

LATVIJAS VALSTS MEŽZINĀTNES INSTITŪTS „SILAVA”
LATVIAN STATE FOREST RESEARCH INSTITUTE ‘SILAVA’

LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
LATVIA UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Mg.silv. **MĀRA KITENBERGA**

**HEMIBOREĀLO MEŽU DEGŠANAS VĒSTURE UN
KOKAUDŽU ATJAUNOŠANĀS DEGUMOS**

***FOREST FIRE HISTORY AND POST-FIRE
REGENERATION PATTERNS IN HEMIBOREAL FORESTS***

Promocijas darba KOPSAVILKUMS
mežzinātņu doktora Dr.silv. zinātniskā grāda iegūšanai

SUMMARY
of the Doctoral thesis for the scientific degree of Forest sciences (Dr.silv.)

Salaspils 2019

Promocijas darba zinātniskie vadītāji / *Supervisors*:
Dr.silv. Āris Jansons, Igor Drobyshev PhD

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Valsts mežzinātnes institūtā “Silava”, doktorantūras studiju ietvaros Latvijas Lauksaimniecības universitātes Meža fakultātē laika periodā no 2014. līdz 2019. gadam. Pētījums izstrādāts AS “Latvijas valsts meži” pētījuma “Meža apsaimniekošanas risku izmaiņu prognozes un to mazināšana” un “Mežsaimniecības ietekme uz meža un saistīto ekosistēmu pakalpojumiem”, un Meža nozares kompetences centra pētījuma ”Metodes un tehnoloģijas meža kapitālvērtības palielināšanai” (ERAF, L-KC-11-0004) ietvaros.

The research was carried out at Latvian State Forest Research Institute ‘Silava’. The doctoral studies were carried out at Latvia University of Life Sciences and Technologies, Forest Faculty in period from 2014 to 2019. The research was funded by the Joint Stock Company ‘Latvia’s State Forests’ research projects: ‘Forest management risks: prognosis and minimization’, and ‘Impact of forest management on forest and related ecosystem services’. The research was also supported by Forest Competence Centre project ‘Ecological risk in management of forest capital value – methods of assessment and recommendations of their minimization’(ERDF, L-KC-11-0004).

Oficiālie recenzenti / *Official reviewers*:

1. Dr.silv. Linards SISENIS, Latvijas Lauksaimniecības Universitātes profesors / *Professor at Latvia University of Life Sciences and Technologies*;
2. PhD Kalev JÕGISTE, Igaunijas Dzīvības zinātņu universitātes profesors / *Professor at Estonian University of Life Sciences*;
3. Dr. Vitas MAROZAS, Vitautas Magnusa universitātes profesors / *Professor at Vytautas Magnus University*.

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Lauksaimniecības universitātes Mežzinātnes un Materiālzinātnes nozaru promocijas padomes atklātā sēdē 2019. gada 20. decembrī plkst. 9:30, Salaspilī, Rīgas ielā 111, LVMI „Silava” bibliotēkā. The public defence of doctoral thesis in open session of the Promotion Council of Forest Sciences and Material Sciences of Latvia University of Life Sciences and Technologies will be held December 20, 2019 at 9:30 am in Salaspils, Rīga Street 111, Latvian State Forest Research Institute ‘Silava’ library.

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu var iepazīties LLU Fundamentālajā bibliotēkā Jelgavā, Lielā ielā 2 un interneta vietnē http://llu.lv/promoc_darbi.html. Atsauksmes sūtīt promocijas padomes sekretārei Mg.silv. Sarmītei Berņikovai - Bondarei uz Dobeles iela 41, Jelgava, LV-3001, Latvija vai koka@llu.lv. / The thesis is available at the Fundamental Library of Latvia University of Life Sciences and Technologies: Lielā Street 2, Jelgava and http://llu.lv/promoc_darbi.html. References are welcome to be sent to Mg.silv. Sarmītei Berņikovai - Bondarei the secretary of the Promotion Council: Dobeles iela 41, Jelgava, LV-3001, Latvia or email koka@llu.lv.

SATURS / CONTENT

1. DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS.....	4
1.1. Tēmas aktualitāte	4
1.2. Promocijas darba mērķis, uzdevumi un tēzes	4
1.3. Pētījuma novitāte.....	5
1.4. Promocijas darba aprobācija	5
1.5. Promocijas darba uzbūve	6
2. MATERIĀLS UN METODES	6
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	8
3.1. Meža ugunsgrēku saistība ar klimatiskajiem faktoriem	8
3.2. Meža degšanas vēsture Piejūras zemienē Latvijas ziemeļrietumu daļā. 10	
3.3. Uguns ietekme uz priedes augstuma pieaugumu	13
3.4. Sanitārās vienlaidus cirtes ietekme uz mežaudzes dabisko atjaunošanos degumos.....	14
SECINĀJUMI	16
PRIEKŠLIKUMI	17
PATEICĪBAS	18
1. GENERAL DESCRIPTION	19
1.1. Relevance of the topic.....	19
1.2. Research aim, objectives and thesis statements	19
1.3. Scientific novelty of the study.....	19
1.4. Approbation of the results	20
1.5. Structure of doctoral thesis.....	20
2. MATERIALS AND METHODS	21
3. RESULTS AND DISCUSSION	23
3.1. The national fire chronologies	23
3.2. Forest fire history in the north-western Latvia.....	24
3.3. Fire influence on Scots pine growth.....	25
3.4. Forest management influence on post-fire regeneration patterns.....	26
CONCLUSIONS	27
RECOMMENDATIONS.....	28
ACKNOWLEDGMENTS	29
LITERATŪRAS SARAKSTS / REFERENCES	30

DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

1.1. Tēmas aktualitāte

Ugunsgrēki ir nozīmīgs dabiskais traucējums sauszemes ekosistēmās, kas izmaina to attīstības dinamiku un palielina oglekļa emisiju daudzumu (Bowman et al., 2009). Tieši cilvēka radītās klimata pārmaiņas ir bijušas galvenais virzītājspēks meža ugunsgrēku platību pieaugumam Eiropā 20. gadsimta otrajā pusē (Seidl et al., 2011). Lai izprastu meža ugunsgrēku lomu hemiboreālajos mežos, nozīmīgi iegūt informāciju par vēsturisko meža ugunsgrēku režīmu un to noteicošajiem faktoriem, kā arī par meža atjaunošanos un jaunaudžu parametriem meža ugunsgrēku skartajās teritorijās. Šāda informācija nepieciešama gan uguns apsardzības sistēmas pilnveidošanai, gan dabas aizsardzības un saimniecisko darbību plānošanai.

1.2. Promocijas darba mērķis, uzdevumi un tēzes

Promocijas darba mērķis ir raksturot klimatisko un antropogēno faktoru ietekmi uz meža degšanas vēsturi un parastās priedes (*Pinus sylvestris* L.) atjaunošanos ugunsgrēka skartajās platībās.

Promocijas darbā izvirzīti četri uzdevumi:

1. novērtēt klimatisko faktoru ietekmi uz ugunsgrēku skaita un platības ilgtermiņa dinamiku;
2. raksturot meža degšanas vēsturi Piejūras zemienē Latvijas ziemeļrietumu daļā;
3. salīdzināt priedes jaunaudžu parametrus stādījumos pēc sanitārās vienlaidus cirtes degumā un pēc vienlaidus atjaunošanas cirtes;
4. novērtēt sanitārās vienlaidus cirtes ietekmi uz dabisko atjaunošanos degumos.

Promocijas darbā izvirzītas divas tēzes:

1. liela mēroga klimatiskajām sistēmām ir būtiska ietekme uz meža ugunsgrēku biežumu un platību Baltijas jūras reģionā;
2. sanitārajai vienlaidus cirtei pēc meža ugunsgrēka ir būtiska ietekme uz priedes dabisko atjaunošanos.

1.3. Pētījuma novitāte

Promocijas darbā pirmo reizi apzināta liela mēroga klimatisko sistēmu ietekme uz meža ugunsgrēku skaitu un platību Baltijas jūras reģionā. Pirmo reizi Baltijas valstīs novērtēta antropogēno un klimatisko faktoru ietekme uz vēsturisko meža ugunsgrēku režīmu 250 gadu ilgā laika posmā. Novērtēta deguma ilglaicīga ietekme uz stādītu priedes jaunaudzū parametriem dažādos meža tipos. Novērtēta sanitārās vienlaidus cirtes (pēc deguma) ietekme uz priedes dabisko atjaunošanos, turklāt pirmo reizi – tik ilgu laika posmu pēc ugunsgrēka meža tipos kūdras augsnēs.

1.4. Promocijas darba aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti apkopoti 5 publikācijās:

1. **Kitenberga M.**, Matisons R., Jansons A., Donis J. (2018) Teleconnection between the Atlantic sea surface temperature and forest fires in Latvia and Estonia. *Silva Fennica*, 52 (1), 1-8. <https://doi.org/10.14214/sf.7771>
2. Drobyshev I., **Kitenberga M.**, Ryzhkova N. (2019) Trends and patterns in annually burned forest areas and fire weather across the European boreal zone in the 20th and early 21st centuries. (manuskripts)
3. **Kitenberga M.**, Drobyshev I., Elferts D., Matisons R., Adamovics A., Katrevics J., Niklasson M., Jansons A. (2019) A mixture of human and climatic effects shapes the 250-year long fire history of a semi-natural pine dominated landscape of Northern Latvia. *Forest Ecology and Management*, 441, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.020>
4. **Zadina M.**, Purina L., Pobiarsens A., Katrevics J., Jansons J., Jansons A. (2014) Height-growth dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in burned and clearcut areas hemiboreal forests, Latvia. In: *Proceedings of the Second International Congress of Silviculture. Designing the future of the forestry sector*, Florence, 443–447. <http://dx.doi.org/10.4129/2cis-mz-hei>
5. **Kitenberga M.**, Elferts D., Adamovics A., Katrevics J., Donis J., Baders E., Jansons A. (2019) Impact of salvage-logging on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) regeneration in post-fire areas in hemiboreal forests. (recenzēšanā *New Forests*)

Ziņojumi par pētījuma rezultātiem prezentēti 5 starptautiskās konferencēs:

1. 26.-29.11.2014. Florence, Itālija. Refertāts: 'Height-growth dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in burned and clearcut areas in hemiboreal forests, Latvia' otrajā starptautiskajā mežzinātnes kongress 'Accademia Italiana di Scienze Forestali'.

2. 23.-24.04.2015. Rīga, Latvija. Stenda referāts 'A 247-year tree-ring width chronology of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from Slitere National Park' starptautiskajā konferencē 'Adaptation and mitigation: strategies for management of forest ecosystems'.
3. 15.-16.09.2015. Rīga, Latvija. Stenda Referats: 'Post-fire regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Latvia' starptautiskajā konferencē Nordic-Baltic Forest Conference 2015 'Wise Use of Improved Forest Reproductive Material'.
4. 04.-06.11.2015. Rīga, Latvija. Stenda referāts: 'Influence of forest fire on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) age structure and regeneration pattern' starptautiskajā zinātniskajā konferencē 'Knowledge based Forest Sector'.
5. 06.-10.09.2017. Tartu, Igaunija. Referāts: 'Dendrochronological reconstruction of the forest fire regime in a *Pinus sylvestris*-dominated forest in the Slitere National Park, Latvia' starptautiskajā konferencē 'Eurodendro'.

1.5. Promocijas darba uzbūve

Promocijas darbs sastāv no piecām publikācijām. Promocijas darba pirmajā publikācijā analizēta meža ugunsgrēku skaita un platības saistība ar liela mēroga klimatiskajām sistēmām Latvijā un Igaunijā. Otrajā publikācijā analizēta meža ugunsgrēku saistība ar klimatiskajiem apstākļiem plašākā reģionā, iekļaujot Skandināviju un daļu no Krievijas boreālo mežu reģioniem. Trešajā publikācijā analizēta informācija par vēsturisko meža ugunsgrēku režīmu Piejūras zemienē un tā saistību ar klimatiskajiem un antropogēnajiem faktoriem. Ceturtajā publikācijā apskatīta uguns ietekme uz priedes augstuma pieauguma veidošanos stādītās jaunaudzēs. Piektajā publikācijā apskatīta meža apsaimniekošanas veida ietekme uz dabisko mežaudzes atjaunošanos uguns skartās platībās.

2. MATERIĀLS UN METODES

Pirmajā un otrajā publikācijā meža ugunsgrēku aktivitātes raksturošanai izmantotie statistikas dati par ugunsgrēku skaitu un platību Latvijā laikposmā no 1922. līdz 2014. gadam iegūti no vairākiem literatūras avotiem un datu bāzēm (Donis et al., 2017), savukārt Igaunijā laikposmā no 1923. līdz 2014. gadam – no Igaunijas Vides aģentūras. Dati par mēneša vidējo jūras virsmas temperatūru (SST) un Atlantijas multidekāžu oscilācijas indeksu (AMO) iegūti no Lielbritānijas Meteoroloģijas Hadleja centra datubāzes (Rayner et al., 2003; Trenberth & Shea, 2006). Ugunsgrēku skaita un platības dati logaritmēti, lai normalizētu datu izkliedi. Sakarības starp Latvijas un Igaunijas meža ugunsgrēku skaitu un platību novērtētas, izmantojot Pīrsona korelācijas un sinhronizācijas

koeficientus. Lai novērtētu saistības starp meža ugunsgrēkiem un klimatiskajiem rādītājiem, izmantota Pīrsona korelācijas analīze *Climate Explorer* programmā (Trouet & Oldenborgh, 2013). Korelāciju būtiskums noteikts ar divpusējo Stjūdenta t-testu, ņemot vērā laikrindas autokorelāciju. Katras korelācijas būtiskums vizualizēts kartē (Wilks, 2006).

Otrajā publikācijā analizēta meža ugunsgrēku aktivitāte plašākā reģionā, iekļaujot ne tikai Baltijas valstis, bet arī Skandināviju un daļu no Krievijas boreālajiem reģioniem. Klimatisko apstākļu raksturošanai izmantots mēneša sausuma indekss (MDC), kuru aprēķina, izmantojot mēneša kopējo nokrišņu daudzumu, minimālās un maksimālās mēneša gaisa temperatūras no CRU TS v. 4.02 datu bāzes (Harris et al., 2014). Hierarhiskā klāsteranalīze izmantota, lai noskaidrotu, kuros reģionos bija līdzīga uguns aktivitāte. Izmantojot iespējamības (*contingency*) analīzi, noteikti reģionāli lieli meža ugunsgrēku gadi (LFY), kuros uguns skārusi vislielākās platības. Ar *Superposed epoch* analīzes palīdzību noteikta LFY saistība ar 500 hPa spiediena laukiem, izmantojot Hadleja centra jūras līmeņa spiediena datus (Allan & Ansell, 2006).

Trešajā publikācijā rekonstruēta meža degšanas vēsture SNP Bažu purva kangaru un vīgu kompleksā Latvijas ziemeļrietumu daļā. Apsekojot aptuveni 2360 ha lielu platību, ievākti koksnes ripu šķērsriezumi no kritālām saskaņā ar Arno & Sneek (1977) un McBride (1983) izveidotām paraugu ievākšanas vadlīnijām. Laboratorijā paraugi izžāvēti, noslīpēti un datēti, izmantojot *Cybis AB Coorecorder* un *CDendro 7.7* programmas (Larsson, 2013). Kopumā ievākti 350 koksnes paraugi, no kuriem bija iespējams datēt 287 (82%). Atbilstoši uguns rētas novietojumam noteikts tās izveidošanās gads un, ja iespējams, arī sezona (rēta gadskārtas agrīnajā vai vēlīnajā koksnē). Lai rekonstruētu degumu platības, pētījuma teritorija sadalīta regulāros kvadrātos (šūnās), izmantojot četrus dažādus telpiskus režģus ar šūnu izmēru 100×100, 300×300, 500×500 un 700×700 m. Lai noskaidrotu, kurš no šiem četriem režģiem visprecīzāk raksturo nodegušo platību, iegūtās rekonstruētās platības salīdzinātas ar faktiski uzskaitīto 1992. gada meža ugunsgrēka platību. Individuāla režģa šūna tika uzskatīta par “aktīvu” (t.i., tā sniedz informāciju par meža degšanas vēsturi konkrētā gadā), ja tajā atradās vismaz viens paraugs ar attiecīgā gadā veidojušos gadskārtu. Individuāla šūna tika uzskatīta par “degušu” tajos gados, kad vismaz vienam koksnes paraugam no attiecīgās šūnas bija uguns rēta konkrētajā gadā. Degušo platību rekonstrukcijai izmantoti divi rādītāji – visas šūnas platība un šūnā ietilpstošā meža platība. Analizējot vēsturisko meža degšanu, aprēķināts uguns cikls, kas ir periods (gados), kurā uguns būtu skārusi platību, kas vienāda ar pētījuma teritorijas kopējo platību (Van Wagner, 1978). Papildus aprēķināts vidējais punktveida uguns atgriešanās intervāls, kas ir vidējais gadu skaits starp divām uguns rētām vienam kokam. Izmaiņas uguns ciklā novērtētas, izmantojot secīgu t-testu (*sequential t-test*) (Rodionov, 2004). Lai novērtētu saistību starp meža degšanu SNP un SST Ziemeļatlantijas okeānā, izmantota *Superposed*

epoch analīze, kas veikta *Climate explorer* programmā (Trouet & Oldenborgh, 2013).

Ceturtajā publikācijā novērtēta meža ugunsgrēka ietekme uz priedes augstuma pieauguma veidošanos. Pētījums veikts saimnieciskajos mežos, četrās degumu platībās, kurās pēc sanitārās vienlaidus cirtes veikta atjaunošana, stādot priedi: Slīterē (mētrājs, 1992. gada degums), Ugālē (mētru ārenis, 2004. gada degums), Jaunjelgavā (mētrājs, 2006. gada degums) un Dalbē (šaurlapju ārenis, 2006. gada degums); kopumā 124 parauglaukumi. Kontroles parauglaukumi (52) izveidoti tuvumā esošās atbilstoša vecuma un meža tipa priežu jaunaudzēs, kas atjaunotas, stādot pēc vienlaidus atjaunošanas cirtes. Katrā apļveida parauglaukumā (100 m²) noteikts priežu skaits un pēdējo trīs gadu augstuma pieaugumi. Datu analīzei izmantots Stjudenta t-tests, lai novērtētu atšķirību būtiskumu starp jaunaudzēm degumos, kur veikta sanitārā vienlaidus cirte, un kontroli, t.i., jaunaudzēm atjaunošanas ciršu platībās.

Piektajā publikācijā saimnieciskās darbības (sanitārās vienlaidus cirtes) ietekme uz turpmāku mežaudzes dabisko atjaunošanos novērtēta SNP 1992. gada deguma teritorijā 23 gadus pēc meža ugunsgrēka. Deguma teritorijās, kurās nav notikusi nekāda saimnieciskā darbība, izveidoti 220 apļveida parauglaukumi, bet teritorijās, kurās pēc deguma veikta sanitārā vienlaidus cirte, – 340 parauglaukumi (25 m²). Pētījums veikts piecos dažādos meža tipos – silā, mētrājā, slapjajā mētrājā, purvājā un niedrājā; jaunaudžu mērķtiecīga apsaimniekošana nevienā no platībām nav veikta. Katrā parauglaukumā noteikts koku ($h > 30$ cm) skaits un uzmērīts to augstums. Teritorijās bez saimnieciskās darbības ap katru parauglaukumu izveidota 10 m buferjosla, kurā identificēti dzīvie iepriekšējās paaudzes koki. Novērtēti faktori, kas ietekmē audzes dabisko atjaunošanos raksturojošos parametrus – audzes biezumu (izmantots negatīvs Puasona vispārināts lineārs modelis GLMM) un koku augstumu (izmantots lineārs jaukta efekta modelis LME). Neparimetriskā dispersijas analīze ANOSIM izmantota, lai salīdzinātu audzes sastāva atšķirības starp abiem apsaimniekošanas veidiem.

Visi aprēķini veikti R programmā (v. 3.5.0, R Core Team 2018), izmantotas paketes *MASU* (Venables & Ripley, 2002), *lme4* (Bates et al., 2015), *multcomp* (Hothorn et al., 2008), *vegan* (Oksanen et al., 2019), *NLME* (Pinheiro et al., 2018).

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Meža ugunsgrēku saistība ar klimatiskajiem faktoriem

Meža ugunsgrēku statistikas datu (1922/23–2014) analīze liecina, ka starp ugunsgrēku platību Latvijā un to platību Igaunijā pastāv ciešāka korelācija ($r=0.74$) salīdzinājumā ar sakarību starp ugunsgrēku skaitu abās valstīs ($r=0.43$).

Savukārt, starp abiem ugunsgrēkus raksturojošajiem rādītājiem – platību un skaitu – Latvijā konstatēta ciešāka korelācija nekā Igaunijā – attiecīgi $r=0.70$ un 0.38 . Visas sakarības bija statistiski būtiskas. Latvijas un Igaunijas meža ugunsgrēku platības un skaita statistikas datiem vidējais sinhronizācijas koeficients bija 0.75 . Salīdzinoši augstie sinhronizācijas un korelācijas koeficienti norāda uz samērā līdzīgu meža ugunsgrēku aktivitāti Latvijā un Igaunijā 20. gadsimtā, kas, visticamāk, saistīta ar līdzīgiem klimatiskajiem apstākļiem. Atšķirības starp abu valstu meža ugunsgrēku statistikas datiem savukārt varētu būt skaidrojamas ar dažādu ģeogrāfisko novietojumu un topogrāfiju (Drobyshev et al., 2012). Zemas frekvences izmaiņas, it īpaši ugunsgrēku platībai abās valstīs, aptuveni atbilda AMO tendencei.

Gan Latvijā, gan Igaunijā ugunsgrēku skaitam un platībai konstatētas vairākas būtiskas korelācijas ar jūras virsmas temperatūru (SST). Igaunijā ugunsgrēku skaitam konstatēta negatīva korelācija ar SST pavasarī un vasarā (īpaši maijā un augustā) Atlantijas okeāna ziemeļu daļā, bet pozitīva – ar SST vasarā Ziemeļjūrā un Baltijas jūrā. Ugunsgrēku platībai šajā valstī konstatēta pozitīva korelācija ar pavasara SST Atlantijas okeāna vidējos platumu grādos, Ziemeļjūrā un Baltijas jūrā, kā arī ar vasaras SST Atlantijas okeāna Eiropas piekrastē (t.sk., Ziemeļjūrā un Baltijas jūrā). Latvijā ugunsgrēku skaitam un platībai novērota pozitīva korelācija ar pavasara un vasaras SST Baltijas jūrā un Ziemeļjūrā.

Konstatētās sakarības starp meža ugunsgrēkiem un SST (Atlantijas okeānā, Ziemeļjūrā, Baltijas jūrā) liecina par liela mēroga atmosfēras cirkulācijas procesu ietekmi uz meža ugunsgrēku aktivitāti Latvijā un Igaunijā. Pētījumā, ko veikuši Drobyshev et al. (2016), konstatētas saistības starp meža ugunsgrēkiem Zviedrijas ziemeļdaļā un negatīvām pavasara SST anomālijām Atlantijas okeānā. Mūsu pētījumā novērotā Igaunijas meža ugunsgrēku saistība ar negatīvām SST pavasara anomālijām Atlantijas okeānā kopumā ir mazāk izteikta, kas, visticamāk, skaidrojams ar Igaunijas ģeogrāfisko novietojumu uz dienvidiem no 60° ziemeļu platumā paralēles. Šī paralēle Zviedrijā Drobyshev et al. (2016) pētījumā identificēta kā robeža, no kuras uz ziemeļiem saistība starp meža ugunsgrēkiem un Atlantijas okeāna SST novērota visizteiktāk. Mūsu pētījumā Igaunijā un Latvijā konstatēta ciešā pozitīvā ugunsgrēkus raksturojošo rādītāju korelācija ar Baltijas jūras SST pavasara un vasaras mēnešos norāda uz būtiskākām sakarībām, kas, visticamāk, saistītas ar reģionālu atmosfēras-jūras mijiedarbību (Stramska & Białogrodzka, 2015). Augsta atmosfēras spiediena sistēmas un meridionālā cirkulācija ar ziemeļu gaisa plūsmu veicina sausu laikapstākļu veidošanos Baltijas jūras reģionā (Jaagus et al., 2010; Kļaviņš & Rodinovs, 2010), kā rezultātā intensīvāk izžūst nobiras mežos un palielinās meža ugunsbīstamība (Donis et al., 2017).

Analizējot ilgtermiņa meža ugunsgrēku platību dinamiku ar hierarhisko klāsteranalīzi, konstatēts, ka Ziemeļeiropas reģions iedalāms piecās grupās, apvienojot ģeogrāfiski tuvākos reģionus ar līdzīgu meža ugunsgrēku platību

dinamiku. Kā atsevišķa grupa izdalīta Baltijas jūras austrumdaļas reģions, kurā ietilpst Baltijas valstis un Pleskavas apgabals Krievijā. Šī klāstera ietvaros visatšķirīgākā no pārējiem reģioniem bija Lietuva.

Baltijas jūras reģionā (Skandināvija, Somija, Baltijas valstis, Baltkrievija) un Krievijā (Karēlijas republika, Murmanskas apgabals) 20. gadsimtā un 21. gadsimta sākumā būtiski palielinājušās mēneša sausuma indeksa MDC vērtības aprīlī. Līdzīgi arī maijā statistiski būtiski augstākas MDC vērtības novērotas Baltijas valstīs, Somijas dienviddaļā, Norvēģijas ziemeļdaļā, Arhangeļskas apgabalā. Daļā pētījuma teritorijas (Lietuvā un Baltkrievijā) konstatēts, ka MDC vērtības pieaugušas arī vasaras beigās (augustā un septembrī). Šīs tendences, kā rezultātā pagarinās periods ar augstu ugunsbīstamību un, iespējams, pieaug postošu ugunsgrēku risks, visticamāk, liecina par klimata pārmaiņām. Līdzīgi arī citos pētījumos (Donis et al., 2017) konstatēts, ka 20. gadsimta otrajā pusē pieauga meža ugunsgrēku skaits pavasarī – martā un aprīlī.

3.2. Meža degšanas vēsture Piejūras zemienē Latvijas ziemeļrietumu daļā

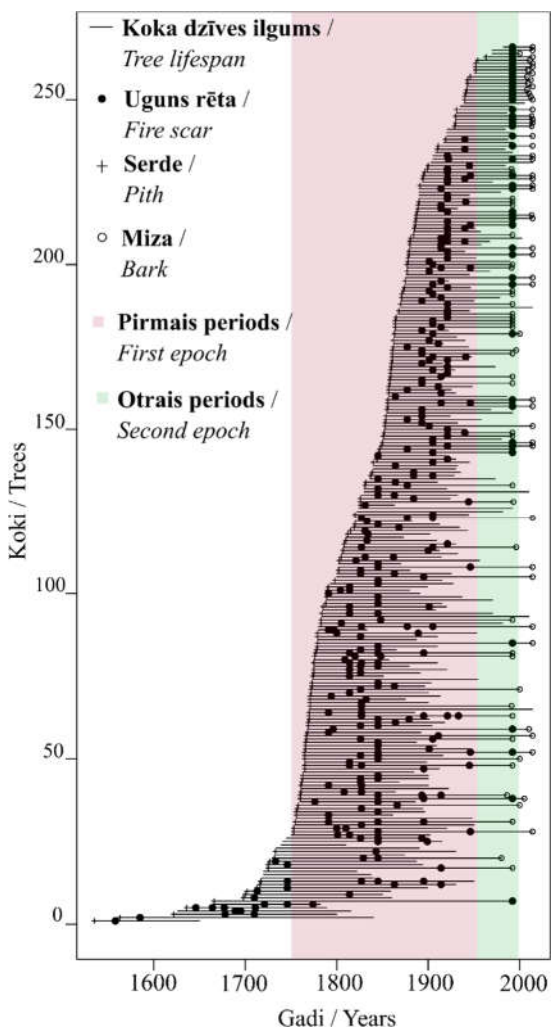
Slīteres Nacionālajā parkā Bažu purva apkārtnē senākā uguns rēta koksnes paraugā datēta ar 1558. gadu, bet jaunākā – ar 1992. gadu (3.1. att.). Uguns skartās platības rekonstruētas periodā 1750–2014, kad vismaz 30% no visām režģa šūnām bija “aktīvas”. Visā novērojumu periodā (1558–1992) vidējais punktteida uguns atgriešanās intervāls bija 46 ± 33.5 gadi (vidējais \pm standartnovirze).

Pārbaudot četrus dažāda izmēra šūnu režģus, vistuvākais rezultāts faktiski uzmērītajai 1992. gada meža ugunsgrēka platībai iegūts, rekonstrukcijā izmantojot 500×500 un 700×700 m režģa šūnas. Uguns cikla izmaiņas konstatētas 20. gadsimta vidū (3.1. att.). Agrākajā laika periodā (1750–1950) uguns cikls atkarībā no izvēlēta šūnas izmēra un tās platības (šūnas kopējā vai meža platība) variēja no 45 līdz 68 gadiem, savukārt vēlākajā periodā (1960–2000) – no 58 līdz 80 gadiem.

Agrākajā laika periodā (1750–1950), kurā uguns cikls bija īsāks, Latvijā plaši izplatīta prakse bija uguns izmantošana lauksaimniecībā un līdumu līšanā (Dumpe, 1999). Meža ugunsgrēku ierobežošanas mēģinājumi sākās jau 16. gadsimtā, tomēr to ieviešanas efektivitāte bija zema sociāli politisku un ekonomisku faktoru dēļ. Uguns izmantošana līdumu līšanā mazinājās 19. gadsimta beigās (Dumpe, 1999; Strods, 1999).

Par antropogēnā faktora ietekmi uz SNP meža degšanas vēsturi liecina arī augstais uguns rētu īpatsvars gadskārtas agrīnās koksnes daļā (65%). Uguns rētas, kas atrodas šajā koksnes daļā, norāda, ka ugunsgrēks, visticamāk, izcēlies agrīnās koksnes veidošanās periodā, t.i., pavasarī vai vasaras pirmajā pusē. Piekrastes reģionos zibens aktivitāte, kas varētu dabiski izraisīt meža

ugunsgrēku, pavasarī un vasaras pirmajā pusē ir zema, jo Baltijas jūras virsma ir auksta un augšupejošās gaisa plūsmas – vājas, tāpēc pērkona negaisa veidošanās iespējamība ir zema (Enno et al., 2013). Tādējādi pavasarī un vasaras sākumā notikušo meža ugunsgrēku lielais īpatsvars, visticamāk, skaidrojams ar cilvēku saimniecisko darbību. Līdz 20. gadsimta sākumam daļa vīgu Bažu purva apkārtnē tika izmantotas lauksaimniecībā kā ganības un pļavas (Abaja, 2011), un izplatīta bija lauksaimniecības augsnes ielabošana, dedzinot koku zarus un čiekurus pļavās (Gustiņa, 2016). Nereti uguns no lauksaimniecības zemēm mēdza izplatīties tuvējos mežos. Par to, ka šādi gadījumi nebija retums, liecina īpaši izdoti noteikumi 18. gadsimtā (Strods, 1999).



3.1.att. Uguns rētu hronoloģija Slīteres Nacionālajā parkā /
Fig. 3.1. Fire scar chronology in Slitere National Park

20. gadsimta vidū notika pāreja uz periodu (1960–2000) ar garāku uguns ciklu, kurā konstatēts viens meža degšanas gadījums 1992. gadā. Izmaiņas uguns ciklā, visticamāk, radušās sociāli politisku pārmaiņu rezultātā, kas norisinājās, Latvijai nokļūstot Padomju Savienības sastāvā pēc Otrā pasaules kara. Padomju okupācijas laikā būtiski izmainījās zemes izmantošanas, nodarbinātības un lauksaimniecības sistēmas Latvijā (Hiden & Salmon, 2013). Šajā periodā Ziemeļkurzemes piekrastes teritorija tika iekļauta armijas militārajā zonā, un

tikai atsevišķos piejūras ciemos bija atļauta zveja. Lauksaimniecībā privāto zemnieku saimniecību vietā tika izveidotas kolektīvās padomju saimniecības, kā rezultātā mazāk produktīvās lauksaimniecības zemes tika pamestas zemās rentabilitātes dēļ. Šajā periodā, kopumā samazinoties reģiona saimnieciskajai aktivitātei, visticamāk, attiecīgi samazinājās arī antropogēni izraisīto meža ugunsgrēku skaits.

Lai novērtētu saistību starp meža degšanu SNP un SST Ziemeļatlantijas okeānā, *Superposed epoch* analizē izmantoti četri LFY – 1905., 1914., 1921. un 1992. gads, kuros rekonstruētā deguši platība bija vismaz 30% no pētījuma teritorijas jeb $> 1 \text{ km}^2$. Lielie uguns gadi SNP bija saistīti ar pozitīvām SST anomālijām Baltijas jūrā no maija līdz jūlijam. Līdzīgas asociācijas maijā un jūlijā novērotas arī ar SST Ziemeļjūrā. Pozitīva saistība starp lieliem uguns gadiem un Baltijas jūras un Ziemeļjūras vidējo mēneša SST, visticamāk, atspoguļo abu procesu atkarību no augsta spiediena apgabaliem vasaras periodā. Līdzīgi rezultāti iegūti arī, analizējot Latvijas un Igaunijas 20. gadsimta meža ugunsgrēku statistikas datu saistības ar SST Atlantijas okeāna ziemeļu daļā, Baltijas jūrā un Ziemeļjūrā (Kitenberga et al., 2018).

3.3. Uguns ietekme uz priedes augstuma pieaugumu

Stādītājās jaunaudzēs šaurlapju ārenī Dalbē un mētrājā Jaunjelgavā priedes vidējais augstums 8 gadu vecumā vienlaidus atjaunošanas cirtes platībās bija būtiski ($p = 0.001$) lielāks nekā degumos, turklāt augstuma starpība pēdējo trīs gadu laikā palielinājusies. Vislielākā vidējā augstuma starpība starp vienlaidus atjaunošanas cirtes un deguma platībām (36 cm) novērota 8 gadu vecumā mētrājā Jaunjelgavā. Savukārt priedes vidējais augstums 10 gadu vecumā mētru ārenī Ugālē un 19 gadu vecumā mētrājā Slīterē būtiski neatšķirās starp vienlaidus atjaunošanas cirtes un deguma platībām, kas norāda, ka šajos gadījumos meža ugunsgrēkam nav bijusi ilgtermiņa ietekme. Pētījumā iekļauto degumu savstarpēju salīdzināšanu apgrūtinā tas, ka katram meža ugunsgrēkam raksturīga gan noteikta intensitāte (enerģija, kas izdalās degšanas procesā, Wm^{-2}), gan ietekmes smagums uz ekosistēmu (*fire severity*) (Keeley, 2012). Kā parāda iepriekšējie pētījumi, atkarībā no ugunsgrēka ietekmes smaguma uz augsni būtiski mainās atjaunojušās kokaudzes un zemsedzes veģetācijas sastāvs, kā arī to atjaunošanās dinamika (Dzwonko et al., 2015). Visticamāk, Ugālē un Slīterē ugunsgrēka ietekmes smagums uz augsni bijis zemāks, jo 10 un 19 gadu vecumā priežu jaunaudzēs netiek novērotas būtiskas augstuma atšķirības starp deguma un vienlaidus cirtes platībām. Savukārt Dalbē un Jaunjelgavā, visticamāk, uguns ietekmes smagums uz augsni bijis lielāks, par ko liecina pieaugošās vidējā augstuma atšķirības līdz 8 gadu vecumam.

Priedes augstumam visās deguma platībās konstatēts lielāks variācijas koeficients nekā vienlaidus atjaunošanas cirtes platībās. Degumā ugunsgrēka ietekmes smagums – galvenokārt, reljefa un degmateriāla atšķirību dēļ – ir

heterogēns. Uguns ietekme uz augsni veģetācijas atjaunošanos var sekmēt, vai tieši pretēji – aizkavēt (Certini, 2005; Dzwonko et al., 2015; Parro et al., 2015). Visticamāk, heterogēns ugunsgrēka ietekmes smagums uz augsni nosaka lielāku priedes augstuma variāciju degumos nekā vienlaidus atjaunošanas cirtes platībās.

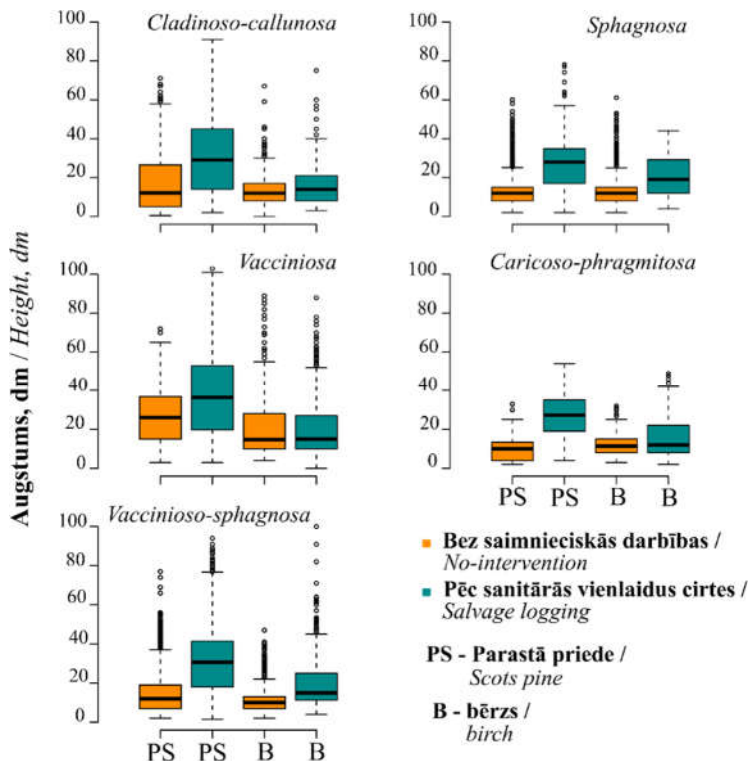
3.4. Sanitārās vienlaidus cirtes ietekme uz mežaudzes dabisko atjaunošanos degumos

Sanitārās vienlaidus cirtes ietekme uz jaunaudžu parametriem novērtēta SNP 1992. gada deguma teritorijā. Visizplatītākās koku sugas 23 gadus pēc meža ugunsgrēka bija priede un bērzs (*Betula pendula* Roth un *Betula pubescens* Ehrh.), veidojot 70 līdz 100% no kopējā atjaunojušos koku skaita visos analizētajos meža tipos. Visaugstākais jaunaudzes biežums konstatēts sanitārās vienlaidus cirtes platībās purvājā (25 440 koki ha⁻¹), slapjajā mētrājā (21 222 koki ha⁻¹) un niedrājā (17 360 koki ha⁻¹). Izmantojot GLMM modeli, noskaidrots, ka priedei atjaunojušos koku skaitu būtiski ietekmēja meža tips, telpiskā autokorelācija, kā arī meža apsaimniekošanas veida (ir/nav veikta sanitārā vienlaidus cirte) un meža tipa faktoru mijiedarbība. Platībās, kurās pēc ugunsgrēka netika veikta sanitārā vienlaidus cirte, priede bija dominējošā koku suga (pēc skaita) visos analizētajos meža tipos, izņemot niedrāju. Savukārt vienlaidus cirtes teritorijās priede dominēja silā, mētrājā un slapjajā mētrājā. Starp meža apsaimniekošanas veidiem priedes biežums nevienā no meža tipiem būtiski neatšķīrās, vienīgais izņēmums bija niedrājs. Sanitārās vienlaidus cirtes teritorijās salīdzinoši lielākā biežumā atjaunojies bērzs, kas norāda, ka papildus gaisma, kas rodas, veicot vienlaidus cirti, kā arī augsnes skarifikācija mežizstrādes laikā veicinājusi šīs koku sugas atjaunošanos. Augsnēs ar lielāku mitruma saturu (kūdras un mītrās minerālaugsnēs) bērzi atjaunojušies lielākā skaitā nekā sausās un nabadzīgās smilšainās augsnēs. Augsnes mitruma pozitīvā ietekme uz bērzu dīgšanu un augšanu novērota arī citos pētījumos (Karlsson, 1996; Karlsson et al., 1998).

Veicot ANOSIM analīzi, konstatēts, ka atjaunojušos koku sugu sastāvs starp abiem apsaimniekošanas veidiem būtiski atšķīrās divos meža tipos – slapjajā mētrājā (stat. $R = 0.16$, $p = 0.001$) un niedrājā (stat. $R = 0.29$, $p = 0.006$). Sausajos nabadzīgajos meža tipos (sil, mētrājs) un nabadzīgās kūdras augsnēs (purvājs), visticamāk, kokaudzes dabisko atjaunošanos limitē barības vielu trūkums augsnē, tāpēc sanitārā vienlaidus cirte būtiski neietekmēja atjaunojušos koku sugu sastāvu.

Izmantojot LME modeli, noskaidrots, ka priedes vidējo augstumu būtiski ($p < 0.05$) ietekmēja meža tips, meža apsaimniekošanas veids, iepriekšējās paaudzes koku skaits, iepriekšējās paaudzes priežu esamība, telpiskā autokorelācija, kā arī mijiedarbība starp faktoriem: meža tips* iepriekšējās paaudzes koku skaits un meža tips* iepriekšējās paaudzes priežu esamība. Visos meža tipos sanitārās vienlaidus cirtes teritorijās priedes vidējais augstums bija

ievērojami lielāks (par 22% līdz 61%) nekā teritorijās bez saimnieciskās darbības, kas norāda, ka iepriekšējās paaudzes koku aizvākšana būtiski uzlabojusi augšanas apstākļus jaunajiem kokiem (3.2. att.). Līdzīgi arī bērza vidējais augstums bija lielāks platībās, kurās veikta sanitārā vienlaidus cirte, tomēr bērzam augstuma atšķirības nebija tik ievērojamas kā priedei. Tātad labāka gaismas pieejamība sanitārās vienlaidus cirtes platībās īpaši veicinājusi priedes augstuma pieauguma veidošanos. Līdzīgi arī Igaunijā veiktā pētījumā secināts, ka pēc meža ugunsgrēka sanitārās vienlaidus cirtes teritorijās priede straujāk kļūva par dominējošu koku sugu nekā platībās, kurās cirte netika veikta (Parro et al., 2015).



3.2.att. Parastās priedes un bērza vidējais augstums divos apsaimniekošanas režīmos 1992. gada deguma teritorijā Slīteres Nacionālajā parkā
 Meža tipi: *Cladinoso-callunosa* - sils, *Vacciniosa* - mētrājs, *Vaccinioso-sphagnosa* - slapjais mētrājs, *Sphagnosa* - purvājs, *Caricoso-phragmitosa* - niedrājs /
 Fig. 3.2. The mean height of Scots pine and birch under two silvicultural treatments in post-fire area of 1992 fire in Slītere National Park

SECINĀJUMI

1. Pēdējo 250 gadu laikā meža ugunsgrēki ir bijuši regulārs dabiskais traucējums priežu audzēs Piejūras zemienē Ziemeļkurzemē ar īsu uguns ciklu (45–68 gadi) senākā pagātnē (1750.–1950. gads) un relatīvi garāku (58–80 gadi) – nesenākā (1950.–2000. gads). Abos periodos konstatējama cieša saistība starp ugunsgrēku režīmu un sociāli politisko situāciju Latvijā un vienlaikus vidējo ūdens virsmas temperatūru Baltijas jūrā un Ziemeļjūrā vasaras sezonā, norādot uz šo abu faktoru – antropogēnā un klimatiskā – komplementāru ietekmi.
2. Atmosfēras cirkulāciju ietekmi uz meža ugunsgrēku dinamiku apstiprina arī Latvijā un Igaunijā konstatētās būtiskās pozitīvās korelācijas starp Baltijas jūras vidējo ūdens virsmas temperatūru pavasara-vasaras sezonā un meža ugunsgrēkus raksturojošiem rādītājiem – ikgadējo ugunsgrēku skaitu un to kopējo platību. Mēneša sausuma indeksa vērtību pieaugums aprīlī un maijā liecina par ugunsbīstamības paaugstināšanos pavasarī 20. gadsimta periodā.
3. Nav konstatēta viennozīmīga ilgtermiņa negatīva meža ugunsgrēka ietekme uz atjaunojušos priežu augstumu (pieaugumu). Deguma teritorijās stādītajās jaunaudzēs bija lielāka priedes augstuma variācija nekā jaunaudzēs, kuras stādītas pēc vienlaidus atjaunošanas cirtes, kas norāda uz deguma ietekmes heterogenitāti.
4. Salīdzinot priedes dabisko atjaunošanos (bez mērķtiecīgas jaunaudžu apsaimniekošanas) 23 gadus pēc deguma, konstatēts, ka platībās, kurās netika veikta sanitārā vienlaidus cirte, priede bija dominējošā koku suga (vismaz 51%) silā, mētrājā, slapjajā mētrājā, purvājā. Savukārt, teritorijās, kurās tika veikta sanitārā vienlaidus cirte pēc deguma, minerālaugsnēs (silā, mētrājā un slapjajā mētrājā) dominēja priede, kūdras augsnēs (niedrājs, purvājs) – bērzs. Priedes biežums starp abiem meža apsaimniekošanas paņēmieniem statistiski būtiski atšķīrās tikai niedrājā: sanitārajai vienlaidus cirtei bija pozitīva ietekme.
5. Dzīvajiem iepriekšējās paaudzes kokiem bija statistiski būtiska negatīva ietekme uz atjaunojušos priežu vidējo augstumu. Platībās, kurās tika veikta sanitārā vienlaidus cirte, priede bija koku suga ar lielāko augstumu, turklāt tajās priedes vidējais augstums bija statistiski būtiski lielāks nekā neapsaimniekotās platībās.

PRIEKŠLIKUMI

1. Priedes atjaunošanās veicināšanai degumos rekomendējams veikt sanitāro vienlaidus cirti.
2. Palielināta augstas intensitātes ugunsgrēku izcelšanās iespēja agrāk pavasarī akcentē atbilstošas ugunsapsardzības infrastruktūras uzturēšanas un attīstības nepieciešamību.
3. Vēsturiskais meža ugunsgrēku režīms priežu audzēs Piejūras zemiņē Ziemeļkurzemē, kas ietekmējis šīs teritorijas sugu un biotopu izplatību, nevar tikt uzskatīts par dabisku meža ugunsgrēku režīmu hemiboreālajos priežu mežos būtiskās antropogēnā faktora ietekmes dēļ. Informāciju par vēsturisko ugunsgrēku režīmu var izmantot šīs teritorijas ilgtermiņa apsaimniekošanas plānošanā.

PATEICĪBAS

Autore pateicas darba vadītājam Ārim Jansonam par pētījuma ideju, kā arī sniegto atbalstu un padomiem promocijas darba izstrādes gaitā. Izsaku pateicību darba vadītājam Igoram Drobiševam (Igor Drobyshev) par sniegtajām zināšanām un prasmēm, rekonstrējot meža degšanas vēsturi, kā arī par pacietību un neatlaidību, sniedzot atbalstu datu analīzē un publikācijas rakstīšanā. Izsaku pateicību LVMI Silava kolēģiem un īpaši Unai Neimanei par sniegto morālo atbalstu un profesionālām diskusijām promocijas darba tapšanas gaitā. Izsaku pateicību Endijam Bāderam par tehnisko palīdzību, veidojot kartogrāfisko materiālu. Vēlos izteikt pateicību Robertam Matisonam un Didzim Elfertam par palīdzību datu statistiskajā apstrādē. Vēlos izteikt pateicību Jurim Katrevičam un Andim Adamovičam par palīdzību lauka darbos. Paldies, ģimenei par morālo atbalstu, īpaši pēc labojumu saņemšanas no rakstu recenzentiem.

Autore pateicas Dabas aizsardzības pārvaldes Kurzemes reģionālajai administrācijai par atļauju veikt pētījumu Slīteres Nacionālā parka teritorijā.

1. GENERAL DESCRIPTION

1.1. Relevance of the topic

Fire is an integral part of the natural disturbance regime in terrestrial ecosystems, altering the structure and composition of vegetation and affecting carbon emissions (Bowman et al., 2009). In Europe, over the second half of the twentieth century, climate change has been the key driver of the increase in fire activity (Seidl et al., 2011). The purpose of this doctoral thesis was to improve knowledge of fire role in hemiboreal forests as well as forest regeneration in post-fire areas. The results of such research could be used in decision making process in forest management and nature conservation planning and to improve National Forest Fire Surveillance System.

1.2. Research aim, objectives and thesis statements

The aim of our study was to assess climate and human effects on the historic forest fire regimes and to assess post-fire regeneration patterns of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.).

The specific objectives of the thesis were:

1. to assess the climate impact on the regional forest fire activity;
2. to describe the forest fire history of the coastal lowlands in north-western Latvia;
3. to compare the growth of planted Scots pine in post-fire and clear-cut areas;
4. to assess the effect of salvage logging on the post-fire natural regeneration.

Thesis statements:

1. large-scale weather systems have a significant influence on forest fire activity in the eastern Baltic Sea region;
2. in the post-fire areas, salvage logging has a significant effect on the pattern of natural regeneration of the Scots pine.

1.3. Scientific novelty of the study

In the thesis, for the first time, the influence of large-scale climate systems on forest fire activity in the Baltic countries has been assessed (Papers I and II). We provide the first annually resolved dendrochronological reconstruction of the forest fire history from the eastern Baltic Sea region, revealing the role of fire during the last 250 years in semi-natural Scots pine-dominated forests of the European hemiboreal forest zone (Paper III). The effects of salvage logging on natural regeneration have been assessed for the first time 23 years following the fire disturbance in forest types on peat soils (Paper V).

1.4. Approbation of the results

The doctoral thesis is based on five publications:

1. **Kitenberga M.**, Matisons R., Jansons A., Donis J. (2018) Teleconnection between the Atlantic sea surface temperature and forest fires in Latvia and Estonia. *Silva Fennica*, 52 (1), 1-8. <https://doi.org/10.14214/sf.7771>
2. Drobyshev I., **Kitenberga M.**, Ryzhkova N. (2019) Trends and patterns in annually burned forest areas and fire weather across the European boreal zone in the 20th and early 21st centuries. (manuscript)
3. **Kitenberga M.**, Drobyshev I., Elferts D., Matisons R., Adamovics A., Katrevics J., Niklasson M., Jansons A. (2019) A mixture of human and climatic effects shapes the 250-year long fire history of a semi-natural pine dominated landscape of Northern Latvia. *Forest Ecology and Management*, 441, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.020>
4. **Zadina M.**, Purina L., Pobiarzens A., Katrevics J., Jansons J., Jansons A. (2014) Height-growth dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in burned and clearcut areas hemiboreal forests, Latvia. In: *Proceedings of the Second International Congress of Silviculture. Designing the future of the forestry sector*, Florence, 443–447. <http://dx.doi.org/10.4129/2cis-mz-hei>
5. **Kitenberga M.**, Elferts D., Adamovics A., Katrevics J., Donis J., Baders E., Jansons A. (2019) Impact of salvage-logging on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) regeneration in post-fire areas in hemiboreal forests. (in review *New Forests*)

The results of study have been presented in five international conferences.

1.5. Structure of doctoral thesis

The doctoral thesis consists of five papers. In the first paper, the effects of large scale weather systems on the historic fire activity in Latvia and Estonia are analyzed. In the second paper, climate effects on forest fire activity in Baltic countries, Fennoscandia and Russian boreal forest regions are analyzed. In the third paper, climate and human effects on the forest fire history in pine-dominated forests in north-western Latvia was investigated. In the fourth paper, the influence of fire on the height growth of Scots pine was investigated. In the fifth paper, the influence on salvage logging on the abundance and mean height of natural regeneration of Scots pine was analyzed.

2. MATERIALS AND METHODS

For Paper I, the time series for the twentieth century for the area burned (AF) and the number of fires (NF) with annual resolution for Estonia and Latvia were obtained from Environment Agency of the Republic of Estonia and from Donis et al. (2018), respectively. The monthly sea surface temperature (SST) and annual Atlantic multi-decadal oscillation (AMO) data were obtained from the UK Met Office Hadley Centre observation datasets (Rayner et al., 2003; Trenberth & Shea, 2006). We used the Pearson correlation analysis to assess the relationships between the North Atlantic SST and the national fire chronologies. The analysis was conducted in the Climate Explorer (Trouet & Van Oldenborgh, 2013). The significance of the correlations was determined using a two-sided student t-test, accounting for the autocorrelation in the time series (Trouet & Van Oldenborgh, 2013). For each correlation map, the field significance was visualised, which described the strength of the correlation at the scale of the studied region (Wilks, 2006).

For Paper II, the time series for the twentieth century of AF for Fennoscandia, Lithuania, and Russia were obtained from the official forest fire statistics datasets and the Global Fire Emission Database (Giglio et al., 2013). The climate data, including the total monthly precipitation and the minimum and maximum monthly temperatures were obtained from CRU TS (v. 4.02; Harris et al., 2014). The principal component analysis and hierarchical clustering methods were used to identify the AF groups based on similarities and distance. The response function analysis was used to identify the best climatic predictors of the regional AF. The superimposed epoch analysis (SEA) was used to assess the relationship between the AF and 500 hPa pressure field using the Hadley Centre Sea Level Pressure dataset (Allan & Ansell, 2006).

For Paper III, the forest fire history was investigated within the inter-dune peatland complex of SNP in the north-western part of Latvia (57°68'–113 57°70' N, 22°46'–22°52' E). We inventoried an area of 2000 ha, which was burned in a fire in 1992. The studied pine stands grew on nutrient-poor, sandy dunes in *Cladinoso-callunosa* and *Vacciniosa* forests (Bušs, 1976). We collected full or partial cross sections of deadwood, following the procedure described by Arno and Sneek (1977) and McBride (1983). Out of 350 deadwood samples, we dated 287 trees (82%), including 44 deadwood samples with no fire scars. We used the scar position within the annual rings to assign the calendar year and, when possible, the fire season to each past fire. To reconstruct the spatial extent of the area burned, we used a regular spatial grid, which encompassed the whole study area. The grid cell was considered burned in a year, when at least one sample within the cell had a fire scar recorded the year in question. For whole period for which we reconstructed the spatial extent of the area burned, we calculated the fire cycle, which is a period (in years) needed to burn the area equal to the total study area (Van Wagner, 1978). The mean point-scale fire return interval (FRI)

is the mean number of years between two successive fire scars recorded by a single tree. We assessed the regime shifts in the fire cycle using a sequential t-test algorithm (Rodionov, 2004). We used the SEA to assess the relationships between fire activity in SNP and the SST dynamics in the subpolar North Atlantic. In the analysis, we correlated the fire data with the SST in the subpolar North Atlantic, averaged over the May-September period. The analysis was conducted using Climate Explorer (Trouet & Van Oldenborgh, 2013).

For Paper IV, to assess the influence of post-fire management on the natural regeneration of the Scots pine and other tree species, we placed sampling plots in the SNP area, which was burned in 1992. In total, we placed 220 and 340 sampling plots in salvage-logged and no-intervention areas, respectively. The effect of post-fire management treatment on natural regeneration was assessed in five different forest site types (Bušs, 1976): dry and poor *Cladinoso-callunosa*, dry and less poor *Vacciniosa*, wet and poor *Vaccinioso-sphagnosa*, poor-peat *Sphagnosa*, and medium fertility peat *Caricoso-phragmitosa*. In each sampling plot, the height of all regenerating tree species (height >30 cm) was measured. In the no-intervention treatment, we identified large live trees within a 10-m radius from the outer margin of the sampling plot. To assess the effect of post-fire management and other factors on the natural regeneration abundance, we employed a Poisson generalised linear mixed-effects model (GLMM). To assess the effect of post-fire treatment and other factors on the height values of the Scots pine, we used linear mixed-effect model (LME). We used a non-parametric analysis of variance-like analysis of similarities (ANOSIM) to compare the natural regeneration composition between post-fire treatments.

For Paper V, to assess the forest fire influence on the growth height of the Scots pine, we placed sampling plots in four post-fire areas, which have been salvage logged and regenerated artificially with the Scots pine. In Slitere, fire occurred in 1992 (*Vacciniosa* forest type). In Ugale, fire occurred in 2004 (*Vacciniosa mel.*), and in Jaunjelgava and Dalbe, fire occurred in 2006 (*Vacciniosa* and *Myrtillosa mel.*, respectively). In each sampling plot, the height of the Scots pine and other tree species was measured. The student's t-test was used to assess the significant differences between the burned and controlled areas.

For Papers I, II, III, IV, and V, all calculations were performed using R software (v. 3.5.0, R Core Team, 2018), using the package MASS (Venables & Ripley, 2002) for the GLMM, the package lme4 (Bates et al., 2015) for the LME, the package multcomp (Hothorn et al., 2008) for Tukey multiple comparisons, the package vegan (Oksanen et al., 2019) for ANOSIM, and the package NLME (Pinheiro et al., 2018) for the generalised least squares model. The R package treeclim (Zang & Biondi, 2015) was used for the response function analysis, and the package stats (R Development Core Team, 2018) was used for the principal component analysis.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. The national fire chronologies

The fire chronologies (1922/23–2014) of Latvia and Estonia suggest that correlation coefficients between AF are stronger ($r=0.74$) than between NF ($r=0.43$). In Latvia, NF and AF showed stronger correlations than in Estonia ($r=0.70$ and $r=0.38$, respectively). The mean synchrony coefficient between countries was 0.75, suggesting a common regional climatic force on the fire activity. The differences in fire chronologies might be related to the differences in topography and atmospheric circulation (Drobyshev et al., 2012). The low-frequency variation particularly in the AF of both countries roughly followed the trend in AMO.

Several significant correlations between the fire chronologies and SST were detected. The NF in Estonia was negatively correlated with the SST in the North Atlantic during spring and summer (May and August), and a positive correlation was observed with the summer SSTs in the North Sea and Baltic Sea. The AF in Estonia showed a positive correlation with spring SSTs in the mid-latitude Atlantic and summer SSTs along the Atlantic coast of Europe. Spring and summer SSTs in the Baltic Sea and the North Sea positively correlated with the NF and AF in Latvia. The observed significant correlation between fire activity and SSTs in the North Atlantic, North Sea, and Baltic Sea suggests a large-scale atmospheric circulation influence on fire activity. In the study performed by Drobyshev et al. (2016), a teleconnection between fire activity in North Sweden above the 60°N parallel and North Atlantic SSTs was detected. In our study, we observed a less pronounced pattern of correlations between North Atlantic SSTs and NF in Estonia, which might be related to the N-S gradient of large-scale atmospheric circulations (Drobyshev et al., 2016) and regional landscape specifics (Hellberg et al., 2004). The positive correlations between Baltic Sea SSTs and fire chronologies in both countries might be related to regional atmospheric-sea interactions (Stramska & Bialogrodzka, 2015). In summer in the Baltic Sea region the meridional circulation pattern prevails (Keevallik et al., 1999), which stimulates the establishment of dry and fire-prone weather conditions when combined with high-pressure systems (Jaagus et al., 2010; Kļaviņš & Rodinovs, 2010; Donis et al., 2017).

Five clusters were identified using the hierarchical clustering analysis, combining the geographically adjacent regions with similar forest fire activity. The cluster of the eastern Baltic Sea region includes the Baltic States, Belorussia, and the Russian region of Pskov. Within the cluster, Lithuania was the most distinguished from all other regions.

During the twentieth and early twenty-first centuries, the drought conditions characterised by the Monthly Drought Index (MDC) increased during the early spring period (April and May) in the Baltic Sea region (Fennoscandia, Baltic

States, and Belarus) and Russia (Republic of Karelia and the Murmansk region). The increase in MDC values was also observed at the end of summer (August and September) in Lithuania and Belarus. These observations of increase in the MDC also indicate an increase in fire hazard during the start and end of the fire season, suggesting a longer and possibly more intensive fire season. In addition, other studies during the second half of the twentieth century detected an increase in fire occurrences during the start of the fire season (March and April; Donis et al., 2017).

3.2. Forest fire history in the north-western Latvia

In SNP, the earliest fire scar was dated to 1558, but the latest was in 1992. For the whole study period (1558–1992), the mean point-scale FRI was 46 with a standard deviation of ± 33.5 years (Fig. 3.1.). We reconstructed the burned area and the fire cycle from 1750 to 2014, for which at least 30% of all grid cells were recorded.

Over the 1750–2000 period, we assessed the regime shifts separately for the forested area and the whole study area, using two different grid-cell sizes (500×500 m and 700×700 m). The shifts in the fire regime were identified in the 1950s, by both grids based on the forested area and the whole grid area. The earlier epoch (1750–2000) had a shorter fire cycle than the last epoch (1960–2000), 45–68 and 58–80 years, respectively (Fig. 3.1.). In the earlier epoch (1750–1950), higher fire activity likely was promoted by slash-and-burn agriculture, that was rather frequently practiced until middle of the nineteenth century (Dumpe, 1999; Strods, 1999).

The shift in the fire regime occurred in the middle of the twentieth century. During the second epoch (1950–2000) only a single large fire occurred in 1992. This pattern is a likely result of a drastic change in the land-use, employment, and agricultural systems in Latvia, which took place during the Soviet Union period (Hiden & Salmon, 2013). The western coastline zone of the Baltic Sea and a part of the SNP after the Second World War was allocated exclusively for military aims. Largely, coastal fishery was prohibited in this region; the exception was only for a few coastal villages. In parallel, the agricultural system was changed from private to collective farming, which led to the abandonment of many fields and meadows (Ržepicka & Ziemelniece, 2017). Consequently, the overall decline in economic activity likely decreased the occurrence human-related ignition.

A substantial proportion of early-season fires (65%) in the study area points to human influence on fire activity. Several inter-dune depressions, which are located nearby the study area, were used as meadows until the 1920s (Abaja, 2011). We assume that the higher fire frequency during the spring and early summer period might be a result of fires escaping from grassland burnings, which were a common soil fertility improvement method until the early twentieth

century (Gustiņa, 2016; Strods, 1999). The significance of human-related ignition during early-season fires is also supported by the lightning patterns in the area. In coastal regions, lightning activity in the spring and the first half of summer is low because the formation of thunderstorms is hindered by the weak upward moving airflows (Enno et al., 2013).

The SEA was operated with four large fire years: 1905, 1914, 1921, and 1992, in which the burned area was greater than 1 km². Fire activity in SNP was linked to SSTs in the North Atlantic, Baltic, and North Seas. The fires in the SNP were associated with positive SST anomalies in the Baltic Sea from May to July. Similar associations were also observed in the North Sea in May and July. The positive correlation between the fire activity and mean monthly SSTs of the Baltic and North Seas likely reflects the dependence of both processes on the presence of a high-pressure cell developing during the summertime and leading to the drying of the forest fuels and warming of the SSTs (Høyer & Karagali, 2016). Comparable results were obtained using the long-term official fire statistics data (Kitenberga et al., 2018).

3.3. Fire influence on Scots pine growth

In Dalbe (*Myrtillosa mel.* forest type) and Jaunjelgava (*Vacciniosa* forest type), at the age of 8 years, the mean height of the Scots pine was significantly ($p=.001$) higher in the clear-cut areas than in the post-fire areas. Nevertheless, during the last 3 years, the mean height differences between both treatments steadily increased. Between the treatments, in Jaunjelgava in the *Vacciniosa* forest type, the largest mean height differences were observed (36 cm). At the age of 10 years in Ugale for the *Vacciniosa mel.* forest type and at the age of 19 years in Slitere for the *Vacciniosa* forest type, no significant differences between the treatments were detected in the mean height of the Scots pine.

The ecological effects of fire on the forest ecosystem are affected by fire intensity (energy released from the combustion process in Wm⁻²) and severity (amount of fire-consumed organic matter; Keeley, 2012). Previous studies show that fire severity significantly affects soil conditions and the composition of natural regeneration (Dzwonko et al., 2015). We assume that the fire severity in Ugale and Slitere was lower than that in Dalbe and Jaunjelgava because, at the age of 10 and 19 years, the mean height differences were insignificant. In Dalbe and Jaunjelgava, however, the trend at the age of 8 years showed increased mean height differences.

The mean height of the Scots pine was more variable in all the post-fire areas compared to the clear-cut areas. Depending on the fire severity, the effect on natural regeneration and soils can be either positive or negative (Certini, 2005). In most cases, due to differences in terrain and fuel structure, fire severity varies across the burned area (Vacchiano et al., 2014; Dzwonko et al., 2015). We assume that the spatial heterogeneity of the fire severity could be the main reason

for the larger height differences in post-fire areas compared to that in clear-cut areas.

3.4. Forest management influence on post-fire regeneration patterns

In 1992, in the burned SNP area, the Scots pine and birch were the most common tree species, accounting for 70% to 100% of the total abundance of regenerating tree species. The post-fire regeneration abundance of the Scots pine was significantly affected by the forest site type, spatial covariate, and interactions between forest site type and treatment, which was assessed using the GLMM. The highest total post-fire regeneration abundance was observed in the salvage-logged *Sphagnosa* site (25.440 ha⁻¹), followed by the salvage-logged *Vaccinoso-sphagnosa* and *Caricoso-phragmitosa* sites with 21.222 ha⁻¹ and 17.360 ha⁻¹, respectively (Paper V, Table. 2). In the no-intervention areas, the Scots pine was the most abundant tree species on all forest site types, except *Caricoso-phragmitosa*, while in salvage-logged areas in *Cladinoso-callunosa*, *Vacciniosa*, and *Vaccinoso-sphagnosa* sites, suggesting that soil scarification and the removal of large trees favoured the establishment of other pioneer tree species, such as the birch. On poor-sandy and poor-peat soils, the Scots pine was the most common tree species, whereas birch more successfully regenerated on soils with a higher moisture content and fertility. The positive influence of higher moisture on the germination success and growth of birch trees has also been observed in other studies (Karlsson, 1996; Karlsson et al., 1998).

The ANOSIM analysis showed that tree species composition of natural regeneration significantly differed (stat. $R=0.16$, sig=0.001) between post-fire treatments on *Vaccinoso-sphagnosa* (stat. $R=0.13$, sig=0.001) and *Caricoso-phragmitosa* (stat. $R=0.29$, sig=0.006) sites. For the forest site types *Cladinoso-callunosa*, *Vacciniosa*, and *Sphagnosa*, the differences between treatments were insignificant.

The mean height of the Scots pine was significantly ($p < 0.05$) affected by the treatment, forest site type, number of remnant trees, presence of remnant pines, spatial covariate, and interactions between factors (site type* number of retained trees and site type* remnant pines). In all forest types in the salvage-logged areas, the mean height of the Scots pine was considerably higher than in no-intervention areas by 22% to 61%, suggesting that the removal of large live trees favoured height growth (Fig. 3.2.). Similarly, the height growth of the birch was promoted by salvage logging, yet the height differences between the treatments were not as high as for the Scots pine, highlighting that salvage logging especially favoured the growth of the Scots pine. Similar observations were reported by Parro et al., (2015), who also noted that salvage logging promoted the growth of the Scots pine and helped it become a dominant tree species earlier than in the no-intervention areas.

CONCLUSIONS

1. Over the last 250 years in the SNP, forest fires have been an important disturbance agent. We identified periods of high (1750–1950) and low (1960–2000) fire activity, with fire cycles being 45–68 and 58–80 years, respectively. The fire activity appeared to be intricately linked to the socio-political situation in Latvia and to the SST in the Baltic and North Seas.
2. Large scale weather systems affect fire activity in Latvia and Estonia as indicated by the significant positive associations between the area and number of forest fires and increased SSTs in the Baltic and North Seas during spring and summer. Over the 20th century, the forest fire danger has increased in the Baltic countries during April and May.
3. No evident long-term negative effect of fire on the growth of the Scots pine was detected. In the post-fire areas, the mean height of the artificially regenerated Scots pine had a higher coefficient of variation than in clear-cut areas, likely indicating the influence of spatial heterogeneity in fire severity.
4. In no-intervention areas in SNP, the Scots pine was the most abundant tree species in *Cladinoso-callunosa*, *Vacciniosa*, *Vaccinoso-sphagnosa*, and *Sphagnosa* forest types 23 years following the fire disturbance, while in salvage logged areas pine dominated only on poor sandy soils (*Cladinoso-callunosa*, *Vacciniosa*, *Vaccinoso-sphagnosa*), on peat soils (*Sphagnosa* and *Caricoso-phragmitosa*) dominated birch. Salvage logging significantly and positively affected the regeneration abundance of Scots pine in *Caricoso-phragmitosa* forest type only.
5. In post-fire areas, live remnant trees significantly and negatively affected the mean height of naturally regenerated Scots pine. In salvage logged areas, Scots pine had the greatest mean height of all tree species, and it was significantly greater in such areas as compared to no-intervention areas.

RECOMMENDATIONS

1. In order to enhance the growth of Scots pine in post-fire areas, removal of large live trees may be recommended.
2. Feasibility of higher intensity forest fires in spring period, highlight the necessity of maintenance and development of forest fire surveillance system.
3. The composition and successional pathways of the forest ecosystems in SNP most likely have been shaped by historic forest fire regime; however, the strong anthropogenic influence on the past fire regime suggests that the estimates of fire cycles cannot be regarded as a reference representing solely natural (human-free) forest fire activity. A knowledge of the SNP fire history can help to define the long-term goals of nature-based management guidelines in this area.

ACKNOWLEDGMENTS

First of all, I thank my supervisors Aris Jansons and Igor Drobyshev for their support, encouragement, guidance and patience through entire my doctoral studies period. They have shared their outstanding knowledge and expertise in research fundamentals, forest and fire ecology. I express my gratitude to all my LSFRI “Silava” collages, which have supported and me during my doctoral studies. I express my special gratitude to Una Neimane for the insight in silviculture fundamentals, interesting scientific discussions and proofreading of texts in Latvian language. My special thanks to Endijs Baders for his assistance with GIS analyses. I express my gratitude to Didzis Elferts and Roberts Matisons for their valuable help with data statistics, analysis and interpretation. I express my special gratitude to Juris Katrevics and Andis Adamovics who helped with data collection in Slitere National Park. I would like to thank my family for the moral support and encouragement.

I express special gratitude to the Nature Conservation Agency of Latvia for the permission to conduct a research study in Slitere National Park territory.

LITERATŪRAS SARAKSTS / REFERENCES

1. Allan R., Ansell T. (2006). A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850-2004. *Journal of Climate*, 19, 5816-5842.
2. Arno S.F., Sneek K.M. (1977). A method for determining fire history in coniferous forests of the Mountain West. USDA Forest Service General Technical Report INT-42, 1-28.
3. Bates D., Maechler M., Bolker B., Walker S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48. doi.org/10.18637/jss.v067.i01.
4. Bowman D. M. J. S., Blach J. K., Artaxo P., Bond W. J., Carlson J. M., Cochrane M. A. ... (2009). Fire in the Earth System. *Science*, 324, 481-484. doi.org/10.1126/science.1163886
5. Bušs K. (1976). Latvijas PSR meža tipoloģijas pamati. Rīga, 24 lpp.
6. Certini G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143(1), 1-10. https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8
7. Donis J., Kitenberga M., Snepsts G., Matisons R., Zarins J., Jansons A. (2017). The forest fire regime in Latvia during 1922-2014. *Silva Fennica*, 51(5), 1-15. doi.org/10.14214/sf.7746
8. Drobyshev I., Bergeron Y., de Vernal A., Moberg A., Ali A. A. (2016). Atlantic SSTs control regime shifts in forest fire activity of Northern Scandinavia. *Scientific Reports*, 6(22532), 1-13. https://doi.org/10.1038/srep22532
9. Drobyshev I., Niklasson M., Linderholm H. W. (2012). Forest fire activity in Sweden: Climatic controls and geographical patterns in 20th century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 154/155, 174-186. doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.11.002
10. Dumpe L. (1999). Mežu izmantošanas attīstība Latvijā. In: Strods, H. (Ed.), *Latvijas mežu vēsture*, Pasaules Dabas Fonds, 363 lpp.
11. Dzwonko Z., Loster S., Gawroński S. (2015). Impact of fire severity on soil properties and the development of tree and shrub species in a Scots pine moist forest site in southern Poland. *Forest Ecology and Management*, 342, 56-63. doi.org/10.1016/j.foreco.2015.01.013
12. Enno S.E., Briede A., Valiukas D. (2013). Climatology of thunderstorms in the Baltic countries, 1951-2000. *Theoretical and Applied Climatology*, 111, 309-325. doi.org/10.1007/s00704-012-0666-2
13. Gustiņa L. (2016). Zālāju apsaimniekošanas vēsture Latvijā. *Latvijas Veģetācija*, 25, 65-79.
14. Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34, 623-642.
15. Hiden J., Salmon P. (2013). THE BALTIC NATIONS AND EUROPE Estonia, Latvia and Lithuania in the Twentieth Century. 238 p.
16. Hothorn T., Bretz F., Westfall P. (2008). Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal*, 50(3), 346-363.
17. Jaagus J., Briede A., Rimkus E., Remm K. (2010). Precipitation pattern in the Baltic countries under the influence of large-scale atmospheric circulation and local. *The International Journal of Climatology*, 30, 705-720. doi.org/10.1002/joc.1929

18. Keeley J. E. (2012). Ecology and evolution of pine life histories. *Annals of Forest Science*, 69(4), 445–453. doi.org/10.1007/s13595-012-0201-8
19. Klavins M., Rodinov V. (2010). Influence of large-scale atmospheric circulation on climate in Latvia. *Boreal Environment Research*, 15, 533–543
20. Larsson L.A., (2013). *Cybis CooRecorder/CDendro*, version: 7.7. 2013-11-19. Available on the web at <http://www.cybis.se> (accessed 01 October 2017).
21. McBride J.R., (1983). Analysis of tree rings and fire scars to establish fire history. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 51–67.
22. Oksanen J., Blanchet G.F., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlenn D., Minchin P.R., O'Hara R.B., Simpson G.L., Solymos P., Stevens M.H.H., Szoecs E., Wagner H. (2019). *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.5-4. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
23. Parro K., Metslaid M., Renel G., Sims A., Stanturf J. A., Jögiste K., Köster K. (2015). Impact of postfire management on forest regeneration in a managed hemiboreal forest, Estonia. *Canadian Journal of Forest Research*, 45, 1192–1197. doi.org/10.1139/cjfr-2014-0514
24. Pinheiro J., Bates D., DebRoy S., Sarkar D., R Core Team (2019). *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models*. R package version 3.1-141, <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
25. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108, 2156–2202. doi.org/10.1029/2002JD002670
26. Rodionov S.N., 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters*, 31, 2–5. <https://doi.org/10.1029/2004GL019448>
27. Seidl R., Schelhaas M.-J., Lexer M. J. (2011). Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. *Global Change Biology*, 17, 2842–2852. doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x
28. Stramska M., Bialogrodzka J. (2015). ScienceDirect Spatial and temporal variability of sea surface temperature in the Baltic Sea based on 32-years. *Oceanologia*, 57, 223–235. doi.org/10.1016/j.oceano.2015.04.004
29. Strods H. (1999). Latvijas mežu politika un likumdošana (XI gs. – 1940. g.). In: Strods, H. (Ed.), *Latvijas mežu vēsture*. Pasaules Dabas Fonds, 363 lpp.
30. Trenberth K.E., Shea D.J. (2006). Atlantic hurricanes and natural variability in 2005. *Geophysical Research Letters*, 33: L12704. <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL026894>.
31. Trouet V., Van Oldenborgh G.J. (2013). KNMI Climate Explorer: A Web-Based Research Tool for High-Resolution paleoclimatology. *Tree-Ring Research*, 69, 3–13.
32. Van Wagner C.E. (1978). Age-class distribution and the forest fire cycle. *Canadian Journal of Forest Research*, 8, 220–227. doi.org/10.1139/x78-034
33. Venables W.N., Ripley B.D. (2002). *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York. 495 p.
34. Wilks D.S. (2006). On “field significance” and the false discovery rate. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45, 1181–1189. doi.org/10.1175/JAM2404.1.