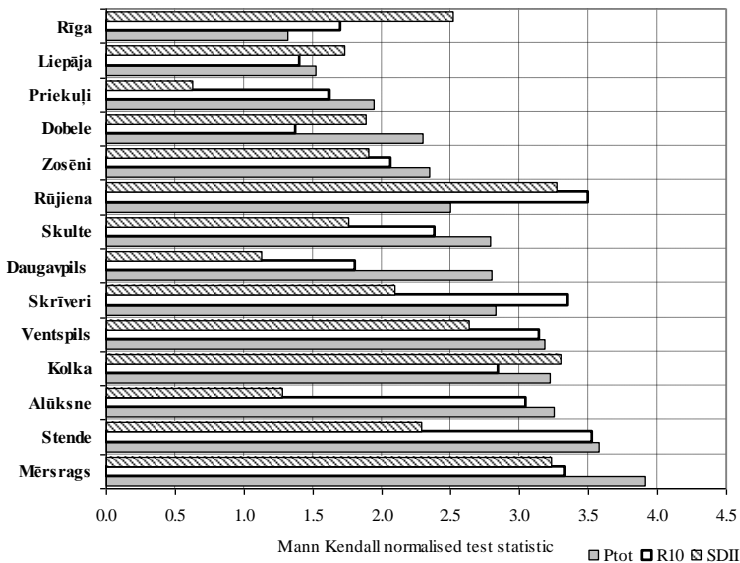
3.1.1. *Ekstremālu klimatisko parādību izmaiņu tendences Latvijā*

Pētījuma gaitā Latvijā tika konstatētas būtiskas ekstremālu klimatisko parādību izmaiņas. Iegūtie rezultāti apstiprina statistiski būtisku diennakts vidējās, minimālās un maksimālās gaisa temperatūras vidējo vērtību paaugstināšanos. Visās meteoroloģisko novērojumu stacijās diennakts minimālās un maksimālās gaisa temperatūras vidējo vērtību paaugstināšanās tendences ir statistiski būtiskas, turklāt kopš 1950. gada 12 stacijās būtiski paaugstinājušās arī diennakts minimālās gaisa temperatūras zemākās vērtības. Diennakts minimālās gaisa temperatūras augstāko vērtību, kā arī diennakts maksimālās gaisa temperatūras augstāko un zemāko vērtību izmaiņu tendences uzrāda zemāku statistiskā būtiskuma līmeni, īpaši meteoroloģisko novērojumu stacijās valsts austrumu daļā. Šādas atšķirības ilustrē gaisa temperatūras ekstremālo vērtību izmaiņu heterogenitāti un vietējo ģeogrāfisko faktoru ietekmi uz klimatiskajiem rādītājiem reģionālā/lokālā mērogā. Turklāt, arī gada griezumā gaisa temperatūras paaugstināšanās nav noritējusi vienmērīgi. Par satraucošām var tikt uzskatītas Rīgā konstatētās gaisa temperatūras paaugstināšanās tendences, kas izpaužas gandrīz visa gada garumā (izņemot oktobri un decembri). Šādas izmaiņas uzsver pilsētas mikroklimata nozīmi termālā režīma veidošanā (Gabriel and Endlicher, 2011; Lizuma, 2008).

Ekstremālas gaisa temperatūras raksturojošo klimata indeksu izmaiņu tendences ir izteiktākas tiem indeksiem, kas saistīti ar ziemas sezonas ekstremālu temperatūru gadījumiem. Piemēram, sala dienu (FD) un dienu bez atkušņa (ID) skaits ir būtiski samazinājies visās meteoroloģisko novērojumu stacijās (1. attēls). Tomēr pieaugošās gaisa temperatūras vidējās vērtības ir izraisījušas arī ekstremāli karstu dienu un nakšu skaita palielināšanos. Lielākajā daļā meteoroloģisko novērojumu staciju konstatēta statistiski būtiska vasaras dienu (SU) un tropisko nakšu (TR) skaita palielināšanās.



1. attēls. Ekstremālas gaisa temperatūras vērtības raksturojošo klimata indeksu ilggadīgo izmaiņu tendences (Manna-Kendala testa vērtības) Latvijā laika periodā no 1950. līdz 2010. gadam. Attēlā izmatotie saīsinājumi atbilst šādiem klimata indeksiem: FD – sala dienas; ID – dienas bez atkušņa; SU – vasaras dienas; TR – tropiskās naktis.



2. attēls. Atmosfēras nokrišņu raksturojošo klimata indeksu ilggadīgo izmaiņu tendences (Manna-Kendala testa vērtības) Latvijā laika periodā no 1950. līdz 2010. gadam. Attēlā izmatotie saīsinājumi atbilst šādiem klimata indeksiem: Ptot – gada kopējais nokrišņu daudzums mitrās dienās; R10 – dienas sar stipriem nokrišņiem; SDII – vienkāršots ikdienas intensitātes indekss.

Turklāt visa Latvijā būtiska pieaugoša tendence konstatēta arī karstuma viļņu indikatora vērtībām, kas raksturo ilgstošu karstuma periodu ilgumu. Šīs var tikt uzskatītas par vissatraucošākajām konstatētajām izmaiņām, jo ilgstoša karstuma periodu biežuma vai ilguma palielināšanās var palielināt cilvēku saslimstību un mirstību (Diaz *et al.*, 2006; Beniston, 2007; Unkaševica and Tošic, 2009).

Ilggadīgo datu rindu analīze Latvijā uzrāda statistiski būtiskas atmosfēras nokrišņu biežuma un intensitātes izmaiņas. Pētījuma gaitā lielākajā daļā meteoroloģisko novērojumu staciju tika konstatēta statistiski būtiska gada kopējā nokrišņu daudzuma mitrās dienās (Ptot) palielināšanās, kā arī būtiskas izmaiņas vienkāršotā diennakts intensitātes indeksa (SDII) vērtībās. Šādas izmaiņas norāda uz pārmaiņām atmosfēras nokrišņu intensitātes raksturā un līdz ar to arī stipru nokrišņu izraisīto postījumu potenciālā (2. attēls). Turklāt visās meteoroloģisko novērojumu stacijās tika konstatēts arī dienu skaits ar stipriem (R10) un ļoti stipriem atmosfēras nokrišņiem pieaugums. Lielākajā daļā pētījumā iekļauto meteoroloģisko novērojumu staciju atmosfēras nokrišņu intensitātes izmaiņas ir pozitīvas un statistiski būtiskas. Vienlaikus tika konstatētas arī reģionālu faktoru ietekmes uz atmosfēras nokrišņu sadalījumu un režīmu. Piemēram, izteiktā dienu skaits ar stipriem nokrišņiem palielināšanās Rīgā, kas ir īpaši izteikta pēdējo ~80 gadu laikā, varētu būt saistīta ar Rīgas līča ietekmi un urbānā klimata specifiku (Birkmann *et al.*, 2010).

3.1.2. Ar ekstremālajām klimatiskajām parādībām Latvijā saistītie liela mēroga atmosfēras cirkulācijas tipi

Lai apzinātu ekstremālu klimatisko parādību attīstībai labvēlīgos atmosfēras apstākļus, pētījuma ietvaros tika analizēti ikdienas liela mēroga atmosfēras cirkulācijas tipi par laika periodu no 1957. līdz 2002. gadam. Tika noskaidrots, ka ekstremāli karstas dienas un naktis visbiežāk Latvijā tiek novērotas anticiklonisku dienvidrietumu un dienvidu plūsmu apstākļos, gadījumā, kad augsta spiediena apgabals atrodas virs Eiropas centrālās daļas. Vienlaikus ekstremāli karsti laika apstākļi Latvijā var būt saistīti arī ciklona silto sektoru.

Savukārt dienas ar stipriem atmosfēras nokrišņiem pārsvarā novērotas cikloniskos apstākļos. Tomēr tika novērotas atšķirības dominējošos sinoptiskajos procesos gada siltajās un aukstajās sezonās. Vasarā stipru nokrišņu gadījumi pārsvarā bija saistīti ar konvektīvajiem procesiem un ar cikloniem saistītām aukstajām atmosfēras frontēm, savukārt ziemā stipru nokrišņu gadījumi pārsvarā bija ar silto atmosfēras frontu nestu ilgstošu atmosfēras nokrišņu rezultāts (Jakimavičius and Kovalenkoviene, 2010; Kriaučiūniene *et al.*, 2008). Tomēr apstākļos, kad ciklona centrs

atrodas virs Latvijas, stipri atmosfēras nokrišņi valstī var tikt novēroti gan vasarā, gan ziemā.

3.2. Jūras ledus izmaiņas Baltijas jūras un Rīgas līča Latvijas piekrastē

3.2.1. Jūras ledus klimatiskais raksturojums Latvijas piekrastē

Atbilstoši pieejamo ilggadīgo laika rindu analīzei, Latvijas piekrastes rajonos sākotnējā ledus veidošanās parasti aizsākas Pērnavas līcī, kur sākotnējās ledus formas tiek novērotas decembra vidū. Turpmāk ledus klātais apgabals pakāpeniski izplatās gar Rīgas līča ziemeļaustrumu krastu, vienlaikus noritot sākotnējo ledus formu attīstībai līča dienvidu un rietumu piekrastē. Visstraujākā ledus veidošanās visbiežāk ir novērojama februārī, kad labvēlīgos apstākļos Rīgas līcis pilnībā aizsalst. Ļoti aukstās ziemās ledus var veidoties arī Baltijas jūras piekrastē. Tomēr atkarībā no valdošajiem atmosfēras apstākļiem, ledus izplatība gadu no gada ir izteikti atšķirīga. Ar valdošajiem rietumu puses vējiem ledus uzlūšana aizsākas līča rietumu daļā un pakāpeniski izplatās uz austrumiem. Pirmā akvatorija, kas ir brīva no ledus, parasti ir Irbes šaurums, tam sekojot līča rietumu un dienvidu daļai. Savukārt līča ziemeļu un ziemeļaustrumu daļā kūstoša dreifējoša ledus paliekas saglabājas visilgāk.

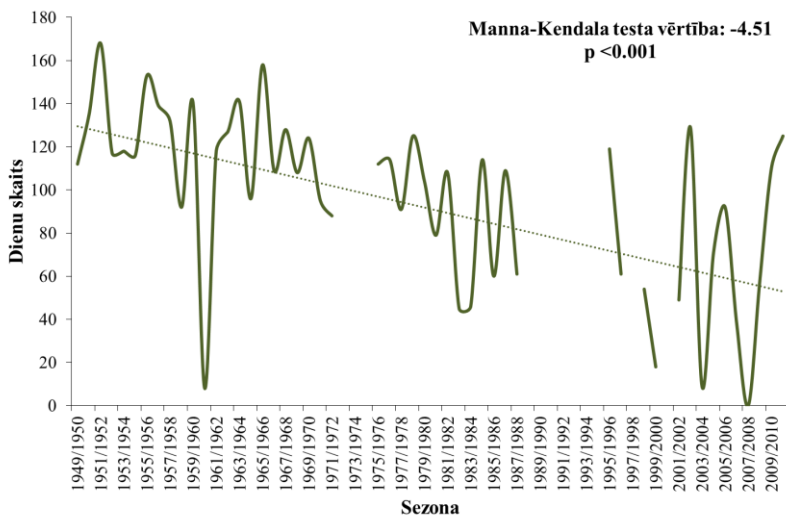
Ledus sezonas vidējais ilgums vislielākais ir Pērnavas līcī un Rīgas līča ziemeļu daļā – 145 dienas jeb gandrīz 5 mēneši. Savukārt visīsākā ledus sezona ~2 mēnešu ilgumā ir raksturīga Rīgas līča dienvidrietumu daļai, Irbes šaurumam un Baltijas jūras piekrastei. Līdz šim ilgākā ledus sezona Rīgas līcī bijusi 168 dienas, bet Baltijas jūras piekrastē – 127 dienas.

3.2.2. Jūras ledus ilggadīgās izmaiņas Latvijas piekrastē

Novērotā gaisa temperatūras vidējo vērtību paaugstināšanās ir veicinājusi būtiskas izmaiņas ledus apstākļos gan Baltijas jūras, gan Rīgas līča Latvijas piekrastē. Laika periodā no 1949. līdz 2013. gadam tika konstatēta būtiska ledus sezonas samazināšanās tendence (3. attēls).

Šādas izmaiņas ir cieši saistītas ar liela mēroga atmosfēras cirkulācijas procesu virs Atlantijas okeāna dinamiku un izmaiņām: tika konstatēta izteikta negatīva korelācija starp Ziemeļatlantijas oscilācijas indeksu un dienu skaitu ar jūras ledu Latvijas piekrastē. Šie atklājumi ilustrē saikni starp liela mēroga Ziemeļatlantijas oscilācijas noteicošajiem faktoriem un reģionāla mēroga klimata procesiem Baltijas reģionā. Turklāt, tika konstatēta arī negatīva korelācija starp Ziemeļatlantijas oscilācijas indeksu, Baltijas ziemas indeksu un ledus uzlūšanas datumiem. Šāda

sakarība norāda uz to, ka procesiem virs Atlantijas okeāna ziemeļu daļas ir noteicoša loma ledus režīma veidošanā Latvijas piekrastē.



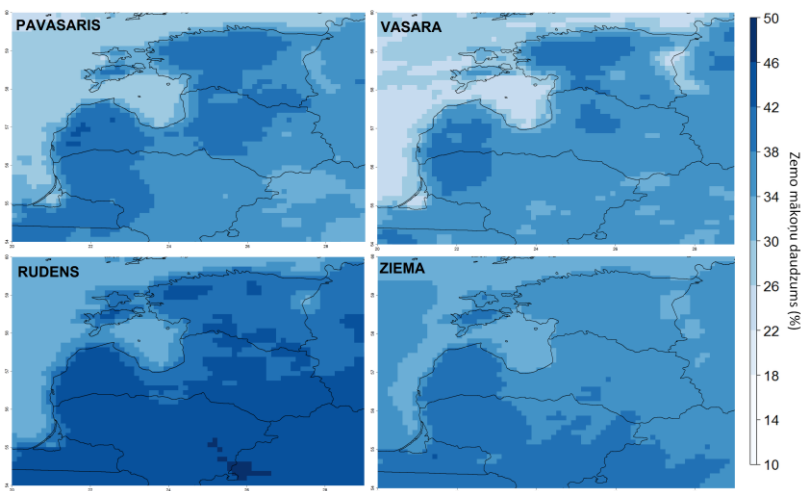
3. attēls. Ledus sezonas ilguma ilggadīgo izmaiņu tendences Rīgas līča Latvijas piekrastē (pēc Salacgrīvas novērojumu stacijas datu rindām) laika periodā no 1949. līdz 2013. gadam

Lai gan ilggadīgajā laika periodā ledus sezonas ilgums ir būtiski samazinājies (Gebre *et al.*, 2014), pēdējās desmitgades laikā ir novērotas ziemas ar plašu ledus segu virs Latvijas piekrastes ūdeņiem. Piemēram, 2010./2011. gada ziemas sezonā, Rīgas līcis bija pilnībā aizsalis jau februāra vidū un dreifējoša kūstoša ledus atliekas līcī saglabājās līdz pat maija sākumam.

3.3. Miglas klimatiskais raksturojums un ilggadīgo izmaiņu tendences Latvijā

3.3.1. Miglas klimatiskais raksturojums Latvijā

Migla tiek uzskatīta par vienu no bīstamākajām meteoroloģiskajām parādībām, kas negatīvi ietekmē transporta sistēmas, īpaši gaisa satiksmi – izraisot lidojumu kavēšanos, atcelšanu vai pārvirzīšanu. Ilggadīgo laika rindu analīzes gaitā tika noskaidrots, ka migla Latvijā ir samērā bieži novērojama atmosfēras parādība – tā veidojas vidēji 19–59 dienas gadā.



4. attēls. Meteoroloģisko satelītu novērotais vidējais zemo mākoņu daudzums (%) rudenī (SON), ziemā (DJF), pavasarī (MAM) un vasarā (JJA) laika periodā no 2008. līdz 2013. gadam

Miglas veidošanās ir cieši saistīta ar vietas ģeogrāfisko novietojumu, tostarp reljefu un nogāzes ekspozīciju, attālumu no Baltijas jūras un Rīgas līča, kā arī ar miglas veidošanu saistītajiem atmosfēras procesiem. Līdz ar to dažādās valsts daļās novērojamas dienu skaita ar miglu atšķirības. Migla Latvijā visbiežāk tiek novērota augstieņu rietumu daļās, savukārt visretāk – augstieņu austrumu daļās un Rīgas līča piekrastē. Turklāt būtiski pieminēt, ka miglu veidošanās biežumā vērojamas izteiktas variācijas gan sezonu, gan gadu griezumā. Iekšzemes meteoroloģisko novērojumu stacijās miglu veidošanās maksimums tiek novērots laikā starp augustu un decembri. Rudens mēnešos bieži veidojas radiācijas migla, savukārt ziemā un pavasarī pakāpeniski palielinās advekcijas miglas veidošanās īpatsvars. Līdz ar to piekrastes meteoroloģisko novērojumu stacijās maksimālais miglu biežums novērojams pavasarī – martā, aprīlī un maijā – kad silta gaisa advekcija no rietumiem veicina advekcijas miglas veidošanos. Līdzīgu sezonālu sadalījumu uzrāda arī uz satelītu novērojumiem balstītu zemo mākoņu izplatības dati (4. attēls).

Migla var tikt klasificēta pēc tās veidošanās apstākļiem advekcijas, siltuma izstarojuma jeb radiācijas, vai arī abu šo procesu kombinācijas ceļā (Ahrens, 2007). Katrs no minētajiem procesiem var veicināt miglas veidošanos Latvijā visa gada garumā. Analīzes gaitā tika noskaidrots, ka miglas veidošanās Latvijā pārsvarā bijusi saistīta ar rietumu un dienvidrietumu gaisa plūsmām anticikloniskos apstākļos. Šādos apstākļos var veidoties gan advekcijas, gan radiācijas tipa migla. Padziļināta novēroto miglas gadījumu analīze Rīgas lidostā liecina, ka lielākā daļa pasliktinātas

redzamības gadījumu bijuši saistīti ar radiācijas miglas veidošanos. Tomēr būtiska daļa Latvijā novēroto miglas gadījumu veidojušās arī cikloniskos apstākļos, kad miglas veidošanās bijusi saistīta ar frontālajām sistēmām vai ciklona silto sektoru. Līdz ar to var secināt, ka miglas veidošanās Latvijā pārsvarā ir saistīta ar silta un mitra gaisa ieplūdi no rietumiem, dienvidrietumiem.

3.3.2. Miglu biežuma ilggadīgās izmaiņas Latvijā

Kopš 1960. gada ikgadējais dienu skaits ar miglu Latvijā ir būtiski samazinājies (1. tabula), un šādas izmaiņas konstatētas visās 14 pētījumā iekļautajās meteoroloģisko novērojumu stacijās.

1. tabula

Miglu skaita ilggadīgo izmaiņu tendences (Manna-Kendala testa vērtības) sezonun un gada griezumā Latvijā laika periodā no 1960. līdz 2012. gadam.

Statistiski būtiskās vērtības izceltas treknrakstā.

	Ziema (DJF)	Pavasaris (MAM)	Vasara (JJA)	Ziema (SON)	Viss gads
Alūksne	-5,09	-5,40	-3,87	-4,88	-6,59
Daugavpils	-5,30	-4,96	-4,41	-4,34	-6,42
Dobeles	-2,81	-3,67	-2,26	-1,93	-3,71
Kolka	-4,73	-3,70	-3,45	-3,85	-4,15
Liepāja	-2,92	-1,91	-0,86	-1,89	-3,01
Mērsrags	-2,84	-0,67	-1,18	-1,24	-2,44
Priekulī	-3,48	-2,85	-3,31	-2,15	-4,58
Rīga	-1,99	-3,02	-4,22	-2,94	-4,28
Rūjiena	-4,32	-4,86	-6,17	-4,18	-6,35
Skrīveri	-2,47	-1,71	-3,06	-1,96	-4,01
Skulte	-2,82	-3,22	-4,30	-4,29	-5,08
Stende	-2,98	-3,46	-4,07	-3,13	-5,15
Ventspils	-3,33	-2,19	-2,21	-1,49	-4,48
Zosēni	-2,75	-2,54	-2,91	-2,66	-3,24
Kopumā Latvijā	-4,34	-3,41	-5,20	-4,08	-5,78

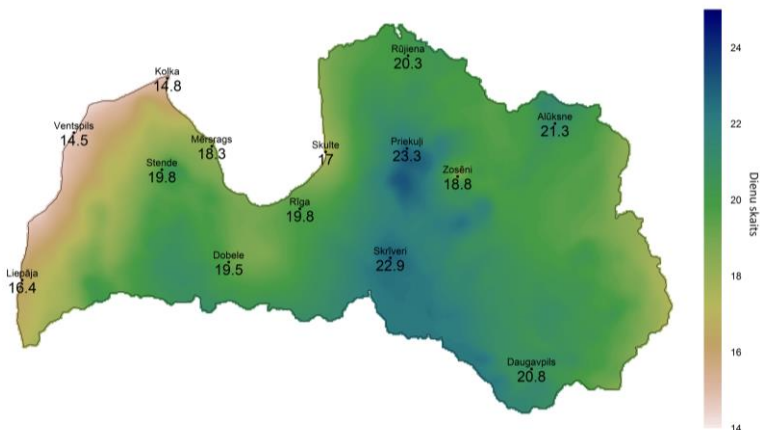
Miglu biežums samazinājies visas sezonās, tomēr visbūtiskākās izmaiņas konstatētas ziemā. Savstarpēji salīdzinot miglu biežum izmaiņas un gaisa temperatūras vērtību izmaiņas, var konstatēt līdzīgas iezīmes – būtiskākās abu parametru pārmaiņas konstatētas ziemas sezonā. Tādējādi iespējams, ka ilggadīgajā laika periodā novērotā miglas biežuma samazināšanās Latvijā varētu būt saistīta arī ar gaisa temperatūras paaugstināšanos. Tomēr abu parametru savstarpējā korelācija neuzrāda

konsekvenci laikā un telpā, un līdz ar to norāda uz papildus meteoroloģisko faktoru – tādu kā, piemēram, gaisa mitrums, kondensācijas kodolu klātbūtne, atmosfēras cirkulācijas apstākļi u.c. – ietekmi uz miglas veidošanos un tās telpisko izplatību Latvijā.

3.4. Pērķona negaisu raksturojums Latvijā

3.4.1. Pērķona negaisu klimatiskais raksturojums Latvijā

Pērķona negaisi ir viena no bīstamākajām atmosfēras parādībām Latvijā, un tie neapšaubāmi ir bīstamākā parādība vasaras sezonā. Pērķona negaisu biežuma un intensitātes klimatiskā analīze par laika periodu no 1960. līdz 2015. gadam liecina, ka Latvijā pērķona negaiss var tikt novērots jebkurā gada laikā, tomēr lielākā negaisu aktivitāte novērojama laika periodā starp maiju un septembri. Gada kopējais dienu skaits ar pērķona negaisu valstī variē no vidēji 14,5–16,4 dienām Baltijas jūras piekrastē līdz vidēji 23 dienām Latvijas austrumu daļas augstieņu apgabalos (5. attēls). Pērķona negaisu veidošanās ir cieši saistīta ar lokāliem ģeogrāfiskiem apstākļiem, kā arī ar to attīstībai labvēlīgiem atmosfēras procesiem, līdz ar to visās 14 pētījumā iekļautajās meteoroloģisko novērojumu stacijās konstatēta ievērojama pērķona negaisu skaita mainība gadu no gada.



5. attēls. Vidējais dienu skaits gadā ar pērķona negaisu Latvijā laika periodā no 1960. līdz 2015. gadam

Lai apzinātu ilggadīgās izmaiņas pērķona negaisu intensitātē Latvijā, apskatītā perioda laikā novērotie pērķona negaisu gadījumi tika grupēti pēc tos pavadošo bīstamo atmosfēras parādību intensitātes. Šāda pieeja tika

aizgūta un atvasināta no valstī pašreiz lietotajiem pērkona negaisu brīdinājumu kritērijiem. Analīzes gaitā tika noskaidrots, ka lielākā daļa (71–85%) kopš 1966. gada Latvijā novēroto pērkona negaisu nav bijuši bīstami jeb atbilduši zaļā bīstamības līmeņa negaisu kritērijiem. Dzeltēnā bīstamības līmeņa pērkona negaisi novēroti 4,6–13% gadījumu, savukārt oranžā bīstamības līmeņa negaisi – 9,7 līdz 14% gadījumu. Sarkanā bīstamības līmeņa pērkona negaisi tiek uzskatīti par ekstremāliem gadījumiem, ko pavada par 25 m/s lielākas krasas vēja brāzmas vai spēcīgas lietusgāzes ar kopējo diennakts nokrišņu daudzumu lielāku par 50 mm. Šādi gadījumi Latvijā bijuši ievērojami retāki – tikai 0,2–1,7% kopš 1966. gada novēroto pērkona negaisu klasificēti kā sarkanā bīstamības līmeņa negaisi. Iegūtie rezultāti liecina, ka līdzšinēji izmantotie pērkona negaisu brīdinājumu kritēriji kopumā ir atbilstoši bīstamu pērkona negaisu klimatiskajam raksturojumam. Tomēr izņēmums ir oranžā bīstamības līmeņa pērkona negaisi, kas novēroti biežāk nekā mazāk bīstamie dzeltēnā bīstamības līmeņa pērkona negaisi.

3.4.2. Pērkona negaisu biežuma un intensitātes ilggadīgo izmaiņu tendences Latvijā

Mūsdienu klimatiskās normas periodā no 1981. līdz 2010. gadam pērkona negaisa dienu skaits ir par aptuveni divām dienām mazāks nekā klimatiskās references periodā no 1961. līdz 1990. gadam. Arī trendu analīzes rezultāti apstiprina vispārēju pērkona negaisu biežuma samazināšanās tendenci – negaisu biežums statistiski būtiski samazinājies astoņās no 14 pētījumā iekļautajām meteoroloģisko novērojumu stacijām (2. tabula). Līdzīgas atziņas gūtas arī Lietuvā un Igaunijā izstrādātos pētījumos (Enno *et al.*, 2014), savukārt Polijā un Somijā būtiskas izmaiņas pērkona negaisu biežumā nav konstatētas (Bielec-Bakowska, 2003; Tuomi and Mäkelä, 2008).

Dienu skaits ar pērkona negaisu, dažādu bīstamības līmeņu pērkona negaisu īpatsvara (%), krusas gadījumu skaita, vidējā un maksimālā atmosfēras nokrišņu daudzuma (mm), vēja brāzmu (m/s) dienās ar pērkona negaisu un dienu skaits ar pārsniegtām atmosfēras nokrišņu un vēja brāzmu intensitātes robežvērtībām ilggadīgo izmaiņu tendences (Manna-Kendala testa vērtības) laika periodā no 1960. līdz 2015. gadam. Statistiski būtiskās vērtības izceltas treknrakstā.

Rādītājs	Meteoroloģisko novērojumu stacija													Kopumā Latvijā	
	Aitkne	Daugavpils	Dobele	Kolka	Liepāja	Mētrags	Prēiļi	Rīga	Rūjiena	Sierīti	Skulte	Stende	Ventpils		Zoelīti
Dienu skaits ar pērkona negaisu	-2,3	-3,4	-0,5	-2,5	-0,6	-0,7	-1,5	-3,0	-2,5	-3,4	-3,4	-0,7	-1,1	-3,8	-2,7
Zaļais bīstamības līmenis	-1,6	1,9	-2,8	-2,3	-0,3	-1,0	-3,2	-3,9	-1,9	-2,4	-1,0	0,3	-1,6	-0,7	-3,6
Dzeltenais bīstamības līmenis	2,0	0,5	2,6	1,6	0,5	0,4	4,7	2,0	3,3	2,3	0,2	-0,3	1,6	1,4	3,6
Oranžais bīstamības līmenis	0,7	-2,7	1,3	0,6	0,1	0,7	0,7	3,3	-0,4	0,6	1,1	0,3	0,9	0,2	1,6
Sarkanais bīstamības līmenis	1,2	-1,9	0,4	1,3	-0,8	2,4	-1,3	-0,8		0,0	-0,1	-1,9	1,4	-0,5	0,1
Krusas gadījumu skaits	3,7	-2,2	-0,7	0,8	-0,5	3,0	1,3	-2,7	1,6	-0,2	-2,3	-1,0	0,4	-0,4	-0,0
Vidējais nokrišņu daudzums	2,1	-1,4	1,4	3,4	0,2	2,4	1,1	3,1	1,5	1,3	2,1	1,7	0,7	1,4	3,7
Maksimālais nokrišņu daudzums	0,4	-2,6	1,5	1,7	-0,6	1,1	-0,3	0,5	0,6	-0,6	-0,5	1,1	-0,3	-1,2	0,7
Nokrišņu daudzums ≥ 15 mm	0,1	-1,7	1,5	1,2	0,3	1,3	-0,8	1,1	-0,7	-0,4	-0,1	0,6	1,0	-1,1	0,2
Nokrišņu daudzums ≥ 50 mm	1,0		-0,3	1,5	-0,3	3,2	-0,4	0,2	0,7	-1,6	2,4	-0,2	0,0	0,1	0,9
Vidējās vēja brāzmas	5,5	0,0	5,5	4,0	-0,3	5,2	4,7	6,5	4,7	4,4	3,5	3,4	3,9	3,7	6,5
Maksimālās vēja brāzmas	2,3	-2,0	4,1	0,4	-1,4	-0,0	1,2	2,7	1,5	1,8	0,4	-1,4	-1,0	1,4	1,3
Vēja brāzmas 15–19 m/s	2,0	-1,4	4,7	1,7	-0,3	0,7	4,1	4,6	2,4	2,4	0,8	-1,0	0,9	1,0	2,5
Vēja brāzmas 20–24 m/s	1,1	-3,5	2,4	0,3	-0,8		0,0	1,4	-0,0	0,6	-1,5	-2,3	-0,3	0,2	-1,1
Vēja brāzmas ≥ 25 m/s	-0,6	-1,5	1,3	-0,7	-0,9		-1,1	-1,2		0,8			1,0		-0,5

Stipru nokrišņu un krusas gadījumu skaita izmaiņas dienās ar pērkona negaisu bijušas telpiski nevienmērīgas, bet vizuāli izteiktākās izmaiņas konstatētas vēja parametru vērtībās. Būtiski pieminēt, ka novērotā vēja brāzmu intensitātes un biežuma palielināšanās dienās ar pērkona negaisu noritējusi vienlaikus ar citu pētījumu ietvaros konstatētu vispārēju vidējā vēja ātruma samazināšanos Latvijā (Briede, 2016).

3.4.3. Attālināto novērojumu izmantošana pērkona negaisu identifikācijai un analīzei Latvijā

Iepriekš sniegtā klimatiskā analīze raksturo vispārējo konvektīvo procesu aktivitāti Latvijā. Tomēr gandrīz ik gadu valstī tiek novēroti atsevišķi spēcīgu pērkona negaisu gadījumi, kas rada ievērojamus postījumus. Līdz ar to, lai ar laicīgas un efektīvas brīdinājumu sistēmas palīdzību samazinātu šādu gadījumu postošās ietekmes, ir būtiski padziļināti analizēt ar spēcīgiem pērkona negaisiem saistītos atmosfēras apstākļus, kā arī apzināt rādītājus, kas var kalpot par postošu negaisu indikatoriem gan vēl pirms to attīstības, gan arī to veidošanās fāzē. Šim nolūkam pētījuma gaitā tika apzināta līdzšinējā vairāku teorijā balstītu un operatīvajā meteoroloģijā

plaši pielietotu rādītāju klātbūtne meteoroloģiskā radara un satelītu novērojumos dienās ar pērķona negaisiem Latvijā.

Meteoroloģiskā radara novērojumu analīzes gaitā tika noskaidrots, ka no teorētiskajiem spēcīgu pērķona negaisu rādītājiem Latvijā dienās ar pērķona negaisu visbiežāk tiek novērota vertikāli ielikta mākoņa forma (*tilted updraft*), retāk tiek novērotas strukturālas izmaiņas radara atstarošanās vērtību vertikālajā šķērsgriezumā (*weak echo region*) (13–43% gadījumu), savukārt visretāk tiek novērotas āķveida struktūras (*hook echo*) (2–16% gadījumu). Virkne rādītāju tika identificēti arī no meteoroloģisko satelītu novērojumu datiem – riņķveida (*cold-ring*) un v-veida (*v-shaped*) negaisa mākoņu struktūras (5–28% gadījumu), mazu ledus daļiņu klātbūtne mākoņa virsotnē (20–50% gadījumu), mākoņu virsotņu iesniegšanās stratosfērā (*overshooting tops*) (22–63% gadījumu), gravitācijas viļņi (*gravity waves*) (4–15% gadījumu). Par rādītājiem, kas var būt noderīgi sākotnējai augstas ietekmes pērķona negaisu identifikācijai Latvijā, tika atzītas meteoroloģiskā radara maksimālās atstarošanās vērtības virs 50 dBZ un mākoņu virsotņu iesniegšanās stratosfērā. Vienlaikus tika noskaidrots, ka spēcīgākie nokrišņi dienās ar pērķona negaisu tikuši novēroti gadījumos ar gravitācijas viļņiem, v-veida negaisa mākoņu struktūrām un mazām ledus daļiņām mākoņa virsotnē. Savukārt spēcīgākās vēja brāzmas bijušas saistītas ar gravitācijas viļņiem, mazām ledus daļiņām un radara maksimālās atstarošanās vērtību zem 50 dBZ novērojumiem. Līdz ar to šie rādītāji var norādīt uz paaugstinātu pērķona negaisu bīstamības potenciālu.

SECINĀJUMI

Kopš 20. gadsimta vidus Latvijā novērotas būtiskas ekstremālo klimatisko parādību biežuma izmaiņas. Ekstremālu klimatisko parādību indeksu ilggadīgo izmaiņu tendenču analīze norāda uz statistiski būtisku karstu dienu skaita palielināšanos, savukārt ekstremāli zemu gaisa temperatūru gadījumi ziemas sezonā ir kļuvuši retāki. Vienlaikus konstatēts arī stipru atmosfēras nokrišņu gadījumu skaita un intensitātes pieaugums, tomēr šo tendenču apmēri un statistiskā būtiskuma līmenis nav telpiski vienmērīgi sadalīti.

Latvijā konstatētās ekstremālu klimatisko parādību izmaiņas teritoriāli bijušas atšķirīgas, iezīmējot apgabalus, ko skārušas krasākas pārmaiņas. Tā izteiktākais stipru atmosfēras nokrišņu biežuma un intensitātes pieaugums novērots Rīgas līča piekrastē, tādējādi ilustrējot Rīgas līča ietekmi uz nokrišņu telpisko izplatību valstī. Klimata indeksu izmaiņu tendences izteiktākas bijušas arī galvaspilsētā Rīgā, kur šādas izpausmes varētu būt saistāmas ar lielām pilsētām raksturīgā mikroklimata ietekmi.

Pētījuma gaitā tika konstatētas likumsakarības starp ekstremālu klimatisko parādību novērojumiem un liela mēroga atmosfēras cirkulācijas apstākļiem. Tika noskaidrots, ka ekstremāli augstas gaisa temperatūras gadījumi Latvijā visbiežāk tiek novēroti anticiklonisku dienvidrietumu un dienvidu plūsmu, kā arī ciklonisku rietumu, dienvidrietumu plūsmu apstākļos. Savukārt stipru atmosfēras nokrišņu gadījumi pārsvarā bijuši saistīti ar ciklonu darbības ietekmi.

Gaisa temperatūras paaugstināšanās ietekmē kopš 20. gadsimta vidus Baltijas jūras un Rīgas līča Latvijas piekrastē būtiski samazinājies ledus sezonas ilgums, ko raksturo vēlāka ledus izveidošanās un ātrāka tā izžušana. Tomēr šīs izmaiņas laika gaitā nav bijušas vienmērīgas, un tika konstatēts, ka jūras ledus režīmu ietekmē liela mēroga atmosfēras cirkulācijas procesi virs Atlantijas okeāna ziemeļu daļas.

Migla Latvijā ir samērā bieži novērojama bīstamā atmosfēras parādība – tā tiek novērota vidēji 19–59 dienas gadā un tās izplatība ir laikā un telpā nevienmērīgi sadalīta. Kopš 20. gadsimta vidus miglas Latvijā kļuvušas ievērojami retākas, un šādas izmaiņas varētu būt saistītas gan ar dabisku faktoru ietekmi, gan arī pakāpenisku industriālo aktivitāšu samazināšanos un līdz ar to arī gaisa kvalitātes uzlabošanos. Tomēr migla aizvien ir viena no tām atmosfēras parādībām, kas Latvijā apdraud transporta sistēmas, jo īpaši aviācijas pārvadājumus.

Lai gan lielākā daļa Latvijā novēroto miglas gadījumu bijuši saistīti ar anticikloniskiem apstākļiem, migla bieži vien pavada nelielu atmosfēras nokrišņu klātbūtne – šis varētu būt indikators advekcijas tipa miglu dominancei Latvijā. Tajā pat laikā, analizējot Rīgas lidostas novērojumu

stacijas laika rindas, tika konstatēts, ka visintensīvākās miglas gadījumi varētu tikt klasificēti kā radiācijas migla. Radiācijas miglai raksturīga mazāka noturība, un līdz ar to tā aviācijas pārvadājumiem ir mazāk bīstama nekā advekcijas migla. Tā kā advekcijas tipa miglai ir būtiska ietekme uz gaisa satiksmes organizāciju, savlaicīga informācija, ko sniedz meteoroloģiskie satelīti, ir neatsverams rīks miglas un zemo mākoņu apgabalu izplatības un noturības prognozēšanai.

Pērķona negaisi ir viena no bīstamākajām atmosfēras parādībām Latvijā un tie tiek novēroti vidēji 14,5–23 dienas gadā. Dienu skaita ar pērķona negaisu telpiskā izplatība ilustrē reljefa un Baltijas jūras tuvuma ietekmi uz konvektīvo procesu izplatību valstī.

Pērķona negaisi ir kompleksa atmosfēras parādība, kas ietver vairākas pavadošas bīstamas atmosfēras parādības, piemēram, spēcīgas lietusgāzes, krusu un krasas vēja brāzmas. Atmosfēras nokrišņi ir visbiežāk novērotā parādība dienās ar pērķona negaisu Latvijā, un vidējais nokrišņu daudzums šādās dienās ir 4,3–9,3 mm, savukārt maksimālais ik gadu sasniedz vidēji 25–29 mm. Krusa dienās ar pērķona negaisu Latvijas oficiālajās novērojumu stacijās tiek reģistrēta reti – vidēji tikai 0,3–1,1 dienu gadā. Savukārt vēja brāzmas dienās ar pērķona negaisu vidēji sasniedz 14–20 m/s, un augstākās vērtības raksturīgas Baltijas jūras piekrastes rajoniem. Tomēr kopējais vēja brāzmainums dienās ar pērķona negaisu ir lielāks iekšzemes meteoroloģisko novērojumu stacijās.

Pērķona negaisu intensitātes klimatiskā analīze liecina, ka vidēji 71–85% Latvijā novēroto pērķona negaisu gadījumu nav bijuši bīstami. Dienu skaits ar dzeltena, oranža un sarkana bīstamības līmeņa pērķona negaisiem bijis ievērojami mazāks – dzeltenā bīstamības līmeņa negaisi novēroti vidēji 4,6–13% gadījumu, oranžā bīstamības līmeņa negaisu īpatsvars svārstījies starp 0,7 un 14%, savukārt sarkanā bīstamības līmeņa negaisi nepārsnieguši 0,2–1,7% no kopējā novēroto negaisa dienu skaita. Tādējādi iegūtie rezultāti liecina, ka pašreiz izmantotie pērķona negaisu brīdinājumu kritēriji kopumā ir atbilstoši bīstamu pērķona negaisu klimatiskajai izplatībai. Tomēr oranžā bīstamības līmeņa kritēriji būtu pārskatāmi.

Mūsdienu klimatiskās normas periodā no 1981. līdz 2010. gadam pērķona negaisa dienu skaits ir par aptuveni divām dienām mazāks, nekā klimatiskās references periodā no 1961. līdz 1990. gadam. Turklāt ilggadīgo izmaiņu tendenču analīze norāda uz statistiski būtisku pērķona negaisu biežuma samazināšanos astoņās no 14 pētījumā iekļautajām meteoroloģisko novērojumu stacijām. Vienlaikus konstatēti pērķona negaisu intensitātes pieauguma indikatori. Tā, piemēram, Rīgas līča piekrastē ilggadīgajā laika periodā būtiski palielinājies atmosfēras nokrišņu biežums un intensitāte dienās ar pērķona negaisu. Tomēr visbūtiskākās izmaiņas konstatētas vēja parametru raksturā – vairumā meteoroloģisko novērojumu staciju to vērtības ir būtiski paaugstinājušās.

Padziļināta atsevišķu pērkona negaisu gadījumu analīze sniedz detalizētu ieskatu procesos, kas nosaka konvektīvo parādību veidošanos un attīstību, un kas aizvien ir izaicinājums zinātnes kopienai. Divu Latvijā un Polijā novērotu tornado gadījumu analīze apraksta līdzīgas ietekmes gadījumu veidošanos atšķirīgos atmosfēras apstākļos, un tādējādi ilustrē konvektīvo parādību veidošanās, dinamikas un intensifikācijas komplekso dabu.

Attālināto novērojumu informācijas izmantošana nenoliedzami sniedz papildus detalizētu informāciju par pērkona negaisu attīstībai raksturīgajiem atmosfēras apstākļiem. Meteoroloģiskā radara novērojumu analīze liecina, ka negaisa mākoņu atstarošanās pārsvarā sniedzas no 1–2 km līdz 6–11 km virs zemes virsmas, savukārt maksimālās radara atstarošanās vērtības pārsvarā sasniedz 50 dBZ. Savukārt no meteoroloģisko satelītu novērojumiem iegūtā informācija liecina, ka konvektīvo mākoņu virsmas temperatūras pārsvarā variē 210–230 K (–63 līdz –43°C) robežās.

Analīzes gaitā tika noskaidrots, ka analizētie teorētiskie rādītāji attālināto novērojumu datus ir lietderīgi pērkona negaisu intensitātes novērtēšanai, ka arī konvektīvo parādību veidošanās apstākļu raksturošanai Latvijā. Par rādītājiem, kas var būt noderīgi sākotnējai augstas ietekmes pērkona negaisu identifikācijai Latvijā, tika atzītas meteoroloģiskā radara maksimālās atstarošanās vērtības virs 50 dBZ un mākoņu virsotņu iesniegšanās stratosfērā. Savukārt tādu papildus indikatoru kā gravitācijas viļņi, mazas ledus daļiņas mākoņa virsotnē un v-veida mākoņu struktūru klātbūtne norāda uz paaugstinātu pērkona negaisu bīstamības potenciālu.

Šī promocijas darba izstrādes gaitā iegūtie rezultāti var sniegt ieguldījumu Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra nodrošināto nacionālo hidrometeoroloģisko un klimatoloģisko pakalpojumu, kā arī ļoti īsa termiņa prognožu un brīdinājumu procesu attīstībai un uzlabošanai. Turklāt pētījuma izstrādes fāzē radītās datubāzes un zināšanas var kalpot par atspēriena punktu turpmākiem ekstremālo klimatisko parādību un bīstamo hidrometeoroloģisko parādību pētījumiem Latvijā.

REFERENCES / LITERATŪRAS SARAKSTS

- Ahrens, C.D. (2007). *Meteorology Today: an Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. Andover, Cengage Learning. 624 pp.
- Bendix, J. (2002). A satellite-based climatology of fog and low-level stratus in Germany and adjacent areas. *Atmospheric Research*, **64**, 3–18.
- Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woth, K. (2007). Future Extreme Events in European Climate: An Exploration of Regional Climate Model Projections. *Climatic Change*, DOI:10.1007/s10584-006-9226-z
- Beniston, M. (2007). Linking extreme climate events and economic impacts: examples from the Swiss Alps. *Energy Policy*, **35** (11), 5384–5392.
- Bhend, J., Storch, V. (2007). Consistency of Observed Winter Precipitation Trends in Northern Europe with Regional Climate Change Projections. *Climate Dynamics*, DOI:10.1007/s00382-007-0335-9
- Bielec-Bakowska, Z. (2003). Long-term variability of thunderstorm occurrence in Poland in the 20th century. *Atmospheric Research*, **67–68**, 35–52.
- Birkmann, J., Garschagen, M., Kraas, F., Quang, N. (2010). Adaptive Urban Governance: New Challenges for the Second Generation of Urban Adaptation Strategies to Climate Change. *Sustainability Science*, DOI:10.1007/s11625-010-0111-3
- Briede, A. (2016). Latvijas klimats un tā mainības raksturs [The climate of Latvia and its variability]. In: Klavins, M., Zaloksnis, J. (eds.), *Klimats un ilgtspējīga attīstība* [Climate and sustainable development] (In Latvian with summary in English) (pp. 55–90). Riga: University of Latvia Academic Press.
- Burroughs, W. (ed.) (2003). *Climate: Into the 21st century*. Cambridge: Cambridge University Press for World Meteorological Organization. 240 pp.
- Cermak, J., Bendix, J. (2008). A novel approach to fog/low stratus detection using Meteosat 8 data. *Atmospheric Research*, **87**, 279–292.
- CM SAF (2009). *Algorithm Theoretical Basis Document. CM-SAF Product CM-02, CM-08 and CM-14. Cloud Fraction, Cloud Type and Cloud Top Parameter Retrieval from SEVIRI*. Available: http://www.cmsaf.eu/EN/Documentation/Documentation/ATBD/pdf/SAF_CM_D_WD_ATBD_CFC_CTH_CTO_SEVIRI_1.pdf?blob=publicationFile&v=4 [Accessed 29.09.2017]
- COST733 (2013). *Classification catalogue*. Available: <http://cost733.geo.uni-augsburg.de/cgi/cost733plot.cgi> [Accessed 27.09.2017]
- Czernecki, B., Taszarek, M., Kolendowicz, L., Konarski, J. (2016). Relationship between human observations of thunderstorms and the PERUN lightning detection network in Poland. *Atmospheric Research*, **167**, 118–128.
- Dessai, S. (2002) Heat Stress and Mortality in Lisbon Part I. Model Construction and Validation. *International Journal of Biometeorology*, **47**, 6–12.

- Diaz, J., Linares, C., Tobias, A. (2006). Impact of Extreme Temperatures on Daily Mortality in Madrid (Spain) among the 45–64 Age Group. *International Journal of Biometeorology*, **50**, 342–348.
- Doswell, C.A., Rasmussen, E.N., Davies-Jones, R., Keller, D.L. (1990). On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables. *Weather Forecasting*, **5**, 576–585.
- Dotzek, N., Groenemeijer, P., Feuerstein, B., Holzer, A.M. (2009). Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric Research*, **93**, 575–586.
- Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R., Mearns, L.O., (2000). Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, **289**, 2068–2074.
- ECA&D (2017). *Indices dictionary*. Available: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php> [Accessed 25.09.2017]
- Enno, S.E., Post, P., Briede, A., Stankunaite, I. (2014). Long-term changes in the frequency of thunder days in the Baltic countries. *Boreal Environment Research*, **19**, 452–466.
- Gabriel, K.M.A., Endlicher, W.R. (2011). Urban and Rural Mortality Rates During Heat Waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution*, **159** (8/9), 2044–2050.
- Gebre, S., Boissy, T., Alfredsen, K. (2014). Sensitivity to climate change of the thermal structure and ice cover regime of three hydropower reservoirs. *Journal of Hydrology*, **510** (3), 208–227.
- Hagen, E., Feistel, R. (2005). Climatic turning points and regime shifts in the Baltic Sea region: The Baltic winter index (WIBIX) 1659–2002. *Boreal Environment Research*, **10**, 211–224.
- Handmer, J., Honda, Y., Kundzewicz, Z.W., Arnell, N., Benito, G., Hatfield, J., Mohamed, I.F., Peduzzi, P., Wu, S., Sherstyukov, B., Takahashi, K., Yan, Z. (2012). Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. In: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* (pp. 231–290). Cambridge: Cambridge University Press.
- Heino, R., Brazdil, R., Forland, E., Tuomenvirta, H., Alexandersson, H., Beniston, M., Pfister, C., Rebetz, M., Rosenhagen, G., Rosner, S., Wibig, J. (1999). Progress in the study of climatic extremes in Northern and Central Europe. *Climate Change*, **42**, 151–181.
- Heo, K., Ha, K., Mahrt, L., Shim, J. (2010). Comparison of advection and steam fogs: from direct observation over the sea. *Atmospheric Research*, **98**, 426–437.
- Hoy, A., Sepp, M., Matschullat, J. (2013) Atmospheric circulation variability in Europe and northern Asia (1901 to 2010). *Theoretical and Applied Climatology*, **113**(1–2), 105–126.

- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC. 151 pp.
- IPCC (2014b). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. 1132 pp.
- Karl, T.R., Trenberth, K.E. (2003). Modern global climate change. *Science*, **302**, 1719–1723.
- Kažys, J., Stankūnavičius, G., Rimkus, E., Bukantis, A., Valiukas, D. (2011). Long-range Alternation of Extreme High Day and Night Temperatures in Lithuania. *Baltica*, **24** (2), 71–82.
- Kjellström, E., Ruosteenoja, K. (2007). Present-day and Future Precipitation in the Baltic Sea Region as Simulated in a Suite of Regional Climate Models. *Climatic Change*, DOI:10.1007/s10584-006-9219-y
- Klein Tank, A.M.G. (2004). *Changing temperature and precipitation extremes in Europe's climate of the 20th century. PhD thesis*. De Bilt: The Netherlands. 124 pp.
- Klein Tank, A.M.G., Können, G.P. (2003). Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–1999. *Journal of Climatology*, **16**, 3665–3680.
- Kovats, R.S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M., Soussana, J.-F. (2014). Europe. In: Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1267–1326). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lange, C.A., Matschullat, J., Zimmermann, F., Sterzik, G., Wienhaus, O. (2003). Fog frequency and chemical composition of fog water – a relevant contribution to atmospheric deposition in the Eastern Erzgebirg, Germany. *Atmospheric Environment*, **37**, 3731–3739.
- LEGMC (2017). *Warnings*. Available: <http://www.meteo.lv/en/bridinajumi/?nid=679> [Accessed 09.09.2017]
- Lemon, L.R., Doswell, C.A. (1979). Severe Thunderstorm Evolution and Mesocyclone Structure as Related to Tornado Genesis. *Monthly Weather Review*, **107**, 1184–1197.
- Lizuma, L. 2008. *Gaisa temperatūras un atmosfēras nokrišņu mainības raksturs Rīgā. Disertācija* [Variability of air temperature and precipitation in Riga. Dissertation] (In Latvian). Riga: University of Latvia Press.
- Luterbacher, J., Xoplaki, E., Dietrich, D., Jones, P.D., Davies, T.D., Portis, D., Gonzalez-Rouco, J.F., von Storch, H., Gyalistras, D., Casty, C., Wanner, H. (2002). Extending North Atlantic Oscillation Reconstructions Back to 1500. *Atmospheric Science Letters*, **2**, 114–124.

- Mason, S.J., Waylen, P.R., Mimmack, G.M., Rajaratnam, B., Harrison, J.M. (2004). Changes in Extreme Rainfall Events in South Africa. *Climatic Change*, **41** (2), 249–257.
- Mäkelä, A., Tuomi, T.J., Haapalainen, J. (2010). A decade of high-latitude lightning location: effects of the evolving location network in Finland. *Journal of Geophysical Research*, **115**(D21), DOI:10.1029/2009JD012183
- Meteoalarm (2017). *Weather warnings: Europe*. Available: <http://www.meteoalarm.eu/> [Accessed 09.09.2017]
- Moeborg, A., Jones, F.D. (2005). Trends in Indices for Extremes in Daily Temperature and Precipitation in Central and Western Europe Analyzed 1901–1999. *International Journal of Climatology*, **25**, 1149–1171.
- Parsons, D.B. (2015). Continental convective system. In: Brunet, G., Jones, S., Ruti, P.M. (eds.), *Seamless prediction of the Earth system: from minutes to months* (pp. 233–265). Geneva: World Meteorological Organization.
- Richard, O.G. (1987). *Statistical Methods for Environmental Polluting Monitoring*. Canada: John Wiley & Sons. 336 pp.
- Rigo T., Pineda N. (2016). Inferring the severity of a multicell thunderstorm evolving to supercell, by means of radar and total lightning. *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*, **11** (2), 1–27.
- Sachweh, M., Koepke, P. (1997). Fog dynamics in an urbanized area. *Theoretical and Applied Climatology*, **58**, 87–93.
- Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T., Amnell, T. (2002). Detecting Trends of Annual Values of Atmospheric Pollutants by the Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimates – the Excel Template Application MAKESENS. *Publication on Air Quality, Finnish Meteorological Institute*, 1–31.
- SELEX Sistemi Integrati GmbH (2006). *Instruction Manual. Release 5.15.1*. Neuss-Rosellen: Sistemi Integrati GmbH.
- Setvak, M., Lindsey, D.T., Novak, P., Wang, P.K., Radova, M., Kerkmann, J., Grasso, L., Su, S.H., Rabin, R.M., Štaska, J., Charvat, Z. (2010). Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds. *Atmospheric Research*, **97**, 80–96.
- Shi, C., Roth, M., Zhang, H., Li, Z. (2008). Impacts of urbanization on longterm fog variation in Anhui Province, China. *Atmospheric Environment*, **42**, 8484–8492.
- Singh, A., Dey, S. (2012). Influence of aerosol composition on visibility in megacity Delhi. *Atmospheric Environment*, **62**, 367–373.
- Stalker, J.R., Knupp, K.R. (2001). A Method to Identify Convective Cells within Multicell Thunderstorms from Multiple Doppler Radar Data. *Monthly Weather Review*, **130**, 188–195.
- Tuomi, T.J., Mäkelä, A. (2008). Thunderstorm climate of Finland 1998–2007. *Geophysica*, **44**, 67–80.
- Unkaševica, M., Tošić, I. (2009). An analysis of heat waves in Serbia. *Global and Planetary Change*, **65**, 17–26.
- Wibing, J., Glowicki, B. (2002). Trends of Minimum and Maximum Temperatures in Poland. *Climate Research*, **20**, 123–133.

- Witiw, M.R., LaDochy, S. (2008). Trends in fog frequencies in the Los Angeles Basin. *Atmospheric Research*, **87**, 293–300.
- Žibert, M.I., Žibert, J. (2013). Monitoring and automatic detection of the cold-ring patterns atop deep convective clouds using Meteosat data. *Atmospheric Research*, **123**, 281–292.
- Zwiers, F.W., Alexander, L.V., Hegerl, G.C., Knutson, T.R., Kossin, J.P., Naveau, P., Nicholls, N., Schär, C., Senevirante, S.I., Zhang, X. (2013). Climate extremes: Challenges in estimating and understanding recent changes in the frequency and intensity of extreme climate and weather events. In: Asrar, G.R., Hurrell, J.W. (eds.), *Climate science for serving society: Research, Modeling and Prediction Priorities* (pp. 339–389). London: Springer.